



Uso del ozono en sistemas hidropónicos de hortalizas de hoja: evidencia reciente y perspectivas futuras

Use of Ozone in Hydroponic Systems for Leafy Vegetables: Recent Evidence and Future Perspectives

William Huamán-Tovar¹, Wilfredo Irrazabal Urruchi², Heydi Amparo Quispe Castro¹,
Salomón Vivanco Aguilar¹, Yesica Yohana Hilario Román¹

¹Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú

²Instituto Brasileiro de Ozônio e Suas Aplicações, São José dos Campos, Brasil

Autor de correspondencia

William Huamán-Tovar

Historial del artículo

Recibido el 25 de julio de 2025 | Revisado el 29 de septiembre de 2025 | Aceptado el 19 de
diciembre de 2025

Referencia del artículo

Huamán-Tovar, W., Irrazabal Urruchi, W., Quispe Castro, H. A., Vivanco Aguilar, S., & Hilario Román, Y. Y. (2025). Uso del ozono en sistemas hidropónicos de hortalizas de hoja: evidencia reciente y perspectivas futuras. *Revista Altoandina de Ciencias Agrarias*, 1(2), pp. 97-106.
<https://doi.org/10.54943/recialcia.845>

RESUMEN

La agricultura hidropónica se ha consolidado en las últimas décadas como una alternativa productiva sostenible frente a los desafíos asociados a la seguridad alimentaria, la eficiencia en el uso de los recursos y la demanda creciente de alimentos inocuos. En este marco, las hortalizas de hoja, tales como la lechuga (*Lactuca sativa*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) y la acelga (*Beta vulgaris*), adquieren especial relevancia debido a su corto ciclo productivo, su alta demanda comercial y su significativo aporte nutricional. El objetivo de la presente revisión fue analizar de manera crítica los avances recientes y las perspectivas de aplicación del ozono en la producción hidropónica de hortalizas de hoja. Para ello, se realizó una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2019 y 2024, mediante la consulta de bases de datos indexadas de alto impacto, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SciELO, así como la plataforma Google Scholar. Se emplearon combinaciones de palabras clave relacionadas con el ozono, la hidroponía, las hortalizas de hoja y la calidad

poscosecha, excluyéndose estudios no vinculados a sistemas hidropónicos o publicados fuera del período establecido. Los resultados indican que el ozono, cuando se aplica en dosis adecuadamente controladas, contribuye de manera significativa a la mejora del crecimiento vegetal, al fortalecimiento de la bioseguridad del sistema hidropónico y a la conservación de la calidad poscosecha. No obstante, la evidencia también demuestra que exposiciones excesivas o mal calibradas pueden inducir estrés oxidativo y deterioro tisular en los cultivos. Asimismo, se identifican avances tecnológicos relevantes, como el uso de micro- y nanoburbujas de ozono y su integración con tecnologías complementarias, orientadas a optimizar la eficiencia y seguridad de su aplicación. En conjunto, la literatura analizada permite concluir que el ozono constituye una herramienta promisorio para el desarrollo de sistemas hidropónicos sostenibles. Sin embargo, su adopción a escala productiva requiere la estandarización de protocolos de aplicación específicos para cada cultivo, considerando dosis, tiempos de exposición y condiciones operativas, a fin de maximizar sus beneficios y minimizar efectos adversos.

Palabras clave: aplicación de ozono; sistemas hidropónicos; hortalizas de hoja; calidad poscosecha; fisiología vegetal; seguridad microbiana

ABSTRACT

Hydroponic agriculture has become established over recent decades as a sustainable production alternative in response to challenges related to food security, resource-use efficiency, and the growing demand for safe and high-quality food. Within this framework, leafy vegetables such as lettuce (*Lactuca sativa*), spinach (*Spinacia oleracea*), and chard (*Beta vulgaris*) are of particular relevance due to their short production cycles, high commercial demand, and significant nutritional value. The objective of this review was to critically analyze recent advances and future perspectives regarding the application of ozone in the hydroponic production of leafy vegetables. To this end, a systematic review of scientific literature published between 2019 and 2024 was conducted using indexed databases, including Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SciELO, as well as the Google Scholar platform. Combinations of keywords related to ozone, hydroponics, leafy vegetables, and postharvest quality were employed, while studies not related to hydroponic systems or published outside the established time frame were excluded. The results indicate that ozone, when applied at properly controlled doses, significantly contributes to enhanced plant growth, improved biosecurity of hydroponic systems, and preservation of postharvest quality. However, the evidence also demonstrates that excessive or poorly calibrated exposure can induce oxidative stress and cause tissue damage in crops. In addition, relevant technological advances were identified, including the use of ozone micro- and nanobubbles and their integration with complementary technologies aimed at optimizing application efficiency and safety. Overall, the analyzed literature allows the conclusion that ozone represents a promising tool for the development of sustainable hydroponic systems. Nevertheless, its large-scale adoption requires the standardization of crop-specific application protocols, taking into account dosage, exposure time, and operational conditions, in order to maximize benefits while minimizing adverse effects.

