



● DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

## Ciencia y uso del ozono en el siglo XXI: aplicaciones en vitivinicultura

Marcos Maza <sup>1</sup>, Florencia Alloggia <sup>1</sup>, Rommy Riveros <sup>2</sup>, Alejandra Camargo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto de Biología Agrícola de Mendoza (IBAM). CONICET. Laboratorio de Cromatografía para Agroalimentos. Almirante Brown 500. M5528AHB. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina.

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ciencias Enológicas y Agroalimentarias. Cátedra de Enología II. Almirante Brown 500. M5528AHB. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina.

\* mmaza@fca.uncu.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

El ozono ( $O_3$ ) es una molécula triatómica de oxígeno con un alto poder oxidante, cuya presencia en la estratósfera es esencial para la existencia de la vida en la Tierra al actuar como filtro de la radiación ultravioleta. Sin embargo, más allá de su función atmosférica, en las últimas décadas se ha consolidado como un agente versátil con aplicaciones en múltiples áreas de la ciencia y la tecnología. Debido a su potencial de reactividad, el ozono es capaz de inactivar microorganismos, degradar compuestos orgánicos complejos y modular procesos biológicos, lo que lo convierte en una herramienta de creciente interés (Epelle *et al.* 2023; Leontieff *et al.* 2025). Asimismo, en los ámbitos ambiental e industrial, las tecnologías basadas en ozono han demostrado un buen rendimiento en el tratamiento de aguas residuales, la reducción de contaminantes emergentes y la mejora de la calidad del aire en espacios confinados (Zhang *et al.* 2025). En el sector agroalimentario, su uso se ha extendido a la conservación poscosecha de frutas y vegetales, así como al control de patógenos en la cadena de producción, ofreciendo una alternativa ecológica frente a los desinfectantes químicos convencionales. La Food and Drug Administration (FDA) de los Estados Unidos lo reconoce como seguro (GRAS) para su aplicación como agente antimicrobiano en alimentos y en la sanitización de superficies en contacto con ellos, reforzando su papel como herramienta segura y eficaz dentro de la industria alimentaria (Federal Register, 66 FR 33829, 2001) (Siteo *et al.* 2025).

Si bien su potencial es amplio, la implementación del ozono también conlleva algunos desafíos. Su corta vida media exige su generación *in situ* y su uso requiere condiciones de seguridad específicas para evitar efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente (Morrison *et al.* 2021). Pese a estas limitaciones, la evidencia científica actual sitúa al ozono como un recurso estratégico en la transición hacia tecnologías más limpias, seguras y sostenibles, lo que refuerza su relevancia tanto en la ciencia como en las aplicaciones del siglo XXI.

### ¿Cómo se genera el ozono?

El  $O_3$  no puede almacenarse de forma estable, ya que se descompone rápidamente en oxígeno molecular, lo que obliga a producirlo en el mismo lugar y en el mismo momento de su utilización. Esta característica ha impulsado el desarrollo de tecnologías específicas de generación, que van desde sistemas industriales de gran escala hasta dispositivos compactos para aplicaciones localizadas (Epelle *et al.* 2023). La descarga de corona sigue siendo la técnica más utilizada a nivel industrial. En este proceso, un flujo de oxígeno o de aire seco se somete a una descarga eléctrica, lo que disocia moléculas de  $O_2$  y las recombina en  $O_3$  (de Carvalho Costa *et al.* 2025). Estos generadores pueden alcanzar concentraciones elevadas y se consideran altamente versátiles, aunque requieren condiciones estrictas de humedad y temperatura para optimizar su rendimiento. Por otro lado, la generación por radiación UV (185 nm), que promueve la disociación de  $O_2$  y genera ozono a bajas concentraciones, constituye una alternativa adecuada para sistemas de pequeña escala. Estos resultan útiles para la desinfección del aire y de cámaras confinadas, aunque presentan limitaciones de eficiencia y estabilidad operativa. Y, por último, recientemente se está estudiando la producción electroquímica de ozono (EOP), que emplea celdas electrolíticas y materiales catalíticos para generar ozono directamente en fase acuosa, evitando el uso de oxígeno comprimido. Sin embargo, aún persisten desafíos cinéticos y termodinámicos que limitan su aplicación a gran escala (Liu *et al.* 2025; Wang *et al.* 2025).

