

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Cultivo e qualidade pós-colheita de alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água ozonizada**

Francisco Horácio Siteo  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**FRANCISCO HORÁCIO SITEO**

**Cultivo e qualidade pós-colheita de alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água ozonizada**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Leda Rita Dantonino Faroni

Coorientadores: Marcus V. de A. Silva  
Fernando F. da Cunha  
Wellington S. Ribeiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S623c Siteo, Francisco Horácio, 1990-  
2025 Cultivo e qualidade pós-colheita de alface (*Lactuca sativa*  
L.) irrigada com água ozonizada / Francisco Horácio Siteo. –  
Viçosa, MG, 2025.  
1 dissertação eletrônica (75 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lêda Rita D'Antonino Faroni.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.  
Inclui bibliografia.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.743>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Alface - Irrigação - Efeito do ozônio. 2. Alface -  
Fisiologia pós-colheita. 3. Alface - Qualidade. I. Faroni, Lêda  
Rita D'Antonino, 1953-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 635.5287

**FRANCISCO HORÁCIO SITEO**

**Cultivo e qualidade pós-colheita de alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água ozonizada**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Francisco Horácio Siteo  
Autor

---

Leda Rita Dantonino Faroni  
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 06/11/2025 às 16:18:03 e pela orientadora em 06/11/2025 às 17:25:43. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **IQ2I.671M.GY4L** e clique no botão 'Validar documento'.

A Deus, meus familiares e  
aos meus amigos...  
companheiros de todas  
as horas....

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.  
(Albert Einstein)

## RESUMO

SITOE, Francisco Horácio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Cultivo e qualidade pós-colheita de alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água ozonizada**. Orientadora: Leda Rita Dantonino Faroni. Coorientadores: Marcus Vinicius de Assis Silva, Fernando Franca da Cunha e Wellington Souto Ribeiro.

A alface (*Lactuca sativa* L.) está entre as hortaliças mais produzidas e comercializadas no mundo. Contudo, a produção dessa hortaliça é constantemente afetada pela qualidade da água de irrigação, que pode favorecer o desenvolvimento de doenças e afetar a qualidade das folhas na fase de pós-colheita. O uso da água ozonizada na irrigação de plantas, pode ser considerada uma alternativa eficiente e sustentável para o aumento da produtividade e preservação de atributos físico-químicos. Este trabalho foi separado em dois capítulos: no primeiro determinou-se os efeitos da aplicação de água ozonizada na produção de mudas de alface e no segundo, a qualidade pós-colheita da alface, irrigada com água ozonizada durante o cultivo. Nos dois estudos foi utilizado água ozonizada e água da redistribuição para irrigação de plantas de alface cultivadas em vaso. Durante a fase de formação e desenvolvimento das mudas, foram analisadas as variáveis de germinação (porcentagem, velocidade, uniformidade, tempo médio e taxa média de germinação), o peso seco, a altura, o diâmetro das plantas e o número de folhas. Na fase de pós-colheita, avaliou-se a perda de massa fresca, sólidos solúveis totais, pH, acidez titulável, cor, clorofila foliar, extravasamento de eletrólitos, proteínas, enzimas e os parâmetros físico-químicos do solo de cultivo. Neste estudo, a irrigação de alface com água ozonizada na fase inicial, influenciou o desenvolvimento da parte aérea e radicular das plantas, resultando em maiores valores médios de altura total, de raiz, massa fresca e seca das mudas. Em plantas de alface irrigadas com água ozonizada e avaliadas na fase de pós-colheita, a presença de ozônio durante o cultivo não alterou a qualidade físico-química e influenciou de forma positiva a altura e o diâmetro das plantas.

Palavras-chave: ozônio; cultivo de alface; irrigação; armazenamento

## ABSTRACT

SITOE, Francisco Horácio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Cultivation and post-harvest quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) irrigated with ozonated water.** Adviser: Leda Rita Dantonino Faroni. Co-advisers: Marcus Vinicius de Assis Silva, Fernando Franca da Cunha and Wellington Souto Ribeiro.

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is among the most widely produced and marketed vegetables in the world. However, the production of this vegetable is constantly affected by the quality of irrigation water, which can favor the development of diseases and affect the quality of the leaves in the post-harvest phase. The use of ozonated water for plant irrigation can be considered an efficient and sustainable alternative for increasing productivity and preserving physical and chemical attributes. This study was divided into two chapters: the first determined the effects of applying ozonated water on the production of lettuce seedlings, and the second determined the post-harvest quality of lettuce irrigated with ozonated water during cultivation. In both studies, ozonated water and redistribution water were used to irrigate lettuce plants grown in pots. During the seedling formation and development phase, the following variables were analyzed: germination (percentage, speed, uniformity, average time, and average germination rate), dry weight, plant height and diameter, and number of leaves. In the post-harvest phase, the loss of fresh mass, total soluble solids, pH, titratable acidity, color, leaf chlorophyll, electrolyte leakage, proteins, enzymes, and the physical-chemical parameters of the cultivation soil were evaluated. In this study, irrigating lettuce with ozonated water in the initial phase influenced the development of the aerial and root parts of the plants, resulting in higher average values for total height and root, diameter, and fresh and dry mass of the seedlings. In lettuce plants irrigated with ozonated water and evaluated in the post-harvest phase, the presence of ozone during cultivation did not alter the physical-chemical quality and positively influenced the height and diameter of the plants.

Keywords: ozone; lettuce cultivation; irrigation; storage

## SUMÁRIO

Introdução Geral	10
Referências Bibliográficas	12
Capítulo 1: Efeitos da irrigação com água ozonizada sobre a produção e o desenvolvimento de mudas de alface	15
1.Introdução	16
2.Material e métodos	17
2.1. Obtenção de materiais e insumos para a produção de mudas	17
2.2. Preparo da água ozonizada	17
2.3. Processo de saturação do ozônio na água	18
2.4. Cinética de decomposição do ozônio na água	19
2.5. Análise de qualidade da água	20
2.6. Produção de mudas	21
2.7. Germinação e vigor de sementes	21
2.6.1. Desenvolvimento e fisiologia das mudas de alface	23
2.7. Análises estatísticas	23
3.Resultados	24
3.1. Saturação do ozônio na água	24
3.2. Cinética de decomposição do ozônio na água	25
3.3. Qualidade da água	26
3.4. Germinação e vigor das sementes de alface	27
3.5. Desenvolvimento inicial e fisiologia de mudas	28
4.Discussão	30
5.Conclusão	34
6.Referências Bibliográficas	35
Capítulo 2. Efeito da aplicação de água ozonizada no desenvolvimento e qualidade pós-colheita de alface	42

1.Introdução	43
2.Material e método	45
2.1. Produção de mudas de alface	45
2.2. Obtenção e preparo do solo e esterco	45
2.3. Produção de alface	47
2.4. Análises do desenvolvimento das mudas de alface	47
2.5. Colheita e análises de qualidade pós-colheita de alface	48
2.5.1. Perda de massa fresca	49
2.5.2. Análise instrumental da cor de alface	49
2.5.3. Determinação do teor de clorofila	50
2.5.4. Determinação do extravasamento de eletrólitos de alface	51
2.5.5. Análise de proteínas e enzimas antioxidativas	51
2.6. Análise do solo	52
2.7. Delineamento experimental e análise estatística	53
3.Resultados	53
3.1. Qualidade pós-colheita de alface	53
3.1.1. Altura, diâmetro e número de folhas de plantas de alface	53
3.1.2. Diâmetro, comprimento e massa de matéria seca da raiz	55
3.1.2. Sólidos solúveis totais, pH e Acidez titulável de alface	55
3.1.3. Cor	58
3.1.4. Clorofila e extravasamento de membrana	60
3.1.5. Perda de matéria fresca de alface	62
3.2. Enzimas	64
4.Discussão	66
5.Conclusão	73
6.Referências bibliográficas	74

## INTRODUÇÃO GERAL

A alface (*Lactuca sativa* L.) está entre as hortaliças mais consumidas e comercializadas no mundo (Guimarães *et al.*, 2019). A China, os Estados Unidos e a Espanha lideram o ranking dos principais países produtores dessa cultura (Birlanga *et al.*, 2021). O Brasil também se destaca como um grande produtor e consumidor. No ano de 2017, a produção de alface no país atingiu 671.509 toneladas (IBGE, 2017). A alface tem alto teor de água, baixo teor de calorias, é rica em vitaminas, minerais e compostos bioativos, que contribuem para uma dieta equilibrada (Kim *et al.*, 2016). O cultivo da alface é de interesse mundial e novas técnicas para obtenção de maiores produtividades e qualidade pós-colheita devem ser estudadas visando o aumento da rentabilidade econômica.

A produção da alface geralmente é feita em campo aberto, cultivo hidropônico ou em ambiente protegido (Thomas *et al.*, 2021). O cultivo em ambiente protegido, tem ganhado maior destaque na atualidade, por proteger a cultura contra o ataque de insetos-praga, doenças e fatores climáticos (Guimarães, 2019; Chen *et al.*, 2021). A produção e produtividade da alface é afetada por vários fatores, com destaque para a qualidade da água de irrigação e propriedades físico-químicas do solo (Sapkota *et al.*, 2019). A água serve como veículo para o transporte de macro e micronutrientes do solo para planta, além de constituir 95% da estrutura vegetal da alface (Lambers, 2019). As características físico-químicas desenvolvidas pela alface durante o seu cultivo determinam a aceitação do produto pelo mercado consumidor (Moraes *et al.*, 2021). A qualidade da água de irrigação e propriedades do solo são fatores determinantes para a qualidade da alface produzida (Abd-Elrahman *et al.*, 2022). A água pode ser afetada por fatores naturais e antrópicos (Amanullah *et al.*, 2020). Os fatores naturais que afetam a qualidade da água podem ser hidrológicos, atmosféricos, climáticos, litológicos, topográficos e antrópicos. Os fatores antrópicos estão ligados à atividade de pecuária, mineração, produção e disposição de resíduos sólidos (Uddin *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).

Atualmente, a disponibilidade e o acesso a água têm reduzido significativamente devido ao seu uso intensivo (Mancosu *et al.*, 2015). Uma das estratégias sustentáveis comumente adotadas para minimizar os impactos do déficit hídrico, tem sido o tratamento e reaproveitamento das águas residuárias (Rekhate; Srivastava, 2020). O tratamento das águas residuárias para irrigação das culturas agrícolas é usualmente feito por adsorção (bioadsorventes, sílica, alumina, carvão ativado, argila, óxidos metálicos e titânia) (Anjum *et al.*, 2019; Chai, 2021; Jjagwe, *et al.*, 2021). O uso contínuo deste tipo de tratamento causa

impactos negativos ao meio ambiente, a saúde pública e altera as propriedades físico-químicas do solo (Bedbabis *et al.*, 2014; Zahmatkesh *et al.*, 2022). Dentre os vários métodos de tratamento das águas que têm sido avaliados, o gás ozônio (O<sub>3</sub>) tem se destacado como uma alternativa ecologicamente correta para o tratamento da água (Li *et al.*, 2019; Hussain *et al.*, 2020; Bein *et al.*, 2021; Hafeez *et al.*, 2021; Tripath e Hassain, 2022).

O O<sub>3</sub> é um dos gases que compõem a atmosfera terrestre, com 90% situado na estratosfera e 10% na troposfera (Wang *et al.*, 2019). Na estratosfera, o ozônio é mais estável e atua absorvendo a radiação ultravioleta do Sol e protegendo a biosfera (Wang *et al.*, 2019). O O<sub>3</sub> também pode ser produzido sinteticamente por meio de descargas elétricas. A eficiência do ozônio no tratamento das águas residuárias já foi relatada em outras investigações científicas (Díaz-López *et al.*, 2022; Ruiz-Espin *et al.*, 2022; Prada-Vásquez *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024). No estudo conduzido por Martínez *et al.* (2011), o tratamento da água residuária com ozônio foi eficiente para inativar os coliformes fecais. Além disso, o tratamento manteve a qualidade da água dentro dos limites estabelecidos.

Para a utilização do O<sub>3</sub> no tratamento de água destinada a irrigação de culturas agrícolas, seu efeito sobre os parâmetros de qualidade da água, rendimento da cultura e propriedades do solo devem ser compreendidos. Por outro lado, presume-se que a irrigação de plantas de alface com água ozonizada tem efeito no desenvolvimento e na qualidade pós-colheita dessa cultura. Os objetivos do trabalho foram: (i) Determinar o efeito da aplicação de água ozonizada na produção de mudas da alface; (ii) Determinar o efeito da aplicação de água ozonizada no desenvolvimento e qualidade pós-colheita da alface.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-ELRAHMAN, S. H.; SAUDY, H. S.; EL-FATTAH, D. A. A.; HASHEM, F. A. E. Effect of irrigation water and organic fertilizer on reducing nitrate accumulation and boosting lettuce productivity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 2144-2155, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00799-8>.
- AMANULLAH; KHALID, S.; IMRAN; KHAN, H. A.; ARIF, M.; ALTAWAHA, A. R.; ADNAM, M.; FAHAD, S.; SHAH, A.; PARMAR, B. Effects of climate change on irrigation water quality. *In*: FAHAD, S.; SAUD, S.; NAWAZ, T.; GU, L.; ALMAD, M.; ZHOU, R. (Ed.). **Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth**. Springer, Cham, 2020, P. p. 123-132. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_6).
- ANJUM, M.; MIANDAD, R.; WAQAS, M.; GEHANY, F.; BARAKAT, M. A. Remediation of wastewater using various nanomaterials. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 8, p. 4897-4919, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.10.004>.
- BEDBABIS, S.; ROUINA, B. B.; BOUKHRIS, M.; FERRARA, G. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 45-50, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.007>.
- BEIN, E.; ZUCKER, I.; DREWES, J. E.; HUEBNER, U. Ozone membrane contactors for water and wastewater treatment: a critical review on materials selection, mass transfer and process design. **Chemical Engineering Journal**, v. 413, p. 127393, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127393>.
- BIRLANGA, V.; ACOSTA-MOTOS, J. R.; PÉREZ-PÉREZ, J. M. Genotype-dependent tipburn severity during lettuce hydroponic culture is associated with altered nutrient leaf content. **Agronomy**, v. 11, p. 616, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040616>.
- CHAI, W. S.; CHEUN, J. Y.; KUMAR, P. S.; MUBASHIR, M.; MAJEED, Z.; BANAT, F.; SHOW, P. L. A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, p. 126589, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126589>.
- CHEN, Z.; HAN, Y.; NING, K.; LUO, C.; SHENG, W.; WANG, S.; WANG, Q. Assessing the performance of different irrigation systems on lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the greenhouse. **PLoS One**, v. 14, n. 2, p. e0209329, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209329>.
- DÍAZ-LÓPEZ, M.; SILES, J. A.; ROS, C.; BASTIDA, F.; NICOLÁS, E. The effects of ozone treatments on the agro-physiological parameters of tomato plants and the soil microbial community. **Science of the Total Environment**, v. 812, p. 151429, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151429>.
- FLORES, P.; HERNANDEZ, V.; FENOLL, J.; HELLIN, P. Pre-harvest application of ozonated water on broccoli crops: Effect on head quality. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 83, p. 103260, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103260>.
- GUIMARÃES, C. M.; CUNHA, F. F. D.; SILVA, F. C. D. S.; ARAÚJO, E. D.; GUIMARÃES, A. B. F.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. J. H. D. Agronomic performance of lettuce cultivars submitted to different irrigation depths. **PLOS One**, v. 14, n. 12, p. e0224264, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224264>.

- HAFEEZ, A.; SHEZAD, N.; JAVED, F.; FAZAL, T.; UR REHMAN, M. S.; REHMAN, F. Developing multiplexed plasma micro-reactor for ozone intensification and wastewater treatment. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, v. 162, p. 108337, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108337>.
- HUSSAIN, M.; MAHTAB, M. S.; FAROOQI, I. H. The applications of ozone-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review. **Advances in Environmental Research**, v. 9, n. 3, p. 191-214, 2020. <https://doi.org/10.12989/aer.2020.9.3.191>.
- JJAGWE, J.; OLUPOT, P. W.; MENYA, E.; KALIBBALA, H. M. Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 6, n. 4, p. 292-322, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003>.
- KIM, M. J.; MOON, Y.; TOU, J. C.; MOU, B.; WATERLAND, N. L. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 49, p. 19-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>.
- LAMBERS, H.; OLIVEIRA, R. S. Plant water relations. In: **Plant Physiological Ecology**. Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1_5)
- LI, K.; XU, L.; ZHANG, Y.; CAO, A.; WANG, Y.; HUANG, H.; WANG, J. A novel electro-catalytic membrane contactor for improving the efficiency of ozone on wastewater treatment. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 249, p. 316-321, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.015>.
- MANCOSU, N.; SNYDER, R. L.; KYRIAKAKIS, G.; SPANO, D. Water scarcity and future challenges for food production. **Water**, v. 7, n. 3, p. 975-992, 2015. <https://doi.org/10.3390/w7030975>.
- MORAES, V. H.; GIONGO, P. R.; ALBERT, A. M.; TONDA TO ARANTES, B. H.; MESQUITA, M. Development of lettuce varieties in different organic wastes as substrate. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 74, n. 2, p. 9483-9489, 2021. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.85547>.
- MORIN-CRINI, N.; CRINI, G. (Dir.) **Eaux Industrielles Contaminées: Réglementation, Paramètres Chimiques et Biologiques & Procédés d'Épuration Innovants**. Presses universitaires de Franche-Comté, 2017. Disponível em: <https://books.openedition.org/pufc/10857>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- PRADA-VÁSQUEZ, M. A.; SIMARRO-GIMENO, C.; VIDAL-BARREIRO, I.; CARDONA-GALLO, S. A.; PITARCH, E.; HERNÁNDEZ, F.; TORRES-PALMA, R. A.; CHICA, A.; NAVARRO-LABOULAIS, J. Application of catalytic ozonation using Y zeolite in the elimination of pharmaceuticals in effluents from municipal wastewater treatment plants. **Science of the Total Environment**, v. 925, p. 1-13 (171625), 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171625>.
- RAKNESS, K.; GORDON, G.; LANGLAIS, B.; MASSCHELEIN, W.; MATSUMOTO, N.; RICHARD, Y.; SOMIYA, I. Guideline for measurement of ozone concentration in the process gas from an ozone generator. **Ozone: Science & Engineering**, v. 18, n. 3, p. 209-229, 1996. <https://doi.org/10.1080/01919519608547327>.

- REKHATE, C. V.; SRIVASTAVA, J. K. Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater-A review. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 3, p. 100031, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100031>.
- RUIZ-ESPIN, A.; GARCIA-CAPARROS, P.; LLANDERAL, A.; COLUNJE, J.; MOREIRA, J. F.; LAO, M. T. Physiological and nutritional responses to ozone application in tomato seedling plants. **Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 60, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010060>.
- SAPKOTA, S.; SAPKOTA, S.; LIU, Z. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. **Horticulturae**, v. 5, n. 4, p. 72-80, 2019. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>.
- SIQUEIRA, E. D. C.; GHEYI, H. R.; BELTRÃO, N. E. D. M.; SOARES, F. A.; BARROS, G.; CAVALCANTI, M. L. Crescimento do algodoeiro colorido sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, supl. 1, p. 263-267, 2005. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v9nsupp263-267>.
- THOMAS, T.; BIRADAR, M. S.; CHIMMAD, V. P.; JANAGOUDAR, B. S. Growth and physiology of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars under different growing systems. **Plant Physiol. Rep.** 26, p. 526–534, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00591-3>.
- TRIPATHI, S.; HUSSAIN, T. Water and wastewater treatment through ozone-based technologies. In: **Development in Wastewater Treatment Research and Processes Removal of Emerging Contaminants from Wastewater Through Bio-nanotechnology**, 2021. P. 172, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85583-9.00015-6>.
- UDDIN, M. G.; NASH, S.; OLBERT, A. I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, v. 122, p. 107218, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
- WAN, C.; HUANG, S.; LI, M.; ZHANG, L.; YUAN, Y.; ZHAO, X.; WU, C. Towards zero excess sludge discharge with built-in ozonation for wastewater biological treatment. **Science of the Total Environment**, v. 926, p. 1-12 (171798), 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171798>.
- ZAHMATKESH, S.; AMESHO, K. T.; SILLANPÄÄ, M. A critical review on diverse technologies for advanced wastewater treatment during SARS-CoV-2 pandemic: what do we know? **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 7, p. 100121, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100121>.
- ZHANG, Q.; QIAN, H.; XU, P.; HOU, K.; YANG, F. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 212, p. 111992, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111992>.

