





Efecto del ozono y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) mínimamente procesado

 Carla Pretell-Vásquez^{1*},  Luis Márquez-Villacorta¹,  Raúl Siche²,  María Hayayumi-Valdivia¹

¹ Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

² Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

* Autor de correspondencia: Universidad Privada Antenor Orrego. Av. América Sur 3145, Urb. Monserrate. Facultad Ciencias Agrarias, Pabellón E 3er piso. Trujillo, Perú. cpretellv@upao.edu.pe

Recibido: 22 de junio de 2019

Aceptado: 20 de mayo de 2020

Publicado: 15 de septiembre de 2020

Editor temático: Catarina Pedro Pássaro Carvalho (Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA]. Centro de Comercio. Regional Antioquia)

Para citar: Pretell-Vásquez, C., Márquez-Villacorta, L., Siche, R. & Hayayumi-Valdivia, M. (2020). Efecto del ozono y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) mínimamente procesado. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1506. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1506

Resumen

A nivel mundial, Perú es uno de los principales productores de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.); este es un vegetal altamente perecible debido a su elevada velocidad de respiración y metabolismo, por lo que es muy importante conservar las características de calidad en los turiones, motivo por el cual se evaluó el efecto del ozono gaseoso (0 a 10 ppm) y tiempo de almacenamiento (0 a 30 días) sobre la pérdida de peso, luminosidad, firmeza, contenido de clorofila y contenido de lignina. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta, aplicando un diseño compuesto central rotatable. Los resultados indicaron que existió influencia significativa de las variables independientes sobre las características fisicoquímicas estudiadas, así como una adecuada bondad de ajuste del modelo de regresión cuadrático. Mediante la técnica de superposición de contornos se determinó que las condiciones óptimas para la mayor retención de firmeza (11,42 N), contenido de clorofila (12,33 mg/100 g) y contenido de lignina (7 mg/100 g) correspondieron a 6,98 ppm de ozono gaseoso hasta los 30 días de almacenamiento, con adecuadas características de calidad en los turiones.

Palabras clave: clorofila, fenoles, lignina, propiedades fisicoquímicas, tallos de espárragos

Effect of ozone and storage time on the physicochemical characteristics of minimally processed green asparagus (*Asparagus officinalis* L.)

Abstract

Peru is one of the world's leading producers of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.), an extremely perishable vegetable due to its high respiration rate and metabolism. Hence, it is imperative to preserve the quality characteristics of its shoots. For this, we evaluated the effect of gaseous ozone (0-10 ppm) and storage time (0-30 days) on weight loss, luminosity, firmness, chlorophyll content, and lignin content. The response surface methodology was used, applying a rotatable central composite design. The results suggested a significant influence of the independent variables on the studied physicochemical characteristics and adequate goodness of fit of the quadratic regression model. We concluded, using the contour technique, that the optimal conditions for the highest retention of firmness (11.42 N), chlorophyll content (12.33 mg/100 g), and lignin content (7 mg/100 g) are 6.98 ppm gaseous ozone for 30 days of storage to preserve the quality of the shoots.

Keywords: asparagus spears, chemicochemical properties, chlorophyll, lignin, phenols

Introducción

Durante las tres últimas décadas es evidente una mayor preocupación por parte de los consumidores en la escala global, respecto a la calidad e inocuidad de los alimentos que ofrece el mercado (Solenó, 2015). El consumo de frutas y hortalizas ha aumentado sustancialmente en años recientes, ya que su valor nutritivo es bien reconocido y se consideran alimentos importantes, debido a que aportan fibra y compuestos antioxidantes en la dieta humana (Tzortzakis & Chrysargyris, 2016).

El espárrago es una hortaliza perenne, rústica y de corta vida de poscosecha (Pascualetti et al., 2013). Perú es el segundo productor de espárragos a nivel mundial (4 % del total) superado solo por China (89 %), aunque está dirigido principalmente al consumo interno, y por delante de México (3 %), Alemania (1 %) y España (1 %), según estadísticas de la Food and Drug Administration (FDA). Las principales zonas productoras peruanas durante el 2018 fueron Ica (53 %) y La Libertad (37 %), según cifras del Ministerio de Agricultura y Riesgo (Agronline, 2019). Se conoce que la vida útil del espárrago (periodo que transcurre entre la cosecha y el consumo final) es de quince días; luego de ello, la degradación o proceso de senescencia se acelera y deja de estar apto para el consumo humano (Cosío, 2017).

El espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) es un vegetal muy popular por su textura turgente y valor nutricional. Sin embargo, recién cosechado es muy susceptible al amarillamiento y decaimiento del turión, característica que se relaciona principalmente con su alta velocidad de respiración y la contaminación microbiana. Los turiones experimentan una serie de cambios fisiológicos considerables durante el almacenamiento, incluida la pérdida de agua, la degradación de la clorofila y ácido ascórbico, así como cambios en los compuestos fenólicos. Mientras tanto, el grado de lignificación es también un factor importante para determinar la calidad de este producto (Wang & Fang, 2019). Estos cambios se pueden reducir por una combinación de enfriamiento rápido después de la cosecha, almacenamiento a bajas temperaturas, tratamientos químicos y el uso de atmósferas modificadas o controladas. Estas últimas estrategias se han utilizado para reducir el deterioro del espárrago durante el almacenamiento en frío, aunque han añadido pocos beneficios (Mercado-Ruiz et al., 2013).

La industria de frutas y hortalizas frescas y mínimamente procesadas normalmente emplea para la limpieza y desinfección el agua clorada y ácidos orgánicos; sin embargo, puede no ser eficaz contra algunos microorganismos y virus patógenos (Aziz & Ding, 2018). Además, la formación de trihalometanos y cloraminas a partir de la reacción de la aplicación de cloro hacia compuestos orgánicos solubles puede amenazar la seguridad alimentaria humana o causar contaminación ambiental. Por lo tanto, diferentes autores sugieren el empleo de agentes desinfectantes alternativos (Gutiérrez et al., 2016b). Es así como las nuevas tecnologías desinfectantes, como el uso de luz ultravioleta, ultrasonido, ozono, irradiación, ácidos orgánicos, entre otros, permiten la inactivación de patógenos y mantienen la calidad del producto (Bermúdez-Aguirre & Barbosa-Cánovas, 2013).

El ozono (O₃) se descompone naturalmente en oxígeno, y ha sido revisado con respecto a su seguridad como desinfectante. Esta sustancia fue declarada GRAS (*generally recognised as safe*); en el 2003, recibió la aprobación formal de la FDA de los Estados Unidos para ser utilizado en contacto directo con alimentos. Por esa razón, y considerando que no tiene efecto cancerígeno para la salud humana, aumentó el uso de ozono en muchas partes del mundo en el procesamiento de alimentos (Aziz & Ding, 2018). La hormesis implica la estimulación de un beneficio en respuesta de la planta por dosis bajas o subletales de

un inductor/agente, como un inductor químico o un estrés físico, para obtener una respuesta beneficiosa o protectora (Ribeiro et al., 2012). El ozono puede inducir al efecto hormonal en frutas y hortalizas, que promueve diversas respuestas fisiológicas positivas, incluyendo la síntesis de antioxidantes, poliaminas, etileno, compuestos fenólicos y otros metabolitos secundarios (Pretell et al., 2016).

La utilización del ozono en poscosecha está creciendo actualmente, ya que se han realizado investigaciones, especialmente en los principales vegetales de exportación, en las que se indica que una dosis correcta de aplicación puede retrasar la senescencia y extender la vida útil de cierto tipo de hortalizas como brócoli, lechuga y repollo (Aziz & Ding, 2018).

El diseño de experimentos desempeña un papel importante dentro del campo de la optimización de procesos y productos, particularmente en áreas de manufactura y mejora continua (Arias-Nava et al., 2015). El objetivo de estos modelos es a menudo la optimización del sistema de producción real simulado (Dellino et al., 2010). La metodología de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas estadísticas usadas para encontrar las condiciones óptimas de procesamiento de los productos, sin aumentar los costos de operación y tiempos de experimentación, con el fin de mejorar los sistemas en los que una o varias respuestas de interés están influenciadas por diversas variables independientes (Torres et al., 2018).

En tal sentido, las potencialidades de la aplicación del ozono en el tratamiento poscosecha de hortalizas muestran una gran viabilidad de uso, permitiendo aplicar esta tecnología a los espárragos verdes. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar, mediante la metodología de superficie de respuesta, la concentración de ozono gaseoso y el tiempo de almacenamiento que permitan obtener el espárrago verde mínimamente procesado con las mejores características fisicoquímicas.

Materiales y métodos

Materia prima

Para el presente estudio se utilizaron turiones de espárrago verde *Asparagus officinalis* L. (Asparagaceae), variedad UC157 F1, procedentes de la provincia de Chao (coordenadas 08°32'25" S y 78°40'39" O), en el departamento de La Libertad, Perú. Se trabajó con espárragos verdes en estado fresco (máximo 7 horas de haber sido cosechados), utilizando aquellos turiones que no mostraron daño físico (golpes, magulladuras, etc.), exentos de plagas y libres de cualquier olor extraño. Se clasificaron de acuerdo con la NTP 011.109:2008 (Indecopi, 2008) con calidad de punta AB y el calibre 14-20 mm.