Keywords: ozone application; hydroponic systems; leafy vegetables; postharvest quality; plant physiology; microbial safety

INTRODUCCIÓN

La hidroponía constituye un sistema de producción agrícola sin suelo que permite el cultivo de plantas mediante soluciones nutritivas controladas o sustratos inertes. En

los últimos años, este sistema ha experimentado una creciente aceptación debido a su eficiencia en el uso del agua, la optimización de la absorción de nutrientes y la posibilidad de mantener condiciones de cultivo compatibles con elevados estándares

de seguridad e inocuidad alimentaria (Beltrano & Gimenez, 2015; Regmi et al., 2024). En un contexto global caracterizado por el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y la progresiva reducción de tierras agrícolas disponibles, la hidroponía se perfila como una alternativa estratégica para fortalecer la seguridad alimentaria (Chatterjee et al., 2025).

Dentro de los sistemas de agricultura sin suelo, las hortalizas de hoja destacan por su corto ciclo de crecimiento, su alto valor nutricional y la creciente demanda por parte de los consumidores en los mercados de productos frescos y mínimamente procesados. Sin embargo, la recirculación de las soluciones nutritivas, característica de muchos sistemas hidropónicos, puede favorecer la diseminación de patógenos fitosanitarios y microorganismos de importancia sanitaria, tales como *Fusarium oxysporum* y *Escherichia coli*, lo que impacta negativamente en la productividad y compromete la inocuidad de los alimentos obtenidos (Msayleb et al., 2021; Faicán-Benenaula et al., 2024).

En este escenario, el ozono emerge como una alternativa tecnológica de interés creciente. Se trata de una molécula triatómica (O_3) con un elevado poder oxidante—superior al del cloro— y una rápida descomposición en oxígeno, lo que evita la generación de residuos químicos persistentes. Su aplicación ha sido ampliamente documentada en la desinfección de agua y aire, así como en la industria alimentaria, particularmente en procesos de sanitización de frutas y hortalizas (Limaico, 2023). En sistemas hidropónicos, el ozono presenta un interés doble: por un lado, permite la desinfección de soluciones nutritivas y el control de patógenos; por otro, puede influir en el metabolismo vegetal, estimulando procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la síntesis de compuestos bioactivos (Zheng et al., 2020; Lee & Goto, 2022).

No obstante, la aplicación del ozono no está exenta de limitaciones. Concentraciones elevadas o exposiciones prolongadas pueden

inducir estrés oxidativo, ocasionar daño celular y reducir el rendimiento de los cultivos. Asimismo, la ausencia de protocolos estandarizados de aplicación en sistemas hidropónicos ha generado resultados inconsistentes, lo que limita su adopción a escala productiva (Han et al., 2020; Botondi et al., 2021).

En este contexto, el presente artículo de revisión tiene como objetivo compilar y analizar críticamente los avances recientes en el uso del ozono en cultivos hidropónicos de hortalizas de hoja, evaluando sus beneficios, limitaciones y perspectivas de aplicación, con el fin de contribuir a la consolidación de estrategias sostenibles basadas en esta tecnología.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión se fundamentó en literatura científica publicada entre 2019 y 2024. Se consultaron bases de datos indexadas de reconocido impacto, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SciELO, así como la plataforma Google Scholar. La estrategia de búsqueda consideró combinaciones de los términos «ozone», «hydroponics», «leafy vegetables», «lettuce», «spinach» y «postharvest quality».

Los criterios de inclusión fueron los subsecuentes: (a) estudios experimentales desarrollados en sistemas hidropónicos con hortalizas de hoja; (b) investigaciones que evaluarán la aplicación del ozono en soluciones nutritivas o durante la etapa poscosecha; y (c) artículos publicados en revistas científicas arbitradas. Se excluyeron estudios publicados antes de 2019 o enfocados en cultivos no hortícolas.