## **CAPÍTULO 1: EFEITOS DA IRRIGAÇÃO COM ÁGUA OZONIZADA SOBRE A PRODUÇÃO E O DESENVOLVIMENTO DE MUDAS DE ALFACE**

### **Resumo**

A fase de produção de mudas de alface (*Lactuca sativa* L.) é uma etapa muito importante durante o processo de cultivo. Para o estabelecimento bem-sucedido das mudas é necessário que as sementes utilizadas no cultivo apresentem germinação rápida e uniforme. O surgimento das novas leis ambientais para o uso de recursos hídricos, resultaram em mudanças nos processos operacionais de produção e o uso de água ozonizada na irrigação representa uma alternativa para substituição, ou complementação dos métodos tradicionais. Este trabalho teve como objetivo determinar os efeitos da irrigação com água ozonizada sobre a produção e o desenvolvimento de mudas de alface. O experimento foi conduzido seguindo um esquema fatorial 2x2 no D.I.C com 4 repetições. Foram avaliados a porcentagem final de germinação, o índice de velocidade de germinação, tempo para atingir 10, 50 e 90 % de germinação, a uniformidade de germinação, o tempo médio de germinação e a taxa média de germinação. Para análise do desenvolvimento inicial e fisiologia das mudas foi considerada a altura total, altura da parte aérea e altura da parte radicular. As análises foram realizadas em 20 mudas de cada variedade. A irrigação das mudas de alface com água ozonizada otimizou o processo de formação das plantas, resultando em um maior crescimento da parte aérea, raízes e um maior teor de matéria seca. Além disso, o ozônio não exerceu efeito significativo sobre os parâmetros microbiológicos, físicos e químicos da água.

**Palavras-chave:** *Lactuca sativa* L., ozônio, qualidade das mudas.

## 1. INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) está entre as espécies hortícolas mais consumidas e comercializadas no Brasil (Stamford et al., 2019). Entre 2016 e 2017, a produção brasileira foi estimada em 671.509 toneladas (IBGE, 2017). O cultivo pode ser feito durante todo o ano, dependendo do clima da região e da cultivar. A fase de produção de mudas de alface é uma etapa muito importante durante o processo de cultivo e pode ser feita em estufa, viveiro, sementeira e sistema hidropônico (Li et al., 2021), ambiente livre e ambientes controlados. Para o estabelecimento bem-sucedido das mudas é necessário que as sementes utilizadas no cultivo apresentem uma germinação rápida e uniforme.

Além disso, as sementes são fotoblásticas positivas e necessitam de luz para germinar e de temperaturas inferiores a 25 °C para completar o processo germinativo (Albornoz; Contreras, 2019). Neste caso, a iluminação no ambiente de produção de mudas também deve ser levada em consideração. Segundo Yan et al., (2019), mudas cultivadas em ambientes com iluminação inadequada tendem a desenvolver menor número de nós, menor área foliar e menor rendimento. Por outro lado, o substrato utilizado deve ter a capacidade de satisfazer as necessidades da planta (Watthier et al., 2017). A qualidade das mudas pode ser influenciada também pelo sistema de irrigação. A aplicação adequada da água contribui para redução do desperdício de água e lixiviação de nutrientes (Bezerra et al., 2019).

A qualidade das mudas tem influência no crescimento e produtividade da alface após o transplantio (Vetrano et al., 2020). São consideradas mudas de qualidade, aquelas livres de pragas, doenças e que apresentam crescimento uniforme no campo. Para assegurar a qualidade das mudas de alface é necessário a implementação de técnicas eficientes durante o cultivo. A legislação ambiental referente ao uso dos recursos hídricos apresenta-se cada vez mais rigorosa e tem provocado mudanças nos processos produtivos. Entre as mudanças destaca-se a utilização de águas de reuso na irrigação. No entanto, essa prática pode reduzir a qualidade da água e estimular a multiplicação de microrganismos (Machado, 2003). O uso de água ozonizada na irrigação de plantas representa uma alternativa para substituição, ou complementação dos métodos tradicionais. Isto porque, a ozonização é considerada uma tecnologia limpa e não deixa resíduos tóxicos no meio ambiente e nem nos produtos (Pandiselvam et al., 2022). O ozônio tem um alto potencial de oxidação, o que o torna eficiente no controle de patógenos além de promover um ambiente saudável para o crescimento das mudas (Wu et al., 2024).

A água ozonizada pode melhorar a absorção de nutrientes pelas raízes e garantir o equilíbrio de nutrientes (Graham et al., 2011). Estudos anteriores demonstram que a aplicação

de água ozonizada no substrato de cultivo pode eliminar a presença de nematoides (Saeedizadeh et al., 2019) e de conídios fúngicos (Ames et al., 2013), além de favorecer o desenvolvimento de mudas (Graham et al., 2011) e melhorar a qualidade pós-colheita de plantas adultas de hortaliças (Flores et al., 2019).

Alguns estudos já avaliaram os efeitos da água ozonizada na sanitização de alface em fase de pós-colheita, para desinfecção, conservação e aumento da vida útil (Singh et al., 2002; Selma et al., 2007; Ölmez; Akbas, 2009; Alexopoulos et al., 2013; Karaca; Velioglu, 2014; Kumar; Ravishankar, 2019; Sun et al., 2022; Silva et al., 2024), mas a aplicação de água ozonizada no solo de cultivo para irrigação de plantas de alface e seus efeitos sobre a produção e o desenvolvimento de mudas, ainda não foram investigados. Considerando a importância dessa hortaliça e a necessidade em se otimizar os sistemas de cultivos atuais, este estudo buscou determinar os efeitos da aplicação de água ozonizada no desenvolvimento de mudas de alface.

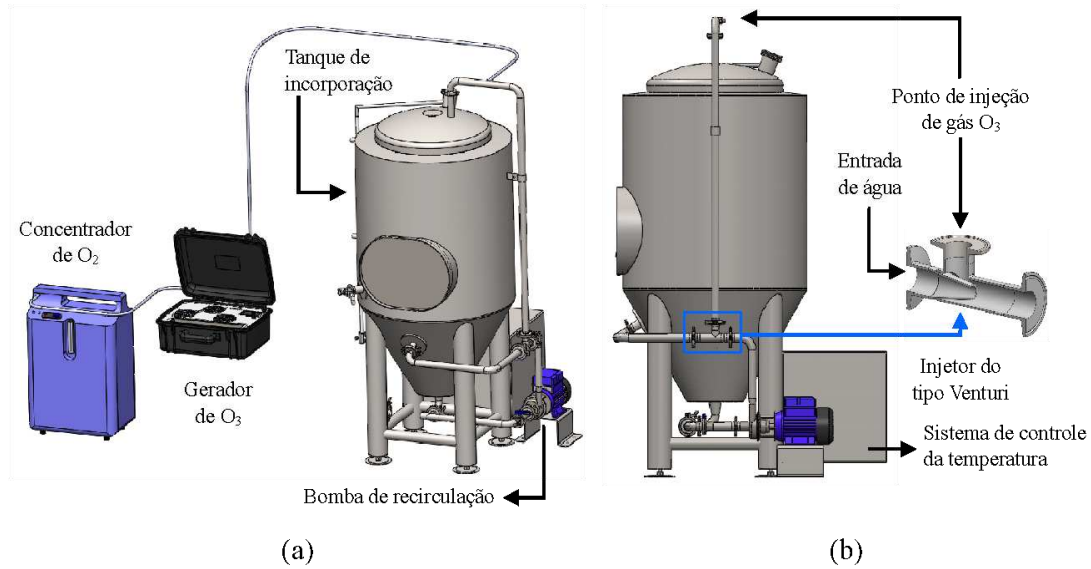
## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Obtenção de materiais e insumos para a produção de mudas**

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação localizada na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Foram utilizadas sementes de alface do grupo lisa (Regina 225, 90 % de germinação) e sementes do grupo cressa (Grand Rapids TBR, 98 % de germinação), da safra de 2021. As sementes foram semeadas em substrato FERTMAX (Fertnobre, Alvinópolis, Minas Gerais, Brasil).

### **2.2. Preparação da água ozonizada**

O O<sub>3</sub> foi obtido por meio de um gerador de ozônio modelo M10 (myOZONE, Jaguariúna, São Paulo, Brasil) com capacidade produtiva de 10 g h<sup>-1</sup>, que era alimentado com oxigênio (93% de pureza) a uma vazão volumétrica de 2 L min<sup>-1</sup>, proveniente de um concentrador de oxigênio modelo EverFlo (Philips Respironics, Murrysville, Pensilvânia, EUA). A vazão volumétrica do oxigênio foi mensurada por um medidor de vazão modelo MF5700® (Siargo Ltd, Chengdu, Sichuan, China). O ozônio foi incorporado na água por meio de um injetor do tipo venturi. Para promover a mistura e incorporação do gás ozônio na água, foi utilizado um tanque jaquetado que permitia a manutenção da temperatura da água em 14 °C durante o processo de incorporação. Para promover a recirculação da água foi utilizado uma bomba modelo ICS – 50AB (Eletroplas, Machados, Santa Catarina, Brasil) que possibilitava a recirculação da água a uma vazão volumétrica de 1,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Apresenta-se na Figura 1 o sistema de ozonização da água utilizada na irrigação da cultura da alface.



**Figura 1.** Vista em perspectiva do sistema geração e de incorporação do gás ozônio na água. Vista lateral do tanque de incorporação de ozônio (a) e detalhe do ponto de injeção do gás e o injetor do tipo venturi (b).

### 2.3. Processo de saturação do ozônio na água

A saturação do ozônio na água foi realizada por meio da determinação da concentração do ozônio na água em intervalos periódicos, pelo método iodométrico (Rakness *et al.*, 1996). O monitoramento da concentração de ozônio na água foi interrompido quando a concentração se manteve constante em três medições consecutivas em intervalos de 30 minutos. A equação sigmoideal de três parâmetros (Equação 1) foi utilizada para o ajuste dos dados de concentração de ozônio durante o processo de saturação da água. No entanto, os modelos da saturação do ozônio na água, baseados na equação sigmoideal de três parâmetros, foram ajustados aos dados experimentais (Equação 1). O tempo de saturação foi determinado pela Equação 2 (Oliveira *et al.*, 2020).

$$C = \frac{a}{(1 + e^{-\frac{t-b}{c}})} \quad \text{Equação 1}$$

$$t_{sat} = b + 2c \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

C - é a Concentração do ozônio dissolvido na água (mg L<sup>-1</sup>);

t - é o tempo em minutos;

a, b, c - são constantes;

$t_{\text{sat}}$  - é o tempo de saturação em horas.

#### 2.4. Cinética da reação do ozônio na água

A determinação da cinética de reação do ozônio na água realizou-se através da determinação da constante da taxa de decomposição ( $k$ ) e do tempo de meia vida do ozônio na água. Após atingir o estado de saturação, interrompeu-se a injeção do ozônio na água e procedeu-se a determinação da concentração do ozônio dissolvido na água, em intervalos regulares de tempo pelo método iodométrico (Rakness *et al.*, 1996). Na Tabela 1 são apresentados os modelos cinéticos de ordem zero, primeira e segunda ordem, ajustadas aos dados apresentados da concentração de ozônio na água (Wright, 2004).

Foi considerado melhor modelo de decomposição de ozônio na água o que apresentou maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Após a definição do modelo de cinética de reação de ozônio, procedeu-se o cálculo do tempo de meia vida ( $t_{1/2}$ ).

**Tabela 1.** Modelos de cinética de reação e respectivas equações linearizadas para determinação da taxa de decomposição do ozônio e meias-vidas.

Ordem	Equações diferenciais	Equação integrada e linearizada	Tempo de meia-vida (min)
0	$\frac{dC}{dt} = -k$	$C = C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$
1	$\frac{dC}{dt} = -kC$	$\ln C = C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$
2	$\frac{dC}{dt} = -kC^2$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt$	$t_{1/2} = \frac{1}{kC_0}$

C – Concentração residual do ozônio na água ( $\text{mg L}^{-1}$ ); k – Constante da taxa de decomposição ( $\text{min}^{-1}$ ); t – tempo (min); e  $C_0$  – Concentração inicial de ozônio ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

Fonte: Wright (2004).

#### 2.5. Análise de qualidade da água

As análises das características físicas, químicas e microbiológicas da água tratada com ozônio e água não tratada foram realizadas na Analag Consultoria e Serviços Ltda. Na Tabela

2, são apresentados os parâmetros físico, químico e microbiológico realizados e os respectivos métodos de determinação.

**Tabela 2.** Características físicas, químicas e microbiológicas da água tratada com ozônio e água não tratada.

PARÂMETROS	METODOLOGIA
Coliformes Totais (NMP/100mL)	SMEWW 9223
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	SMEWW 9223
Cloretos (mg/L)	SMEWW 4500-CI- B
Cor Aparente (uH)	POP 508
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)	SMEWW 5210 B
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	SMEWW 5220 D
Dureza Total (mg/L)	SMEWW 2340 C
Nitrato (mg N-NO <sub>3</sub> /L)	WAH 8171
pH	SMEWW 4500-H+ B
Sulfato (mg/L)	SMEWW 4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Turbidez (UNT)	SMEWW 2130 B
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	SMEWW 2540 C
Ferro Total (mg/L)	SMEWW 3030E/3111B
Mangans Total (mg/L)	SMEWW 3030E/3111B

## 2.6. Produção de mudas

A produção de mudas foi feita em bandejas de 128 células e conduzida em dois ciclos. Metade de cada bandeja foi destinada a semeadura de alface do grupo crespa e a outra metade para alface do grupo lisa. O experimento foi conduzido em quatro repetições, totalizando 8 bandejas por ciclo. As bandejas foram preenchidas e pesadas para determinar a massa do substrato. Em cada célula foram colocadas três sementes, a uma profundidade de 0,5 centímetros. Após a semeadura, procedeu-se a irrigação das bandejas com água convencional

(não tratada) e água ozonizada, com uma concentração de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{O}_3$ . Em seguida, as bandejas foram cobertas com uma lona preta até o início da germinação.

Após 12 horas sem a incidência de radiação solar, toda a água em excesso foi drenada e procedeu-se a pesagem das bandejas para determinar a sua capacidade de campo. A irrigação foi feita diariamente, seguido pela pesagem das bandejas e reposição da água até atingir a capacidade de campo. Para assegurar que todas as células recebessem a quantidade necessária de água, o manejo da irrigação foi feito considerando a reposição de um volume de água 20% superior à quantidade de água necessária para que o substrato atingisse a capacidade de campo. Após a irrigação, foi registrado a temperatura e umidade relativa no interior da casa de vegetação. Aos 10, 15 e 20 dias, realizou-se aplicação da solução de arranque (NPK – 10,10,10) no substrato. A colheita das mudas ocorreu aos 25 dias após o plantio.

## **2.7. Germinação e vigor de sementes**

Para a análise de germinação e vigor, foram avaliados a porcentagem final de germinação (PFG), índice de velocidade de germinação (IVG), tempo para atingir 10%, 50% e 90% de germinação (T10, T50 e T90), uniformidade de germinação (UnifG), tempo médio de germinação (TMG) e taxa média de germinação (TaMG). Apresenta-se na Tabela 3 as Equações utilizadas para o cálculo dos índices de germinação.

**Tabela 3.** Equações para o cálculo de Porcentagem Final de Germinação (PFG), Índice de Velocidade de Germinação (IVG), tempo para atingir 10%, 50% e 90% de germinação (T10, T50 e T90), Uniformidade de germinação (UnifG), Tempo Médio de Germinação (TMG) e Taxa Média de Germinação (TaMG).

Função	Descrição	Fórmula	Referência
PFG	Porcentagem final de germinação	$PFG = \left(\frac{n}{N}\right) \times 100$ <p><math>n</math> é o número de sementes germinadas, e <math>N</math> é número total de sementes.</p>	(ISTA, 2015)
IVG	Índice de velocidade de germinação	$IVG = \sum_{i=1}^K (n_i/t_i)$ <p><math>n_i</math> é o número de sementes germinadas em cada dia de contagem diária até a última contagem, e <math>t_i</math> é o número de dias após o início do teste em cada contagem.</p>	(Maguire, 1962)
T10	Tempo necessário para germinação de 10% das sementes	$T_{10} = t_i + \frac{\left\{ \left\lfloor \frac{N}{\left(\frac{100}{10}\right)} \right\rfloor - n_i \right\} (t_f - t_i)}{(n_f - n_i)}$ <p><math>N</math> é o número final de sementes germinadas, e <math>n_i</math> e <math>n_f</math> são o número total de sementes germinadas em contagens adjacentes no tempo inicial (<math>t_i</math>) e final (<math>t_f</math>) respectivamente, quando</p> $n_i < \frac{N+1}{2} < n_f.$	(Farooq <i>et al.</i> , 2005)
T50	Tempo necessário para germinação de 50% das sementes	$T_{50} = t_i + \frac{\left\{ \left\lfloor \frac{N}{\left(\frac{100}{50}\right)} \right\rfloor - n_i \right\} (t_f - t_i)}{(n_f - n_i)}$ <p>Mesma codificação de T10.</p>	(Farooq <i>et al.</i> , 2005)
T90	Tempo necessário para germinação de 90% das sementes	$T_{90} = t_i + \frac{\left\{ \left\lfloor \frac{N}{\left(\frac{100}{90}\right)} \right\rfloor - n_i \right\} (t_f - t_i)}{(n_f - n_i)}$ <p>Mesma codificação de T10</p>	(Farooq <i>et al.</i> , 2005)
TMG	Tempo médio de germinação	$TMG = \frac{\sum_{ni}^k ni \, ti}{\sum_{ni}^k ni}$ <p><math>n_i</math> é o número de sementes germinadas por dia (não o número acumulado, mas o número correspondente à <math>i</math>-ésima observação), e <math>t_i</math> é o tempo desde o início do teste de germinação até a <math>i</math>-ésima observação.</p>	(Cruz <i>et al.</i> , 2001)
TaMG	Taxa média de germinação	$\bar{v} = \frac{CoVg}{100} = 100/\bar{t}$ <p><math>\bar{t}</math> é o tempo médio de germinação e <math>CoVg</math> é o coeficiente de velocidade de germinação.</p>	(Cruz <i>et al.</i> , 2001)
UnifG	Uniformidade de germinação	$UnifG = (T90 - T10)$ <p><math>T90</math> é o tempo necessário para a germinação de 90% das sementes, e <math>T10</math> é o tempo necessário para germinação de 10% das sementes.</p>	(Demilly <i>et al.</i> , 2014)

---

Fonte: Silva *et al.*, (2019, p. 252-253).