En todos los casos, el control de la concentración, el tiempo de exposición y el medio de aplicación resulta crucial para garantizar tanto la eficacia en la inactivación de microorganismos o contaminantes como la seguridad del proceso. La tendencia actual apunta al desarrollo de equipos compactos, portátiles y energéticamente eficientes, con sistemas de monitoreo en tiempo real, lo que permitirá ampliar el rango de aplicaciones del ozono en ámbitos ambientales, agroalimentarios y médicos.

### Aplicaciones agroalimentarias

En las últimas décadas, el sector agroalimentario ha identificado en el ozono una herramienta eficaz para abordar dos desafíos centrales: garantizar la inocuidad de los alimentos y avanzar hacia procesos productivos más sostenibles. Su alto poder oxidante y la ausencia de residuos químicos tras su descomposición en oxígeno le confieren un perfil favorable para su uso en toda la cadena alimentaria (por ejemplo, control microbiano, degradación de contaminantes, fumigación) (Epelle *et al.* 2023; Siteo *et al.* 2025). En el ámbito de la poscosecha, numerosos estudios muestran que la aplicación de ozono, tanto en fase gaseosa como mediante agua ozonizada, prolonga la vida útil de frutas y hortalizas. El mecanismo principal es la inhibición de hongos y bacterias responsables del deterioro, así como la modulación de los procesos fisiológicos implicados en la maduración. En cámaras de almacenamiento, el ozono ha demostrado eficacia para reducir la incidencia de mohos sin dejar residuos visibles en la superficie de los productos,

lo que lo distingue de los tratamientos químicos tradicionales (Siteo *et al.* 2025). Otras investigaciones han demostrado que el ozono también puede degradar micotoxinas presentes en los granos, como las aflatoxinas y otros metabolitos tóxicos, cuando se aplica bajo condiciones controladas de concentración y tiempo (Tiwari *et al.* 2010). Asimismo, algunos estudios sugieren que, a dosis adecuadas, el ozono no solo elimina patógenos, sino que también mejora algunas propiedades funcionales de los granos sin afectar su calidad comercial (Zhu 2018). Estas evidencias respaldan la idea de que el ozono puede servir como alternativa “limpia” a los pesticidas y fumigantes convencionales, particularmente en situaciones en las que estos últimos enfrentan restricciones regulatorias o resistencia microbiana.

### Ozono en la vitivinicultura

En el ámbito de las bebidas, y en especial en el vitivinícola, el ozono emerge como una alternativa para la limpieza y desinfección de barricas, tanques y sistemas de conducción en el interior de la bodega. En la bodega, el ozono puede incorporarse en sistemas de limpieza continuos, lo que permite la recirculación de agua ozonizada a través de tuberías, bombas, filtros y maquinaria, sin necesidad de desmontaje. En comparación con agentes químicos convencionales, como detergentes alcalinos, peróxido o desinfectantes ácidos, el uso de ozono minimiza los residuos químicos, reduce el consumo de agua y simplifica el proceso de enjuague. Este proceso se utiliza ampliamente en la desinfección de barricas de roble que, debido a su porosidad y a la presencia de microgrietas, dificultan el acceso de los sanitizantes. En condiciones óptimas, estos métodos controlan la carga microbiana sin dejar subproductos que alteren el perfil aromático de la madera ni del vino (lo cual es importante cuando se reutilizan las barricas).

Por otro lado, es posible realizar aplicaciones de ozono en la vid que complementan el manejo sanitario tradicional. En ese sentido, se está estudiando el ozono como tratamiento exógeno directo sobre la vid, mediante pulverizaciones con agua ozonizada o endoterapia por inyección directa al sistema vascular (Ferreira *et al.* 2023). En cultivares como *Vitis vinifera* cv. *Bobal*, rociados con agua ozonizada durante el ciclo vegetativo, se ha modificado el perfil de compuestos fenólicos y aromáticos, incrementando la actividad antioxidante y, en algunos casos, con efectos positivos sobre la madurez tecnológica de la uva (aunque el efecto depende de la dosis, la frecuencia y la variedad) (Campayo *et al.* 2019). Adicionalmente, exposiciones ligeras al ozono parecen actuar como estrés oxidativo, estimulando rutas metabólicas de defensa en la planta (resistencia sistémica inducida). Un estudio sobre la vid reporta que dosis no agresivas de ozono inducen la expresión de genes de respuesta defensiva sin causar daño oxidativo severo, lo que abre la posibilidad de su uso como herramienta de manejo sanitario complementaria al fungicida clásico (Modesti *et al.* 2022). Este conjunto de aplicaciones, en bodega, en barricas, en sistemas CIP (Clean-In-Place) y en el tratamiento en viñedo, posiciona al ozono como una tecnología versátil en la cadena vitivinícola. Al reemplazar o reducir el uso de químicos, se contribuye a disminuir el consumo de agua y de cargas sanitizantes tradicionales, al tiempo que se mantiene o se mejora el control microbiano y puede incluso influir favorablemente en los perfiles bioquímicos de la uva y del vino.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la temporada 2022 se realizó un ensayo en Mendoza para evaluar el potencial del ozono en aplicaciones para el cultivo de vid. Los tratamientos se desarrollaron con el propósito de generar una respuesta diferencial y abrir una nueva perspectiva ante las elevadas concentraciones de azúcar que presentan las uvas en la actualidad, debido a las altas temperaturas ocasionadas por el cambio climático en la región. El ozono, gracias a su elevada capacidad de oxidorreducción, induce en las plantas de vid diversas respuestas fisiológicas que favorecen la biosíntesis de polifenoles.