Tras el proceso de selección y depuración, se analizaron 39 estudios, los cuales fueron organizados en cuatro ejes temáticos principales: efectos fisiológicos del ozono en los cultivos, impacto del ozono en la calidad poscosecha, contribución del ozono a la bioseguridad de los sistemas hidropónicos y perspectivas futuras.

RESULTADOS

Los resultados de la revisión se presentan de manera estructurada y coherente, siguiendo los ejes temáticos definidos en la metodología. La síntesis de la literatura permite identificar tendencias consistentes, así como limitaciones metodológicas y efectos dependientes de la dosis reportados en los estudios analizados. La Figura 1 y la Tabla 1 resumen visualmente los principales hallazgos y se interpretan de forma integrada en el texto.

Efectos fisiológicos del ozono en los cultivos

La evidencia científica indica que la aplicación de ozono en bajas concentraciones puede ejercer un efecto estimulante sobre el metabolismo vegetal. Zheng et al. (2020) reportaron que el uso de soluciones nutritivas enriquecidas con ozono favorece el crecimiento radicular y aumenta la capacidad antioxidante de las raíces de lechuga, lo que se asocia con una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. De manera concordante, Tamaki et al. (2020) observaron que la incorporación de microburbujas de ozono en sistemas hidropónicos de lechuga y *komatsuna* promovió el desarrollo tanto foliar como radicular.

Asimismo, Lee y Goto (2022) evidenciaron que la aplicación controlada de ozono en lechuga roja incrementa el contenido de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, lo que sugiere una activación del metabolismo secundario. No obstante, la respuesta fisiológica al ozono es marcadamente dosodependiente. Han et al. (2020) demostraron que exposiciones prolongadas o concentraciones elevadas de ozono en *Brassica campestris* reducen la biomasa y afectan negativamente la calidad bioquímica del cultivo, subrayando la importancia de una dosificación adecuada.

La Figura 1 muestra una comparación del desarrollo radicular de plantas de lechuga cultivadas con y sin aplicación de

microburbujas de ozono, evidenciándose un mayor crecimiento en el tratamiento ozonizado.

Figura 1. Desarrollo radicular de lechuga con y sin ozonización en hidroponía



Fuente. Cosemar Ozono (2023).

Impacto del ozono en la calidad poscosecha

Durante la etapa poscosecha, diversos estudios coinciden en que el ozono contribuye a la conservación de la calidad de hortalizas de hoja, particularmente en lechuga y espinaca, al preservar el color, la firmeza y las características sensoriales durante el almacenamiento. En el caso de la acelga, la literatura reporta reducciones significativas de la carga microbiana, lo que se traduce en una mejora de la inocuidad del producto.

Mersinli et al. (2021) demostraron que el uso de agua ozonizada a bajas concentraciones permite mantener la calidad visual y textural de espinaca mínimamente procesada durante el almacenamiento refrigerado. De manera similar, Prabawa et al. (2022) reportaron que tiempos adecuados de ozonización prolongan la vida útil de la espinaca japonesa, conservando sus atributos sensoriales y químicos.

Sin embargo, la evidencia también advierte que una aplicación inadecuada del ozono puede resultar contraproducente. Pandiselvam et al. (2022) señalaron que la sobredosificación provoca daño en las membranas celulares, acelerando la pérdida de textura y reduciendo la aceptabilidad sensorial, lo que confirma el carácter dosodependiente de sus efectos.

Contribución del ozono a la bioseguridad en sistemas hidropónicos

Uno de los principales beneficios del ozono en hidroponía es su capacidad para reducir la carga microbiana en las soluciones nutritivas. Msayleb et al. (2021) evidenciaron que la ozonización disminuye significativamente la viabilidad de *Fusarium oxysporum*, patógeno de importancia económica en cultivos hidropónicos. De igual modo, Faicán-Benenaula et al. (2024) comprobaron una reducción sustancial en la supervivencia de *Escherichia coli* en acelga cultivada bajo este sistema.

Adicionalmente, Zhao et al. (2024) reportaron que la aplicación de nanoburbujas de ozono en lechuga no solo reduce microorganismos patógenos, sino que

también favorece la diversidad microbiana benéfica en la rizosfera, contribuyendo a la sanidad y sostenibilidad del sistema productivo. En conjunto, estos resultados posicionan al ozono como una herramienta eficaz para mejorar la bioseguridad en sistemas hidropónicos de recirculación.