### 2.6.1. Desenvolvimento e fisiologia das mudas de alface

O desenvolvimento inicial e fisiologia das mudas de alface foram avaliados aos 25 dias do plantio, excluindo-se as mudas localizadas nas bordas das bandejas para efeitos de análise. A altura total das mudas e a altura da parte aérea foram medidas em 20 mudas de cada variedade e de cada bandeja. Para medição da raiz, foi considerada a distância desde a superfície do solo até à raiz mais longa. Para determinar a massa fresca e seca, as mudas foram pesadas em balança digital semi analítica com precisão de  $1 \times 10^{-2}$  (modelo BK 8000, Gehaka, São Paulo, Brasil). Em seguida, as mudas foram embaladas e secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado novamente para determinação do peso seco e a massa de matéria seca foi calculada pela relação entre o peso seco e o peso fresco das amostras, conforme a Equação 9.

$$\text{Matéria seca \%} = \frac{Ps}{Pf} * 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

Ps: peso seco das mudas;

Pf: peso fresco das mudas.

### 2.7. Análises estatísticas

Para o estudo da cinética de reação do gás ozônio na água, os dados de concentração residual de ozônio em função do tempo foram submetidos à análise de regressão. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão pelo teste *t* a um nível de probabilidade de 1%, pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o fenômeno biológico em estudo. Para investigar o desenvolvimento das mudas de alface submetidas a irrigação com água ozonizada, o experimento foi montado em esquema fatorial 2 x 2, tendo duas formas de irrigação (água e água ozonizada) e duas variedades de alface (lisa e crespa) no delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições. Os dados foram submetidos a análise variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas, pelo teste Tukey, ambos ao nível de 5 % de probabilidade. Independentemente da interação ser ou não significativa, optou pelo desdobramento da mesma, devido ao interesse de estudo. Para a confecção dos gráficos e

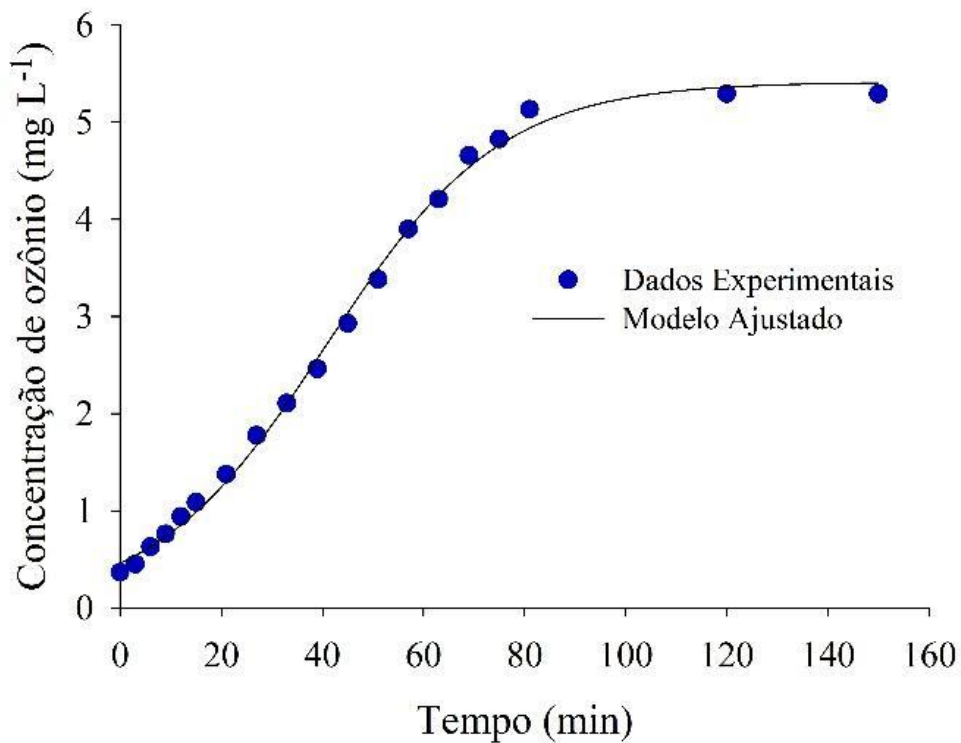
análise de regressão foi utilizado o software SigmaPlot versão 12.0 (Systat Software Inc., Erkrath, Alemanha). As análises estatísticas referentes aos parâmetros de desenvolvimento das mudas de alface foram feitas utilizando o Software SAS (SAS Institute, 2002).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Saturação do ozônio na água

Apresenta-se na Figura 2, a curva de saturação do ozônio na água em função do tempo de exposição, com a concentração de entrada de  $40 \text{ mg L}^{-1}$ . A temperatura da água adotada no estudo foi de  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , pH em torno de 6,5 e condutividade elétrica em torno de 115. Entretanto, observou-se uma tendência crescente da concentração do ozônio na água até atingir a concentração de saturação ( $5,29 \text{ mg L}^{-1}$ ) em 78 minutos. Na Tabela 4, apresenta-se a equação de regressão ajustada, o respectivo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão da estimativa (EPE) da concentração do ozônio na água em função do tempo.

**Figura 2.** Modelo cinético ajustado da primeira ordem para a saturação de ozônio na água em função do tempo a  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Tabela 4.** Equação de regressão, respectivo coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa da concentração residual de ozônio dissolvido na água em função do tempo, para a concentração de entrada de 40,0 mg L<sup>-1</sup> a 14 °C.

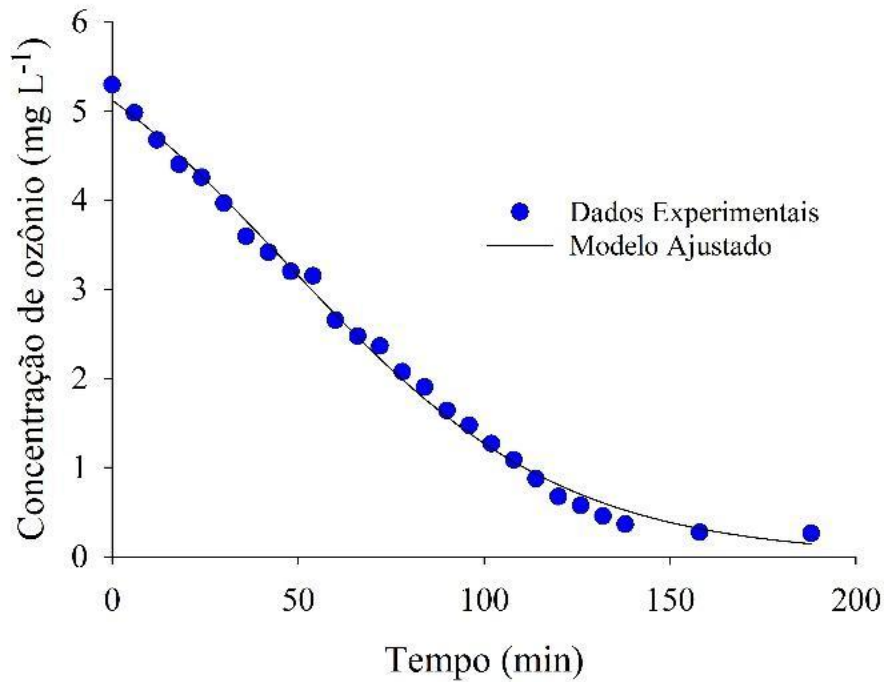
T (°C)	E. Ajus	R <sup>2</sup>	EPE	t <sub>sat</sub> (min)	C <sub>sat</sub> (mg L <sup>-1</sup> )
14	$\hat{C} = \frac{5,41^{**}}{1 + e^{-0,0622(t-29,64)}}$	0,99	0,1211	78	5,29

$\hat{C}$  – Concentração estimada de ozônio na água (mg L<sup>-1</sup>); t – tempo (min); R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação; EPE – Erro padrão da estimativa; t<sub>sat</sub> – tempo de saturação (min); C<sub>sat</sub> – concentração de saturação (mg L<sup>-1</sup>); E. ajus – equação ajustada.

### 3.2. Cinética da reação do ozônio na água

Apresenta-se na Figura 3, a curva de decaimento da concentração de ozônio na água em função do tempo para a temperatura de 14 °C. Houve uma tendência decrescente da concentração do ozônio na água ao longo do tempo. Entretanto, o tempo necessário para o decaimento completo do ozônio na água foi de 186 minutos. Na Tabela 5, apresentam-se as equações dos modelos de ordem zero, primeira e segunda ordem e os respectivos coeficientes de determinação em função do tempo. O modelo cinético que melhor representa o decaimento da concentração de ozônio na água é da primeira ordem, por apresentar o maior coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) em relação aos demais modelos.

**Figura 3.** Modelo cinético ajustado da primeira ordem para o decaimento de ozônio residual na água em função do tempo a 14 °C.



**Tabela 5.** Equações de regressão ajustadas para a decomposição do ozônio em água em função do tempo, os respectivos coeficientes de determinação e erro padrão da estimativa (EPE), para a concentração de entrada de 40,0 mg L<sup>-1</sup>.

Temperatura (°C)	Ordem	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	EPE
14	0	$C = 4,20 - 0,031^{**}t$	0,84	0,6345
	1	$\ln C = \ln(5,65) - 0,019^{**}t$	0,98	0,205
	2	$1/C = (1/6,06) + 0,006^{**}t$	0,95	0,533

\*\* Significant at 1% probability by the t-test.  $\hat{C}$  – Concentração estimada de ozônio na água (mg L<sup>-1</sup>); t – tempo (min); R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação; EPE – Erro padrão da estimativa;  $t_{sat}$  – tempo de saturação (min);  $C_{sat}$  – concentração de saturação (mg L<sup>-1</sup>); k – Constante da taxa de decomposição (min<sup>-1</sup>);  $C_0$  – Concentração inicial de ozônio (mg L<sup>-1</sup>).

### 3.3. Qualidade da água

Apresentam-se na Tabela 6, as características microbiológicas da água tratada com ozônio e água não tratada para a irrigação de mudas de alface. Não houve efeito significativo

( $p > 0,05$ ) dos tratamentos nas características microbiológicas da água. A presença de coliformes totais e de *Eschirechia coli*. esteve abaixo do limite de detecção recomendado. Para a *Eschirechia coli*, os órgãos nacionais e internacionais (Embrapa, Anvisa e FAO), recomendam  $< 200\text{NMP}/100\text{mL}$  para a irrigação de hortaliças. Para os Coliformes totais, não há um limite de detecção estabelecido.

**Tabela 6.** Características microbiológicas da água tratada com ozônio e água não tratada.

Parâmetros	Tratamento	Ensaio microbiológicos		
		Controle	L. inferior	L. superior
Coliformes totais (NMP/100mL)		$<1,0$	NA	NA
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	Controle	$<1,0$	NA	$<200\text{NMP}/100\text{mL}$
Coliformes totais (NMP/100mL)		$<1,0$	NA	NA
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	Ozônio	$<1,0$	NA	$<200\text{NMP}/100\text{mL}$

NA – Não se aplica; NMP – Número Mais Provável.

Os resultados das características físicas e químicas da água tratada com ozônio e água não trada são apresentados na Tabela 7. Não foram observados efeitos significativos ( $p > 0,05$ ) dos tratamentos na cor aparente, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, sulfatos totais, ferro total, manganês total, dureza total, nitratos, pH e turbidez da água. Entretanto, os valores médios da cor aparente, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, sulfatos totais, ferro total e manganês total, estão abaixo do limite mínimo de quantificação do método usado. Observou-se efeito significativo ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos no teor de cloretos e sólidos dissolvidos totais. Os valores médios de cloretos e sólidos dissolvidos totais na água foram superiores na água com ozônio dissolvido.

**Tabela 7.** Análise de características físicas e químicas da água tratada com ozônio e água não tratada.

Tratamento	Cor aparente	DBO	DQO	Sulfatos	Ferro total	Manganês total
Controle	<10	<5	<20	<9	<0,08	<0,06
Ozônio	<10	<5	<20	<9	<0,08	<0,06

Tratamento	Cloretos	Dureza total	Nitratos	pH	Turbidez	Sólidos dissolvidos totais
Controle	23,70 b	28,60 a	0,73 a	7,01 a	0,42 a	85,66 b
Ozônio	24,20 a	28,05 a	0,73 a	7,06 a	0,42 a	90,31 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “F” para cada característica. DBO – demanda bioquímica de oxigênio; DQO – demanda química de oxigênio e SDT – Sólidos Dissolvidos Totais.

### 3.4. Germinação e vigor das sementes de alface

Apresentam-se nas Tabelas 8, 9 e 10 os valores médios de germinação e vigor das sementes de alface lisa e crespa. Não foram observados efeitos significativos ( $p > 0,05$ ) na porcentagem final de germinação (PFG), no índice de velocidade de germinação (IVG), nem no tempo necessário para atingir 10% (T10) e 50% de germinação nas duas variedades avaliadas. Contudo, observou-se efeito significativo da variedade apenas para o PFG da alface irrigada com água não tratada.

**Tabela 8.** Valores médios de PFG, IVG, T<sub>10</sub>, T<sub>50</sub>, T<sub>90</sub>, TMG, TaMG e UnifG de mudas da alface irrigada com água e água ozonizada (5 mg L<sup>-1</sup>).

Tratamento	PFG (%)		IVG (%)		T <sub>10</sub> (Dias)		T <sub>50</sub> (Dias)	
	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa
Água	93,81aA	82,55aB	37,51aA	34,22aA	3,14 aA	2,98bA	3,96 aA	4,35 aA
Água + O <sub>3</sub>	86,97 aA	79,62 aA	33,45bA	30,81aA	3,21 aA	3,24 aA	4,57 aA	4,93 aA

	T <sub>90</sub> (Dias)		TMG (Dias)		TaMG		UnifG	
	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa
Água	9,24 aA	8,17 aA	5.05 aA	4.97 aA	19,85aA	20,12aA	6,09aA	5,18 aA
Água + O <sub>3</sub>	7,24 aA	6,35 aA	5.32 aA	5.27 aA	18,78aA	18,97aA	4,03 aA	3,11 aA

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. PFG - Porcentagem final de germinação, IVG - índice de velocidade de germinação,  $T_{10}$  - tempo necessário para germinação de 10%,  $T_{50}$  - tempo necessário para germinação de 50%,  $T_{90}$  - tempo necessário para germinação de 90%, TMG – tempo médio de germinação, TaMG – taxa média de germinação e UnifG – uniformidade de germinação.

### 3.5. Desenvolvimento inicial e fisiologia de mudas

Os valores médios da altura total, altura da raiz, altura da parte aérea, número de folhas, peso fresco da raiz (PFR), do peso fresco da parte aérea (PFPA), da matéria seca da raiz (MSR), da matéria seca da parte aérea (MSPA), peso seco da raiz (PSR), peso seco da parte aérea (PSPA) e matéria seca da parte aérea (MSPA) das mudas da alface lisa e crespa são apresentados na Tabela 10. Observou-se efeito significativo ( $p < 0,05$ ) do tratamento sobre a altura total (Ht), a altura da raiz (Hr), o peso fresco da raiz, a matéria seca da raiz e da parte aérea, o PSR, o PSPA e a MSPA para as variedades lisa e crespa. para as variedades lisa e crespa irrigadas com água ozonizada. Os valores médios de altura total e da altura da raiz das mudas de alface lisa e crespa foram superiores quando a irrigação foi realizada com água ozonizada. Entretanto, não foram observados efeitos significativos ( $p > 0,05$ ) sobre o número de folhas para as variedades em estudo. Por outro lado, não foi observado efeito significativo ( $p > 0,05$ ) sobre o número de folhas das mudas de alface, em relação aos tratamentos, tanto para a variedade lisa e crespa.

Os valores médios do PFR, da MSR, da MSPA, PSR, o PSPA e a MSPA das variedades lisa e crespa das mudas de alface foram superiores quando as mudas foram irrigadas com água ozonizada. Entretanto, não se verificou efeito significativo ( $p > 0,05$ ) sobre a matéria fresca da parte aérea das duas variedades em estudo.

A variedade da alface apresentou efeito significativo ( $p < 0,05$ ) sobre a altura da raiz, a altura da parte aérea e o número de folhas nas mudas irrigadas com água não tratada. Já nas mudas irrigadas com água ozonizada, o efeito significativo ( $p < 0,05$ ) foi observado apenas na altura da parte aérea e no número de folhas, em ambas variedades.

Nas mudas irrigadas com água não tratada, verificou-se efeito significativo da variedade ( $p < 0,05$ ) sobre o PFR, PFPA e MRS, tanto na alface lisa quanto na crespa. Já nas mudas irrigadas com água ozonizada, o efeito significativo ( $p < 0,05$ ) restringiu-se ao PFR e ao PFPA

em ambas variedades. Além disso, a variedade de alface também influenciou de forma significativa ( $p < 0,05$ ) o PSR, PSPA e MSPA das mudas irrigadas com água não tratada, enquanto nas mudas irrigadas com água ozonizada, o efeito significativo da variedade ( $p < 0,05$ ) limitou-se ao PSR e ao PSPA.

**Tabela 11.** Valores médios do comprimento da raiz (HR), altura da parte aérea (HPA), número de folhas (Nf), matéria fresca e seca da parte aérea (PFPA) e radicular (PFR e MSR), matéria seca radicular (PSR) e parte aérea (PSPA e MSPA) de mudas da alface irrigada com água e água ozonizada ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ ).

Tratamento	HR (cm)		HPA (cm)		NF	
	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa
Água	10,24 bA	9,31 bB	12,41 aB	14,78 bA	6,32 aA	4,18 aB
Água ozonizada	11,97 aA	11,57 aA	13,03 aB	16,15 aA	5,98 aA	4,25 aB
	PFR (g)		PFPA (g)		MSR (%)	
	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa
Água	7,72 bB	10,55 bA	41,27 bB	50,91 aA	5,42 bB	6,36 bA
Água ozonizada	9,73aB	12,45 aA	47,79 aB	54,94 aA	7,62 aA	7,57 aA
	PSR (g)		PSPA (g)		MSPA (%)	
	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa	Lisa	Crespa
Água	0,42 bB	0,66 bA	2,27 bB	3,32 bA	5,50 bB	6,51 bA
Água ozonizada	0,74aB	0,94 aA	3,73 aA	4,32 aA	7,77aA	7,87 aA

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade. HR – Comprimento da raiz da raiz, HPA – altura da parte aérea, NF – número de folhas, PFR – peso fresco da raiz, PFPA – peso fresco da parte aérea, MSR – massa seca da raiz, PSR – peso seco da raiz, PSPA – peso seco da parte aérea e MSPA – massa seca da parte aérea.

#### 4. DISCUSSÃO

O entendimento do processo de saturação do ozônio na água é fundamental para determinar o tempo mínimo necessário para incorporar o gás ozônio na água. Ela pode ser influenciada pela concentração de ozônio aplicada, tempo de contato, pH e temperatura da água (Rakness *et al.*, 1996). Neste estudo, a concentração do ozônio na água teve uma tendência aumento até atingir a concentração de saturação e a partir desse instante se manteve constante. Isto está relacionado ao fato de a água ter atingido a sua capacidade máxima de dissolução do ozônio.

