



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola

**Estudio del aumento del potencial de almacenamiento de  
cerezas (*Prunus avium* L.) cv. Regina a partir de la aplicación  
de ultrasonido y nano burbujas**

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola

Denise Andrea Aravena Hernández  
CHILLÁN-CHILE  
2025

Profesor Guía: Pedro Miguel Aqueveque Muñoz  
Dpto. de Agroindustrias  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Agroindustrias de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

---

Dr. Pedro Miguel Aqueveque Muñoz  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora

---

M.S. Pedro Santiago Melin Marín  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

---

Dr. Víctor Hugo Escalona Contreras  
Facultad de Ciencias Agronómicas  
Universidad de Chile

Director del Programa

---

M.S. Pedro Santiago Melin Marín  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al proyecto “Hurdle technologies en postcosecha para incrementar el potencial de almacenamiento en cerezas orgánicas de exportación” (PYT 2021-0277) y al Programa Tecnológico “Centro para la investigación e innovación en fruticultura para la zona sur” (16PTECFs-66647), por el financiamiento y respaldo que hicieron posible este estudio.

# ÍNDICE

	Página
Resumen .....	VIII
Abstract .....	X
1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	3
3. Hipótesis y Objetivos .....	10
4. Materiales y Métodos .....	11
5. Resultados y Discusión .....	21
6. Conclusiones .....	41
7. Sugerencias .....	43
8. Referencias .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama del proceso postcosecha de cerezas.....	2
Figura 2. Sistema de generación de nanoburbujas en circuito hidráulico cerrado.....	12
Figura 3. Representación de la medición de la resistencia mecánica de cerezas.....	13
Figura 4. Representación de la medición de color exterior e interior de la cereza.....	17
Figura 5. Componentes principales generadas por el Análisis de Componentes Principales (ACP) aplicado a todas las variables evaluadas.....	22
Figura 6. Análisis de Componentes Principales de variables físicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días).....	26
Figura 7. Análisis de Componentes Principales de variables químicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días).....	31
Figura 8. Análisis de Componentes Principales de las coordenadas de color de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días).....	35
Figura 9. Análisis de Componentes Principales de variables microbiológicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días).....	40

## ÍNDICE DE ECUACIONES

		Página
Ec1.	Acidez titulable.....	14
Ec2.	Tasa de fuga de electrolitos.....	15
Ec3.	Tasa de respiración de CO <sub>2</sub> .....	16
Ec4.	Unidades formadoras de colonias.....	18
Ec5.	Incidencia de daños visuales.....	19

## Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de dos tecnologías emergentes —ultrasonido y nanoburbujas— sobre la calidad postcosecha de cerezas (*Prunus avium L.*) cv. ‘Regina’. La investigación responde a la necesidad de alternativas sostenibles al uso intensivo de fungicidas sintéticos, especialmente en el contexto de exportaciones de larga distancia como las dirigidas al mercado asiático. Se aplicaron nueve tratamientos postcosecha: tres niveles de potencia de ultrasonido (30, 100 y 360W por 30s respectivamente) y nanoburbujas (generadas con O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>), además de controles convencionales (positivo con fludioxonil, negativo sin tratamiento y grupo blanco con solo agua). Las cerezas se almacenaron a  $0 \pm 0.5$  °C por un período de hasta 45 días, replicando condiciones reales de transporte marítimo. Se evaluaron parámetros físicos (resistencia mecánica, calibre, masa grupal), químicos (sólidos solubles, acidez titulable, tasa de respiración, fuga de electrolitos), de color (CIELab externo e interno) y microbiológicos (recuento de aerobios mesófilos, mohos y levaduras). Se aplicaron técnicas estadísticas multivariadas como análisis de componentes principales (ACP), correlaciones, y el análisis de varianza (ANDEVA) ( $p < 0.05$ ) para integrar los parámetros de calidad de fruta analizados y determinar el efecto de los tratamientos. Los resultados mostraron que ultrasonido y nanoburbujas son alternativas viables al fungicida fludioxonil. El ultrasonido a 30W fue el tratamiento más eficaz para conservar resistencia mecánica, masa grupal y reducir carga microbiana, destacando por su efecto suave sobre la estructura celular. En contraste, 360W mostró efectos negativos sobre el color. Entre las nanoburbujas, las

de CO<sub>2</sub> destacaron por su capacidad para conservar color y estabilidad química, mientras que las de O<sub>3</sub> mantuvieron una alta carga microbiana al final del almacenamiento. En conjunto, el ultrasonido a 30W y las nanoburbujas de CO<sub>2</sub> fueron los tratamientos más efectivos para prolongar la vida útil y calidad del fruto, posicionándose como opciones sustentables frente a fungicidas sintéticos.

## Abstract

The present study aimed to evaluate the impact of two emerging technologies—ultrasound and nanobubbles—on the postharvest quality of ‘Regina’ sweet cherries (*Prunus avium L.*). This research responds to the need for sustainable alternatives to the intensive use of synthetic fungicides, particularly in the context of long-distance exports such as those bound for the Asian market. Nine postharvest treatments were applied: three ultrasound power levels (30, 100, and 360 W for 30 seconds each) and nanobubbles generated with O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub>, along with conventional controls (a positive control with fludioxonil, a negative control without treatment, and a blank group treated only with water). Cherries were stored at 0 ± 0.5 °C for up to 45 days, replicating real maritime transport conditions. Physical (mechanical resistance, fruit size, mass), chemical (soluble solids, titratable acidity, respiration rate, electrolyte leakage), color (external and internal CIELab), and microbiological parameters (mesophilic aerobic counts, molds, and yeasts) were evaluated. Multivariate statistical techniques such as principal component analysis (PCA), correlations, and analysis of variance (ANOVA) (p<0.05) were applied to integrate the fruit quality parameters analyzed and determine treatment effects. Results indicated that ultrasound and nanobubbles are viable alternatives to the fungicide fludioxonil. Ultrasound at 30 W was the most effective treatment for preserving mechanical resistance, batch mass, and reducing microbial load, highlighting its gentle effect on cell structure. In contrast, 360 W negatively affected fruit color. Among the nanobubbles, CO<sub>2</sub> demonstrated the best performance in maintaining color and chemical stability, while O<sub>3</sub> nanobubbles

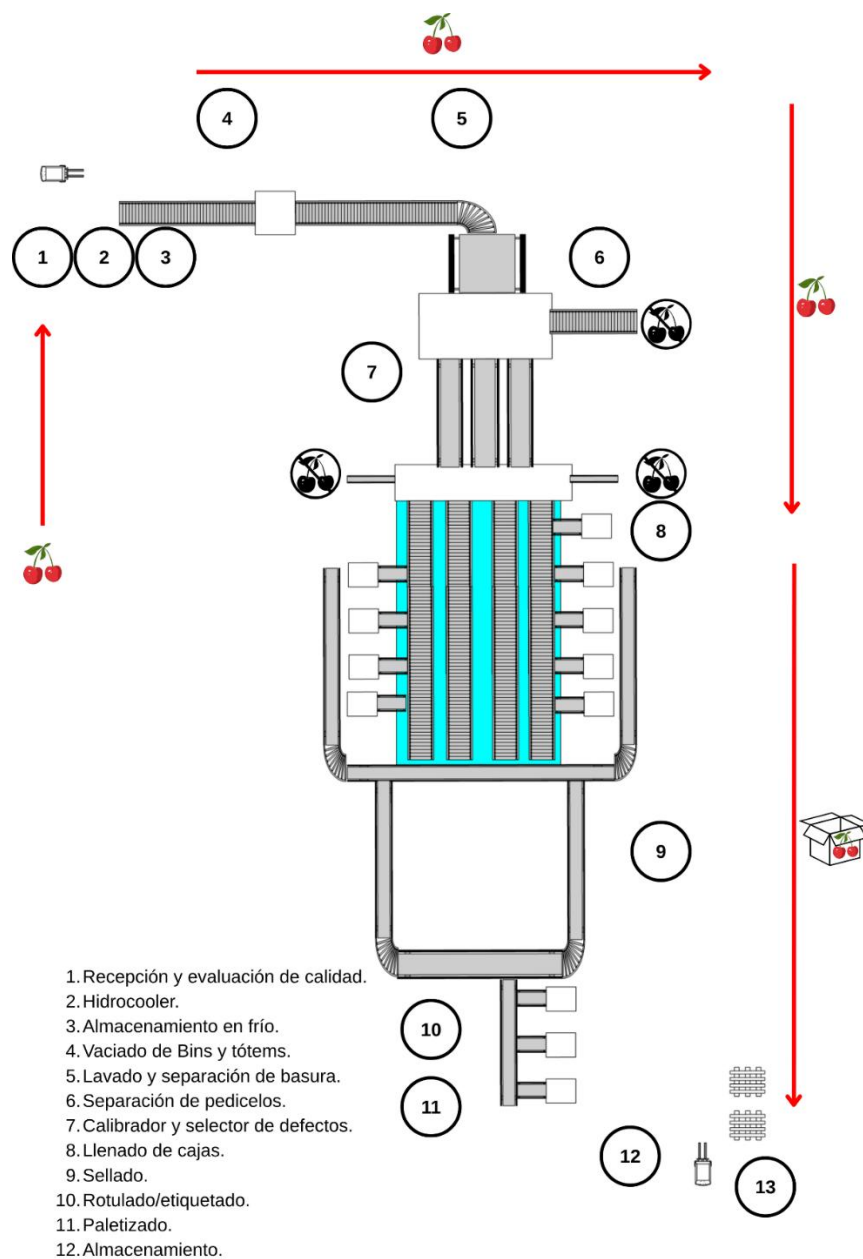
retained a high microbial load at the end of storage. Overall, ultrasound at 30 W and CO<sub>2</sub> nanobubbles were the most effective treatments for extending fruit shelf life and quality, positioning themselves as sustainable alternatives to synthetic fungicides.

# 1. Introducción

La conservación postcosecha de frutas es un desafío clave en la industria hortofrutícola, debido a la rápida pérdida de calidad después de la cosecha, que afecta a la aceptación del producto en los mercados de exportación. Es el caso específico de la cereza dulce (*Prunus avium*), la cual es una fruta de clima templado que posee múltiples beneficios para la salud y un alto nivel comercial, llegándose a exportar el año 2024 más de 896 mil toneladas (iQonsulting, 2025). Este fruto no continúa su proceso de maduración después de la cosecha, impidiendo una recolección anticipada (Abdipour et al., 2020). Esta limitación impone un reto logístico que exige optimizar las líneas de proceso postcosecha, incorporando tecnologías que reduzcan el deterioro, controlen microorganismos y preserven la calidad del fruto durante el transporte. El flujo general de dicho proceso se detalla en la Figura 1.

Este estudio evaluó el efecto de diferentes potencias de ultrasonido (30, 100 y 360 W) y de nanoburbujas (generadas con oxígeno, dióxido de carbono y ozono) en tiempos de aplicación por 30 segundos sobre la calidad postcosecha de cerezas cultivar *Regina*. El objetivo fue identificar condiciones óptimas que permitan extender la vida útil del fruto y reducir el uso de fungicidas sintéticos. Además, la integración de estas tecnologías emergentes podría facilitar el acceso a mercados lejanos mediante transporte marítimo, incluso para cerezas orgánicas, reduciendo costos logísticos y la dependencia del mercado chino (Simfruit, 2022). Con el fin de integrar los parámetros de calidad y condición de la fruta evaluados, se plantea una estrategia que permita identificar y combinar los predictores con mayor capacidad discriminante. Esto

permite una diferenciación más precisa y objetiva entre tratamientos, mejorando la interpretación de los resultados y facilitando la comparación del desempeño durante el almacenamiento.