Perspectivas futuras

La literatura reciente destaca el desarrollo de innovaciones tecnológicas orientadas a maximizar la eficiencia del ozono. Xu et al. (2022) señalaron que el uso de nanoburbujas de ozono mejora la oxigenación y la productividad en sistemas hidropónicos y acuapónicos. Asimismo, Templalexis et al. (2023) demostraron que la combinación de ozono con radiación UV-C en lechuga fresca potencia la reducción microbiana y la conservación de la calidad.

Desde un enfoque más amplio, Keris-Sen y Gurol (2017) propusieron el uso del ozono para la ruptura de células microalgales con fines bioenergéticos, abriendo nuevas líneas de investigación biotecnológica con potencial integración en sistemas hidropónicos.

Tabla 1. Principales estudios recientes (2019-2024) sobre la aplicación del ozono en sistemas hidropónicos de hortalizas de hoja

Fuente	Cultivo/Sistema	Tratamiento con ozono	Principales hallazgos
Zhao et al. (2024)	Lechuga en hidroponía	Micro- y nanoburbujas de ozono en solución nutritiva	Estimuló el crecimiento vegetal y aumentó la diversidad microbiana benéfica en la rizosfera.
Faicán-Benenaula et al. (2024)	Acelga baby en hidroponía	Aplicaciones de ozono en agua de riego	Redujo la supervivencia de <i>E. coli</i> en el sistema y en tejidos vegetales, mejorando la inocuidad.
Xu et al. (2022)	Sistemas hidropónicos y acuapónicos	Burbujas finas de oxígeno y ozono	Mejóro la productividad del sistema y la eficiencia en la oxigenación radicular.
Tanaka y Kobayashi (2020)	Lechuga y otras hortalizas, NFT	Ozonización de solución nutritiva	Aumentó la oxigenación de raíces y redujo la proliferación de patógenos en sistemas de recirculación.
Msayleb et al. (2021)	Lechuga en hidroponía	Ozonización de soluciones nutritivas	Disminuyó la viabilidad de <i>Fusarium oxysporum</i> , reduciendo riesgos fitopatológicos.

Templalex et al. (2023)	Lechuga fresca mínimamente procesada	Ozonización combinada con UV-C	Redujo la pérdida de masa y preservó la calidad poscosecha (color y textura).
Aslam et al. (2020)	Frutas y hortalizas	Ozonización poscosecha	Evidenció potencial como desinfectante natural sin generación de residuos tóxicos.
Al-Rawahy et al. (2023)	Pepino en hidroponía	Aplicación de ozono en invernadero	Redujo la incidencia de enfermedades y mejoró rendimiento bajo condiciones controladas.

Nota. Elaboración propia sobre la base de los estudios revisados.

DISCUSIÓN

El análisis de la literatura científica reciente confirma que el ozono presenta un elevado potencial como herramienta tecnológica en sistemas hidropónicos, siempre que su aplicación sea cuidadosamente regulada. Desde el punto de vista agronómico, las evidencias indican que dosis bajas de ozono —generalmente inferiores a 1 mg L⁻¹ en soluciones nutritivas o mediante aplicaciones intermitentes— favorecen la fotosíntesis, la acumulación de biomasa y la síntesis de metabolitos secundarios, mientras que concentraciones elevadas inducen estrés oxidativo y reducciones en el crecimiento vegetal (Bailey et al., 2019).

En relación con la calidad poscosecha, los estudios revisados muestran resultados consistentes: el ozono contribuye a retrasar el deterioro fisiológico, preservar el color y la textura, así como reducir la carga microbiana de hortalizas de hoja. No obstante, una dosificación inadecuada puede provocar daños en las membranas celulares y acelerar la pérdida de calidad sensorial (Pandiselvam et al., 2022).

Desde la perspectiva de la bioseguridad, el ozono se consolida como una alternativa sostenible a los desinfectantes químicos convencionales, dado que no deja residuos tóxicos y resulta eficaz en el control de patógenos como *Fusarium oxysporum* y *Escherichia coli*. La integración del ozono con tecnologías emergentes, como la radiación UV-C y la agricultura de precisión, podría potenciar su eficacia y optimizar los costos

operativos (Salman & Abdulrasool, 2022; Templalex et al., 2023).