O ozônio é um gás instável e pode se decompor naturalmente em oxigênio (O<sub>2</sub>) ao longo do tempo. No entanto, o decaimento do ozônio na água pode ser acelerado pela elevação da temperatura e aumento do pH. No estudo, a decomposição do ozônio na água teve uma tendência decrescente ao longo do tempo. A redução da concentração do ozônio pode estar associada a instabilidade do ozônio em soluções aquosas, devido a presença de íons e outras substâncias reativas na água (Von Gunten, 2003). Entretanto, alguns estudos relatam que a decomposição do ozônio na água pode ser descrita por modelos cinéticos de primeira ou segunda ordem (Gardoni *et al.* 2012). O modelo cinético que melhor representou a decomposição do ozônio na água foi o modelo cinético de primeira ordem. Este resultado assemelha-se ao resultado observado em estudos sobre a sensibilidade da decomposição do ozônio em função da temperatura (Gardoni *et al.* 2012).

Os resultados deste estudo demonstraram que a irrigação com água ozonizada em alface não comprometeu a germinação das sementes, nem causou anormalidades, originando plantas vigorosas e normais. Ainda assim, os efeitos desse tratamento sobre a germinação de hortaliças permanecem pouco investigados, sobretudo quando aplicado diretamente ao solo de cultivo. Os estudos existentes sobre o uso de ozônio aquoso durante o cultivo, são mais focados no desenvolvimento de mudas, abordando variáveis relacionadas ao crescimento e produção de massa foliar (Graham *et al.*, 2009; Sharaf-Eldin *et al.*, 2022; Lam *et al.*, 2023). Alguns trabalhos que relacionam os efeitos do ozônio ao processo germinativo de sementes, em testes de germinação conduzidos em laboratório, demonstram comportamentos distintos entre o ozônio gasoso e aquoso, sobre características como percentual de germinação e velocidade de emergência.

Em estudos com cevada (Zuluaga-Calderón *et al.*, 2023) e milho (Maximiano *et al.*, 2018), o uso da água ozonizada na lavagem de sementes para desinfecção superficial, reduziu

a presença de fungos sem afetar o processo germinativo, mas a exposição de sementes de cevada (Sanchez *et al.*, 2024) e milho (Normov *et al.*, 2019) ao ozônio na forma de gás, aplicado com essa mesma finalidade, prejudicou a capacidade germinativa, ocasionando efeitos adversos.

Essa diferença de comportamento entre o ozônio gasoso e aquoso, pode ser atribuída a capacidade do gás ozônio em oxidar constituintes presentes no tegumento e danificar membranas (Tiwari *et al.*, 2010; Savi *et al.*, 2014), prejudicando posteriormente o padrão trifásico de absorção de água e hidratação da semente (1-embebição, 2-processo bioquímico preparatório e 3-emergência da plântula) (Marcos Filho, 2005). Enquanto a presença de água naturalmente contribui com a reorganização dos componentes estruturais (Voet e Voet, 2004), reduzindo assim o estresse oxidativo. Neste trabalho, os radicais presentes na água ozonizada também podem ter reagido com os elementos do substrato de plantio das sementes de alface, diminuindo ainda mais sua reatividade.

Os efeitos do ozônio sobre o processo germinativo das sementes de uma forma geral, também podem estar relacionados a concentração e ao tempo de exposição adotados. No tomateiro, o tratamento com ozônio gasoso em baixas concentrações, aumentou a porcentagem de germinação e favoreceu o desenvolvimento de raízes (Sudhakar *et al.*, 2011). Em milho, a presença de ozônio gasoso em tempos curtos de exposição, acelerou o processo germinativo (Violleau *et al.*, 2008) e em sementes de trigo, não houve influência do ozônio gasoso sobre essa variável (Savi *et al.*, 2014)

Os efeitos positivos da água ozonizada observados no desenvolvimento inicial e fisiologia das mudas de alface, sobre a altura de plantas, comprimento de raízes e massa fresca e seca da parte aérea e radicular, demonstram a capacidade da água ozonizada em favorecer o crescimento dessa cultura. Esses efeitos são benéficos para toda a cadeia produtiva, pois aumentam a tolerância das plantas de alface a condições de estresse e resultam em plantas maiores. Isto favorece a resistência e a comercialização dessas variedades na fase de pós-colheita pois no momento da compra os consumidores tendem a optar por alfaces maiores, de folhas soltas, espessas e com maior área foliar (Sala e Costa, 2012). Além disso, a presença de folhas maiores e mais espessas também é uma característica importante para a comercialização de produtos minimamente processados (Sala e Costa, 2012).

Resultados semelhantes, foram observados em mudas de pimentão (Martínez-Sanchez e Aguayo, 2019) e tomate (Graham *et al.*, 2011; Tahamolkonan *et al.*, 2022), irrigadas com água ozonizada. Nestes trabalhos, a água ozonizada em concentrações inferiores a 5 mg L<sup>-1</sup> de

O<sub>3</sub>, também foi benéfica para o desenvolvimento inicial das plantas e favoreceu o crescimento da parte aérea (altura de planta), ou radicular. Em mudas de melancia irrigadas com água ozonizada (concentrações abaixo de 1 mg L<sup>-1</sup> de O<sub>3</sub>) a presença de ozônio ocasionou um estresse moderado nas plantas, mas sem afetar o desenvolvimento da parte aérea (altura de planta e massa fresca) (Martínez-Sánchez e Aguayo, 2020). Neste estudo, não foram observados efeitos da água ozonizada sobre o número de folhas em plantas de alface, indicando que o ozônio não estimulou e nem prejudicou a produção de folhas em termos de quantidade. Resultados distintos foram verificados em mudas de pimentão (Martínez-Sánchez e Aguayo, 2019) e tomate (Tahamolkonan *et al.*, 2022), cujo a água ozonizada influenciou de forma positiva essa variável.

O maior acúmulo da massa fresca e seca em plantas e raízes de alface demonstram a influência positiva da água ozonizada sobre o acúmulo de biomassa nas plantas. Esse mesmo efeito também foi observado em mudas de tomate, irrigadas com água ozonizada durante o cultivo (Graham *et al.*, 2011), mas em mudas de melancia, essa variável não foi influenciada pela presença de água ozonizada (Martínez-Sánchez e Aguayo, 2020). As variáveis de crescimento, juntamente com a área e a massa foliar compõem a biomassa e são usadas para mensurar a assimilação de carboidratos, indicando a capacidade da planta em aumentar seu peso seco por meio da fotossíntese (Costa e Leal, 2008).

Dessa forma, a ausência de efeitos negativos sobre as variáveis de crescimento e massa foliar, mostram que a presença de água ozonizada possivelmente não prejudica o processo fotossintético, como a condutância estomática, o influxo de CO<sub>2</sub> e a atividade das enzimas ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP), ou ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), presentes no ciclo de Calvin (Peloso *et al.*, 2017). Esse comportamento também indica, que a presença de água ozonizada provavelmente não prejudicou o equilíbrio entre auxinas e giberelinas no processo germinativo, que possui relação direta com o crescimento de plantas e raízes (Taiz *et al.*, 2017) e nem a atividade de moléculas orgânicas, ou de aminoácidos, responsáveis pela manutenção da turgescência celular, captação de água e fundamentais na neutralização e estabilização de radicais livres, espécies reativas de oxigênio, proteínas e membranas celulares (Vettore *et al.*, 2021; Ghosh *et al.*, 2022; Sousa *et al.*, 2023).

Durante o cultivo, as mudas de alface não apresentaram danificações na parte aérea ou radicular e tanto as mudas irrigadas com água ozonizada, ou água sem adição de ozônio, permaneceram intactas do início ao fim do cultivo. As mudas de alface expostas ao tratamento

com água ozonizada, também apresentaram uma maior produção de raízes. Aspecto que pode estar relacionado com a aplicação direta da água ozonizada no substrato de cultivo. Quando aplicada diretamente no solo de cultivo, a água ozonizada pode tornar o solo mais esponjoso, proporcionando uma retenção mais adequada de umidade e o desenvolvimento de plantas mais vigorosas (Raub *et al.*, 2001). A depender da cultura agrícola, a irrigação localizada superficial com água ozonizada, pode apresentar uma maior eficiência do que a irrigação por aspersão. Em outros trabalhos por exemplo, o uso de água ozonizada aplicada por sistema de aspersão, ocasionou estresse oxidativo nas mudas de pimentão (Martínez-Sanchez e Aguayo, 2019) e em espécies lenhosas, foram observadas perdas de até 70% durante o cultivo de mudas (Graham *et al.*, 2009).

Assim como em outras culturas, a presença de nutrientes no substrato, ou solo de cultivo e a capacidade de absorção das raízes, são fatores muito importantes no desenvolvimento das mudas e plantas de alface. Os radicais presentes na água ozonizada provenientes da decomposição do ozônio, podem aumentar a oxidação da matéria orgânica tornando os nutrientes mais disponíveis para o vegetal e reduzir a necessidade de fertilizantes (Zhao *et al.*, 2024). Além disso, a presença dos radicais otimiza o processo de respiração radicular, a absorção, redução da presença de microrganismos patogênicos e insetos-praga (Raub *et al.*, 2001; Ohashi-Keneko *et al.*, 2009; Najarian *et al.*, 2018; Tahamolkonan *et al.*, 2022). A maior oxigenação do sistema radicular, favorecida pela presença dos radicais, também aumenta a disponibilidade de carbono (C) no solo e o crescimento das raízes (Zhou *et al.*, 2022).

O uso de água ozonizada na irrigação de alface se apresentou como uma alternativa promissora para a produção de mudas, resultando em plantas saudáveis e com o padrão de qualidade necessário para a fase de plantio. Esse aspecto é fundamental, considerando que o plantio de mudas vigorosas proporciona uma distribuição mais adequada de plantas na lavoura e aumenta a lucratividade. No entanto, os efeitos do ozônio podem variar de uma cultura agrícola para outra e os tratamentos com água ozonizada precisam ser adaptados as condições de cultivo de cada espécie.

## **5. CONCLUSÃO**

A irrigação com água ozonizada não prejudicou o processo germinativo da alface, e otimizou a formação das mudas, resultando em maior crescimento da parte aérea, radicular e maior teor de matéria fresca e seca. A presença de água ozonizada durante o cultivo, também não ocasionou danificações nas mudas de alface e nem limitações ao seu desenvolvimento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBORNOZ, F.; VILCHES, I.; CONTRERAS, S. Managing lettuce seed quality through nitrogen nutrition in soilless production. **Scientia Horticulturae**, v. 252, p. 169-175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.049>Get rights and content
- ALEXOPOULOS, A.; PLESSAS, S.; CECIU, S.; LAZAR, V.; MANTZOURANI, I.; VOIDAROU, C.; STAVROPOULOU, E.; BEZIRTZOGLOU, E. Evaluation of ozone efficacy on the reduction of microbial population of fresh cut lettuce (*Lactuca sativa*) and green bell pepper (*Capsicum annuum*). **Food Control**, v. 30, n. 2, p. 491-496, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.018>
- AMES, Z. R.; FELIZIANI, E.; SMILANICK, J. L. Germination of fungal conidia after exposure to low concentration ozone atmospheres. **Postharvest Biology and Technology**, v. 83, p. 22-26, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.03.008>
- BEZERRA, A. C. M.; VALENÇA, D. D. C.; CARVALHO, D. F. D.; PINHO, C. F. D.; REINERT, F.; GOMES, D. P.; MEDICI, L. O. Automation of lettuce seedlings irrigation with sensors deployed in the substrate or at the atmosphere. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 179-189, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0163>
- COSTA, E.; LEAL, P. A. M. Leaf biomass evaluation of hydroponic strawberry in greenhouses. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1941-1952, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000600038>
- CRUZ, E. D.; MARTINS, F. D. O.; CARVALHO, J. E. U. D. Biometria de frutos e sementes e germinação de jatobá-curuba (*Hymenaea intermedia* Ducke, Leguminosae-Caesalpinioideae). **Brazilian Journal of Botany**, v. 24, p. 161-165, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042001000200005>
- 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**. CRC Press, 2014, p. 147-164. <https://doi.org/10.1201/b17441>
- 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/10.1111/j.1744-7909.2005.00031.x>
- GARDONI, D., VAILATI, A., CANZIANI, R. Decay of Ozone in Water: A Review. **Ozone: Science & Engineering**, 34(4), 233-242. 2012. <https://doi.org/10.1080/01919512.2012.686354>
- GHOSH, K.; ISLAM, N.; SIDDIQUI, N.; CAO, X.; KHAN, R. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. **Plant Biology**, v. 24, p. 227-239, 2022. <https://doi.org/10.1111/plb.13363>
- GRAHAM, T.; ZHANG, P.; WOYZBUN, E.; DIXON, M. Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 3, p. 464-471, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.019>
- GRAHAM, T.; ZHANG, P.; ZHENG, Y.; DIXON, M. A. Phytotoxicity of Aqueous Ozone on Five Container-grown Nursery Species. **HortScience**, v. 44, n. 3, p. 774-780, 2009. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.3.774>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário de 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6619#resultado>. Acesso em: 15 mar. 2024.

- ISTA. The germination test. In: International rules for seed testing. Zurich, Switzerland: **International Seed Testing Association**, 2015. <http://dx.doi.org/10.15258/istarules.2015.05>.
- KARACA, H.; VELIOGLU, Y. S. Effects of ozone treatments on microbial quality and some chemical properties of lettuce, spinach, and parsley. **Postharvest Biology and Technology**, v. 88, p. 46-53, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.09.003>
- KUMAR, G. D.; RAVISHANKAR, S. Ozonized water with plant antimicrobials: An effective method to inactivate *Salmonella enterica* on iceberg lettuce in the produce wash water. **Environmental Research**, v. 171, p. 213-217, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.023>
- LAM, V.P.; LOI, D.N.; KIM, S. *et al.* Ozonated water soaking improves the flower growth, antioxidant activity, and bioactive compound accumulation in *Agastache rugosa*. **Chem. Biol. Technol. Agric.** 10, 128, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00496-3>
- LI, Z.; LI, Y.; YANG, Y.; GUO, R.; YANG, J.; YUE, J.; WANG, Y. A high-precision detection method of hydroponic lettuce seedlings status based on improved Faster RCNN. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 182, p. 106054, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106054>
- MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v. 6, 121-136, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2003000300008>
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: ESALQ, 2005.
- MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, A.; AGUAYO, E. Effect of irrigation with ozonated water on the quality of capsicum seedlings grown in the nursery. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 547-555, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.027>
- MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, A.; AGUAYO, E. Effects of ozonated water irrigation on the quality of grafted watermelon seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 261, 109047, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109047>
- MAXIMIANO, C. V.; CARMONA, R.; SOUZA, N. O.; ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. Physiological and sanitary quality of maize seeds preconditioned in ozonated water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 360-365, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p360-365>
- NAJARIAN, M.; MOHAMMADI-GHEHSAREH, A.; FALLAHZADE, J.; PEYKANPOUR, E. Responses of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to ozonated water under varying drought stress intensities. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 1, p. 1-9. 2018. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346665>
- NORMOV, D.; CHESNIUK, E.; SHEVCHENKO, A.; NORMOVA, T.; GOLDMAN, R.; POZHIDAEV, D.; BOHINC, T.; TRDAN, S. Does ozone treatment of maize seeds influence their germination and growth energy? **Acta agriculturae Slovenica**, v. 114, n. 2, p. 251–258, 2019. <https://doi.org/10.14720/aas.2019.114.2.10>
- OHASHI-KANEKO, K.; YOSHII, M.; ISOBE, T.; PARK, J. S.; KURATA, K.; FUJIWARA, K. Nutrient solution prepared with ozonated water does not damage early growth of

hydroponically grown tomatoes. **Ozone: Science and Engineering**, v. 31, p. 21-27, 2009. <https://doi.org/10.1080/01919510802587523>

ÖLMEZ, H.; AKBAS, M. Y. Optimization of ozone treatment of fresh-cut green leaf lettuce. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 4, p. 487-494, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.026>

PANDISELVAM, R.; SINGH, A.; AGRIOPOULOU, S.; SACHADYN-KRÓL, M.; ASLAM, R.; LIMA, C. M. G.; KHANASHYAM, A. C.; KOTHAKOTA, A.; ATAKAN, O.; KUMAN, M.; MATHANGHI, S. K.; KHANEGHAH, A. M. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 127, p. 74-86, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.008>

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, J. F. T. Limitações fotossintéticas em folhas de café arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, p. 389-399, 2017. Disponível em: <<https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1314>> Acesso em: 21 de fevereiro de 2025.

RAKNESS, K.; GORDON, G.; LANGLAIS, B.; MASSCHELEIN, W.; MATSUMOTO, N.; RICHARD, Y.; ROBSON, R. C. M. SOMIYA, I. *et al.* Guideline for measurement of ozone concentration in the process gas from an ozone generator. **Ozone Sci. Eng.** 18 (3), p. 209-229, 1996. <https://doi.org/10.1080/01919519608547327>.

RAUB, L.; AMRHEIN, C.; MATSUMOTO, M. The effects of ozonated irrigation water on soil physical and chemical properties. **Ozone Science and Engineering**, v. 23, n. 1, p. 65-76, 2001. <https://doi.org/10.1080/01919510108961989>.

SAEEDIZADEH, A.; NIASTI, F.; AMERI-BAFGHI, M. E.; AGAHI, K. Response of root-knot nematode *Meloidogyne javanica* to ozone. **Science and Agrotechnology**, v. 43, p. 1-11, (008419), 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943008419>.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospective and trends of Brazilian lettuce crop. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 187-194, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200002>.

SANCHEZ, D. R.; JESPERSEN, B. M.; RASMUSSEN, L. H.; ANDERSEN, M. L. Fungicidal effect of gaseous ozone in malting barley: Implications for *Fusarium* infections and grain germination. **Journal of Cereal Science**, v. 118, 103973, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103973>.

SAS Institute. **SAS/STAT User's Guide**, version 6.0. Cary: SAS Institute Inc., 2002.

SAVI, G. D.; PIACENTINI, K.; BITTENCOURT, K. O.; SCUSSEL, V. M. Ozone treatment efficiency on *Fusarium graminearum* and deoxynivalenol degradation and its effects on whole wheat grains (*Triticum aestivum* L.) quality and germination. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p. 245-253, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.03.008>.

SELMA, M. V.; BELTRÁN, D.; ALLENDE, A.; CHACÓN-VERA, E.; GIL, M. I. Elimination by ozone of *Shigella sonnei* in shredded lettuce and water. **Food Microbiology**, v. 24, n. 5, p. 492-499, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.09.005>.

SHARAF-ELDIN, M. A.; ALSHALLASH, K. S.; ALHARBI, K. R.; ALQAHTANI, M. M.; ETMAN, A. A.; YASSIN, A. M. *et al.* A. Influence of seed soaking and foliar application using ozonated water on two sweet pepper hybrids under cold stress. **Sustainability**, 14(20), 13453, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142013453>.