**Figura 1.** Diagrama del proceso postcosecha de cerezas. Elaboración propia.

## **2. Antecedentes**

### **2.1. Prácticas estándar de manejo postcosecha**

Para prolongar la vida postcosecha de las cerezas, la industria utiliza un paquete tecnológico estándar (lavado con fungicidas sintéticos, uso de bolsas de atmosfera modificada y almacenamiento en frío a 0°C). Este paquete reduce la tasa respiratoria de la fruta, minimiza el crecimiento microbiano y controla el desarrollo de podredumbres (Bilkova et al., 2022). Los fungicidas han demostrado ser efectivos contra patógenos como la *Botrytis cinerea* y *Alternaria spp.* (Aaliya et al., 2021; Mohapatra et al., 2013), pero su uso genera preocupaciones ambientales si no se gestionan adecuadamente. Además, el uso repetido de estos productos favorece la generación de resistencias de microorganismos, disminuyendo la eficacia del control sanitario (Abdipour et al., 2020).

### **2.2. Alternativas al uso del fludioxonil**

El uso intensivo de fungicidas también entra en conflicto con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 12 (producción y consumo responsables) que promueven la reducción de la contaminación ambiental, la innovación hacia procesos industriales sostenibles y la adopción de prácticas más responsables en la producción y el consumo de alimentos (Naciones Unidas, 2018).

Ante este escenario, la industria frutícola ha comenzado a explorar alternativas más sostenibles que permitan reducir la dependencia de compuestos químicos sintéticos como el fludioxonil, sin comprometer la inocuidad ni la calidad del producto final. Algunas de las tecnologías emergentes que han sido evaluadas en este contexto incluyen el uso de luz ultravioleta (Zhang et al., 2021), ultrasonido (Birmpha et al., 2013), shock térmico (Zhang et al., 2021), ozono (Brodowska et al., 2018) y nano burbujas (Ushida et al., 2017). Estas herramientas han demostrado un efecto positivo en la reducción de la carga microbiana y en la preservación de atributos de calidad en frutas frescas, contribuyendo además a minimizar el impacto ambiental y a responder a las exigencias de mercados con normativas más estrictas (Muzaffar et al., 2016). Dentro de este abanico de tecnologías, el ultrasonido y las nano burbujas destacan por su aplicabilidad en líneas de proceso de fruta fresca y su potencial para mantener la calidad durante la postcosecha. Ambas han mostrado resultados prometedores en la reducción microbiana y en la conservación de parámetros sensoriales y fisicoquímicos de frutos frescos (Aaliya et al., 2021; Chen et al., 2020).

### **2.3. Cavitación**

Entre estas tecnologías emergentes, el ultrasonido y las nanoburbujas se fundamentan en el principio de cavitación, representado por dos variantes principales: la cavitación sónica y la hidrodinámica, respectivamente. La cavitación sónica es un fenómeno físico en el cual se generan burbujas microscópicas en un líquido como resultado de ondas ultrasónicas. Estas burbujas, al colapsar o implosionar, liberan energía localizada en forma de altas presiones y temperaturas (Figura 2). Tal energía

desencadena efectos mecánicos intensos capaces de penetrar tejidos biológicos y disrumpir estructuras celulares, como las paredes y membranas de microorganismos, facilitando su inactivación (Babu & Amamcharla, 2022). Las condiciones extremas generadas durante el colapso contribuyen a la ruptura de las células microbianas, reduciendo la viabilidad de bacterias, hongos y otros agentes que podrían comprometer la calidad de los frutos durante su almacenamiento (Leong et al., 2017).

Por otro lado, la cavitación hidrodinámica se produce cuando un líquido es forzado a través constricciones geométricas (como tubos Venturi o orificios), lo que provoca una disminución local de presión suficiente para formar burbujas de gas disuelto. Estas burbujas, sometidas a intensas fuerzas de cizallamiento y fluctuaciones de presión, pueden implosionar liberando energía similar a la cavitación sónica (Gutiérrez-Mosquera, 2019).

#### **2.4. Ultrasonido en postcosecha**

En el caso del ultrasonido, las ondas acústicas generan microburbujas de aproximadamente 70 $\mu$ m (Karimi et al., 2014) que, al colapsar, provocan intensos efectos mecánicos y la formación de radicales libres altamente reactivos, como los radicales hidroxilo. Estos compuestos pueden inducir daño oxidativo en componentes celulares críticos, incluyendo el ADN de microorganismos, interfiriendo así en su capacidad de replicación y supervivencia (Arvanitoyannis et al., 2017; Birmipa et al., 2013; Leong et al., 2017). Al desestabilizar las membranas celulares, este mecanismo de acción hace que el ultrasonido sea una herramienta eficaz para la reducción microbiana y la mejora de la inocuidad alimentaria (Aday & Caner, 2014). En el

ámbito postcosecha, su eficacia ha sido confirmada en diversas matrices: por ejemplo, en frutillas tratadas a 40 kHz y 350 W se observó un buen mantenimiento de la calidad, mientras que en jugos de kiwi y frutillas tratados a 40 kHz y 180 W se logró una reducción significativa de levaduras y mohos (Cao et al., 2010; Tomadoni et al., 2017). En cerezas, tratamientos a 33 kHz y 60 W permitieron reducir la incidencia de podredumbres y conservar la resistencia mecánica y apariencia del fruto durante el almacenamiento (Muzaffar et al., 2016; Nicolau-Lapeña et al., 2019). De esta manera, el ultrasonido no solo reduce la carga microbiana, sino que también contribuye a mejorar la inocuidad de los productos tratados.

## **2.5. Nanoburbujas en postcosecha**

Las nanoburbujas, también conocidas como burbujas ultrafinas, son estructuras con un diámetro entre 1 micrómetro y 1 nanómetro. Su elevada relación superficie-volumen les permite permanecer en suspensión durante largos periodos y acceder a microespacios donde las burbujas convencionales no llegan (Agarwal et al., 2011). Durante su colapso se libera radicales hidroxilo e iones de hidrógeno altamente oxidantes que contribuyen a la inactivación eficiente de patógenos y a la degradación de compuestos orgánicos contaminantes (Sandiman, 2021). Esta capacidad oxidativa, sumada a la estabilidad de las nanoburbujas en solución, las convierte en una herramienta prometedora para procesos de desinfección sin aditivos agresivos. Además, su capacidad para facilitar la coalescencia y flotación de burbujas más grandes mejora la eficiencia en procesos de separación y purificación del agua (Ahmadi et al., 2014). Las nanoburbujas también actúan como vehículos para gases

como oxígeno, ozono y dióxido de carbono, ampliando sus aplicaciones. Por ejemplo, el oxígeno disuelto en forma de nanoburbujas mejora la oxigenación en sistemas de riego, promoviendo el crecimiento de cultivos como tomates y pepinos (Zhou et al., 2019), mientras que el ozono, al incorporarse en tratamientos postcosecha, reduce significativamente la carga microbiana sin dejar residuos tóxicos (Aday & Caner, 2014; Ushida et al., 2017). Por su parte, el dióxido de carbono ha demostrado eficacia antimicrobiana en aplicaciones como frutas congeladas, favoreciendo la penetración en fisuras y mejorando la conservación a bajas temperaturas (Adhikari et al., 2020; Esteve Gaviña, 2015). En conjunto, estas propiedades posicionan a las nanoburbujas como una alternativa versátil y eficaz para mejorar la inocuidad alimentaria y la calidad del agua en múltiples contextos industriales.

## **2.6. Evaluación de la calidad del fruto**

En este contexto, además del control sanitario, la evaluación integral de la calidad del fruto adquiere un rol fundamental, ya que incide directamente en la aceptación del producto por parte del consumidor y en el cumplimiento de los estándares de exportación.

La evaluación de la calidad de frutas como la cereza involucra múltiples dimensiones y depende del punto de vista del evaluador. Desde una perspectiva sensorial, el producto puede analizarse mediante los sentidos: vista, olfato, gusto, tacto e incluso oído (Cordero-Bueso et al., 2017). Para el consumidor, la calidad se percibe a través de la apariencia visual, el aroma, el sabor, y la turgencia tanto en mano como en boca (Faienza et al., 2020). En contraste, la industria frutícola utiliza parámetros sensoriales

e instrumentales —como los sólidos solubles, la acidez, la resistencia mecánica y la ausencia de defectos— que permiten realizar evaluaciones objetivas, rápidas y consistentes entre evaluadores, asegurando precisión y estandarización (Shewfelt, 2014). Sin embargo, los métodos tradicionales de evaluación —como los análisis instrumentales, protocolos normativos o pruebas sensoriales humanas— presentan limitaciones significativas, ya sea por su alto costo, complejidad técnica o componente subjetivo (Zhang et al., 2022). Estas restricciones evidencian la necesidad de desarrollar metodologías más eficientes, accesibles y reproducibles para una determinación rápida y confiable de la calidad en cerezas. El desarrollo de índices de calidad integrados ha surgido como una estrategia prometedora para evaluar y predecir la evolución postcosecha de los frutos (López et al., 2023).

## **2.7. Cereza chilena**

Chile se ha consolidado como uno de los principales actores del mercado frutícola a nivel mundial, liderando la exportación de frutas frescas desde el hemisferio sur. Entre sus cultivos más relevantes, la cereza dulce (*Prunus avium*) ocupa un lugar estratégico tanto por su valor comercial como por su creciente demanda internacional. En 2024, el país destinó más de 70 mil hectáreas(ha) al cultivo de cereza, superando a otros cultivos tradicionales como el nogal y la vid de mesa. Las regiones de O'Higgins y Maule concentran la mayor superficie plantada destinando cerca de 62 mil ha, mientras que Ñuble se posiciona también como una zona productora con unas 3 mil ha (ODEPA, 2025).

La exportación de cerezas chilenas tiene una fuerte dependencia del mercado chino, que en 2024 recibió el 91% del volumen total exportado, seguido por Estados Unidos con un 3% (iQonsulting, 2025). Sin embargo, la logística asociada a este proceso representa un desafío técnico importante: cerca del 95% de las exportaciones se realiza por vía marítima, con tiempos de tránsito que oscilan entre 16 y 21 días, dependiendo del país de destino.

Esto obliga a mantener una cadena de frío estricta (0 °C) y condiciones de atmósfera modificada controladas (12–16% de O<sub>2</sub> y 4–6% de CO<sub>2</sub>) para evitar pérdidas de calidad (López et al., 2023; Serradilla et al., 2013).

Además, el acceso a mercados internacionales exige que los productores cumplan con normativas fitosanitarias estrictas, como el registro en el Sistema de Registro Agrícola del SAG, certificaciones en Buenas Prácticas Agrícolas, trazabilidad completa del producto y protocolos de inocuidad. Para mercados como Estados Unidos y Reino Unido, también se exige el cumplimiento de estándares internacionales de seguridad alimentaria (ASOEX, 2021; Chileagricola, 2019; Exportador, 2022).

### **3. Hipótesis**

El uso de las tecnologías emergentes (ultrasonido y nano burbujas) en condiciones de pilotaje para la aplicación en una línea de proceso de cerezas, es una alternativa al uso de un fungicida sintético de uso comercial.

### **Objetivos**

#### Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de distintas energías de ultrasonido de potencia y la composición gaseosa de las nano burbujas sobre la calidad y vida postcosecha de cerezas Regina en distintos tiempos de almacenamiento.

#### Objetivos específicos

- Determinar en ambas tecnologías (ultrasonido y nano burbujas) la mejor condición de aplicación para prolongar la vida postcosecha de cerezas a partir de los parámetros de calidad y condición de la fruta.
- Definir e integrar los principales predictores de calidad y condición de la fruta para una óptima diferenciación de tratamientos.

## **4. Materiales y Métodos**

### **4.1. Materia vegetal y acondicionamiento de la fruta**

Se utilizaron cerezas cultivar Regina cosechadas en un huerto ubicado en la región del Maule, Chile, (Latitud: -34.961, Longitud: -71.122), en la temporada 2022 y 2023. Los frutos cosechados se transportaron en cajas térmicas en dos horas aproximadamente al laboratorio, para evitar un deterioro acelerado.