El estudio se desarrolló en viñedos de *Vitis vinifera* L. cv. *Cabernet Sauvignon*, en la parcela de Viticultura de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, bajo el sistema de conducción Ramé (figura 1, pág. XXX). El cultivo presenta un diagrama en bloques y se seleccionaron las plantas al azar entre los distintos bloques para los tratamientos. El agua se ozonizó mediante un equipo de generación de ozono gaseoso para enriquecimiento de agua por descarga de corona (figura 2, pág. XXX) y se realizaron 3 tratamientos de aplicación de agua ozonizada (1,25 ppm) mediante diferentes modalidades: R1 por pulverización foliar; R2 por inyección endoxilemática al sistema vascular interno de la planta; R3 por riego por goteo; y R4 control de uvas sin tratar. Los tratamientos se aplicaron post-envero durante los meses de febrero y marzo, cada 15 días. Posteriormente, las uvas fueron cosechadas y micro-vinificadas en la bodega de la Cátedra de Enología de la Facultad de Ciencias Agrarias (figura 3, pág. XXX). Luego de la vinificación, el vino se estabilizó y se agregó SO<sub>2</sub> (50 mg/L) y se conservó en recipientes de vidrio hasta su análisis.



**Figura 1.** Cultivo de vid en el sistema de conducción Ramé.



**Figura 2.** Equipo de generación de ozono gaseoso para el enriquecimiento de agua.

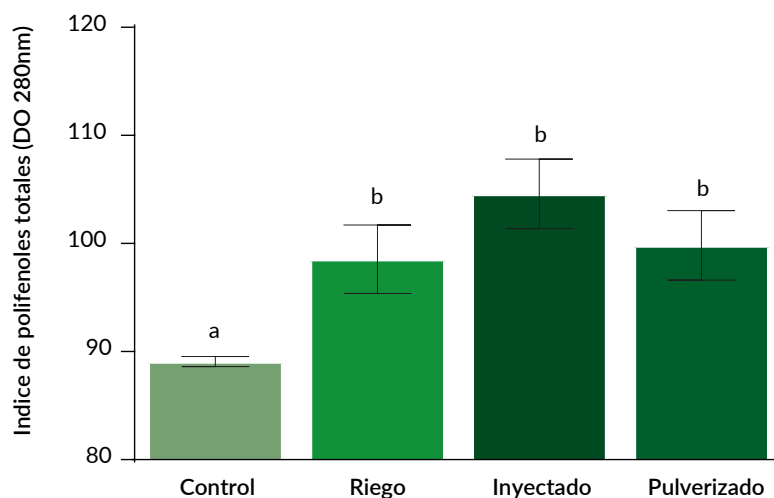


**Figura 3.** Microvinificaciones de uva de la variedad Cabernet Sauvignon.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados demostraron que los tratamientos no afectaron el desarrollo vegetativo ni el reproductivo de la vid. Por el contrario, las aplicaciones foliares y endoxilemáticas mostraron tendencias a un menor contenido de azúcares y a una mayor acidez en las bayas, junto con mejoras en los parámetros enológicos de los vinos, incluyendo incrementos en el índice de polifenoles totales (IPT) y en la intensidad colorante respecto del control. Las microvinificaciones realizadas en la bodega con los mismos tratamientos confirmaron que el ozono no interfiere con la fermentación ni compromete la estabilidad de los vinos.