- SILVA, L. J. D. et al. SeedCalc, a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. **Journal of Seed Science**, 41: 250-257. 2019. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42n2217267>
- SILVA, M. J.; ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. A.; SILVA, M. V. A.; MACHADO, S. G.; MAGALHÃES, C. G.; RIBEIRO, W. S.; RIBEIRO MARTINS, A. H. R. Post-harvest quality of lettuce treated with ozonised water in a microbubble system. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, p. 1-18, 2024. <https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2345330>.
- SINGH, N.; SINGH, R. K.; BHUNIA, A. K.; STROSHINE, R. L. Efficacy of Chlorine Dioxide, Ozone, and Thyme Essential Oil or a Sequential Washing in Killing *Escherichia coli* O157:H7 on Lettuce and Baby Carrots. **Food Science and Technology-LWT**, v. 35, n. 8, p. 720-729, 2002. <https://doi.org/10.1006/fstl.2002.0933>.
- SOUSA, V. F. O.; DIAS, T. J.; HENSCHER, J. M.; JÚNIOR, S. O. M.; BATISTA, D. S.; LINNÉ, J. A.; TARGINO, V. A.; SILVA, R. F. Castor bean cake increases osmoprotection and oil production in basil (*Ocimum basilicum*) under saline stress. **Scientia Horticulturae**, v. 309, n. 5, 111687, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111687>.
- STAMFORD, N. P.; FELIX, F.; OLIVEIRA, W.; SILVA, E.; CAROLINA, S.; ARNAUD, T.; FREITA, A. D. Interactive effectiveness of microbial fertilizer enriched in N on lettuce growth and on characteristics of an Ultisol of the rainforest region. **Scientia Horticulturae**, v. 247, p. 242-246, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.028>.
- SUDHAKAR, N.; NAGENDRA-PRASAD, D.; MOHAN, N.; HILL, B.; GUNASEKARAN, M.; MURUGESAN, K. Assessing influence of ozone in tomato seed dormancy alleviation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 2, n. 3, p. 443-448, 2011. <https://doi.org/10.4236/ajps.2011.23051>.
- SUN, Y.; WU, Z.; ZHANG, Y.; WANG, J. Use of aqueous ozone rinsing to improve the disinfection efficacy and shorten the processing time of ultrasound-assisted washing of fresh produce. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 83, 105931, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105931>.
- TAHAMOLKONAN, M.; GHAHSAREH, A. M.; ASHTARI, M. K.; HONARJOO, N. Tomato (*Solanum lycopersicum*) growth and fruit quality affected by organic fertilization and ozonated water. **Protoplasma**, v. 259, p. 291-299, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00709-021-01657-7>
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6 ed., Porto Alegre, RS: Artmed, 2017. 888 p.
- TIWARI, B. K.; BRENNAN, C. S.; CURRAN, T.; GALLAGHER, E.; CULLEN, P. J.; DONNELL, C. P. O. Application of ozone in grain processing. **Journal of Cereal Science**, v. 51, n. 3, p. 248-255, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>.
- VETRANO, F.; MICELI, C.; ANGILERI, V.; FRANGIPANE, B.; MONCADA, A.; MICELI, A. Effect of bacterial inoculum and fertigation management on nursery and field production of lettuce plants. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1477, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101477>.
- VETTORE, L. A.; WESTBROOK, R. L.; TENNANT, D. A. Metabolismo da prolina e redox; mantendo um equilíbrio na saúde e na doença. **Amino Acids**, v. 53, p. 1779-1788, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00726-021-03051-2>.

- VIOLLEAU, F.; HADJEBBA, K.; ALBET, J.; CAZALIS, R.; SUREL, O. Effect of Oxidative Treatment on Corn Seed Germination Kinetics. **Ozone: Science & Engineering**, v. 30, n. 6, p. 418-422, 2008. <https://doi.org/10.1080/01919510802474631>.
- VOET, D.; VOET, J. G. **Biochemistry**. 3rd ed. Wiley, United States of America. p. 1591, 2004.
- VON GUNTEN, U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. **Water Research**, v. 37, p. 1443-1467, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00457-8).
- WATTHIER, M.; SILVA, M. A.; SCHWENGBER, J. E.; FERMINO, M. H.; CUSTÓDIO, T. V. Production of lettuce seedlings in substrates with tung compost, carbonized rice husk and earthworm humus. **Horticultura Brasileira**, v. 35, p. 174-179, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170204>.
- WRIGHT, M. R. **Experimental Procedures. Chap. 2 in An Introduction to Chemical Kinetics**, edited by John Wiley & Sons, Ltd. New York. 2004.
- WU, C.; TANG, P.; CAO, A.; NI, P.; ZHANG, B.; CHANG, Z. Evaluation of an Ozone-Induced Free Radical Solution's Characteristics and Its Efficacy as an Alternative Pest Control Method. **Applied Sciences**, v. 14, n. 7, p. 3111, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14073111>.
- YAN, Z.; HE, D.; NIU, G.; ZHAI, H. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. **Scientia Horticulturae**, v. 248, p. 138-144, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.002>.
- ZHAO, Q.; GUO, S.; FENG, J.; LI, D.; YANG, S.; ZHOU, X. Suitable water -fertilizer management and ozone synergy can enhance substrate-based lettuce yield and water -fertilizer use efficiency. **Agronomy**, 14(8), 1619, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081619>.
- ZULUAGA-CALDERÓN, B.; GONZÁLEZ, H. H. L.; ALZAMORA, S. M.; CORONEL, M. B. Multi-step ozone treatments of malting barley: Effect on the incidence of *Fusarium graminearum* and grain germination parameters. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 83, 103219, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103219>.

## CAPÍTULO 2. EFEITO DA APLICAÇÃO DE ÁGUA OZONIZADA NO DESENVOLVIMENTO E QUALIDADE PÓS-COLHEITA DE ALFACE

### Resumo

O uso da água ozonizada pode influenciar no crescimento das plantas e na produção agrícola. O efeito positivo do ozônio na planta e no rendimento, depende fundamentalmente da concentração de ozônio. O objetivo do estudo foi determinar o efeito da aplicação de água ozonizada no desenvolvimento e na qualidade pós-colheita de alface. O estudo foi realizado em três (3) etapas. Na primeira etapa realizou-se a produção de mudas em 25 dias. A produção das mudas foi feita em duas (2) bandejas em dois (2) ciclos. A irrigação foi realizada com água convencional (não tratada). Na segunda etapa foi realizado o transplantio das mudas para 48 vasos. Os vasos continham dois (2) kg de solo misturado com esterco bovino. A irrigação dos vasos foi realizada com água convencional (controle), água com adição de ozônio nas concentrações de 1 mg L<sup>-1</sup> e 5 mg L<sup>-1</sup>. Nas primeiras 12 horas após o transplantio das mudas foi determinada a capacidade de campo dos vasos. A cada dois dias realizava-se a irrigação dos vasos. Na terceira etapa realizou-se as análises de qualidade pós-colheita de alface nos dias zero, três, seis e nove dias de armazenamento. A irrigação com água ozonizada favoreceu o desenvolvimento da alface, promovendo crescimento e qualidade pós-colheita. Além disso, os parâmetros físicos e químicos do solo não sofreram alterações significativas em função desse tipo de irrigação.

**Palavras-chave:** ozônio, *Lactuca sativa*, irrigação com água ozonizada

## 1. INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças mais cultivadas e consumidas no mundo. Essa popularidade deve-se ao seu ciclo de produção curto, alta produtividade e valor nutricional, que a tornam um alimento amplamente presente na dieta humana (Lee *et al.*, 2019). No Brasil e em outros países, a procura por esta hortaliça tem aumentado significativamente nos últimos anos. Este aumento é impulsionado por mudanças nos hábitos alimentares e pela procura de dietas mais saudáveis (Taban; Halkman, 2011; Calejon *et al.*, 2015). Além da procura crescente, o seu cultivo apresenta vantagens agrônômicas, como a possibilidade de alta densidade de plantação, que permite um uso eficiente do espaço. Adicionalmente, a alface requer um consumo reduzido de insumos energéticos, tornando-se uma alternativa viável tanto para pequenos produtores como para sistemas agrícolas em larga escala (Lee *et al.*, 2019).

Apesar da sua ampla aceitação no mercado, a produção da alface enfrenta desafios que afetam a sua qualidade e segurança. A cultura tem uma elevada necessidade de água para garantir o seu crescimento e desenvolvimento (Roux *et al.*, 2016). No entanto, um dos principais problemas com que os produtores se deparam é a contaminação microbiológica, que pode ocorrer em diferentes etapas da cadeia produtiva. O contato da alface com o solo, fertilizantes, água de lavagem e, sobretudo, a água de irrigação representa um risco significativo de introdução de patógenos entéricos (Park *et al.*, 2014; Castro-Ibáñez *et al.*, 2015a). A água de irrigação é amplamente reconhecida como um vetor crítico de contaminação em vegetais folhosos (Rodrigues *et al.*, 2014; Pachepsky *et al.*, 2011; Gil *et al.*, 2015).

Diante deste cenário, o uso de sanitizantes seguros e eficazes tem sido fundamental para mitigar os riscos de contaminação e garantir a qualidade dos produtos hortícolas frescos. O ozônio tem-se destacado como uma alternativa promissora, devido à sua elevada permeabilidade e ação antimicrobiana, sem deixar resíduos químicos nos alimentos (Glowacz; Rees, 2016). A sua aplicação tem sido investigada para manter a qualidade pós-colheita de frutas e hortaliças (Aguayo *et al.*, 2014), bem como para controlar patógenos em cultivos hidropônicos e solos agrícolas (Fujiwara *et al.*, 2006; Graham *et al.*, 2011).

Além do seu efeito sanitizante, o ozônio pode influenciar diretamente o crescimento e a produtividade das plantas. Estudos indicam que a sua aplicação em concentrações adequadas pode ter um impacto positivo no rendimento agrícola, promovendo respostas fisiológicas favoráveis nas plantas (Najarian *et al.*, 2018; Zhuang *et al.*, 2019; Flores *et al.*, 2019; Terao *et al.*, 2019). No entanto, a sua interação com o meio agrícola ainda não é totalmente

compreendida. Algumas pesquisas sugerem que o ozônio pode modificar os parâmetros químicos do solo e da água de irrigação, reduzindo o pH e aumentando a concentração de eletrólitos devido à oxidação da biomassa orgânica (Raub *et al.*, 2001).

Nesse sentido, o presente estudo avaliou o efeito da aplicação de água ozonizada no desenvolvimento e na qualidade físico-química da alface durante o armazenamento. A investigação dos impactos dessa tecnologia permitirá um melhor entendimento sobre a sua viabilidade na horticultura e os seus benefícios, tanto na fase de produção como na fase posterior à colheita. Os resultados poderão contribuir para a formulação de estratégias mais eficazes de gestão sanitária, visando aumentar a segurança alimentar e a sustentabilidade da produção de hortaliças.

## **2. MATERIAL E MÉTODO**

### **2.1. Produção de mudas de alface**

A produção de mudas da alface (*Lactuca sativa* L.) foi realizada em estufa, em dois ciclos distintos. O primeiro ciclo ocorreu entre maio e junho, enquanto o segundo ciclo decorreu entre julho e agosto de 2024. Foram utilizadas sementes de alface do grupo lisa (Regina 225), provenientes da colheita de 2021, com uma taxa de germinação de 90%. A semeadura foi realizada em substrato comercial FERTMAX (Fertnobre, Alvinópolis, Minas Gerais, Brasil), em bandejas de poliestireno expandido com 128 células. Em cada célula foram colocadas três sementes. As bandejas foram irrigadas diariamente com água não tratada, de modo a garantir condições adequadas para a germinação e o desenvolvimento inicial das mudas.

### **2.2. Obtenção e preparação do solo e esterco**

Para a produção das mudas da alface, foi utilizado solo de barranco obtido na Área de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). As características físico-químicas deste solo estão detalhadas na Tabela 1. Para enriquecer o solo e fornecer os nutrientes essenciais ao desenvolvimento das mudas, foi utilizado esterco bovino proveniente da Unidade de Pesquisa, Ensino e Extensão (UEPE) gado de leite da UFV.

Inicialmente, tanto o solo como o esterco foram dispostos numa superfície plana e expostos à radiação solar por um período de 30 dias para realizar a solarização. Após este período, o solo e o esterco foram peneirados separadamente, utilizando uma peneira para remover torrões e outros materiais indesejáveis. Em seguida, o solo e o esterco foram misturados homogeneamente com a ajuda de uma betoneira profissional de 100 litros modelo C8037 (Betoneira Profissional C8037). A mistura foi realizada por um período de 10 min, utilizando uma proporção de 75% de solo e 25% de esterco bovino. Essa proporção foi escolhida para garantir uma distribuição uniforme dos componentes, o que é essencial para a preparação adequada do substrato.

**Tabela 1.** Características físico-químicas do solo utilizado no estudo.

<b>Ordem</b>	<b>Propriedade Químicas</b>	<b>Valor</b>
1	pH	5,3
2	Fósforo (P)	5,98 mg/dm <sup>3</sup>
3	Potássio (K)	16 mg/dm <sup>3</sup>
4	Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	0,65 cmol/dm <sup>3</sup>
5	Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	0,41 cmol/dm <sup>3</sup>
6	Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	0,1 cmol/dm <sup>3</sup>
7	Hidrogênio + Alumínio (H+Al)	3,30 cmol/dm <sup>3</sup>
8	Bases Trocáveis (SB)	1,10 cmol/dm <sup>3</sup>
9	Fósforo Remanescente (P-rem)	15,12 mg/l
10	Zinco (Zn)	2,0 mg/dm <sup>3</sup>
11	Ferro (Fe)	63,8 mg/dm <sup>3</sup>
12	Manganês (Mn)	53,1 mg/dm <sup>3</sup>
13	Cobre (Cu)	3,1 mg/dm <sup>3</sup>
14	Boro (B)	0,0 mg/dm <sup>3</sup>
15	Capacidade de Troca Catiônica (t)	1,20 cmol/dm <sup>3</sup>
16	Capacidade de Troca Total (T)	4,40 cmol/dm <sup>3</sup>
17	Saturação por Bases (%)	25%
18	Saturação por Metais (%)	8,3%
19	Matéria Orgânica (MO)	1,21 dag/kg

### 2.3. Produção de alface

Trinta dias após o plantio, as mudas de alface foram transplantadas para os vasos. O transplante foi realizado em 96 vasos com capacidade para 2 litros, nos quais foram colocados dois (2) kg de solo previamente misturado com esterco. A seguir, os vasos foram irrigados até o solo atingir a saturação com água convencional, para determinação da capacidade de campo. Decorridas 12 horas sem incidência de radiação solar, permitiu-se a drenagem do excesso de água e, posteriormente, os vasos foram pesados para determinar a capacidade de campo. Com base neste parâmetro, os seguintes tratamentos foram aplicados: água convencional (controle), água ozonizada na concentração de 1 mg L<sup>-1</sup> e água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup>. Durante as duas primeiras semanas, as plantas foram irrigadas de três em três dias, devido à elevada capacidade de retenção de água do solo. Nas semanas seguintes, a irrigação foi realizada de dois em dois dias. Para promover o crescimento inicial das mudas, foi aplicada uma solução de arranque contendo NPK (10-10-10) nos dias 3, 10 e 20 após o transplante.

#### **2.4. Análises do desenvolvimento das mudas de alface**

As análises do desenvolvimento das mudas de alface foram realizadas de três em três dias durante o período de crescimento. As variáveis avaliadas incluíram a altura, o diâmetro e o número de folhas das plantas. A altura das plantas foi medida com a ajuda de uma régua milimétrica de 50 centímetros. O número de folhas foi contado diretamente, considerando-se apenas as folhas vivas e em bom estado de desenvolvimento.

#### **2.5. Colheita e análises de qualidade pós-colheita de alface**

A colheita das plantas de alface foi realizada 30 dias após o transplântio das mudas. Após a colheita determinou-se a altura, diâmetro, massa fresca e massa seca das raízes. As plantas, depois de submetidas ao processo de hidroresfriamento, foram armazenadas por 3, 6 e 9 dias. O processo de hidroresfriamento consistiu na imersão das plantas em um tanque contendo água e gelo na temperatura a 1 °C, por um período de 8 min. No final de cada período de armazenamento, foram realizadas análises de qualidade física e química da parte aérea das plantas.

As determinações físico-químicas da qualidade de alface foram realizadas de acordo com os métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008) e pela Commission Internationale de l'Éclairage (CIE, 2004). Para a análise dos sólidos solúveis totais, do pH e da acidez titulável, as amostras foram inicialmente trituradas com auxílio de um processador de alimentos, modelo R11341 (Philips, Walita, China), até se obter um extrato homogêneo.

A determinação dos sólidos solúveis totais foi realizada com um refratômetro digital, modelo Poket Refractometer PAL-3 (Atago, Tóquio, Japão), com escala de 0 a 32 °Brix. A medição do pH foi realizada com um medidor de pH digital, modelo K39-0014PA (Kasvi, São José dos Pinhais, Brasil), previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0. As análises de sólidos solúveis totais foram conduzidas em quadruplicata, enquanto as determinações de pH foram realizadas em triplicata.

A acidez titulável foi determinada pelo método da potenciometria e os resultados foram expressos em percentagem de ácido cítrico por 100 g de amostra. Para a análise, foram diluídos 5 g da amostra triturada em 50 mL de água destilada e a titulação foi conduzida com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L<sup>-1</sup> até a solução atingir um pH de 8,2. As medições de pH foram realizadas com o medidor de pH digital portátil modelo K39-0014PA (Kasvi, São José dos Pinhais, Brasil) e a análise foi feita em triplicata. O cálculo da acidez titulável foi realizado de acordo com a Equação 1:

$$\text{Acidez titulável (\% ácido cítrico/100g)} = \frac{V \times F \times 10}{m} \quad (1)$$

Onde: V é o volume de hidróxido de sódio gasto (NaOH - 0,1) na titulação, f é o fator de correção e m, a massa da amostra (g).

### 2.5.1. Perda de massa fresca

A perda de massa fresca da alface foi determinada a partir da diferença entre a massa inicial de cada amostra no primeiro dia de análise (dia 0) e a massa registada nos dias 3, 6 e 9 de armazenamento. A cada período avaliativo, as amostras foram pesadas numa balança digital de alta precisão ( $1 \times 10^{-2}$  g), modelo BK 8000 (Gehaka, São Paulo, Brasil). Os resultados foram expressos em percentagem, conforme a Equação 2:

$$PMF(\%) = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100 \quad (2)$$

Onde: *PMF* (%) é a percentagem de perda de massa; *Mi* é a massa inicial da amostra no dia 0 e *Mf* é a massa da amostra no dia avaliativo.

### 2.5.2. Análise instrumental da cor de alface

A leitura das coordenadas da cor das amostras de alface foi determinada em seis pontos aleatórios da parte axial da folha. A leitura das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  na superfície da folha de alface foi obtida com auxílio de um colorímetro digital modelo CR-400 (Konica Minolta, Osaka, Japão). Com os valores das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  foi calculado a diferença da cor ( $\Delta E^*$ ) (Equação 3), a tonalidade da cor ( $h^*$ ) (Equação 4) e a saturação da cor ou croma ( $C^*$ ) (Equação 5). Para o cálculo da diferença total de cor, utilizaram-se como referência as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  de amostras não expostas ao ozônio.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (4)$$

$$h^* = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (6)$$

Onde:  $L_0^*$ ,  $a_0^*$  e  $b_0^*$  são as coordenadas de cor obtidas na alface não irrigada com água ozonizada.