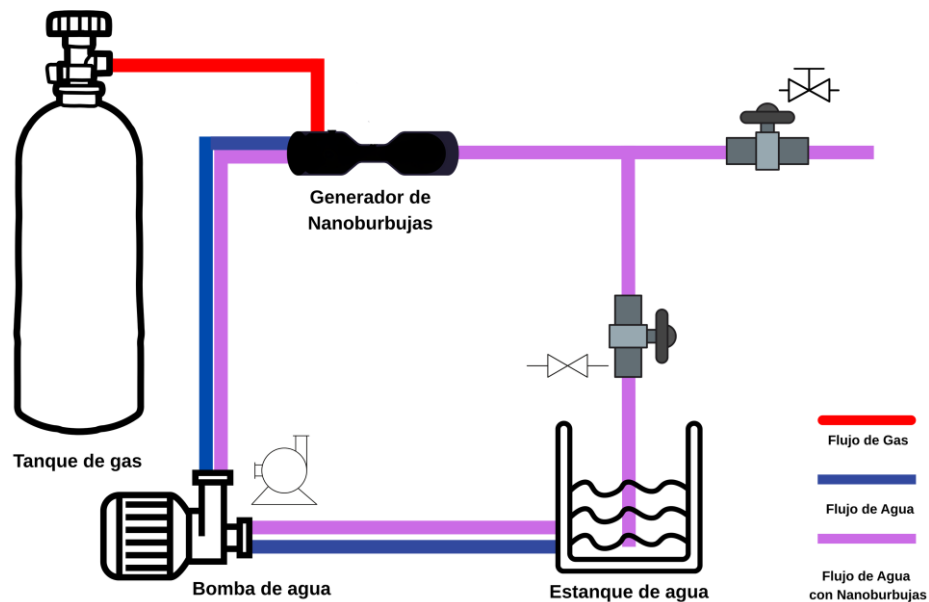
En el laboratorio, se separaron cuidadosamente los frutos por homogeneidad de color y eliminaron aquellos dañados. Los frutos seleccionados se almacenaron en cámaras frigoríficas a 0°C hasta la aplicación de los tratamientos, realizados entre 2 y 12h después.

Tras la aplicación de los tratamientos, los frutos fueron envasados en bolsas de atmósfera modificada y almacenados a  $0 \pm 0,5$  °C durante períodos de 21, 34 y 45 días, simulando el almacenamiento prolongado requerido para el transporte marítimo.

### **4.2. Aplicación de tratamientos**

Se evaluó el efecto de nueve tratamientos postcosecha, todos aplicados durante 30 segundos con agua a 10°C. Entre ellos se consideraron tres tratamientos basados en la aplicación de nanoburbujas, de oxígeno (N1), dióxido de carbono (N2) y ozono (N3) respectivamente, utilizando gases puros recirculados durante 5 minutos en 80 litros de agua. El sistema utilizado para la generación de nanoburbujas se presenta en la Figura 2. De manera complementaria, se evaluaron tres tratamientos de ultrasonido a una

frecuencia constante de 40kHz, aplicados a potencias de 30W (W1), 100W (W2) y 360W (W3). Como referencia comparativa, se incluyó un control positivo (C+) consistente en la aplicación del fungicida comercial fludioxonil (1cc/L), un control negativo constituido por fruta sin ningún tipo de tratamiento (C-), y un grupo blanco en el cual los frutos fueron únicamente lavados con agua potable (B).



**Figura 2.** Sistema de generación de nanoburbujas en circuito hidráulico cerrado. Elaboración Propia.

### 4.3. Determinación de parámetros de calidad y condición de las cerezas

#### 4.3.1. Medición de calibre

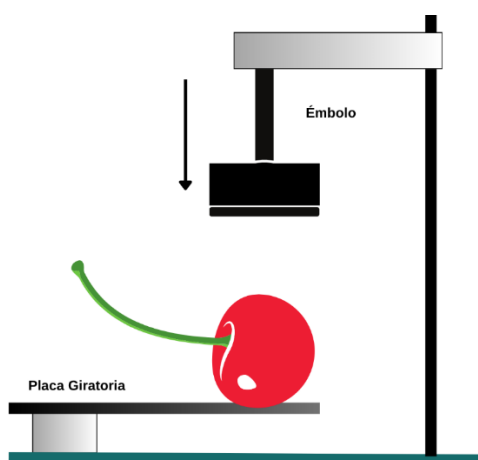
El calibre (mm) de 15 frutos se determinó como el diámetro ecuatorial máximo, utilizando un pie de metro digital (precisión 0.01mm).

#### 4.3.2. Medición de masa grupal

La masa grupal (g) se determinó desde un conjunto de 15 frutos seleccionados al azar, utilizando una balanza analítica (Marca Choyo, Modelo JK180) (precisión 0.01g).

#### 4.3.3. Evaluación de la resistencia mecánica

Para determinar la resistencia estructural de las cerezas mediante un equipo Cherrytex (Udeclab Qscientific, Chile, 2020), el cual mide el área bajo la curva de compresión(gf/mm), como se ilustra en la Figura 3. El sistema utilizado opera de forma similar al equipo FirmPro (HappyAgro, Chile), ampliamente empleado en estudios de calidad en frutos carnosos.



**Figura 3.** Representación de la medición de resistencia mecánica de cerezas. Elaboración Propia.

#### 4.3.4. Sólidos solubles y acidez titulable total.

Las cerezas se almacenaron a  $-80^{\circ}\text{C}$  en un congelador de ultra baja temperatura (Biobase, Modelo BDF-86-86V158) hasta su evaluación. Luego, se descongelaron a temperatura ambiente y se les retiró el carozo y el pedicelo. Las cerezas se procesaron con una licuadora de mano (Ursus Trotter, Klot400P) para obtener una pulpa homogénea.

Los sólidos solubles totales (SS) se midieron con un refractómetro manual (Refratec, Modelo-R0056007) con un rango de 0 a  $32^{\circ}\text{Brix}$  (precisión 0.02).

La acidez titulable se determinó diluyendo 5g de pulpa en 50mL de agua destilada y titulando con NaOH 0.01N hasta alcanzar pH de 8.2. Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico ( $192.124 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

$$\% \text{ de Acidez} = \frac{V_{\text{NaOH}} * N_{\text{NaOH}} * P_{\text{eq del ácido}} * 100}{P_{\text{de la muestra}} * 1000}$$

**Ec1.**

$V_{\text{NaOH}}$ : volumen de NaOH aplicado (mL).

$N_{\text{NaOH}}$ : normalidad de NaOH.

$P_{\text{eq del ácido}}$ : peso equivalente del ácido en el que se exprese la acidez en gramos ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

$P_{\text{de la muestra}}$ : peso inicial de la muestra (g).

#### 4.3.5. Medición de tasa de fuga de electrolitos

Para la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), a 10 frutos se le cortaron pequeños cilindros (5 mm de diámetro) de sus hombros, se lavaron tres veces con agua destilada y se colocaron en tubos Falcon con manitol al 0.2M, y se agitó durante 1h, se congeló durante 12h, se descongeló y agitó nuevamente, se realizaron las mediciones con un conductímetro (Bante DDS-11AW) luego de cada agitación.

$$Tasa\ de\ fuga = \frac{L1}{L2} * \frac{100}{P*T}$$

**Ec 2.**

- L1: lectura de conductividad despues de la primera agitación ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- L2: lectura de conductividad despues de la segunda agitación ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- P: peso de las muestras (g).
- T: tiempo entre lecturas en horas (h).

#### 4.3.6. Medición de tasa de respiración

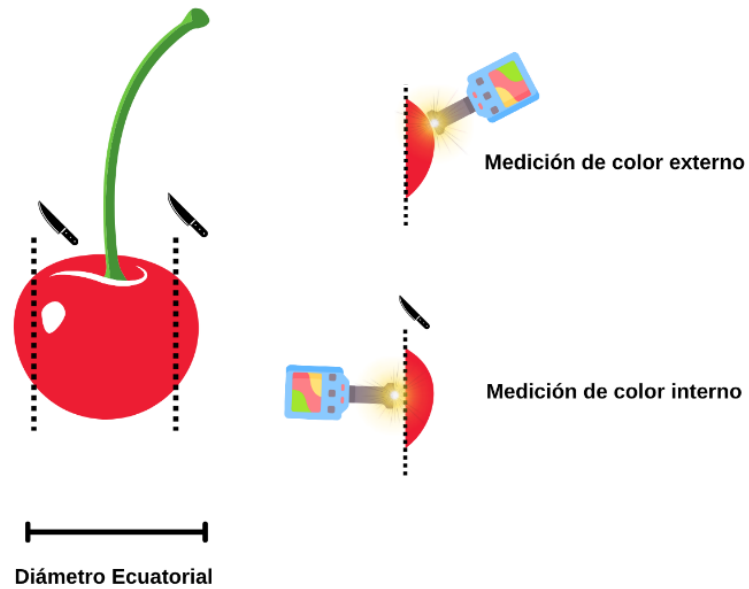
La medición de la respiración de las cerezas se realizó utilizando 15 frutas, que se colocaron en frascos de 500mL previamente aclimatados a 4°C y sellados herméticamente con septos de goma en las tapas. Estos frascos se conectaron a un analizador de gases portátil (Dansensor CheckPoint 3, Dinamarca, 2021) para medir la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las mediciones se realizaron a intervalos de 1h durante un período de 5h, manteniendo los frascos a 4°C. La tasa de respiración se calculó de la siguiente manera:

$$TR_{CO_2} = \frac{(C_{t;CO_2} - C_{t_0;CO_2}) * V}{100 * m * t} \quad \text{Ec 3.}$$

- TR<sub>CO<sub>2</sub></sub>: Tasa de respiración de CO<sub>2</sub> (mL\*kg<sup>-1</sup>\*h<sup>-1</sup>).
- C<sub>t<sub>0</sub>;CO<sub>2</sub></sub>: Concentración de CO<sub>2</sub> en la hora 0 (%).
- C<sub>t;CO<sub>2</sub></sub>: Concentración de CO<sub>2</sub> en la hora analizada (%).
- V: volumen libre en el frasco (volumen de agua – volumen de la muestra) (mL).
- M: masa de la muestra (kg).
- T: tiempo en el que la muestra fue analizado (h).

#### 4.3.7. Medición del color

El color de las cerezas se evaluó mediante reflectancia en ambas secciones laterales de la fruta, interior y exterior, como se ilustra en la Figura 4. Para ello, se utilizó un colorímetro Konica Minolta (CR-400, Japón, 2021), que opera bajo el sistema de color CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).



**Figura 4.** Representación de la medición de color exterior e interior de la cereza. Elaboración Propia.

#### 4.3.8. Recuento microbiológico en la fruta

Para el análisis microbiológico, se obtuvieron 10g de muestra de pulpa de fruta, se diluyeron en 90mL agua peptonada estéril y se homogeneizó utilizando un depósito stomacher. Las muestras se sembraron en profundidad con medios CASO y PDA, incubando a 37°C para aerobios mesófilos y 22-25°C para mohos y levaduras. Las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) se calcularon tras un periodo de incubación de 24 a 72 horas. Se realizaron diluciones seriadas hasta 10<sup>-2</sup>, y la siembra en profundidad se efectuó tomando 1mL de cada dilución y depositándola en placas de Petri estériles con los medios. Las placas se incubaron a 37°C (para aerobios mesófilos) o 22-25°C (para mohos y levaduras). El conteo de las UFC se realizó después de 24-48 h de incubación (para aerobios mesófilos) o 48-72 h para mohos y levaduras).

$$UFC = \frac{N^{\circ}colonias * \frac{1}{Factor\ de\ dilución}}{1\ mL} \quad \text{Ec 4.}$$

#### 4.3.9. Inspección de daños visuales en la fruta

Se realizó una inspección visual de 15 frutas para identificar parámetros que afectan la condición de las cerezas. Cada cereza se evaluó para detectar la presencia de defectos tales como Los resultados se presentan como porcentajes, indicando la frecuencia de cada defecto en comparación con el número total de frutas observadas.

$$\text{Incidencia (\%)} = \left( \frac{\text{Número de frutos dañados}}{\text{Número de frutos evaluados}} \right) * 100$$

**Ec 5.**

#### **4.4. Diseño experimental**

Diseño factorial completamente al azar, sin medidas repetidas, con tratamientos de ultrasonido, nanoburbujas y controles. Las variables se evaluaron en cuatro tiempos de almacenamiento.

#### **4.5. Análisis estadístico**

Se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) por categoría para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y explorar patrones globales.