Un desafío relevante identificado en la literatura es la ausencia de protocolos estandarizados de aplicación, ya que las investigaciones difieren considerablemente en concentraciones, tiempos de exposición y métodos de ozonización. Asimismo, se requieren estudios de largo plazo que evalúen los efectos del ozono sobre el valor nutricional de los vegetales y la sostenibilidad energética de los sistemas.

CONCLUSIONES

El ozono constituye una herramienta promisorio para la producción hidropónica de hortalizas de hoja, con efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, la calidad poscosecha y la bioseguridad del sistema. Sin embargo, su efectividad depende de una adecuada calibración de dosis y tiempos de aplicación, los cuales varían según la especie cultivada.

Las investigaciones futuras deben centrarse en la estandarización de protocolos específicos por cultivo, la evaluación integral de la sostenibilidad energética y económica de los sistemas de ozonización y su integración con tecnologías complementarias. De este modo, el ozono podrá consolidarse como una tecnología verde, segura y eficiente para la hidroponía sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Huancavelica y a la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias por el apoyo

institucional brindado durante el proceso académico-investigativo que hizo posible la elaboración de este estudio. De manera especial, se reconoce la valiosa contribución de los docentes del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, quienes promovieron y acompañaron su elaboración como parte de la formación en investigación especializada.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses —de naturaleza personal, académica, institucional o financiera— que haya influido en la elaboración y publicación del presente artículo.

REFERENCIAS

- Al-Rawahy, M. S., Al-Abri, W. S., Al-Hinai, A. S., Al-Abri, H. A., Al-Mahrooqi, S. H., Al-Shmali, N. M., Al-Khatri, Z. T., & Al-Subhi, K. S. (2023). Response of Ozone Treatment on Disease Incidence, Dissolved Oxygen Levels, Growth and Yield of Cucumber Crop Grown in Hydroponics in Cooled Green House. Season: Summer (June-August) at DGALR, Rumais. *Journal of Agricultural Science*, 15(3), 85-90. <https://doi.org/10.5539/jas.v15n3p85>
- Aslam, R., Alam, M. S., & Saeed, P. A. (2020). Sanitization potential of ozone and its role in postharvest quality management of fruits and vegetables. *Food Engineering Reviews*, 12(1), 48-67. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09204-0>
- Bailey, A., Burkey, K., Taggart, M., & Rufty, T. (2019). Leaf Traits That Contribute to Differential Ozone Response in Ozone-Tolerant and Sensitive Soybean Genotypes. *Plants*, 8(7), 235. <https://doi.org/10.3390/plants8070235>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía* (1.ª edición). Editorial de la Universidad de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/46752>
- Bertrand, B. J. (2020). *Efficiency of Ozone-Based Advanced Oxidation Processes in Treating Recirculating Irrigation Water* [A Thesis for the degree of Master of Science in Environmental Science, University of Guelph, Ontario, Canada]. Theses & Dissertations. <http://hdl.handle.net/10214/17802>
- Botondi, R., Barone, M., & Grasso, C. (2021). A Review into the Effectiveness of Ozone Technology for Improving the Safety and Preserving the Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables. *Foods*, 10(4), 748. <https://doi.org/10.3390/foods10040748>
- Brodowska, A. J., Nowak, A., & Śmigielski, K. (2018). Ozone in the food industry: principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2176-2201. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308313>
- Chatterjee, A., Ghosh, P., Winkler, B., V, V., Debnath, S., Cichocki, J., Trenkner, M., Vanicela, B., Riethmueller, C., Walz, M., Chandra, S., & Pal, H. (2025). Demystifying the integration of hydroponics cultivation system reinforcing bioeconomy and sustainable agricultural growth. *Scientia Horticulturae*, 341. 113973. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.113973>
- Cosemar Ozono (2023). *Cultivos hidropónicos de lechuga con ozono*. Autor. <https://tinyurl.com/yw727cd6>
- Da Silva, M. J., Rodrigues de Alencar, E., D'Antonino, L. D., De Assis, M. V., Gonçalves, S., Gonçalves, C., Souto, W., & Ribeiro, A. H. (2024). Post-harvest quality of lettuce treated with ozonised water in a microbubble system. *New*

- Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(3), 762-779.
<https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2345330>
- Embersona, L. D., H Pleijel, H., Ainsworth, E. A., Van den Berg, M., Ren, W., Osborne, S., Mills, G., Pandey, D., Dentener, F., B ker, P., Ewert, F., Koeble, R., & Van Dingenen, R. (2018). Ozone effects on crops and consideration in crop models. *European Journal of Agronomy*, 100, 19-34.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>
- Faicán-Benenaula, M. A., Hernández-Adasme, C., Machuca, A., Escalona, V. (2024). Survival and internalization of *Escherichia coli* in baby chard subjected to ozone applications during hydroponic system cultivation. *European Journal of Horticultural Science*, 89(4), 1-10.
<https://doi.org/10.17660/eJHS.2024/019>
- Han, Y. J., Gharibeshghi, A., Mewis, I., Förster, N., Beck, W., & Ulrichs, C. (2020). Plant responses to ozone: effects of different ozone exposure durations on plant growth and biochemical quality of *Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*. *Scientia Horticulturae*, 262, 108921.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108921>
- Ishii, M., Lam, V. P., Fujiwara, K., & Park, J. S. (2022). Intermittent Root Flushing with Ozonated Water Promotes Growth of Japanese Mustard Spinach (*Brassica rapa* var. *perviridis*) grown in a Nutrient Film Technique Hydroponic Culture-Preliminary Results. *Ozone: Science & Engineering*, 44(5), 464-472.
<https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1967723>
- Keris-Sen, U. D., & Gurol, M. D. (2017). Using ozone for microalgal cell disruption to improve enzymatic saccharification of cellular carbohydrates. *Biomass and Bioenergy*, 105, 59-65.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.023>
- Kim, S., & Park, J. (2025). Application of Ozonated Water to the Roots Increases Growth and Secondary Metabolite Accumulation in Brassicaceae Plants in a Hydroponics System. *Science & Engineering*, 47(3), 235-249.
<https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2431211>
- Kleiber, T., Borowiak, K., Schroeter-Zakrzewska, A., Budka, A., & Osiecki, S. (2017). Effect of ozone treatment and light colour on photosynthesis and yield of lettuce. *Scientia Horticulturae*, 217, 130-136.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.035>
- Lee, J.-H., & Goto, E. (2022). Ozone control as a novel method to improve health-promoting bioactive compounds in red leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 1045239.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1045239>
- Machuca, A., Silveira, A. C., Hernández-Adasme, C., Escalona, V. H. (2023). Effect of the Ozone Application in the Nutrient Solution and the Yield and Oxidative Stress of Hydroponic Baby Red Chard. *Horticulturae*, 9(11), 1234.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9111234>
- Mersinli, E., Koyuncu, M. A., & Erba , D. (2021). Quality retention of minimally processed spinach using low-dose ozonated water during storage. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45(2), 133-143.
<https://doi.org/10.3906/tar-2004-75>
- Msayleb, N., Kanwar, R., Wu, H., & Van Leeuwen, J. H. (2021). Effects of ozonation on the viability of *Fusarium oxysporum* conidia in hydroponic nutrient solutions. *Ozone: Science & Engineering*, 44(1), 96-104.
<https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1928476>
- Osman, K. A., Elsayed, H. H., & Salama, M. S. (2024). Ozone Treatment as a Green