### 2.5.3. Determinação do teor de clorofila

A quantificação dos teores de clorofila (*a* e *b*) foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Araújo (2014), com adaptações. Para a extração dos pigmentos, amostras de alface foram cortadas em discos com 0,8 mm de diâmetro, até se obter uma massa total de 0,3 g. Em seguida, os discos foram transferidos para tubos de vidro contendo 0,5 mL de uma solução extratora composta por uma mistura de acetona e água destilada na proporção de 80:20 (v/v). Após a preparação das amostras, os tubos foram colocados num ambiente escuro e à temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C) por 24 horas, para permitir a extração completa dos pigmentos. Em seguida, o sobrenadante foi cuidadosamente recolhido e submetido a uma análise espectrofotométrica. A quantificação das clorofilas *a* e *b* foi realizada com recurso a um espectrofotómetro modelo *Cirrus 80 ST* (Femto, São Paulo, Brasil). As leituras foram efetuadas nos comprimentos de onda de 647 nm e 664 nm, respetivamente. Com base nos valores de absorbância obtidos, os teores de clorofila foram calculados de acordo com as equações 6 e 7.

$$Cl \text{ (mgL}^{-1}\text{)} = 17,9 * A_{647} + 8,08 * A_{664,5} \quad (6)$$

$$Cl \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{Cl \left(\frac{mg}{L}\right) * 0,05}{\text{massa dos discos}} \quad (7)$$

### 2.5.4. Determinação do extravasamento de eletrólitos de alface

A quantificação do extravasamento de eletrólitos (EL) foi conduzida de acordo com a metodologia descrita por Lima et al. (2002), com adaptações. Inicialmente, foram cuidadosamente obtidos dez discos foliares com 0,8 mm de diâmetro a partir de regiões entre as nervuras primárias e secundárias das folhas, para determinação dos EL. Em seguida, os discos foram imediatamente transferidos para béqueres com 20 mL de água destilada. As soluções foram mantidas em repouso à temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C) por um período de seis horas, de modo a garantir a difusão inicial dos eletrólitos para o meio externo. A condutividade elétrica da solução ( $L_1$ ) foi determinada com um condutímetro digital modelo *mCA150* (TECNOPON, Piracicaba, Brasil).

Após a leitura inicial, os frascos foram selados hermeticamente com película de PVC e colocados num banho-maria modelo *SP-152* (Solab, Piracicaba, Brasil). As amostras foram submetidas a um aquecimento controlado a 90 °C durante uma hora, de modo a promover a lise completa das membranas celulares e a libertação total dos eletrólitos intracelulares. Após o tratamento térmico, os béqueres foram mantidos em repouso à temperatura ambiente por 10

min para estabilização térmica, após o que se procedeu à determinação da condutividade elétrica final ( $L_2$ ) utilizando o mesmo condutímetro. O percentual de extravasamento de eletrólitos foi calculado por meio da equação 8.

$$EL = \frac{L_1}{L_2} * 100 \quad (8)$$

### 2.5.5. Análise de proteínas e enzimas antioxidativas

A quantificação das proteínas totais foi realizada pelo método colorimétrico de Bradford (1976), com leituras de absorbância a 595 nm num espectrofotômetro modelo *Cirrus 80 ST* (Femto, São Paulo, Brasil). A atividade das enzimas antioxidantes foi determinada por métodos específicos para cada enzima. A catalase (CAT) foi quantificada de acordo com o descrito por Havir e McHale (1987), com leituras a 240 nm. A peroxidase (POD) foi quantificada de acordo com o protocolo de Kar & Mishra (1976), com leituras a 470 nm. Já a peroxidase do ascorbato (APX) foi determinada segundo a metodologia adaptada de Ramalheiro (2009), com leituras a 290 nm.

### 2.6. Análise do solo

As análises físico-químicas, bem como os teores de nutrientes e micronutrientes presentes no solo, foram realizadas no LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLO VIÇOSA. O pH do solo foi determinado em água, KCl e CaCl<sub>2</sub>, na proporção 1:2,5. Para quantificar os nutrientes e micronutrientes, foram realizadas extrações com diferentes soluções: o fósforo (P), o sódio (Na), o potássio (K), o ferro (Fe), o zinco (Zn), o manganês (Mn) e o cobre (Cu) foram extraídos utilizando o extrator *Mehlich 1*. O cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos com uma solução de KCl a uma concentração de 1 mol L<sup>-1</sup>, enquanto o hidrogênio e o alumínio (H + Al) foram extraídos com uma solução de acetato de cálcio a uma concentração de 0,5 mol L<sup>-1</sup> e pH 7,0. A determinação do boro (B) foi realizada por extração com água quente e a do enxofre (S) com fosfato monocálcico em ácido acético.

Além dos nutrientes, avaliou-se a capacidade do solo de reter cátions através da análise da soma de bases trocáveis (SB), da capacidade de troca catiónica efetiva (CTC(t)) e da capacidade de troca catiónica a pH 7,0 (CTC(T)) segundo metodologia descrita por Ngewoh et al. (1989). A saturação de bases (V) e a saturação de alumínio (m) também foram avaliadas segundo metodologia descrita por Bertsch e Bloom (1996). O teor de matéria orgânica (MO) foi calculado multiplicando o carbono orgânico (C. Org) por um fator de 1,724, conforme o

método de Walkley-Black. Adicionalmente, o fósforo remanescente (P-rem) foi quantificado por meio de um método de extração convencional.

## **2.7. Delineamento experimental e análise estatística**

Para a realização deste estudo, foi adotado um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos: água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 mg L<sup>-1</sup> e 5 mg L<sup>-1</sup>. O experimento seguiu um esquema fatorial 3 x 4, considerando três tratamentos e quatro tempos de armazenamento (0, 3, 6 e 9 dias). Os resultados das análises de qualidade pós-colheita foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e regressão. Para comparar as médias entre os tratamentos utilizou-se o teste de Tukey adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Os modelos de regressão para o fator quantitativo foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t” adotando-se o nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação  $\left(R^2 = \frac{S.Q.Regressão}{S.Q.Tratamento}\right)$  e no fenômeno em estudo. Independentemente da interação de maior grau ser ou não significativo, optou-se pelo desdobramento da mesma. Para as variáveis diâmetro da raiz, comprimento da raiz e matéria seca da raiz, realizou-se uma análise percentual.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Qualidade pós-colheita de alface

##### 3.1.1. Altura, diâmetro e número de folhas de plantas de alface

Os valores médios da altura da parte aérea, diâmetro da planta e número de folhas de alface são apresentados na Tabela 2. Houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos na altura da planta apenas na quarta semana de desenvolvimento. No tratamento com ozônio (5 mg L<sup>-1</sup>) observou-se maior valor médio da altura da planta. Também foi observado efeito significativo do tratamento no diâmetro da planta durante o período de desenvolvimento. Os maiores valores médios do diâmetro da planta foram observados no tratamento com ozônio (5 mg L<sup>-1</sup>) na segunda, terceira e quarta semanas de desenvolvimento. Para o número de folhas, foram observados efeitos significativos ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos apenas na quarta semana de desenvolvimento das plantas. Nas alfaces irrigadas com água convencional (controle) e ozônio (5 mg L<sup>-1</sup>), observaram-se maiores valores de número de folhas.

**Tabela 2.** Valores médios de altura, diâmetro, e número de folhas de alface irrigada com água convencional e água ozonizada (1 e 5 mg L<sup>-1</sup>)

<b>Altura da alface</b>				
<b>Tratamento</b>	<b>Semanas</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Controle	8,52a	11,98a	15,30a	16,27b
Ozônio (1mg L <sup>-1</sup> )	8,72a	12,26a	15,72a	16,73b
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	8,67a	12,46a	15,34a	19,11a
<b>Diâmetro da alface</b>				
Controle	19,55a	33,44b	36,75b	38,61c
Ozônio (1mg L <sup>-1</sup> )	19,11a	32,97b	36,55b	40,31b
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	20,48a	33,96a	38,77a	41,70a
<b>Número de folhas</b>				
Controle	6,83a	11,53a	13,01a	22,13a
Ozônio (1mg/l)	6,62a	10,99a	12,68a	19,82b
Ozônio (5mg/l)	7,11a	11,22a	13,29a	22,79a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

### 3.1.2. Diâmetro, comprimento e massa de matéria seca da raiz

Apresenta-se na Tabela 3 os resultados referentes aos valores médios de diâmetro e comprimento de raiz e massa de matéria seca de raiz das plantas de alface submetidas a irrigação com água convencional (controle), e água ozonizada nas concentrações de 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>. Em relação ao diâmetro das raízes, observou-se diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre todos os tratamentos. O maior diâmetro médio de raiz foi verificado quando as plantas foram irrigadas com água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> (12,76 cm). Para comprimento de raiz também foi observada diferença estatística entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ). Entretanto, o tratamento com água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> apresentou a maior altura (44,25 cm). Em relação a massa de matéria seca, observou-se diferença significativa apenas para irrigação com água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup>, tratamento que culminou com o maior percentual de matéria seca da raiz (7,29%)

**Tabela 3.** Valores médios do diâmetro e comprimento de raiz e porcentagem de massa de matéria seca das raízes de plantas de alface irrigadas com água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>

Tratamento	Diâmetro da raiz (cm)	Comprimento da raiz (cm)	Matéria seca da raiz (%)
Controle	9,38 c	39,12 b	6,05 b
Água ozonizada (1 mg L <sup>-1</sup> )	11,25 b	42,00 b	6,06 b
Água ozonizada (5 mg L <sup>-1</sup> )	12,76 a	44,25 a	7,29 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

### 3.1.2. Sólidos solúveis totais, pH e Acidez titulável de alface

Os valores médios do teor de sólidos solúveis totais (°Brix), potencial hidrogeniônico (pH) e acidez titulável de alface, para as respectivas combinações de tratamentos e períodos de armazenamento, são apresentados na Tabela 4. Foram observados efeitos significativos ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos sobre as variáveis sólidos solúveis totais, potencial hidrogeniônico e acidez titulável. Os valores de sólidos solúveis totais (°Brix) variaram de 4,17 a 5,86 para o tratamento com água convencional (controle) durante o armazenamento. Exceto para os

tratamentos com adição de ozônio na água, 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>, no dia zero, o teor de sólidos solúveis para os tratamentos com adição de ozônio na água, independente da concentração, manteve-se constante até o sexto dia de armazenamento. Uma maior redução do °Brix foi observada no tratamento com água convencional (controle) em relação aos tratamentos com adição de ozônio na água no nono dia de armazenamento em 20,72%.

Para o potencial hidrogeniônico (pH) de alface, observa-se uma redução ao longo do armazenamento, independentemente do tratamento (Tabela 4). Resultado semelhante pode ser verificado para acidez total titulável. Embora no terceiro e sexto dia de armazenamento para os tratamentos com adição de ozônio na água tenha tido um ligeiro aumento em relação ao controle, no nono dia apenas o tratamento com 5 mg L<sup>-1</sup> de ozônio apresentou valor superior aos demais tratamentos.

**Tabela 4.** Valores médios de sólidos solúveis totais, potencial hidrogeniônico e acidez total titulável de alface para as respectivas combinações de tratamentos e períodos de armazenamento.

<b>Sólidos solúveis totais (°Brix)</b>				
Armazenamento (dias)				
Tratamento	0	3	6	9
Controle	5,86 a	4,31 a	4,31 a	4,17 b
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	5,47 ab	4,70 a	4,70 a	4,91 a
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	4,96 b	4,91 a	4,86 a	5,26 a
<b>Potencial hidrogeniônico (pH)</b>				
Armazenamento (dias)				
Tratamento	0	3	6	9
Controle	6,18 b	5,04 a	5,35 a	5,95 a
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	6,50 a	5,10 a	5,34 a	6,04 a
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	6,20 b	4,99 a	5,10 b	5,85 b
<b>Acidez total titulável</b>				
Armazenamento (dias)				
Tratamento	0	3	6	9
Controle	0,183 a	0,165 b	0,180 b	0,141 b
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	0,164 b	0,188 a	0,208 a	0,131 b
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	0,190 a	0,187 a	0,198 a	0,162 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Apresenta-se na Tabela 5 as equações de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2/r^2$ ) que descrevem o comportamento observado para acidez total titulável, pH

e sólidos solúveis totais ou °Brix durante o armazenamento. As variáveis que não apresentaram efeitos significativo para o fator tempo, foram descritas pela média geral. Observa-se que para os três tratamentos não foi observada influência do tempo de armazenamento nos valores de acidez total titulável. O tempo de armazenamento também não influenciou o °Brix das alfaces submetidas a irrigação com água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> que apresentou um valor médio de 4,99. Em relação aos valores de pH, foi observado uma influência significativa (1 e 5%) do tempo de armazenamento. A variação do pH com o tempo de armazenamento foi descrito por uma função do tipo raiz quadrada para os tratamentos controle e água ozonizada na concentração de 1 mg L<sup>-1</sup>. Para o tratamento de irrigação com água ozonizada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> os valores de pH foram descritos por uma equação polinomial do segundo grau. O comportamento dos valores de sólidos solúveis totais para °Brix, referente ao tratamento controle e irrigação com água ozonizada na concentração de 1 mg L<sup>-1</sup> foram descritos por uma função do tipo raiz quadrada.

**Tabela 5.** Equações ajustadas e coeficientes de determinação ( $R^2/r^2$ ) referente acidez total titulável; pH e sólidos solúveis totais (°Brix) das folhas de alface em função do tempo de armazenamento (Te) para os tratamentos com irrigação por água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>.

Tratamento	Variável	Equações ajustadas	$R^2/r^2$
Controle	Acidez Total	$\hat{y} = 0,168$	-
	pH	$\hat{y} = 6,1845 - 1,464^{**}Te^{1/2} + 0,4612^{**}Te$	0,9995
	°Brix	$\hat{a} = 5,8579 - 1,2669^{*}Te^{1/2} + 0,24122^{*}Te$	0,9990
Água ozonizada (1 mg L <sup>-1</sup> )	Acidez Total	$\hat{y} = 0,173$	-
	pH	$\hat{y} = 6,4813 - 4,7532^{*}Te^{1/2} + 0,9732^{*}Te$	0,9913
	°Brix	$\hat{y} = 5,4756 - 0,7795^{**}Te^{1/2} + 0,1905^{*}Te$	0,9997
Água ozonizada (5 mg L <sup>-1</sup> )	Acidez Total	$\hat{y} = 0,184$	-
	pH	$\hat{y} = 6,1662 - 0,5209^{*}Te + 0,0544^{*}Te^2$	0,9777
	°Brix	$\hat{y} = 4,99$	-

° Significativo a 10% pelo teste “t”; \*\* Significativo a 1% pelo teste “t”; \* Significativo a 5% pelo teste “t”.

### 3.1.3. Cor

Os valores médios obtidos de diferença de cor ( $\Delta E$ ), de tonalidade de cor ( $h^*$ ) e de saturação de cor ( $C^*$ ) de alface para as respectivas combinações de tratamentos e período de armazenamento, são apresentados na Tabela 6. Não foram observados efeitos significativos ( $p > 0.05$ ) dos tratamentos na diferença de cor, tonalidade de cor e saturação de cor para os dias

0; 3; 6 e 9 de armazenamento. Apresenta-se na Tabela 7 as equações de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2/r^2$ ) que descrevem o comportamento observado para diferença de cor ( $\Delta E$ ); tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ ) e saturação de cor ou croma ( $Cr^*$ ) durante o armazenamento.

As variáveis que não apresentaram efeitos significativos para o fator tempo, foram descritas pela média geral. Observa-se que para os três tratamentos não foi observada influência do tempo de armazenamento nos valores da tonalidade da cor no tratamento controle e água ozonizada ( $1 \text{ mg L}^{-1}$ ). As equações ajustadas foram representadas pelos valores médios. O tempo de armazenamento também não influenciou a saturação da cor das alfaces submetidas a irrigação com água ozonizada na concentração de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  e  $5 \text{ mg L}^{-1}$ . Em relação aos valores de diferença da cor, foi observado uma influência significativa do tempo de armazenamento. A variação da diferença da cor em função do tempo de armazenamento foi descrita por uma função do primeiro grau para o controle e água ozonizada ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ ) e função do segundo grau para água ozonizada ( $1 \text{ mg L}^{-1}$ ).

**Tabela 6.** Valores médios obtidos para diferença de cor, tonalidade de cor e saturação de cor de alface para as respectivas combinações de tratamentos e períodos de armazenamento.

<b><math>\Delta E</math> (Diferença de cor)</b>				
Armazenamento (dias)				
<b>Tratamento</b>	0	3	6	9
Controle	0 b	0 b	0 b	0 b
Ozônio ( $1 \text{ mg L}^{-1}$ )	2,63 a	1,39 a	2,58 a	2,30 a
Ozônio ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ )	1,99 a	2,24 a	2,20 a	1,59 a
<b><math>h^*</math> (Tonalidade de cor)</b>				
Armazenamento (dias)				
<b>Tratamento</b>	0	3	6	9
Controle	123,91 a	123,25 a	124,09 a	123,25 a
Ozônio ( $1 \text{ mg L}^{-1}$ )	124,77 a	123,90 a	124,09 a	124,39 a
Ozônio ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ )	124,45 a	124,13 a	124,36 a	124,27 a
<b><math>C^*</math> (Saturação de cor)</b>				
Armazenamento (dias)				
<b>Tratamento</b>	0	3	6	9
Controle	20,15 a	21,93 a	21,27 a	22,14 a
Ozônio ( $1 \text{ mg L}^{-1}$ )	21,20 a	21,38 a	21,20 a	21,80 a
Ozônio ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ )	20,87 a	20,68 a	20,38 a	21,19 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

**Tabela 7.** Equações ajustadas referentes a Diferença de Cor ( $\Delta E$ ); Tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ ) e Saturação de cor ou croma ( $Cr^*$ ) em em função do tempo de armazenamento ( $Te$ ) para os tratamentos com irrigação por água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>.

Tratamento	Variável	Equações ajustadas	R <sup>2</sup> /r <sup>2</sup>
Controle	$\Delta E$	$\hat{y} = 57,55 + 0,5042 * Te$	0,9439
	$h^*$	$\hat{y} = 123,05$	-
	$Cr^*$	$\hat{y} = 20,357 + 0,3496 * Te$	0,7829
Água ozonizada (1 mg L <sup>-1</sup> )	$\Delta E$	$\hat{y} = 60,1567 - 4,1531^{NS} Te + 0,7625^{\circ} Te^2$	0,9427
	$h^*$	$\hat{y} = 124,26$	-
	$Cr^*$	$\hat{y} = 20,69$	-
Água ozonizada (5 mg L <sup>-1</sup> )	$\Delta E$	$\hat{y} = 56,922 + 0,2559^{\circ} Te$	0,6884
	$h^*$	$\hat{y} = 124,99 - 0,2396 * Te$	-
	$Cr^*$	$\hat{y} = 28,76$	-

° Significativo a 10% pelo teste “t”; \*\* Significativo a 1% pelo teste “t”; \* Significativo a 5% pelo teste “t”.

### 3.1.4. Clorofila e extravasamento de membrana

Os valores médios de clorofila e de extravasamento de membrana dos tratamentos ao longo do armazenamento são apresentados na Tabela 8. Observou-se uma variação significativa ( $p < 0.05$ ) dos tratamentos em combinação com o período de armazenamento. O tratamento com adição de 5 mg L<sup>-1</sup> de ozônio na água de irrigação apresentou, nos dias seis e nove de armazenamento, menores valores médios de clorofila nas plantas de alface em relação aos demais tratamentos. A mesma redução foi observada nos valores médios de extravasamento de membrana do tratamento com adição de 5 mg L<sup>-1</sup> de ozônio, no nono dia de armazenamento.

Apresenta-se na Tabela 9 as equações de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2/r^2$ ) que descrevem o comportamento observado para clorofila e extravasamento de membranas de alface durante o armazenamento. O teor de clorofila da alface não apresentou efeito significativo para o fator tempo, entretanto, foi descrita pela média geral em todos os tratamentos. Em relação ao extravasamento de eletrólitos, houve influência significativa do tempo de armazenamento em todos os tratamentos. O extravasamento de eletrólitos em função do tempo de armazenamento foi descrito por funções do tipo raiz quadrada para o controle e tratamento com água ozonizada (1 mg L<sup>-1</sup>) e do primeiro grau para a água ozonizada (5 mg L<sup>-1</sup>).

**Tabela 8.** Valores médios de clorofila e de extravasamento de membrana de alface para as respectivas combinações de tratamentos e períodos de armazenamento.