Posteriormente, con el fin de capturar una visión integral de la calidad postcosecha, los parámetros evaluados se agruparon en cuatro categorías: denominados físicos, químicos, microbiológicos y de color. Esta clasificación permitió estructurar el análisis y aplicar herramientas estadísticas específicas según la naturaleza de cada variable.

A cada categoría se le aplicó nuevamente ACP, en donde las dos primeras componentes principales de cada análisis se interpretaron como índices integradores de calidad, al concentrar la mayor parte de la varianza explicada. Posteriormente, estos índices se

correlacionaron con los niveles de daño visual observados mediante una matriz de correlación, con el objetivo de vincular los cambios cuantitativos en los parámetros con la condición visual del fruto.

Para observar los tratamientos en distintos puntos temporales, los parámetros se representaron gráficamente. Los boxplots permiten observar la distribución de los valores de cada variable, incluyendo la mediana, los cuartiles, los valores atípicos (outliers) y la dispersión general de los datos. Además, se incluyó la media de cada grupo como referencia complementaria.

Luego, se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos respecto a los grupos control en cada tiempo de almacenamiento. Las comparaciones entre medias se realizaron mediante la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95%. Todo el procesamiento fue realizado en el software RStudio (R Core Team, 2023).

Este enfoque multivariado y exploratorio permitió una evaluación robusta y eficiente de la respuesta postcosecha frente a las tecnologías aplicadas, integrando tanto variables cuantitativas como cualitativas.

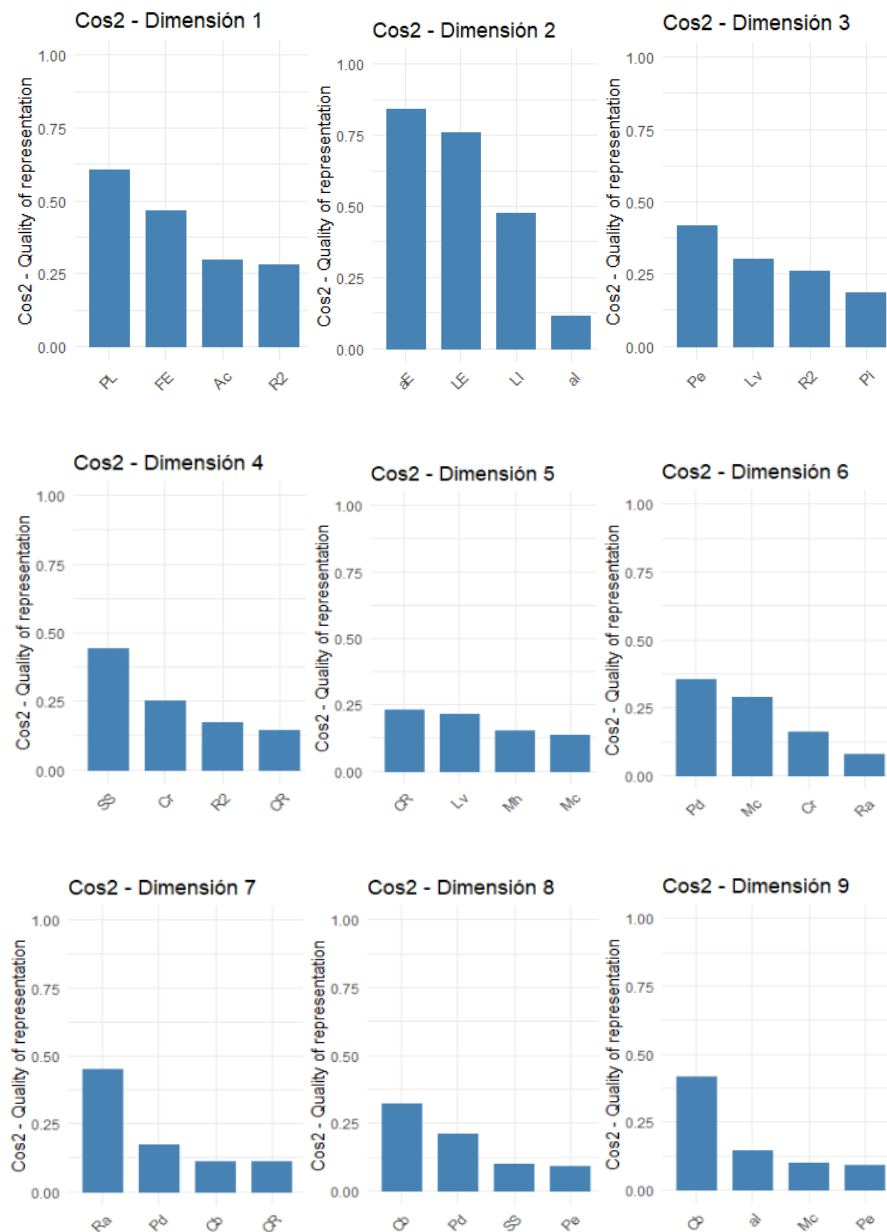
## 5. Resultados y Discusión

Mediante el uso combinado del Análisis de Componentes Principales (ACP), matriz de correlación y gráficos de caja, se observaron patrones y cambios en la calidad postcosecha en cerezas Regina, con el fin de identificar diferencia en el efecto de la aplicación de ultrasonido de potencia (30, 100 y 360W) y nanoburbujas (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>) en comparación con la aplicación del fungicida fludioxonil de uso comercial.

Para esto se analizó el calibre (mm), masa grupal (g), resistencia mecánica (gf\*mm), sólidos solubles totales (°Brix), acidez (% ácido cítrico), conductividad (%), tasa de fuga de electrolitos (%/g\*h), tasa de respiración de CO<sub>2</sub> (mL CO<sub>2</sub>/ kg\*h), color interno y externo (L\*, a\*, b\*) y el recuento de aerobios mesófilos, mohos y levaduras (UFC/g).

En base a un ACP global, en la Figura 5 se observa que las primeras nueve componentes principales explicaron el 71% de la varianza total, identificando agrupaciones consistentes, permitiendo evidenciar asociaciones según la naturaleza de su comportamiento. Entre las primeras 3 dimensiones, se observó que, defectos como piel de lagarto, mostraron una asociación con variables como la tasa fuga de electrolitos y la acidez, que las variables de color presentaron una alta contribución y relación entre sus coordenadas, y que la presencia de pedicelo deshidratado está asociada con el número de unidades de colonias de levadura y la tasa de respiración de CO<sub>2</sub>.

Principales Componentes (PC)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12
Desviación estándar	1.79	1.50	1.34	1.16	1.14	1.07	1.04	1.02	1.00	0.94	0.89	0.87
Proporción de Varianza	0.16	0.11	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Proporción acumulada	0.16	0.27	0.36	0.43	0.49	0.55	0.61	0.66	0.71	0.75	0.79	0.83



**Figura 5.** Componentes principales generadas por el Análisis de Componentes Principales (ACP) aplicado a todas las variables evaluadas. En cada subfigura se muestran las variables con mayor contribución ( $\cos^2$ ) a cada dimensión.

Siguiendo esta línea de análisis, los datos fueron segmentos y denominados con categorías comúnmente utilizadas en la evaluación de calidad de cerezas (físicas, químicas, de color y microbiológicas).

### **5.1. Categoría de variables físicas**

Para la categoría de variables físicas (calibre – Cb, masa grupal –MG y resistencia mecánica – Tx), se observa en la Figura 6 que dos componentes principales explicaron el 71% de la variabilidad. La primera componente estuvo dominada por calibre y resistencia mecánica, mostrando ésta una muy baja correlación positiva con piel de lagarto (PL = 0.15) lo que podría sugerir que este defecto no depende directamente del tamaño o resistencia mecánica de la cereza fruto. La segunda componente estuvo influenciada principalmente por la masa grupal y presentó una baja correlación negativa con pedicelo deshidratado (Pe = -0.25) indicando que frutos con mayor masa tienden a mantener mejor su pedicelo, probablemente por una menor pérdida de agua. almacenamiento.

El análisis del gráfico de cajas para masa grupal muestra diferencias significativas en todos los tiempos de evaluación. Al momento de la aplicación, las nanoburbujas de ozono (N3) mostraron una masa significativamente distinta en comparación con los tratamientos W2 (ultrasonido 100 W), B (agua), C+ (fungicida) y N2 (nanoburbujas de CO<sub>2</sub>). A los 21 días, se registraron diferencias entre el tratamiento B y N1 (nanoburbujas de oxígeno), mientras que, a los 34 días, W1 (ultrasonido 30 W) difirió significativamente respecto a C+, N1 y W2. Finalmente, a los 45 días se observaron diferencias entre W1 y los tratamientos W3 (ultrasonido 300 W) y C+.

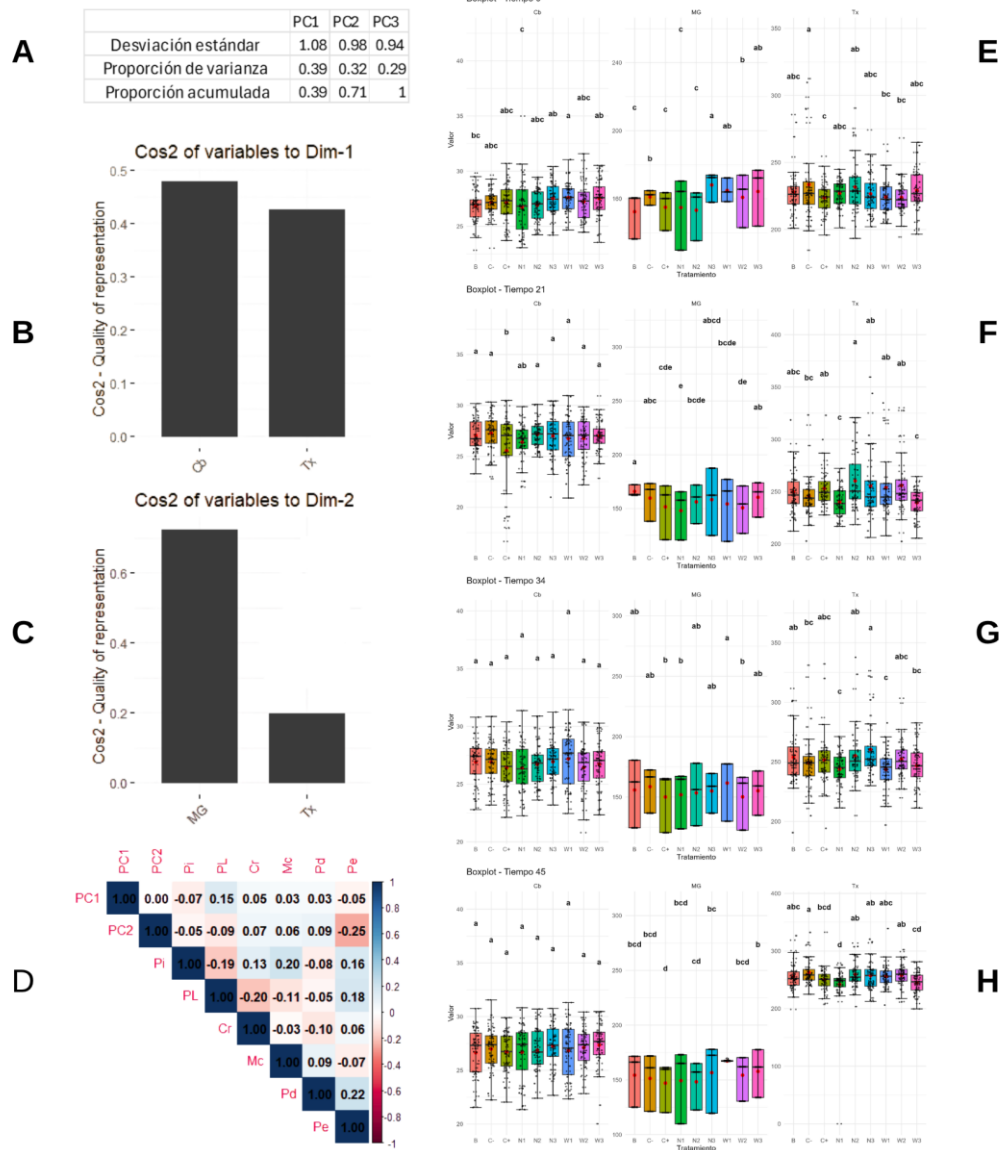
En cuanto al calibre, no se encontraron diferencias significativas a los 34 y 45 días de almacenamiento, lo que sugiere una relativa estabilidad de este parámetro en etapas avanzadas del almacenamiento. Sin embargo, al momento de la aplicación, W1 presentó diferencias en comparación con N1, y a los 21 días, múltiples tratamientos (B, C-, N2, N3, W1, W2 y W3) mostraron diferencias significativas respecto a C+.