En este sentido, la aplicación de ozono permite adelantar la cosecha sin comprometer la calidad polifenólica del vino y, además, contribuye a reducir el grado alcohólico final. Esta estrategia resulta particularmente valiosa en escenarios de maduración acelerada inducida por el cambio climático. En la figura 4 se muestra el efecto de los distintos tratamientos sobre el contenido del índice de polifenoles totales (IPT) de los vinos elaborados a partir de uvas tratadas con agua ozonizada. Se observa un incremento significativo (superior al 15%) respecto al control en todas las condiciones evaluadas. Entre los tratamientos, la endoterapia presenta la mayor eficacia en el aumento del IPT; sin embargo, su aplicación a gran escala está limitada por la complejidad operativa que conlleva. No obstante, el tratamiento por pulverización foliar también evidencia una mejora sustancial respecto al control, lo que constituye una alternativa más factible de implementar en condiciones productivas.



**Figura 4.** Contenidos de polifenoles expresados en IPT de los vinos obtenidos de viñedos tratados con ozono.

Asimismo, la figura 5 presenta los valores de intensidad colorante obtenidos en los vinos elaborados a partir de uvas tratadas con agua ozonizada. Los resultados muestran una tendencia similar a la observada en el IPT, lo que indica que los vinos elaborados con uvas tratadas, independientemente del sistema de aplicación empleado, presentan diferencias significativas respecto al control. La mayor ganancia en intensidad colorante se registra con el tratamiento por inyección, con un incremento del 18%, seguido del tratamiento pulverizado, con un aumento del 13%. Este último sistema representa la mejor relación entre eficacia y viabilidad económica en cuanto a la forma de aplicación. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial del ozono como herramienta tecnológica sostenible, capaz de modificar la composición fenólica y el color de los vinos, así como de favorecer prácticas enológicas adaptativas al cambio climático.

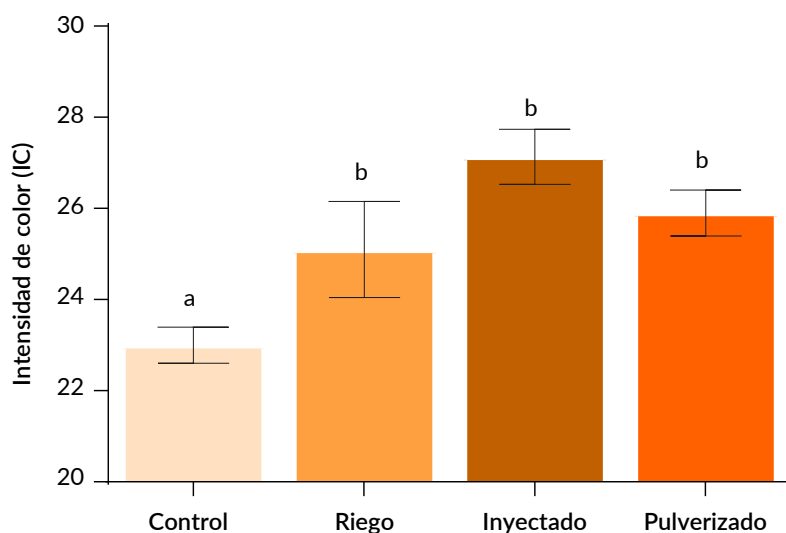


Figura 5. Intensidad colorante de vinos obtenidos de viñedos tratados con ozono.

## CONCLUSIONES

La aplicación de ozono constituye una tecnología transversal, con implicaciones estratégicas en los ámbitos ambientales, agroalimentarios, biomédicos e industriales. Su elevado poder oxidante, la ausencia de residuos tóxicos tras su descomposición y su reconocimiento regulatorio como agente seguro lo convierten en una herramienta alineada con los principios de sostenibilidad. En el sector agroalimentario, particularmente en la vitivinicultura, los resultados experimentales demuestran que las aplicaciones de agua ozonizada mediante pulverización foliar generan mejoras significativas en parámetros enológicos, como el incremento del índice de polifenoles totales y de la intensidad colorante en los vinos. Estos efectos, sumados a su potencial para reducir el uso de insumos químicos tradicionales y adelantar la madurez tecnológica de la uva ante el cambio climático, posicionan al ozono como un recurso estratégico de alto valor para la adaptación de los sistemas productivos. No obstante, persisten limitaciones vinculadas a la corta vida media del ozono, la necesidad de equipos generadores in situ y la complejidad operativa de ciertas modalidades de aplicación, lo que obliga a seguir profundizando en el desarrollo de esta tecnología con el fin de mejorar la durabilidad y el sistema de aplicación de ozono. En este sentido, la investigación futura deberá centrarse en la optimización de las dosis, de la durabilidad o vida media del ozono en el agua y de los protocolos de aplicación para preservar la seguridad de los operarios, así como en el estudio de los mecanismos moleculares que explican sus efectos sobre las plantas y los alimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Campayo, A., K. Serrano de la Hoz, M. M. García-Martínez, J. F. Sánchez-Martínez, M. R. Salinas, and G. L. Alonso. 2019. "Spraying Ozonated Water on Bobal Grapevines: Effect on Grape Quality." *Food Research International* 125:108540. doi:10.1016/j.foodres.2019.108540.
2. de Carvalho Costa, Leticia Reggiane, Júlia Toffoli de Oliveira, and Liliana Amaral Féris. 2025. "Optimization of a Compact Corona Discharge Ozone Generator for Emergency Water Treatment in Brazil." *Water* 17(16):2430. doi:10.3390/w17162430.
3. Epelle, Emmanuel I., Andrew Macfarlane, Michael Cusack, Anthony Burns, Jude A. Okolie, William Mackay, Mostafa Rateb, and Mohammed Yaseen. 2023. "Ozone Application in Different Industries: A Review of Recent Developments." *Chemical Engineering Journal* 454:140188. doi:10.1016/j.cej.2022.140188.