<b>Clorofila</b>				
Armazenamento (dias)				
<b>Tratamento</b>	0	3	6	9
Controle	6,63 a	6,49 a	6,34 a	6,62 a
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	6,74 a	6,55 a	5,23 a	6,71 a
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	6,72 a	6,49 a	3,07 b	4,29 b

<b>Extravasamento de membrana</b>				
Armazenamento (dias)				
<b>Tratamento</b>	0	3	6	9
Controle	21,98 a	18,40 a	20,08 a	21,40 a
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	24,73 a	19,03 a	20,35 a	24,12 a
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	22,73 a	18,31 a	17,60 a	15,50 b

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

**Tabela 9.** Equações ajustadas referentes a valores médios de clorofila e de extravasamento de membrana de alface em função do tempo de armazenamento (Te) para os tratamentos com irrigação por água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 e 5 mg L<sup>-1</sup>.

Tratamento	Variável	Equações ajustadas	R <sup>2</sup> /r <sup>2</sup>
Controle	Clorofila	$\hat{y} = 6,52$	0,9439
	Extravasamento	$\hat{y} = 21,95 - 4,374 * Te^{1/2} + 1,414 ** Te$	0,9736
Água ozonizada (1 mg L <sup>-1</sup> )	Clorofila	$\hat{y} = 6,30$	-
	Extravasamento	$\hat{y} = 24,762 - 7,7704 * Te^{1/2} + 2,4995 ** Te$	0,9903
Água ozonizada (5 mg L <sup>-1</sup> )	Clorofila	$\hat{y} = 5,14$	-
	Extravasamento	$\hat{y} = 21,892 - 0,7463 * Te$	0,9042

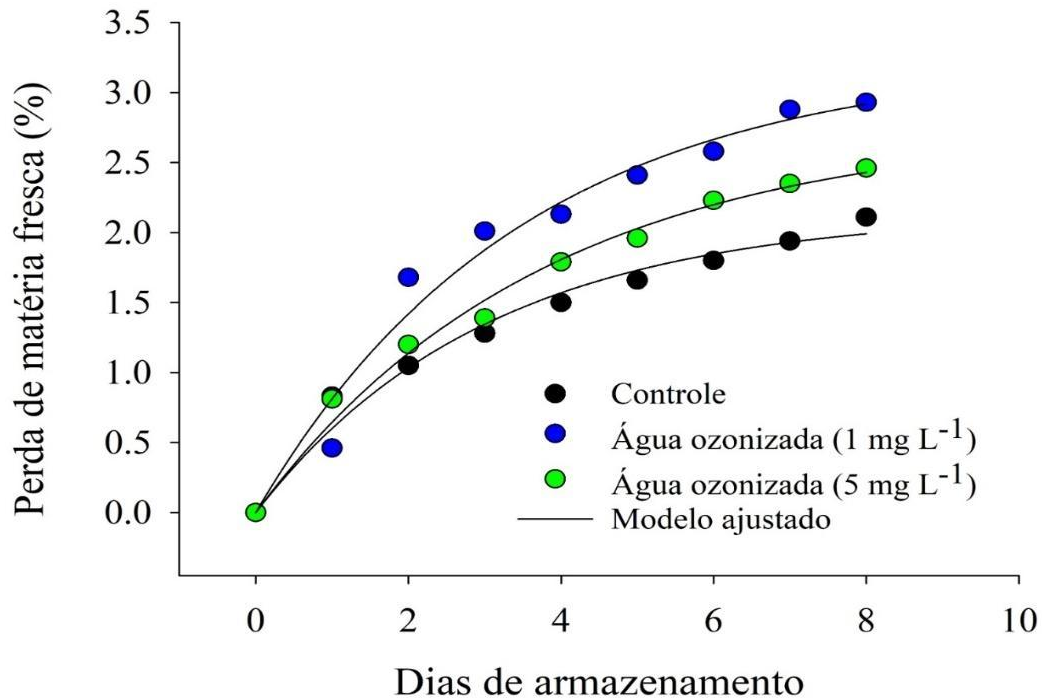
° Significativo a 10% pelo teste “t”; \*\* Significativo a 1% pelo teste “t”; \* Significativo a 5% pelo teste “t”.

### **3.1.5. Perda de matéria fresca de alface**

Na Figura 1 estão representados os valores de perda de matéria fresca de alface ao longo do período de armazenamento. O tratamento com adição de 1 mg L<sup>-1</sup> de ozônio na água apresentou maior perda de matéria fresca durante o período de armazenamento. Por outro lado, o controle apresentou a menor perda de matéria fresca durante o período de armazenamento. No oitavo dia de armazenamento, o controle e o tratamento com adição de 1 mg L<sup>-1</sup> de ozônio na água apresentaram 2,11% e 2,93% de perda de matéria fresca respectivamente.

Apresenta-se na Tabela 10 as equações de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2/r^2$ ) que descrevem o comportamento da perda de matéria fresca durante o armazenamento. A perda da matéria fresca de alface foi influenciada pelo tempo de armazenamento. O comportamento da perda de matéria fresca durante o armazenamento, foi descrito por meio de funções exponenciais.

**Figura 1.** Porcentagem de perda de matéria fresca de alface irrigada com água convencional (controle) e água ozonizada nas concentrações de 1 mg L<sup>-1</sup> e 5 mg L<sup>-1</sup>.



**Tabela 10.** Equação de regressão ajustada e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para perda de matéria fresca, em alface irrigada com água convencional (controle) e água ozonizada (1 mg L<sup>-1</sup> e 5 mg L<sup>-1</sup>), ao longo do armazenamento.

Tratamento	Equações de regressão	$R^2/r^2$
Controle	$\hat{y} = 2,1462^{**}(1-\exp(-0,3286^{**}Te))$	0,9758
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	$\hat{y} = 3,2378^{**}(1-\exp(-0,2887^{**}Te))$	0,9727
Ozônio (5mg L <sup>-1</sup> )	$\hat{y} = 2,7575^{**}(1-\exp(-0,2663^{**}Te))$	0,9896

° Significativo a 10% pelo teste “t”; \*\* Significativo a 1% pelo teste “t”; \* Significativo a 5% pelo teste “t”.

### 3.2. Enzimas

Os valores médios das enzimas catalase (CAT), peroxidase (APX) e peroxidase do ascorbato (POD) são apresentados na Tabela 11. Não foi verificado efeito significativo ( $p > 0.05$ ) dos tratamentos nos valores médios de catalase, peroxidase e peroxidase do ascorbato. Os valores médios de peroxidase variam entre 2979,22 a 3557,05 uM/min/de proteína. Os valores

médios da catalase variam entre 82,61 e 175.10 uM/min/de proteína. Os valores médios de peroxidase do ascorbato na faixa de 18,80 a 54.19 uM/min/de proteína.

**Tabela 11.** Valores médios da atividade enzimática de alface para as respectivas combinações de tratamento.

Tratamento	APX(uM/min/de proteína)	Enzimas	
		CAT(uM/min/de proteína)	POD(uM/min/de proteína)
Controle	3557.05 a	175.10 a	54.19 a
Ozônio (1 mg L <sup>-1</sup> )	2867.23 a	139.92 a	33.08 a
Ozônio (5 mg L <sup>-1</sup> )	2979.22 a	82.61 a	18.80 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

### 3.3. Solo

Apresenta-se na Tabela 12, os valores médios dos parâmetros de análise de qualidade de solo irrigado com água convencional e água ozonizada (1 e 5 mg L<sup>-1</sup>). Houve efeito significativo dos tratamentos ( $p < 0,05$ ) no pH, P, K, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, H+Al, SB, (t), (T) e Fe do solo. Este efeito, foi influenciado pela concentração de ozônio aplicada na água de irrigação. Para tratamentos com 5 mg L<sup>-1</sup> de ozônio houve redução nos valores médios de pH e K em 9% e 18,8% respectivamente. Em tratamentos com 1 mg L<sup>-1</sup> de ozônio, observou-se uma redução dos valores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SB, (t), (T) e Fe do solo em 15,48%, 24,31%, 24,31%, 19,85% e 35,21% respectivamente. Não houve efeito significativo dos tratamentos ( $p > 0,05$ ) no V, Mo, P-rem, Zn, Mn e Cu do solo.

**Tabela 12.** Valores médios dos parâmetros de análise de qualidade de solo irrigado com água convencional e água ozonizada (1 e 5 mg L<sup>-1</sup>)

<b>Tratamento</b>	pH	P (mg/dm <sup>3</sup> )	K (mg/dm <sup>3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmol /dm <sup>3</sup> )
Controle	6,66 a	197,33a	780 a	9,28 a
O3 (1 mg L <sup>-1</sup> )	6,46 a	141,28b	850 a	6,01b
O3 (5 mg L <sup>-1</sup> )	6,06b	200 <sup>a</sup>	633,33b	10,23 a

<b>Tratamento</b>	Mg <sup>2+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	H+Al(cmol /dm <sup>3</sup> )	SB(cmol /dm <sup>3</sup> )	(t)( cmol /dm <sup>3</sup> )
Controle	3,94 b	2,31 b	15,22 a	15,22 a
O3 (1 mg L <sup>-1</sup> )	3,33 c	2,53ab	11,52 b	11,52 b
O3 (5 mg L <sup>-1</sup> )	4,66 a	3,74 <sup>a</sup>	16,51 a	16,51 a

<b>Tratamento</b>	(T)(cmol /dm <sup>3</sup> )	V(%)	Mo(dag/kg)	P-rem (mg/l)
Controle	17,53 b	86,83 a	5,83 a	45,80 a
O3 (1 mg L <sup>-1</sup> )	14,05 c	82,03 a	5,41 a	44,6 a
O3 (5 mg L <sup>-1</sup> )	20,25 a	81,56 a	5,56 a	54,12 a

<b>Tratamento</b>	Zn(mg/dm <sup>3</sup> )	Fe(mg/dm <sup>3</sup> )	Mn(mg/dm <sup>3</sup> )	Cu(mg/dm <sup>3</sup> )
Controle	22,56 a	43,57 a	108,46 a	3,63 a
O3 (1 mg L <sup>-1</sup> )	16,03 a	28,23 b	117,80 a	2,20 a
O3 (5 mg L <sup>-1</sup> )	25,00 a	51,56 a	87,50 a	4,26 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4. DISCUSSÃO

A utilização do ozônio na produção agrícola aumentou significativamente nos últimos anos. A sua utilização tem sido para diversas finalidades, como desinfecção de solo e água, controle de pragas, estimulação de crescimento e armazenamento de produtos (Shi *et al.*, 2023). A utilização do ozônio, pode reduzir a necessidade de pesticidas e outras substâncias químicas, melhorar a qualidade dos produtos e aumentar a produtividade (Liu *et al.*, 2019).

No estudo, o ozônio ( $5\text{mg L}^{-1}$ ) teve efeito significativo na altura, diâmetro e número de folhas de plantas de alface. Nenhum efeito foi observado no tratamento com  $1\text{ mg L}^{-1}$  de ozônio na altura, diâmetro e número de folhas de plantas de alface. Os resultados observados, podem ter sido influenciados pela aplicação direta da água ozonizada no solo (Raub *et al.*, 2001). Este resultado sugere que concentrações adequadas de ozônio, podem aumentar a altura, o diâmetro e o número de folhas de alface. Assim, a presença de  $5\text{mg L}^{-1}$  de ozônio na água de irrigação, pode ter aumentado a disponibilidade de oxigênio para as raízes, melhorando a respiração radicular e promover o crescimento da planta. Entretanto, o ozônio tem capacidade de aumentar a atividade e síntese de hormônios vegetais e estimular o crescimento da planta. O ozônio, também pode facilitar a transferência de nutrientes para as plantas, favorecendo o seu crescimento (Sey *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2019).

Os resultados do estudo, assemelham-se aos resultados observados por Zhao (2024), no qual o ozônio influenciou positivamente no crescimento da alface. Um resultado similar, foi observado no crescimento inicial de plantas de tomate cultivadas em um sistema hidropônico com água ozonizada (Ohashi-Kaneko *et al.*, 2009). No estudo realizado por Graham *et al.* (2011), foi observado um aumento da área foliar em tomates tratados com água ozonizada em concentrações maiores ( $3,0\text{ mg L}^{-1}$ ). Estes resultados divergem dos resultados observados por Veronico *et al.* (2017), tendo observado um efeito negativo nos parâmetros de crescimento em tomate irrigado com água ozonizada.

Os resultados do estudo indicam que a aplicação de água ozonizada influenciou significativamente o diâmetro, comprimento radicular e a matéria seca de raiz. Isso sugere que o ozônio pode modular determinados aspectos do crescimento radicular, alterando o comprimento das raízes. O maior diâmetro radicular observado no tratamento com água ozonizada a  $5\text{ mg L}^{-1}$  sugere que concentrações mais elevadas de ozônio podem induzir um crescimento mais robusto das raízes. Esse efeito pode estar relacionado à ação das espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas pela dissolução do ozônio na água, que, em concentrações moderadas, atuam como sinalizadores fisiológicos ativando rotas metabólicas associadas ao

crescimento celular (Raub *et al.*, 2001; Najarian *et al.*, 2018). Além disso, o ozônio pode contribuir para a melhora da disponibilidade de oxigênio no meio, promovendo condições favoráveis para o desenvolvimento radicular (Zhou *et al.*, 2022). A tendência observada nos tratamentos com 1 mg L<sup>-1</sup> e 5 mg L<sup>-1</sup> de água ozonizada mostrou valores superiores ao controle. Isso reforça a hipótese de que doses adequadas de ozônio podem estimular o engrossamento das raízes. Possivelmente, esse efeito ocorre como um mecanismo adaptativo que favorece a absorção de água e nutrientes. Em relação à matéria seca de raiz, o tratamento com 5 mg L<sup>-1</sup> apresentou valores significativamente superior aos demais, enquanto o tratamento com 1 mg L<sup>-1</sup> não diferiu estatisticamente do controle. Esse resultado indica que concentrações mais elevadas de ozônio podem favorecer a alocação de biomassa para as raízes, promovendo maior acúmulo de matéria seca. Isso pode estar associado à ativação de respostas antioxidantes e ao aumento da eficiência na absorção de água e nutrientes, processos que influenciam diretamente a biomassa radicular (Najarian *et al.*, 2018; Tahamolkonan *et al.*, 2022). O fato de que concentrações mais baixas de ozônio (1 mg L<sup>-1</sup>) não resultaram em diferenças significativas em relação ao controle sugere que existe um limiar mínimo de exposição para que os efeitos benéficos do ozônio sejam observados. Este resultado também pode estar associado ao tipo de textura de solo (argiloso) usado no estudo. Em solos argilosos a penetração de água no solo é mais lenta, o que pode ter influenciado na eficiência do ozônio devido a sua instabilidade. Entretanto, concentrações altas de ozônio podem alterar as funções fisiológicas da raiz, como respiração e absorção de água e nutrientes (Nouchi *et al.*, 1991).

Por outro lado, a diferença significativa entre os tratamentos em relação ao comprimento de raiz indica que o ozônio, na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> atuou diretamente no alongamento radicular. A presença do ozônio pode ter aumentado a disponibilidade de oxigênio e reduzido o estresse oxidativo, estimulando o crescimento da raiz. Apesar do alongamento de raiz ser altamente dependente de fatores hormonais, como o balanço entre auxinas e citocininas, o ozônio induziu alterações que influenciaram no alongamento e aumento do diâmetro e da matéria seca da raiz (Tanimoto, 2005). Além disso, é possível que o ozônio tenha promovido um crescimento das raízes, um aumento expressivo no seu comprimento, refletindo uma adaptação fisiológica das plantas ao ambiente tratado.

Em estudo anterior, pesquisadores descreveram que o ozônio melhorou a respiração das raízes, aumentou a absorção de nutrientes e a produção da biomassa (Ohashi-Kaneko *et al.*, 2009). Resultados semelhantes foram observados em mudas de pimentão irrigadas com água ozonizada, onde mudas tratadas apresentaram maior proporção de raiz em relação ao

comprimento (Martínez-Sánchez e Aguayo, 2019). Em contraste, na cultura de tomate irrigada com água ozonizada por quatro dias, foi observado um efeito negativo nos parâmetros de crescimento (Veronico *et al.*, 2017). Os pesquisadores Graham *et al.* (2009) não observaram nenhum efeito no sistema radicular em tratamentos com ozônio (10,4 a 31,2  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), mas constataram que concentrações mais elevadas reduziram o peso seco do sistema radicular em diferentes espécies vegetais.

A influência da água ozonizada sobre os parâmetros de qualidade de alface ao longo do armazenamento também foi evidente. A dinâmica dos sólidos solúveis totais, pH e acidez titulável sugere que o ozônio impacta diretamente a composição química e a estabilidade dos metabólitos durante o período de estocagem. O tratamento com 5  $\text{mg L}^{-1}$  promoveu maior estabilidade na acidez titulável e nos sólidos solúveis totais ao longo do tempo, enquanto a influência do tempo de armazenamento foi mais evidente nos tratamentos controle e com 1  $\text{mg L}^{-1}$ . Esses achados reforçam a hipótese de que o ozônio pode ser uma ferramenta eficaz para prolongar a vida útil e manter a qualidade de produtos armazenados, minimizando variações indesejáveis ao longo do tempo (Siteo *et al.*, 2025).

Os resultados mostram que houve efeito significativo do tempo de armazenamento no pH e sólidos solúveis da alface. No entanto, observou-se um aumento diário dos valores de pH e sólidos solúveis. Esta tendência indica que fatores como respiração celular, decomposição enzimática, perda de umidade e contaminação por microrganismos foram observados ao longo do tempo de armazenamento, contribuindo para o aumento de pH e teor de sólidos solúveis na alface.

A ausência de efeito significativo dos tratamentos sobre a cor sugere que o ozônio, nas concentrações utilizadas, não interferiu diretamente nos pigmentos responsáveis pela coloração, pelo menos a curto prazo. No entanto, a influência do tempo de armazenamento indica que mudanças naturais na cor ocorreram independentemente do tratamento. A estabilidade da cor em diferentes condições reforça a hipótese de que o ozônio não acelerou a degradação dos pigmentos, permitindo a manutenção da integridade visual do produto ao longo do tempo (Miller *et al.*, 2013; Bambalele *et al.*, 2023).

A clorofila, um dos principais pigmentos vegetais, está diretamente relacionada ao crescimento e desenvolvimento da planta (Chitarra e Chitarra, 2005). Seu teor é um parâmetro essencial na avaliação da qualidade pós-colheita, sendo um indicador da senescência e do grau de maturação da alface (Silva *et al.*, 2007). No presente estudo, a redução da clorofila observada nos tratamentos com maior concentração de ozônio ao longo do tempo sugere que esse gás pode

induzir a degradação dos pigmentos clorofilínicos. Esse efeito pode estar associado ao aumento da atividade oxidativa, resultando na conversão da clorofila em feofitina ou outros derivados não funcionais. Por outro lado, a manutenção de níveis mais elevados de clorofila nos tratamentos controle e com menor concentração de ozônio indica que uma exposição moderada pode preservar a estrutura dos cloroplastos por mais tempo, retardando a perda da coloração verde (Miller *et al.*, 2013; Bambalele *et al.*, 2023).

A falta de efeito do tempo de armazenamento no teor de clorofila da alface foi evidente nos resultados do estudo. Essa tendência sugere que, dependendo das condições de armazenamento e manuseio adequado o tempo de armazenamento não pode impactar a síntese de clorofila da alface, mantendo a qualidade do produto ao longo do tempo.