Respecto a la resistencia mecánica, tras la aplicación de los tratamientos, C- mostró diferencias respecto a C+. A los 21 días, se observaron diferencias entre N2, N1 y W3. A los 34 días, N3 presentó diferencias respecto a N1 y W1, mientras que, a los 45 días, C- difirió significativamente de N1.

Por tanto, en base a los resultados de la categoría variables físicas, se observa que el tratamiento con ultrasonido de baja potencia (30 W) permitió conservar una mayor masa grupal con el paso del tiempo, lo cual sugiere una menor pérdida de agua durante el almacenamiento. Este efecto podría atribuirse a la cavitación controlada generada por el ultrasonido, la cual puede modificar estructuras celulares sin causar daño irreversible, lo que facilita la retención de agua en el fruto (Pinheiro et al., 2015; Cao et al., 2010).

En contraste, los tratamientos con nanoburbujas de oxígeno (N1) mostraron una resistencia mecánica promedio más baja en comparación con otros tratamientos. Esto podría explicarse por la generación de especies reactivas de oxígeno (radicales libres) asociadas a la dinámica de colapso de las nanoburbujas, las cuales podrían haber afectado la integridad celular del tejido vegetal, generando daño estructural (Gutiérrez-Mosquera et al., 2019).

El análisis de comparación de medias reveló que el calibre fue un parámetro discriminante en el ACP, pero no identificó diferencias significativas entre tratamientos específicos, mientras que la masa grupal y la resistencia mecánica, que mostraron una mayor capacidad para evidenciar dichas diferencias.



**Figura 6.** Análisis de Componentes Principales de variables físicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0, 21, 34 y 45 días). **(A)** Proporción de varianza explicada por cada componente principal. **(B-C)** Calidad de representación ( $\cos^2$ ) de las variables en PC1 y PC2. **(D)** Matriz de correlaciones entre componentes de variables físicas y daños visuales. **(E-H)** Boxplots de las variables físicas evaluadas por tratamiento en cada tiempo de almacenamiento. Los puntos rojos indican la media para cada grupo. Las letras sobre las cajas representan agrupamientos estadísticos ( $p < 0,05$ ), permitiendo identificar diferencias significativas entre tratamientos en cada tiempo de almacenamiento.

## 5.2. Categoría de variables químicas

En cuanto a las variables químicas (acidez – Ac, fuga de electrolitos – FE, tasa de respiración de CO<sub>2</sub> – R2 y sólidos solubles – SS), representadas en la Figura 7, en el ACP se observa que a las dos primeras componentes principales explicaron el 66% de la variabilidad total de los datos. La primera componente se encuentra dominada por FE y R2, y presenta una baja correlación positiva con la presencia de piel de lagarto (PL = 0.31) y negativa con pitting (Pi = -0.24), esto podría sugerir que un mayor estrés fisiológico podría estar levemente asociado con la presencia de estos tipos de daño, aunque la relación es débil, mientras que la segunda componente, esta influenciada principalmente por sólidos solubles totales (SS) y acidez titulable (Ac), que mostró una muy baja correlación positiva con cracking (Cr = 0.15) indicando que la composición interna no influye este daño.

En los gráficos boxplots para la acidez, se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los días 0, 21 y 34 del almacenamiento ( $p < 0.05$ ), mientras que al día 45 no se detectaron diferencias. Al momento de la aplicación (T0), el tratamiento con ultrasonido de 100 W (W2) presentó valores significativamente distintos en comparación con la fruta lavada solo con agua (B), la fruta sin tratamiento (C-) y la fruta tratada con fungicida (C+). A los 21 días, C+ presentó diferencias significativas respecto del ultrasonido de 360W (W3). Posteriormente, a los 34 días, tanto el ultrasonido de 30 W (W1) como las nanoburbujas de dióxido de carbono (N2) mostraron diferencias frente a las nanoburbujas de O<sub>2</sub> (N1), de ozono (N3), B, C-, N3 y W3.

La tasa de fuga de electrolitos presentó diferencias significativas entre tratamientos en todos los tiempos evaluados ( $p < 0,05$ ). En T0, las cerezas sin tratamiento (C-) se diferenciaron significativamente del tratamiento con ultrasonido de 360 W (W3). A los 21 días, W3 presentó los valores más altos y se distinguió estadísticamente de W1, N1, N3, B, C+ y W2. A los 34 días, las nanoburbujas de CO<sub>2</sub> (N2) y W3 mostraron diferencias significativas respecto de W1 y W2. Finalmente, al día 45, se observaron diferencias entre los tratamientos B, C+ y W2, en comparación con C- y N2.

En la tasa de respiración (CO<sub>2</sub>) se detectaron diferencias significativas en todos los tiempos evaluados ( $p < 0,05$ ). Al momento de la aplicación (T0), N3 mostró diferencias con el tratamiento de ultrasonido de 30 W (W1). A los 21 días, N1 presentó valores significativamente diferentes en comparación con W3. Esta tendencia se repitió a los 34 días, donde N1 también se diferenció de W1. Al finalizar el almacenamiento (día 45), se observaron diferencias significativas entre C+, N1 y N2, indicando un efecto diferenciado de estos tratamientos sobre la tasa respiratoria del fruto.

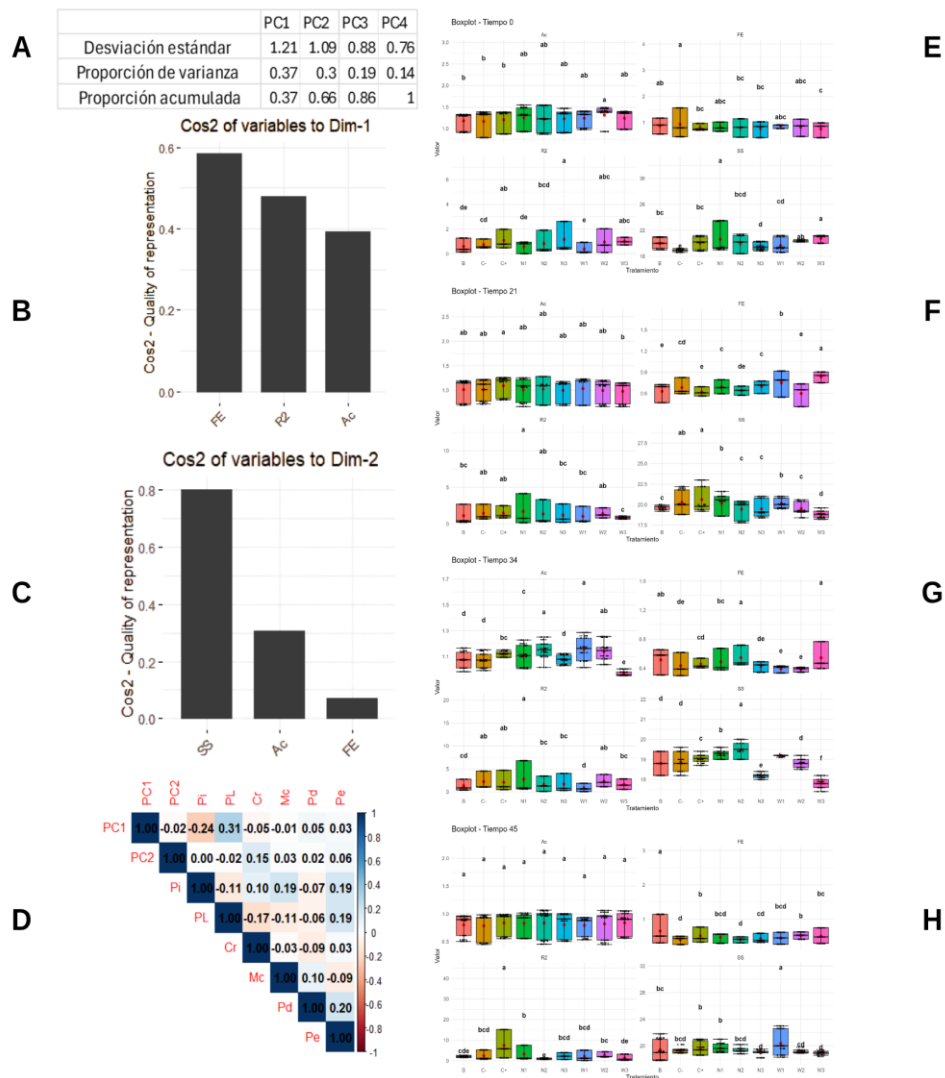
En los sólidos solubles totales (°Brix), desde T0 hasta los 45 días de almacenamiento se evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ). En el T0, N1 y W3 se diferenciaron de N3 y C-. A los 21 días, C+ se distinguió estadísticamente de N1, W1, B, N2, N3, W2 y W3. A los 34 días, los tratamientos N2, N1 y W1 se diferenciaron significativamente entre sí, al igual que con C-, C+, B, N3, W2 y W3. Finalmente, al día 45, W1 presentó diferencias significativas en comparación con C+, N1 y N3.

Por lo que los resultados obtenidos de las variables de la categoría químicas reflejan que el ultrasonido y las nanoburbujas, podrían influir positivamente en la fisiología postcosecha de la cereza.

La agrupación de FE y R2 en la primera componente principal del ACP sugiere una fuerte asociación entre integridad celular y tasa metabólica del fruto. En particular, la tasa de fuga de electrolitos (FE), indicador de la integridad de membranas celulares, fue significativamente más baja en tratamientos como N1 (nanoburbujas de aire), W1 y W2 (ultrasonido de 30 W y 100 W). Esta menor permeabilidad celular sugiere que dichas tecnologías ayudaron a preservar las estructuras celulares del fruto, reduciendo el daño mecánico, y generando una adsorción de compuestos orgánicos oxidantes, en línea con lo reportado por Mu et al. (2020) y Z. Zhang et al. (2022). Además, los resultados de tasa respiratoria confirman esta tendencia, ya que tratamientos como W1, W3 y N2 mostraron valores más bajos en varios puntos del almacenamiento, lo que indica una menor actividad metabólica, lo cual puede estar directamente relacionado con una menor disrupción celular y estrés fisiológico (Adhikari et al., 2020).

En términos de acidez y sólidos solubles totales, tratamientos como W1 (ultrasonido 30 W) y N2 (nanoburbujas de CO<sub>2</sub>) lograron mantener niveles más estables luego de 34 días en la acidez de la cereza, lo que podría sugerir una desaceleración en la degradación de ácidos orgánicos, como el ácido cítrico. Este comportamiento es relevante, ya que una acidez más constante se asocia con un metabolismo más lento y a una maduración controlada, este tipo de resultados también ha sido descrito por Malahlela et al. (2024) observaron una mayor estabilidad metabólica y una mejora en atributos fisiológicos en frutas tratadas con nanoburbujas de CO<sub>2</sub>. En cuanto a los

sólidos solubles totales (°Brix), se observó que N3 (nanoburbujas de ozono) permitió mantener niveles más estables durante el almacenamiento, lo que podría asociarse a un control en la degradación de azúcares y una menor aceleración de la maduración. Este efecto puede atribuirse a la acción combinada de la cavitación y un estrés oxidativo moderado provocado por la nanoburbujas y el ozono, que modulan la actividad enzimática y las rutas catabólicas del fruto, como lo mencionan Li et al. (2024) y Zhao et al. (2023).