- Technology for Removing Chlorpyrifos Residues from Vegetables and Its Impact on the Quality of Vegetables. *Ozone: Science & Engineering*, 46(6), 558-572. <https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2404060>
- Pandiselvam, R., Singh, A., Agriopoulou, S., Sachadyn-Król, M., Aslam, R., Gonçalves, C. M., Khanashyam, A. Ch., Kothakota, A., Atakan, O., Kumar, M., Mathanghi, S. K., Mousavi, A. (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.008>
- Pandiselvam, R., Subhashini, S., Banuu, E. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Shahir, S. (2019). Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science & Engineering*, 41(1), 17-34. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1490636>
- Pastacaldi, Ch., Gaudioso, D., Beltrami, C., Gunnella, B., & Tegli, S. (2025). On the Effectiveness of Ozone Treatments: A Silver Bullet for Plant Health? *Agronomy*, 15(3), 567. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030567>
- Portal Frutícola. (2025). *Uso del ozono en el agro*. Autor. <https://tinyurl.com/mryp78v2>
- Prabawa, S., Safitri, D. I., Hartanto, R., Amanto, B. S., & Yudhistira, B. (2022). The effect of differences in ozonation time and storage temperature on physical, chemical, and sensory characteristics of japanese spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Food Research*, 6(3), 203-214. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(3\).350](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(3).350)
- Regmi, A., Rueda-Kunz, D., Liu, H., Trevino, J., Kathi, S., & Simpson, C. (2024). Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems. *Technology in Horticulture*, 4, e005. <https://doi.org/10.48130/tihort-0024-0002>
- Salman, A. D., & Abdulrasool, I. J. (2022). Effect of ozone enrichment and spraying with organic nutrient on nutrient and water use efficiency and fertilizer productivity of broccoli plant cultivated hydroponically with modified nft technology. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 53(3), 660-668. <https://doi.org/10.36103/ijas.v53i3.1576>
- Sapakov, A., Sapakova, S., Oser, D., & Yerekeyeva, S. (2022). Intensification of hydroponic green fodder production using ozonized air. *AIP Conference Proceedings*, 2650(1), 030030. <https://doi.org/10.1063/5.0105376>
- Sarron, E., Gadonna-Widehem, P., & Aussenac, T. (2021). Ozone Treatments for Preserving Fresh Vegetables Quality: A Critical Review. *Foods*, 10(3), 605. <https://doi.org/10.3390/foods10030605>
- Stoica, C. M., Velcea, M., Chira, L., Jerca, O. I., Velea, M. A., & Drăghici, E. M. (2022). The nutrient solution oxygenation influence on the growth of the species *Lactuca sativa* L. root system cultivated in the nutrient film technique (NFT) system. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, LXVI(1), 533-540. <https://tinyurl.com/35df4jv6>
- Tamaki, M., Ikeura, H., & Enmei, N. (2020). Growth response of hydroponic leaf lettuce and komatsuna to ozone microbubble treatment. *Journal of Plant Nutrition*, 43(10), 1369-1377. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730896>
- Templalexis, C., Lentzou, D., Samioti, A., & Xanthopoulos, G. (2023). The individual and combined effect of ozone and UV-C on mass loss, respiration, texture and colour changes of fresh-cut lettuce. *Food Research*, 7(3), 29-41. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.7\(3\).367](https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(3).367)

- Top Ozono. (2025). *Tratamiento agro-ecológico con ozono para agua de riego*. Autor. <https://tinyurl.com/yeuxz5b8>
- Wang, X., Zuo, J., Yan, Z., Shi, J., Wang, Q., & Guan, W. (2020). Effect of Ozone Micro-nano-bubble Treatment on Postharvest Preservation of Spinach. *Food Science*, 41(23), 190-196. <https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20191102-014>
- Xu, K., Mo, X., Xu, X., & Wu, H. (2022). Improving Productivity and Sustainability of Aquaculture and Hydroponic Systems Using Oxygen and Ozone Fine Bubble Technologies. *Innovations in Applied Engineering and Technology*, 1(1), 1-8. <https://doi.org/10.62836/iaet.v1i1.1008>
- Yang, P., Guo, Y-Z., & Qiu, L. (2018). Effects of ozone-treated domestic sludge on hydroponic lettuce growth and nutrition. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(3), 593-602. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61868-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61868-9)
- Yüceer, M. (2023). *Ozone applications in food processing*. En O. Kılınççeker & R. Meral (Eds.), *Some novel applications in the food industry* (pp. 329-346). Serüven Yayınevi. <https://tinyurl.com/2nfepwa9>
- Zhao, Q., Dong, J., Li, S., Lei, W., & Liu, A. (2024). Effects of micro/nano-ozone bubble nutrient solutions on growth promotion and rhizosphere microbial community diversity in soilless cultivated lettuces. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1393905. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1393905>
- Zhao, Q., Guo, S., Feng, J., Li, D., Yang, S., & Zhou, X. (2024). Suitable Water-Fertilizer Management and Ozone Synergy Can Enhance Substrate-Based Lettuce Yield and Water-Fertilizer Use Efficiency. *Agronomy*, 14(8), 1619. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081619>
- Zheng, L., Liu, Ch., & Song, W. (2020). Effect of Ozonated Nutrient Solution on the Growth and Root Antioxidant Capacity of Substrate and Hydroponically Cultivated Lettuce (*Lactuca Sativa*). *Ozone: Science & Engineering*, 42(3), 286-292. <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1668256>