A integridade celular também foi influenciada pelos tratamentos, como evidenciado pelo extravasamento de eletrólitos. No nono dia de armazenamento, o tratamento controle e o tratamento com a menor concentração de ozônio apresentaram um extravasamento significativamente maior, sugerindo que a integridade celular foi melhor preservada na concentração de 5 mg L<sup>-1</sup> de ozônio. Esse achado indica que o ozônio, quando aplicado em concentrações adequadas, pode estabilizar as membranas celulares, reduzindo danos oxidativos que comprometem a seletividade e resultam no vazamento de íons e metabólitos (Wang *et al.*, 2023). Essa preservação celular pode estar relacionada à ação antimicrobiana do ozônio e à sua capacidade de minimizar a peroxidação lipídica quando aplicado em doses controladas (Liu *et al.*, 2021; Kaur *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2024).

O efeito do tempo de armazenamento no extravasamento de eletrólitos de alface foi evidente. Essa tendência sugere que ao decorrer do tempo, as membranas celulares podem se tornar mais permeáveis, facilitando a liberação de eletrólitos para o meio externo. O fenômeno também pode estar relacionado a decomposição enzimática e perda de integridade celular de alface, resultando na perda da qualidade e redução da vida útil da alface.

A perda de matéria fresca foi significativamente influenciada pelo tempo de armazenamento, apresentando coeficientes de determinação elevados em todos os tratamentos. Isso sugere que esse parâmetro está fortemente associado à progressão temporal. O tratamento com maior concentração de ozônio apresentou um coeficiente ligeiramente superior, o que pode indicar uma menor taxa de degradação metabólica ou respiração celular. Isso sugere que o ozônio pode reduzir a conversão de compostos estruturais em energia e vapor de água, funcionando como um possível regulador do metabolismo pós-colheita e minimizando perdas fisiológicas ao longo do tempo (Shezi *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2024; Siteo *et al.*, 2025).

Os resultados evidenciam o efeito significativo do tempo de armazenamento na perda de matéria fresca de alface com o tempo. O resultado sugere que o tempo de armazenamento pode reduzir o teor de matéria fresca da alface por dia. Esta perda pode ser influenciada por fatores como respiração celular, desidratação, decomposição enzimática e atividade microbiana. Estes fatores contribuem para a perda da qualidade, redução da vida útil e mudanças na textura e no sabor da alface.

A atividade das enzimas antioxidantes catalase (CAT), peroxidase (APX) e peroxidase do ascorbato (POD) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, sugerindo que as concentrações de ozônio utilizadas não induziram respostas adaptativas intensas relacionadas ao estresse oxidativo. Normalmente, o aumento da atividade dessas enzimas ocorre quando há um desequilíbrio redox severo, exigindo a ativação de mecanismos celulares para mitigar o estresse oxidativo (Lei *et al.*, 2016; Meitha *et al.*, 2020). A estabilidade enzimática observada sugere que as concentrações utilizadas não foram suficientes para desencadear uma resposta antioxidante expressiva, indicando que o ozônio foi aplicado dentro de um intervalo seguro, sem comprometer a homeostase celular.

A catalase, uma enzima essencial no processo de desintoxicação do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), desempenha um papel fundamental na regulação das espécies reativas de oxigênio (ROS). Embora o aumento da atividade dessa enzima esteja associado à mitigação do estresse oxidativo, concentrações elevadas de ozônio podem levar à produção excessiva de ROS, afetando a capacidade antioxidante da planta e causando danos celulares (Caregnato *et al.*, 2013). No entanto, os resultados deste estudo diferem daqueles relatados por Martínez-Sánchez e Aguayo (2019), que observaram um aumento na atividade da catalase em capim capscum irrigado com água ozonizada. Resultados semelhantes foram relatados por Mishra *et al.* (2013) e Veronico *et al.* (2017), que também verificaram um aumento na atividade dessa enzima em tratamentos com ozônio. Por outro lado, Guo e Wang (2017) observaram a mesma tendência de elevação da catalase em repolho tratado com ozônio, reforçando que a resposta enzimática pode variar de acordo com a cultura e as condições experimentais.

Dessa forma, embora estudos anteriores tenham demonstrado um aumento na atividade da catalase sob a influência do ozônio, os resultados obtidos neste trabalho sugerem que as concentrações testadas não induziram essa resposta. Isso reforça a necessidade de uma definição criteriosa das doses aplicadas, uma vez que concentrações mais elevadas podem favorecer a preservação da integridade celular e retardar processos fisiológicos adversos. No entanto, é fundamental equilibrar os benefícios da conservação com os possíveis impactos sobre

os parâmetros bioquímicos, garantindo uma aplicação eficiente dessa tecnologia na manutenção da qualidade da alface.

Os resultados do estudo evidenciam um efeito significativo dos tratamentos com ozônio no pH, P, K,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , H+Al, SB, (t), (T) e Fe do solo. Os resultados sugerem que dependendo da concentração aplicada, o ozônio pode ter impacto nos indicadores dos parâmetros de análise de solo. Em concentrações mais elevadas, o ozônio pode reagir com matéria orgânica e outros componentes do solo, reduzindo o pH e o K do solo (Díaz-López *et al.*, 2021). Em solos argilosos, o ozônio pode alterar o pH do solo, tornando-o mais ácido e perda de K. Em concentrações mais baixas, o ozônio pode reduzir o  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, (t), (T) e Fe do solo. O fenômeno pode estar associado a capacidade do ozônio de liberar os nutrientes fixados no solo e aumentar a sua disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , e ajudar a solubilizar o ferro (Fe) para o crescimento da planta. A presença do ozônio também pode aumentar a soma de bases (SB) e melhorar a fertilidade do solo, para além de afetar a capacidade de troca catiônica, influenciando na disponibilidade de nutrientes. A irrigação com água ozonizada, pode contribuir para o aumento de agentes oxidativos que contribuem para a ocorrência de reações com matéria orgânica, liberando nutrientes, sais e outros compostos (Ghahrchi e Rezaee, 2020; Rizzo *et al.*, 2020).

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados do estudo indicam que a irrigação com água ozonizada favoreceu o desenvolvimento da alface. A adição da concentração de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  de ozônio na água destacou-se por promover um maior diâmetro radicular e um aumento no teor de matéria seca da raiz. Além disso, a irrigação com água ozonizada influenciou positivamente os parâmetros de qualidade física e química de alface.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFSAH-HEJRI, L.; HAJEB, P.; EHSANI, R. J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 19(4), 1777-1808, 2020. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12594>.
- AGUAYO, E.; ESCALONA, V.; SILVEIRA, A. C.; ARTÉS, F. Quality of tomato slices disinfected with ozonated water. **Food Science and Technology International**, 20(3), 227-235, 2014. <https://doi.org/10.1177/1082013213482846>.
- AHMED, H. A.; TONG, Y., LI, L.; SAHARI, S. Q.; ALMOGAHED, A. M.; CHENG, R. Integrative effects of CO<sub>2</sub> concentration, illumination intensity and air speed on the growth, gas exchange and light use efficiency of lettuce plants grown under artificial lighting. **Horticulturae**, 8(3), 270, 2022. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030270>.
- ÁLVARES, V. S.; FINGER, F. L.; SANTOS, R. C.; SILVA NEGREIROS JR., J.; CASALI, V. W. Efeito do pré-resfriamento na pós-colheita de folhas de salsa. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v. 5, n. 2, p. 31–34, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452007000300026>.
- BAMBALELE, N. L.; MDITSHWA, A.; MAGWAZA, L. S.; TESFAY, S. Z. Postharvest effect of gaseous ozone on physicochemical quality, carotenoid content and shelf-life of mango fruit. **Cogent Food & Agriculture**, 9(1), 2247678, 2023. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2247678>.
- CALLEJÓN, R. M.; RODRÍGUEZ-NARANJO, M. I.; UBEDA, C.; HORNEDO-ORTEGA, R.; GARCIA-PARRILLA, M. C.; TRONCOSO, A. M. Reported foodborne outbreaks due to fresh produce in the United States and European Union: trends and causes. **Foodborne Pathogens and Disease**, v. 12, n. 1, p. 32–38, 2015. <https://doi.org/10.1089/fpd.2014.1821>.
- CAREGNATO, F. F., BORTOLIN, R. C., JUNIOR, A. M. D., & MOREIRA, J. C. F. Exposure to elevated ozone levels differentially affects the antioxidant capacity and the redox homeostasis of two subtropical *Phaseolus vulgaris* L. varieties. **Chemosphere**, 93(2), 320-330, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.04.084>.
- CASTRO-IBÁÑEZ, I.; GIL, M. I.; TUDELA, J. A.; IVANEK, R.; ALLENDE, A. Assessment of microbial risk factors and impact of meteorological conditions during production of baby spinach in the Southeast of Spain. **Food Microbiology**, v. 49, p. 173–181, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.02.004>.
- DÍAZ-LÓPEZ, M.; NICOLÁS, E.; LÓPEZ-MONDÉJAR, R.; GALERA, L.; GARRIDO, I.; FENOLL, J.; BASTIDA, F. Combined ozonation and solarization for the removal of pesticides from soil: Effects on soil microbial communities. **Science of the Total Environment**, 758, 143950, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143950>.
- FLORES, P.; HERNANDEZ, V.; FENOLL, J.; HELLIN, P. Pre-harvest application of ozonated water on broccoli crops: Effect on head quality. **Journal of Food Composition and Analysis**, 83, 103260, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103260>.
- FUJIWARA, K.; KADOYA, M.; HAYASHI, Y.; KURATA, K. Effects of ozonated water application on the population density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in soil columns.

**Ozone: science & engineering**, v. 28, n. 2, p. 125-127, 2006. <https://doi.org/10.1080/01919510600559435>.

GHAHRCHI, M.; REZAEE, A. Electro-catalytic ozonation for improving the biodegradability of mature landfill leachate. **Journal of environmental management**, 254, 109811., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109811>.

GIL, M. I.; SELMA, M.V.; SUSIOW, T.; JACXSENS, L. Pre-and Postharvest Preventive Measures and Intervention Strategies to Control Microbial Food Safety Hazards of Fresh Leafy Vegetables. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, p. 453–468, 2015. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657808>.

GLOWACZ, M.; REES, D. The practicality of using ozone with fruit and vegetables. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 14, p. 4637–4643, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7763>.

GRAHAM, T.; ZHANG, P.; WOYZBUN, E.; DIXON, M. Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 3, p. 464–471, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.019>.

GUO, Z.; WANG, Q. Efficacy of ozonated water against *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* in *Brassica campestris* ssp. *chinensis*. **Ozone: Science & Engineering**, 39(2), 127-136, 2017. <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1270744>.

KAUR, K.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A.; ISHWARYA, S. P.; ZALPOURI, R.; MAHANTI, N. K. Impact of ozone treatment on food polyphenols—A comprehensive review. **Food Control**, 142, 109207, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109207>.

LABAIR, H.; NEMMICH, S.; CHARIF, K. C.; RAMDANI, N. N.; NASSOUR, K.; REGUIG, M.; TILMATINE, A. Investigating the synergistic impact of ozonated water irrigation and organic fertilization on tomato growth. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 36, 1-9, 2024. <https://orcid.org/0000-0003-1082-9595>

LEE, R. J.; BHANDARI, S. R.; LEE, G.; LEE, J. G. Optimization of temperature and light, and cultivar selection for the production of high-quality head lettuce in a closed-type plant factory. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, 60, 207-216, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0118-8>.

LEI, X. G.; ZHU, J. H.; CHENG, W. H.; BAO, Y.; HO, Y. S.; REDDI, A. R.; HOLMGREN, A. ARNÉR, E. S. J. Paradoxical roles of antioxidant enzymes: basic mechanisms and health implications. **Physiological reviews**, 96(1), 307-364, 2016. <https://doi.org/10.1152/physrev.00010.2014>.

LIU, C.; CHEN, C.; ZHANG, Y.; JIANG, A.; HU, W. Aqueous ozone treatment inhibited degradation of cellwall polysaccharides in fresh-cut apple during cold storage. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 67, 102550, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102550>.

MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, A.; AGUAYO, E. Effect of irrigation with ozonated water on the quality of capsicum seedlings grown in the nursery. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 547-555, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.027>.

MASUTOMI, Y.; KINOSE, Y.; TAKIMOTO, T.; YONEKURA, T.; OUE, H.; KOBAYASHI, K. Ozone changes the linear relationship between photosynthesis and stomatal conductance and

- decreases water use efficiency in rice. **Science of the Total Environment**, 655, 1009-1016, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.132>.
- MEITHA, K.; PRAMESTI, Y.; SUHANDONO, S. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits. **International journal of food science**, 2020(1), 8817778, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>.
- MILLER, F. A.; SILVA, C. L.; BRANDAO, T. R. A review on ozone-based treatments for fruit and vegetables preservation. **Food Engineering Reviews**, 5(2), 77-106, 2013. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-013-9064-5>.
- MISHRA, A. K.; RAI, R.; AGRAWAL, S. B. Individual and interactive effects of elevated carbon dioxide and ozone on tropical wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars with special emphasis on ROS generation and activation of antioxidant defence system, 2013. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/17098>.
- NAJARIAN, M.; MOHAMMADI-GHEHSAREH, A.; FALLAHZADE, J.; PEYKANPOUR, E. Responses of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to ozonated water under varying drought stress intensities. **Journal of Plant Nutrition**, 41(1), 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346665>.
- NOUCHI, T.; TANAKA, Y.; TSUKADA, T.; SATO, C.; MARUMO, F. Appearance of  $\alpha$ -smooth-muscle-actin-positive cells in hepatic fibrosis. **Liver**, 11(2), 100-105, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0676.1991.tb00499.x>.
- PACHEPSKY, Y.; SHELTON, D. R.; MCLAIN, J. E.; PATEL, J.; MANDRELL, R. E. Irrigation waters as a source of pathogenic microorganisms in produce: a review. **Advances in agronomy**, 113, 75-141., 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00002-6>.
- PARK, S.; NAVRATIL, S.; GREGORY, A.; BAUER, A.; SRINATH, I.; SZONVI, B.; NIGHTINGALE, K.; ANCISO, J.; JUN, M.; HAN, D.; LAWHON, S.; IVANEK, R. Farm management, environment, and weather factors jointly affect the probability of spinach contamination by generic *Escherichia coli* at the preharvest stage. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 80, p. 2504–2515, 2014. <https://doi.org/10.1128/AEM.03643-13>.
- PENG, X.; DONG, C.; ZHANG, N.; ZHENG, P.; BAI, Y.; JI, H.; YU, J.; BAN, Z.; CHEN, C.; HU, Y. Effect of ozone treatment on the decay and cell wall metabolism during the postharvest storage of cantaloupe. **Scientia Horticulturae**, 331, 113119, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113119>.
- PRABHA, V. I. T. H. U.; BARMA, R. D.; SINGH, R. A. N. J. I. T.; MADAN, A. Ozone technology in food processing: A review. **Trends in Biosciences**, 8(16), 4031-4047, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/305399037\\_Ozone\\_Technology\\_in\\_Food\\_Processing\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/305399037_Ozone_Technology_in_Food_Processing_A_Review). Acesso em: 10 abr. 2023.
- RISOLI, S.; LAURIA, G. Ozonated water application as an innovative tool for elicitation of plant defense response: a minireview. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, 28, 100375, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100375>.
- RIZZO, L.; GERNJAK, W.; KRZEMINSKI, P.; MALATO, S.; MCADELL, C. S.; PEREZ, J. A. S.; SCHARR, H.; FATTA-KASSINOS, D. Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU

countries. **Science of the Total Environment**, 710, 136312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>.

RODRIGUES, R. Q.; LOIKO, R.; MINEIA, PAULA, C. M. D.; HESSEL, T.; JACXSENS, L.; UYTLENDIAEL, M.; BENDER, R.J. TONTO, E. C. Microbiological contamination linked to implementation of good agricultural practices in the production of organic lettuce in Southern Brazil. **Food Control**, v. 42, p. 152–164, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.043>.

ROUX, B. L.; LAAN, M. V. D.; VAHRMEIJER, T.; ANNANDALE, J. G.; BRISTOW, K. L. Estimating water footprints of vegetable crops: Influence of growing season, solar radiation data and functional unit. **Water**, v. 8, n. 10, p. 473, 2016. <https://doi.org/10.3390/w8100473>.

SHEZI, S.; MAGWAZA, L. S.; MDITSHWA, A.; TESFAY, S. Z. Changes in biochemistry of fresh produce in response to ozone postharvest treatment. **Scientia Horticulturae**, 269, 109397, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109397>.

SILVA, J. M.; ONGARELLI, M. G.; AGUILA, J. S.; SASAKI, F. F.; KLUGE, R. A. Métodos de determinação de clorofila em alface e cebolinha minimamente processadas. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, México**, v. 8, n. 2, p. 53–59, 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/813/81311221001.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

SITOE, E. D. P. E.; USBERTI, F. C. S.; AGUIAR, R. H.; & PEDRO, C. Post-Harvest Quality of Red Bell Pepper: Effect of Ozonized Mist and Protective Film. **Food Biophysics**, 20(1), 16, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09909-8>.

SKOWRON, K.; WAŁECKA-ZACHARSKA, E.; GRUDLEWSKA, K.; BIAŁUCHA, A.; WIKTORCZYK, N.; BARTKOWSKA, A.; KOWALSKA, M.; KRUSZEWSKI, S.; GOSPODAREK-KOMKOWSKA, E. Biocidal Effectiveness of Selected Disinfectants Solutions Based on Water and Ozonated Water against *Listeria monocytogenes* Strains. **Microorganisms**, v. 7, n. 5, 2019. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7050127>.

TABAN, B. M.; HALKMAN, A. K. Do leafy green vegetables and their ready-to-eat [RTE] salads carry a risk of foodborne pathogens? **Anaerobe**, v. 17, n. 6, p. 286–287, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.04.004>.

TAHAMOLKONAN, M.; GHAHSAREH, A. M; ASHTARI, M. K.; HONARJOO, N. Tomato (*Solanum lycopersicum*) growth and fruit quality affected by organic fertilization and ozonated water. **Protoplasma**, v. 259, p. 291-299, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00709-021-01657-7>

TANIMOTO, E. Regulation of root growth by plant hormones roles for auxin and gibberellin. **Critical reviews in plant sciences**, 24(4), 249-265, 2005. <https://doi.org/10.1080/07352680500196108>.

TERAO, D.; LIMA NECHET, K.; FRIGHETTO, R. T. S.; SASAKI, F. F. C. Ozonated water combined with heat treatment to control the stem-end rot of papaya. **Scientia horticulturae**, 257, 108722, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108722>.

TERAO, D.; DE LIMA NECHET, K.; FRIGHETTO, R. T. S.; SASAKI, F. F. C. Ozonated water combined with heat treatment to control the stem-end rot of papaya. **Scientia horticulturae**, 257, 108722, 2019.

VERONICO, P.; PACIOLLA, C.; SASANELLI, N.; DE LEONARDIS, S.; MELILLO, M. T. Ozonated water reduces susceptibility in tomato plants to *Meloidogyne incognita* by the

modulation of the antioxidant system. **Molecular Plant Pathology**, 18(4), 529-539, 2017. <https://doi.org/10.1111/mpp.12413>.

WANG, Y.; LI, Y.; YANG, S.; LI, C.; LI, L., GAO, S.; WU, Z. Mechanism of ozone treatment in delayed softening of fresh-cut kiwifruit during storage. **Postharvest Biology and Technology**, 204, 112469, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112469>.

ZHUANG, M.; LAM, S. K.; LI, Y.; CHEN, S. Elevated tropospheric ozone affects the concentration and allocation of mineral nutrients of two bamboo species. **Science of The Total Environment**, 577, 231-235, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.169>.