**Figura 7.** Análisis de Componentes Principales de variables químicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0, 21, 34 y 45 días). (A) Proporción de varianza explicada por cada componente principal. (B-C) Calidad de representación ( $\cos^2$ ) de las variables en PC1 y PC2. (D) Matriz de correlaciones entre componentes de variables químicas y daños visuales. (E–H) Boxplots de las variables químicas evaluadas por tratamiento en cada tiempo de almacenamiento. Los puntos rojos indican la media para cada grupo. Las letras sobre las cajas representan agrupamientos estadísticos ( $p < 0,05$ ), permitiendo identificar diferencias significativas entre tratamientos en cada tiempo de almacenamiento.

### 5.3. Categoría de variables de color

En la categoría de variables de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  externo e interno), representadas en la Figura 8, dos componentes principales explicaron el 83% de la variabilidad. La primera componente estuvo dominada por las coordenadas de color externo, sin correlaciones destacadas con daños visuales. La PC2, dominada por las coordenadas internas, mostró una muy baja correlación negativa con piel de lagarto ( $PL = -0.18$ ) sugiriendo que una menor intensidad interna de color podría estar ligeramente asociada a la presencia de este tipo de daños, aunque la relación es débil.

Las coordenadas de color externas presentaron diferencias significativas entre tratamientos a lo largo del periodo de almacenamiento ( $p < 0.05$ ), con excepción de la coordenada  $a^*$  en T0, donde no se observaron diferencias relevantes.

La coordenada  $L^*$  externa evidenció diferencias a lo largo del almacenamiento. En T0, el tratamiento con ultrasonido de 100 W (W2) fue significativamente distinto de las nanoburbujas de ozono (N3) y W3. A los 21 días, el tratamiento con N2 mostró los valores más altos de luminosidad, superando a C-, N1 y W3. Esta tendencia se mantuvo a los 34 días, donde N2 fue significativamente mayor que N1. Al finalizar el almacenamiento (T45), la fruta tratada con fungicida (C+) presentó mayor luminosidad en comparación con el tratamiento de ultrasonido de 360 W (W3).

En la coordenada  $a^*$  externo, a los 21 días de almacenamiento, el tratamiento con nanoburbujas de dióxido de carbono (N2) presentó valores significativamente más altos que el ultrasonido de 360 W (W3), indicando una mayor intensidad de rojo. A los 34 días, la fruta sin tratamiento (C-) mostró valores superiores a W3, y a los 45 días, tanto el control negativo (C-) como el fungicida (C+) presentaron valores

significativamente más altos que W3. En cuanto a la coordenada b\*, se observaron diferencias desde el momento de la aplicación, donde la fruta lavada con agua (B) presentó un valor significativamente mayor que el C+. A los 21 días, los tratamientos con N2 y ultrasonido de 100 W(W2) mostraron valores superiores en comparación con W1 y W3. Este patrón se mantuvo a los 34 días, con N2 presentando los valores más altos en comparación con W3. Finalmente, al día 45, los tratamientos C- y C+ presentaron valores significativamente distintos respecto a W3.

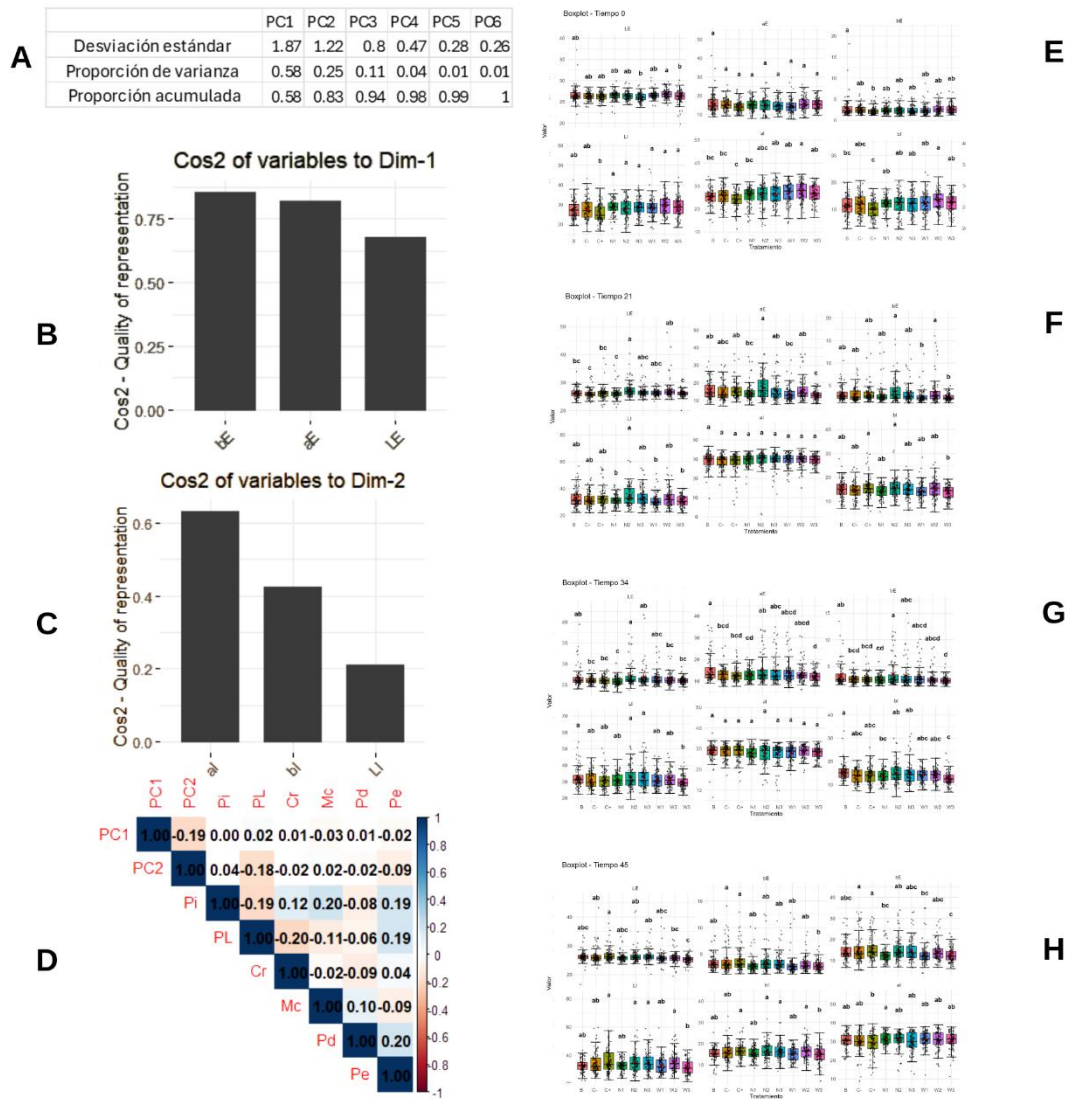
En el caso de las coordenadas internas, la mayoría de los tratamientos presentaron diferencias significativas a lo largo del almacenamiento ( $p < 0.05$ ), aunque en la coordenada a\* no se observaron diferencias en los días 21 y 34.

En la coordenada L\* interno, desde el momento de la aplicación, todos los tratamientos con ultrasonido (W1, W2, W3) y nanoburbujas (N1, N2, N3) presentaron valores significativamente distintos a C+. A los 21 días, N2 fue significativamente diferente a N1, W1 y W3. A los 34 días, B, N2 y N3 presentaron valores significativamente más altos que W3. Finalmente, a los 45 días, C+, N2, N3 y W2 mostraron mayor luminosidad en comparación con W3. En la coordenada a\* interno, al momento de la aplicación (T0), el tratamiento con ultrasonido de 100 W (W2) presentó valores significativamente más altos que el fungicida (C+). A los 45 días, las nanoburbujas de oxígeno (N1) mostraron valores superiores a C+, indicando una posible preservación del tono rojizo interno. Para la coordenada b\* interno, desde T0 ya se observaron diferencias entre W2 y C+. A los 21 días, tanto el tratamiento con fungicida (C+) como las nanoburbujas de CO<sub>2</sub> (N2) presentaron valores más altos que el tratamiento con ultrasonido de 360 W (W3). A los 34 días, la fruta lavada con agua (B) fue

significativamente distinta a W3. Finalmente, al día 45, los tratamientos C+, N2, N3 y W2 mostraron valores significativamente superiores en comparación con W3.

Las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , tanto internas como externas, funcionaron como indicadores indirectos del estado fisiológico del fruto. El ACP reveló una clara separación entre componentes dominadas por las coordenadas externas e internas. Mientras que el tratamiento con ultrasonido de alta potencia (W3) destacó por presentar las mayores alteraciones en el color interno y externo. Estos resultados sugieren que W3, al aplicar una energía de cavitación más intensa, podría haber inducido mayor desorganización celular y afectado la retención de pigmentos.. Estudios previos han demostrado que tratamientos no térmicos bien controlados pueden preservar pigmentos clave y evitar cambios visuales indeseados (Tilahun et al., 2017; Yixue Zhao et al., 2023), por lo que estos hallazgos subrayan la importancia de ajustar la intensidad del ultrasonido para evitar efectos adversos.

A diferencia del tratamiento W3, que mostró mayores variaciones en las coordenadas de color durante el almacenamiento, las nanoburbujas de  $\text{CO}_2$  (N2) permitieron una mejor conservación del brillo y del tono rojizo característico de la cereza Regina. Este efecto podría asociarse a la capacidad del  $\text{CO}_2$  disuelto por las nanoburbujas de generar un entorno antioxidante que reduce la degradación de pigmentos. De manera similar, Li et al. (2021) reportaron que el uso de microburbujas en manzanas no provocó alteraciones significativas en su color, posiblemente debido a su efecto limpiador sobre la superficie del fruto.



**Figura 8.** Análisis de Componentes Principales de las coordenadas de color de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días). (A) Proporción de varianza explicada por cada componente principal. (B-C) Calidad de representación ( $\cos^2$ ) de las variables en PC1 y PC2. (D) Matriz de correlaciones entre componentes de las coordenadas de color y daños visuales. (E-H) Boxplots de las coordenadas de color evaluadas por tratamiento en cada tiempo de almacenamiento. Los puntos rojos indican la media para cada grupo. Las letras sobre las cajas representan agrupamientos estadísticos ( $p < 0,05$ ), permitiendo identificar diferencias significativas entre tratamientos en cada tiempo de almacenamiento.

#### 5.4. Categoría de variables microbiológicas

En la categoría de variables microbiológicas (recuentos de aerobios mesófilos –Ra, moho – Mh y levadura – Lv), representadas en la Figura 9, el ACP mostro que las dos primeras componentes explican el 72% de la variabilidad del conjunto de datos. La primera componente estuvo dominada por Lv y Mh, y la correlación de esta componente con los daños visuales en fruto fue baja y positiva con pitting (Pi;  $r=0.25$ ), machucón (Mc;  $r=0.16$ ) y piel de lagarto (PL;  $r=0.11$ ). Estos resultados sugieren que una mayor presencia de estos microorganismos podría asociarse levemente con la presencia de estos daños superficiales, mientras que la segunda componente estuvo dominada por RAM la cual mostró bajas correlaciones positivas con piel de lagarto (PL;  $r=0.17$ ) y pedicelo suelto (Pe;  $r=0.11$ ) y negativa con pitting Pi ( $r = -0.21$ ), lo que indica una relación poco clara entre este grupo microbiano y la incidencia de estos daños visuales.

La presencia de levaduras mostró diferencias significativas entre tratamientos en todos los tiempos evaluados ( $p < 0,05$ ). Inmediatamente después de la aplicación de los tratamientos (T0), la fruta lavada solo con agua (B), las nanoburbujas de oxígeno (N1) y de dióxido de carbono (N2), así como los ultrasonidos de 30 W (W1) y 100 W (W2), evidenciaron un mayor control de levaduras en comparación con la fruta sin tratamiento (C–), el ultrasonido de 360 W (W3) y las nanoburbujas de ozono (N3).

A los 21 días de almacenamiento, este efecto se mantuvo en N2,W2, y W3, también N1, los cuales mostraron menores recuentos en comparación los demás tratamientos. A los 34 días, W3 presentó la menor concentración de levaduras, diferenciándose

significativamente del tratamiento B. Sin embargo, al día 45, fue la fruta sin tratamiento (C<sup>-</sup>) la que presentó los recuentos más bajos, seguidos de N3 y N1.