4. Ferreira, J. A., Esparraguera, L. B., Queiroz, S. C. N., & Bottoli, C. B. G. (2023). Vegetative endotherapy—advances, perspectives, and challenges. *Agriculture*, 13(7), 1465. doi.org/10.3390/agriculture13071465
5. Leontieff, Daniel A., Keisuke Ikehata, Yasutaka Inanaga, and Seiji Furukawa. 2025. "Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications." *Processes* 13(8):2331. doi:10.3390/pr13082331.
6. Liu, Jia, Xiaoge Peng, Xiaosa Wang, Xing Zhong, and Jianguo Wang. 2025. "Electrochemical Ozone Production: From Fundamental Mechanisms to Advanced Applications." doi:10.1039/D4EY00204K.
7. Modesti, Margherita, Roberto Forniti, Elena Brunori, Fabio Mencarelli, Andrea Bellincontro, and Pietro Tonutti. 2022. "Ozone Treatments to Induce Systemic-Acquired Resistance in Leaves of Potted Vines: Molecular Responses and NIR Evaluation for Identifying Effective Dose and Exposition Duration." *OENO One* 56(1):175–87. doi:10.20870/oeno-one.2022.56.1.5373.
8. Morrison, Christina, Ariel Atkinson, Arash Zamyadi, Faith Kibuye, Michael McKie, Samantha Hogard, Phil Mollica, Saad Jasim, and Eric C. Wert. 2021. "Critical Review and Research Needs of Ozone Applications Related to Virus Inactivation: Potential Implications for SARS-CoV-2." *Ozone: Science & Engineering* 43(1):2–20. doi:10.1080/01919512.2020.1839739.
9. Siteo, Eugénio da Piedade Edmundo, Lêda Rita D'Antonino Faroni, Clara Mariana Gonçalves Lima, Nathália Nogueira Leite, Rômulo Alves Morais, Flaviana Coelho Pacheco, Beatriz Dal Pian Machado, Renata Ferreira Santana, and Roney Alves da Rocha. 2025. "Exploiting Ozone for Post-Harvest Preservation of Fruits and Vegetables: Application Techniques, Quality Effects, and Regulatory Frameworks." *Food Reviews International* 1–32. doi:10.1080/87559129.2025.2525424.
10. Tiwari, B. K., C. S. Brennan, T. Curran, E. Gallagher, P. J. Cullen, and C. P. O' Donnell. 2010. "Application of Ozone in Grain Processing." *Journal of Cereal Science* 51(3):248–55. doi:10.1016/j.jcs.2010.01.007.
11. Wang, Xiuyue, Ye Yuan, Zheyuan Ding, Junna Yang, Yilin Wang, Siming Li, Yu Ding, Yawei Li, Min Wang, and Mingbo Wu. 2025. "Status and Prospects of Anode Materials for Efficient Electrochemical Ozone Production." *Energy Reviews* 4(2):100129. doi:10.1016/j.enrev.2024.100129.
12. Zhang, Kang, Jianzheng Liu, Hongkun Lv, Xianyang Zeng, Zhongqian Ling, Liwei Ding, and Chenyang Jin. 2025. "Advances in Ozone Technology for Environmental, Energy, Food and Medical Applications." *Processes* 13(4):1126. doi:10.3390/pr13041126.
13. Zhu, Fan. 2018. "Effect of Ozone Treatment on the Quality of Grain Products." *Food Chemistry* 264:358–66. doi:10.1016/j.foodchem.2018.05.047.