La presencia de mohos también presentó diferencias significativas entre tratamientos en todos los tiempos evaluados ( $p < 0,05$ ). En T0, los tratamientos con fungicida (C<sup>+</sup>), agua (B), nanoburbujas de oxígeno (N1), y ultrasonidos de 30 W (W1) y 100 W (W2), mostraron los recuentos más bajos, en comparación con C<sup>-</sup>, N2, N3 y particularmente con W3, el cual presentó los niveles más altos. No obstante, a los 21 días, tanto W1 como C<sup>-</sup> perdieron eficacia, siendo superados por otros tratamientos que lograron mantener bajos niveles de mohos (C<sup>+</sup>,N1,N2,N3,W2,W3). A los 34 días, el tratamiento con ultrasonido de 100 W (W2) fue el más efectivo, con recuentos más bajos en comparación con demás tratamientos. Finalmente, al día 45, los tratamientos sin intervención (C<sup>-</sup>) y con ultrasonido de 30 W (W1) fueron los que presentaron los menores niveles de mohos, superando al tratamiento con nanoburbujas de ozono (N3), que mantuvo una alta presencia de mohos hasta el final del almacenamiento.

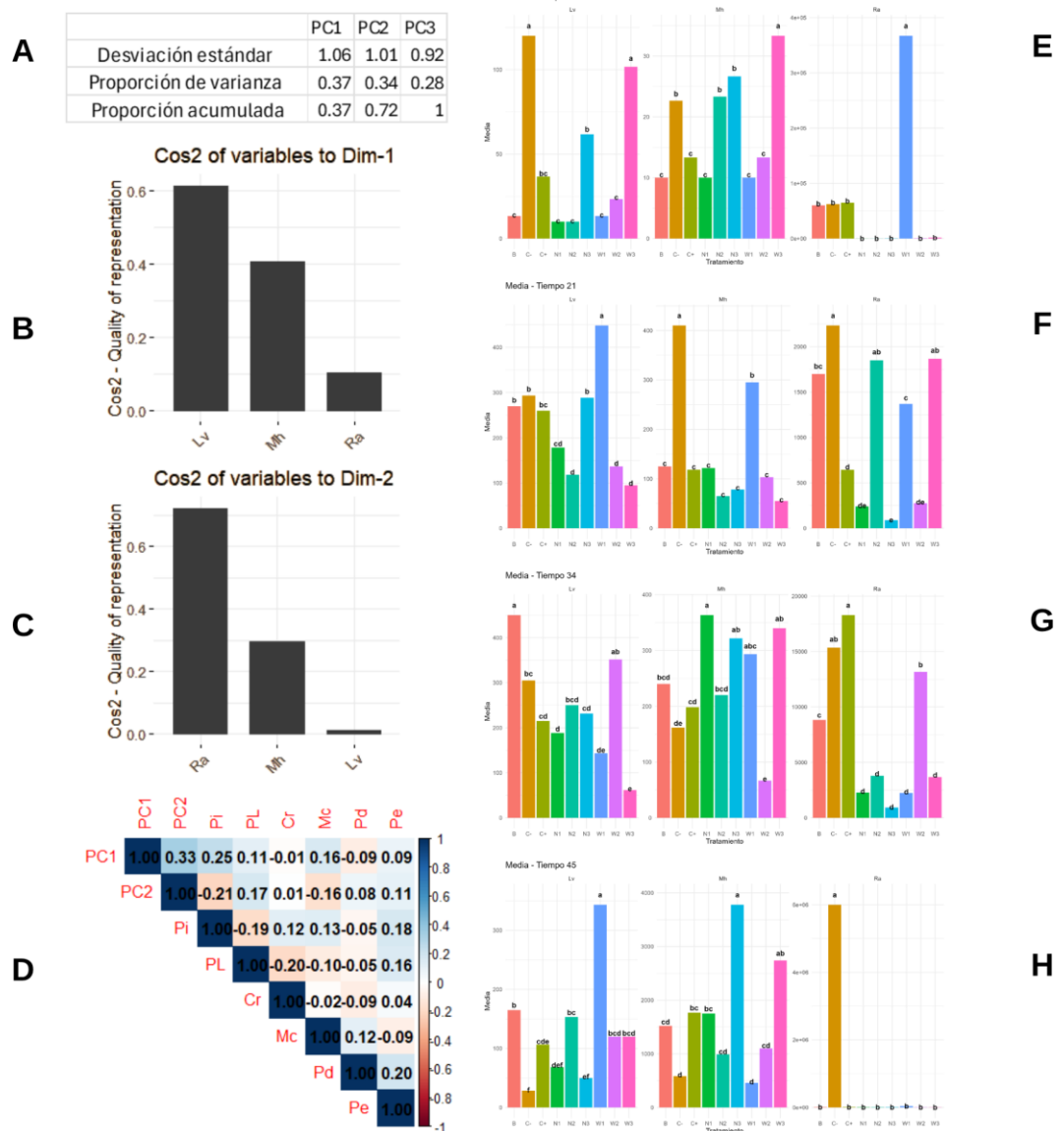
En cuanto a los recuentos de microorganismos aerobios mesófilos (RAM), se observaron diferencias significativas a lo largo del periodo de almacenamiento ( $p < 0,05$ ). Inmediatamente después de la aplicación (T0), el tratamiento con ultrasonido de 30 W (W1) presentó los mayores recuentos, en comparación con el resto de los tratamientos. A los 21 días, tanto la fruta sin tratamiento (C<sup>-</sup>) como W1 continuaron presentando los valores más altos, diferenciándose significativamente de C<sup>+</sup> y N3. A los 34 días, el tratamiento con fungicida (C<sup>+</sup>) presentó los mayores recuentos, seguido de C<sup>-</sup>, ambos con niveles superiores al resto de los tratamientos. Finalmente, a los 45

días, el tratamiento sin intervención (C-) se mantuvo con los valores más elevados de RAM, diferenciándose del resto de los tratamientos.

La reducción de cargas microbianas (Ra, Mh, Lv) observada en tratamientos como W1 sugiere un efecto antimicrobiano eficaz en etapas iniciales y avanzadas de almacenamiento, posiblemente asociado a cavitación de baja intensidad.

W1 mostró recuentos bajos en varios momentos del almacenamiento, especialmente en mohos y levaduras, lo que sugiere una capacidad sostenida de control microbiológico en ciertas condiciones. De acuerdo con Muzaffar (2016), el tratamiento con ultrasonido (33 kHz, 60 W) reduce significativamente la carga microbiana en cerezas al generar radicales hidroxilo y fuerzas de cizallamiento que provocan disrupción celular de microorganismos.

Si bien los tratamientos con nanoburbujas no mostraron una reducción generalizada de microorganismos en todos los tiempos de evaluación, en etapas tempranas (día 0) y a los días 21 y 45, N1 presentó cargas microbianas comparables al control positivo (C+), lo que sugiere un efecto moderado pero relevante para asegurar una vida postcosecha. Investigaciones como la de Malahlela et al. (2025) han demostrado que las nanoburbujas reducen eficazmente los microorganismos superficiales en frutas, retrasando su proliferación y mejorando la estabilidad postcosecha. Este efecto se refuerza con los hallazgos de Agarwal et al. (2011), quienes atribuyen a las nanoburbujas un alto potencial para la remoción de contaminantes, y con los de Shi et al. (2023), quienes destacan la elevada actividad antimicrobiana del ozono disuelto por su fuerte poder oxidante.



**Figura 9.** Análisis de Componentes Principales de variables microbiológicas de cerezas, su correlación con daños visuales y su comportamiento en los tiempos de almacenamiento (0,21, 34 y 45 días). (A) Proporción de varianza explicada por cada componente principal. (B-C) Calidad de representación (cos<sup>2</sup>) de las variables en PC1 y PC2. (D) Matriz de correlaciones entre componentes de variables microbiológicas y daños visuales. (E-H) Gráficos de barra de las variables microbiológicas (UFC/g)

evaluadas por tratamiento en cada tiempo de almacenamiento. Las letras sobre las barras representan agrupamientos estadísticos ( $p < 0,05$ ), permitiendo identificar diferencias significativas entre tratamientos en cada tiempo de almacenamiento.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten confirmar la hipótesis: el uso de tecnologías emergentes como el ultrasonido y las nanoburbujas representa una alternativa viable al fungicida sintético fludioxonil para conservar la calidad postcosecha de cerezas Regina.

Se observó un efecto diferencial según la potencia del ultrasonido y la composición gaseosa de las nanoburbujas. El ultrasonido de baja potencia (30 W) fue el tratamiento más efectivo en conservar masa grupal, resistencia mecánica y reducir la carga microbiana, destacando por su capacidad para preservar la integridad estructural del fruto. En contraste, el ultrasonido de alta potencia (360 W) mostró efectos negativos sobre el color, provocando un posible daño celular por cavitación intensa.

Entre las nanoburbujas, las de CO<sub>2</sub> (N2) se destacaron por su capacidad para conservar el color, estabilizar parámetros químicos y mantener bajo el deterioro visual. Las de O<sub>2</sub> (N1) mostraron menor resistencia mecánica y resultados menos consistentes con el paso de los tiempos de almacenamiento. Las nanoburbujas de ozono (N3) no ofrecieron ventajas consistentes y mantuvieron una alta carga microbiana al final del almacenamiento.

La integración de variables como masa grupal, fuga de electrolitos, tasa de respiración y parámetros de color permitió diferenciar con claridad los tratamientos.

En conjunto, el ultrasonido de 30 W y las nanoburbujas de CO<sub>2</sub> resultaron ser los tratamientos más efectivos para prolongar la vida útil y calidad del fruto durante el almacenamiento, posicionándose como alternativas sostenibles y eficaces frente al uso de fungicidas sintéticos.

## **7. Sugerencias**

El estudio realizado es un avance para identificar alternativas al uso de fungicidas sintéticos mediante la aplicación de tecnologías emergentes. A futuro, es deseable explorar la interacción entre el ultrasonido y las nanoburbujas mediante tratamientos combinados, evaluando posibles efectos sinérgicos en la preservación de la calidad postcosecha de cerezas. Estudiar otras variedades de cereza y frutas de similar comportamiento postcosecha, para analizar la aplicabilidad transversal de las tecnologías evaluadas como realizar un seguimiento sensorial y comercial, incluyendo pruebas de aceptación por parte de consumidores y analizar el impacto en el valor comercial de las cerezas.

Por otra parte, es interesante incorporar técnicas a escalas moleculares para evaluar el efecto de los tratamientos sobre la integridad de tejidos celulares, que permitan comprender mejor los mecanismos fisiológicos involucrados.

## 8. Referencias

- Aaliya, B., Valiyapeediyekkal Sunooj, K., Navaf, M., Parambil Akhila, P., Sudheesh, C., Ahmad Mir, S., Sabu, S., Sasidharan, A., Theingi Hlaing, M., & George, J. (2021). Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: A synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques. *Food Research International*, 147, 110514. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110514>
- Abdipour, M., Sadat Malekhossini, P., Hosseinfarahi, M., & Radi, M. (2020). Integration of UV irradiation and chitosan coating: A powerful treatment for maintaining the postharvest quality of sweet cherry fruit. *Scientia Horticulturae*, 264, 109197. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109197>
- Aday, M. S., & Caner, C. (2014). Individual and combined effects of ultrasound, ozone and chlorine dioxide on strawberry storage life. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.006>
- Adhikari, B. M., Truong, T., Prakash, S., Bansal, N., & Bhandari, B. (2020). Impact of incorporation of CO<sub>2</sub> on the melting, texture and sensory attributes of soft-serve ice cream. *International Dairy Journal*, 109, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104789>
- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175-1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Ahmadi, R., Khodadadi, D. A., Abdollahy, M., & Fan, M. (2014). Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(4), 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.05.021>
- Arvanitoyannis, I. S., Kotsanopoulos, K. V., & Savva, A. G. (2017). Use of ultrasounds in the food industry—Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(1), 109-128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.860514>

- ASOEX. (2021). Lineamientos para exportación de cerezas frescas a china.
- Babu, K. S., & Amamcharla, J. K. (2022). Generation methods, stability, detection techniques, and applications of bulk nanobubbles in agro-food industries: a review and future perspective. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067119>
- Bilkova, A., Knapova, P., Suran, P., Kwiecien, J., Svec, F., & Sklenarova, H. (2022). Effect of storage conditions on content of pesticide residues in sweet cherries. *Food Chemistry: X*, 13, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100185>
- Birmpa, A., Sfika, V., & Vantarakis, A. (2013). Ultraviolet light and Ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods. *International Journal of Food Microbiology*, 167(1), 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.005>
- 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>
- Cao, S., Hu, Z., & Pang, B. (2010). Optimization of postharvest ultrasonic treatment of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 55(3), 150-153. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.11.002>
- Cao, S., Hu, Z., Pang, B., Wang, H., Xie, H., & Wu, F. (2010). Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest. *Food Control*, 21(4), 529-532. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.08.002>
- Chen, F., Zhang, M., & Yang, C.-h. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104953. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104953>
- Chileagricola. (2019). *Requisitos productos orgánicos*. [http://www.chileagricola.us/eeuu/?Page\\_id=654](http://www.chileagricola.us/eeuu/?Page_id=654)
- Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Vuong, Q. V., Papoutsis, K., & Stathopoulos, C. E. (2016). Sweet cherry: Composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.002>

- Cliff, M., Dever, M., Hall, J., & Girard, B. (1995). Development and evaluation of multiple regression models for prediction of sweet cherry liking. *Food Research International*, 28(6), 583-589.
- Cordero-Bueso, G., autores, V., Malegori, C., Grassi, S., Arroyo, T., Esteve-Zarzoso, B., Heredia, F. J., Cantoral, J., Alonso Villegas, R., Arboleña, J.-C., Lázaro, A., Escribano, S., Rodríguez-Herrera, A., García, M., Ruiz, R., & Fregapane, G. (2017). *Análisis Sensorial de los Alimentos*.
- Esteve Gaviña, A. (2015). Estudio de la actividad antimicrobiana de micropartículas de sílice sobre *Escherichia coli*.
- Exportador, D. D. (2022). Requisitos de ingreso para frutas y hortalizas a la Unión Europea. <https://www.diariodelexportador.com/2020/03/requisitos-de-ingreso-para-frutas-y.html#>
- Faienza, M. F., Corbo, F., Carocci, A., Catalano, A., Clodoveo, M. L., Grano, M., Wang, D. Q. H., D'Amato, G., Muraglia, M., Franchini, C., Brunetti, G., & Portincasa, P. (2020). Novel insights in health-promoting properties of sweet cherries. *Journal of Functional Foods*, 69, 103945. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103945>
- Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Scientia et Technica*, 24(2), 283-304.
- Ikeura, H., Kobayashi, F., & Tamaki, M. (2013). Ozone Microbubble Treatment at Various Water Temperatures for the Removal of Residual Pesticides with Negligible Effects on the Physical Properties of Lettuce and Cherry Tomatoes. *Journal of Food Science*, 78(2), T350-T355. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12007>
- Iqonsulting. (2025). *Anuario cereza 2025*. <https://www.calameo.com/read/0071544704cab764d8835>
- Kappel, F., Fisher-Fleming, B., & Hogue, E. (1996). Fruit characteristics and sensory attributes of an ideal sweet cherry.

- Karimi, M., Jenkins, B., & Stroeve, P. (2014). Ultrasound irradiation in the production of ethanol from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *40*, 400-421. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.151>
- Leong, T., Juliano, P., & Knoerzer, K. (2017). Advances in Ultrasonic and Megasonic Processing of Foods. *Food Engineering Reviews*, *9*(3), 237-256. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9167-5>
- Li, X., Liu, C., Liu, F., Zhang, X., Chen, X., Peng, Q., Wu, G., & Zhao, Z. (2024). Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles. *Food Chemistry*, *441*, 138293. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138293>
- López, L., Larrigaudière, C., Giné-Bordonaba, J., & Echeverria, G. (2023). Defining key parameters and predictive markers of 'Early Bigi' cherry consumer satisfaction by means of differential storage scenarios. *Postharvest Biology and Technology*, *195*, 112117. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112117>
- Malahlela, H. K., Belay, Z. A., Mphahlele, R. R., & Caleb, O. J. (2024). Micro-nano bubble water technology: Sustainable solution for the postharvest quality and safety management of fresh fruits and vegetables – A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *94*, 103665. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103665>
- Malahlela, H. K., Belay, Z. A., Mphahlele, R. R., & Caleb, O. J. (2025). Efficacy of Air and Oxygen Micro-nano Bubble Waters Against Colletotrichum gloeosporioides and Impacts on Postharvest Quality of 'Fan Retief' Guava Fruit. *Journal of Food Protection*, *88*(1), 100437. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100437>
- Mohapatra, D., Mishra, S., Giri, S., & Kar, A. (2013). Application of hurdles for extending the shelf life of fresh fruits. *Trends in Post-Harvest Technology*, *1*(1), 37-54.
- Mu, Y., Feng, Y., Wei, L., Li, C., Cai, G., & Zhu, T. (2020). Combined effects of ultrasound and aqueous chlorine dioxide treatments on nitrate content during storage and postharvest storage quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Food Chemistry*, *333*, 127500. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127500>

- Muzaffar, S., Ahmad, M., Wani, S. M., Gani, A., Baba, W. N., Shah, U., Khan, A. A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Wani, T. A. (2016). Ultrasound treatment: effect on physicochemical, microbial and antioxidant properties of cherry (*Prunus avium*). *Journal of Food Science and Technology*, 53(6), 2752-2759 <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2247-3>
- Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- Nicolau-Lapeña, I., Lafarga, T., Viñas, I., Abadias, M., Bobo, G., & Aguiló-Aguayo, I. (2019). Ultrasound Processing Alone or in Combination with Other Chemical or Physical Treatments as a Safety and Quality Preservation Strategy of Fresh and Processed Fruits and Vegetables: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 12(9), 1452-1471. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02313-y>
- ODEPA. (2025). *Boletín de la fruta* [https://apps.odepa.gob.cl/powerbi/boletin\\_fruta.html](https://apps.odepa.gob.cl/powerbi/boletin_fruta.html)
- Pinheiro, J., Alegria, C., Abreu, M., Gonçalves, E. M., & Silva, C. L. M. (2015). Influence of postharvest ultrasounds treatments on tomato (*Solanum lycopersicum*, cv. Zinac) quality and microbial load during storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 552-559. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2015.04.009>
- R Core Team (2023). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>
- Sandiman. (2021). *Nanoburbujas: Una revolución en transferencia de gases* <https://sandiman.cl/area/generadores-nanoburbujas/>
- Serradilla, M. J., Villalobos, M. D. C., Hernández, A., Martín, A., Lozano, M., & Córdoba, M. D. G. (2013). Study of microbiological quality of controlled atmosphere packaged ‘Ambrunés’ sweet cherries and subsequent shelf-life. *International Journal of Food Microbiology*, 166(1), 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.006>
- Shewfelt, R. L. (2014). Chapter 14 - Measuring Quality and Maturity. In W. J. Florkowski, R. L. Shewfelt, B. Brueckner, & S. E. Prussia (Eds.), *Postharvest Handling (Third Edition)* (pp. 387-410). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408137-6.00014-4>

- Shi, J., Cai, H., Qin, Z., Li, X., Yuan, S., Yue, X., Sui, Y., Sun, A., Cui, J., Zuo, J., & Wang, Q. (2023). Ozone micro-nano bubble water preserves the quality of postharvest parsley. *Food Research International*, 170, 113020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113020>
- Simfruit. (2022). *Cerezas: el “oro frutícola” de O’Higgins que se transará en la bolsa de valores Nasdaq en 2023*. <https://www.simfruit.cl/cerezas-el-oro-fruticola-de-ohiggins-que-se-transara-en-la-bolsa-de-valores-nasdaq-en-2023/#:~:text=Un%20aspecto%20fundamental%20del%20mercado%20de%20las%20cerezas%20es%20cerca,la%20temporada%202021%2D2022%E2%80%9D>.
- Tilahun, S., Park, D. S., Taye, A. M., & Jeong, C. S. (2017). Effect of ripening conditions on the physicochemical and antioxidant properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Food Science and Biotechnology*, 26(2), 473-479. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0065-7>
- Tomadoni, B., Moreira, M. D. R., Espinosa, J. P., & Ponce, A. (2017). Individual and Combined Effects of Pomegranate Extract and Ultrasonic Treatments on Kiwifruit Juice Quality Parameters [<https://doi.org/10.1111/jfpe.12339>]. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12339. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12339>
- Ushida, A., Koyama, T., Nakamoto, Y., Narumi, T., Sato, T., & Hasegawa, T. (2017). Antimicrobial effectiveness of ultra-fine ozone-rich bubble mixtures for fresh vegetables using an alternating flow. *Journal of Food Engineering*, 206, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.003>
- Valero, D. (2015). Recent developments to maintain overall sweet cherry quality during postharvest storage.
- Zhang, B. H., Xu, X., Lu, H., Wang, L., & Yang, Q. (2021). Removal of phoxim, chlorothalonil and Cr<sup>3+</sup> from vegetable using bubble flow. *Journal of Food Engineering*, 291, 110217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110217>
- Zhang, C., Gong, H., & Liu, Y. (2022). Effects of postharvest coating using chitosan combined with natamycin on physicochemical and microbial properties of sweet cherry during cold storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.057>

- Zhang, N., Ding, Y., Wang, Q., & Chen, A. (2021). Effects of intermittent hot water treatment on cherry quality. *Journal of Animal and Plant Sciences-Japs*, 31(4), 1036-1042. <https://doi.org/10.36899/japs.2021.4.0300>
- Zhang, Q., Yang, W., Liu, J., Liu, H., Lv, Z., Zhang, C., Chen, D., & Jiao, Z. (2021). Postharvest UV-C irradiation increased the flavonoids and anthocyanins accumulation, phenylpropanoid pathway gene expression, and antioxidant activity in sweet cherries (*Prunus avium* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 175, 111490. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111490>
- Zhang, X., Ge, C., Ma, J., & Chen, L. (2022). Rapid quality determination of cherry fruit (*Prunus* spp.) Using artificial olfactory technique as combined with non-linear data extraction model. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1804-1816. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2106999>
- Zhang, Y.-L., Cui, Q.-L., Wang, Y., Shi, F., Liu, Y.-P., Liu, J.-L., & Nie, G.-W. (2021). Effect of carboxymethyl chitosan-gelatin-based edible coatings on the quality and antioxidant properties of sweet cherry during postharvest storage. *Scientia Horticulturae*, 289, 110462. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110462>
- Zhang, Z.-H., Wang, S., Cheng, L., Ma, H., Gao, X., Brennan, C. S., & Yan, J.-K. (2022). Micro-nano-bubble technology and its applications in food industry: A critical review. *Food Reviews International*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2023172>
- Zhao, H., Wang, B., Cui, K., Cao, J., & Jiang, W. (2019). Improving postharvest quality and antioxidant capacity of sweet cherry fruit by storage at near-freezing temperature. *Scientia Horticulturae*, 246, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.054>
- Zhao, Y., Hou, Z., Zhang, N., Ji, H., Dong, C., Yu, J., Chen, X., Chen, C., & Guo, H. (2023). Application of proteomics to determine the mechanism of ozone on sweet cherries (*Prunus avium* L.) By time-series analysis [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1065465>
- Zhao, Y., Li, L., Gao, S., Wang, S., Li, X., & Xiong, X. (2023). Postharvest storage properties and quality kinetic models of cherry tomatoes treated by high-voltage electrostatic fields. *LWT*, 176, 114497. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114497>

Zhou, Y., Zhou, B., Xu, F., Muhammad, T., & Li, Y. (2019). Appropriate dissolved oxygen concentration and application stage of micro-nano bubble water oxygation in greenhouse crop plantation. *Agricultural Water Management*, 223, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105713>