Tratamiento con mínimo proceso

Los turiones fueron lavados por aspersión con agua potable, con el fin de eliminar las impurezas superficiales, y fueron sumergidos en una solución de dióxido de cloro a 100 ppm durante 5 minutos a temperatura ambiente. Se cortaron a una longitud de 17 cm, considerando la medida de la punta a la base; luego, se eliminó el exceso de humedad y, seguidamente, se acondicionaron en bandejas de poliestireno expandido con un peso de 150 g \pm 3 g, para trasladarse a la cámara de tratamiento, donde se inyectó el ozono gaseoso generado mediante una máquina ozonificadora (marca Ozonomatic, modelo OZ-500), con un flujo de 500 mg/h y a través de una manguera de 7 mm de diámetro, sometidos a diferentes

concentraciones entre 0 y 10 ppm, controladas mediante un medidor digital de ozono gaseoso (marca Crowcon, modelo Gasman O₃, rango 0-100 ppm, sensibilidad $\pm 0,1$ ppm). Finalmente, las bandejas con turiones se retiraron de la cámara y fueron recubiertas con una película de cloruro de polivinilo (PVC) y almacenadas en una cámara de refrigeración con control de temperatura durante 30 días a $4\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ y $85-90\% \pm 0,1\%$ de humedad relativa, control realizado con un termohigrómetro (Marca Fluke, Modelo 971, sensibilidad $\pm 2,5\%$).

Técnicas analíticas para evaluar las características fisicoquímicas

A continuación, se exponen las técnicas para determinar las características fisicoquímicas de los materiales:

- **Pérdida de peso.** Esta característica se determinó registrando el peso las bandejas de espárrago verde antes y después de cada periodo de almacenamiento establecido. Los resultados se expresaron como porcentaje de pérdida de peso con respecto al peso inicial (Wang & Fang, 2019).
- **Color.** Para determinar las características de color, se utilizó el sistema CIELAB, mediante el colorímetro Kónica-Minolta, modelo CR-400. El equipo fue calibrado con un blanco estándar. Luego se determinó la luminosidad o valor L* ($L^*=0$ para negro y $L^*=100$ para blanco), utilizando 10 muestras por cada tratamiento. Los resultados se expresaron como el promedio de los valores obtenidos (Albanese et al., 2007).
- **Firmeza.** Se utilizó un texturómetro Instron modelo 3342 con una celda de 50 N. La fuerza de ruptura del tejido se midió con una cruceta de 3.18 mm de diámetro y velocidad de 1 mm/s, registrado por el software Bluehill 2.0 (Albanese et al., 2007). Los resultados se expresaron como el promedio de 10 muestras por tratamiento.
- **Contenido de lignina.** La lignina es un polímero de compuestos fenólico insoluble en todos los solventes; por lo tanto, es necesario romper químicamente sus componentes estructurales. La tioacidólisis es un método usado para hidrolizar la lignina. Se deshidrató el tejido; luego, 0,5 g se homogenizaron con 150 mL de etanol al 80 % por 4 minutos. La mezcla fue filtrada a vacío y el residuo fue lavado con 20 mL de etanol al 80 % y secado a 50 °C por 24 horas. Para el secado del residuo, se adicionaron 15 mL de HCl 2 mol/L y 1 mL de ácido tioglicólico; posteriormente, se llevó a cocción por 4 horas, y centrifugado a 10.000 rpm por 15 minutos. El residuo (lignina tioglicolato) fue lavado con 10 mL de agua, y nuevamente suspendido en 20 mL de NaOH 0,5 mol/L con un agitador magnético por 18 horas a temperatura ambiente y centrifugado; 4 mL de HCl concentrado fue adicionado al líquido sobrenadante. La lignina ácida tioglicólica fue precipitada a 4 °C por 4 horas y centrifugada; el residuo fue disuelto en 10 mL de NaOH 0,5 mol/L; la absorbancia fue leída a 280 nm. La cuantificación fue realizada en mg/100 g muestra, usando una curva estándar de ácido cumárico (An et al., 2007; Wang & Fang, 2019).
- **Contenido de clorofila.** Para determinar el contenido de clorofila se utilizó el método según Ruiz Santiago et al. (2019) y de Wang y Fang (2019). Para ello, se cortó finamente la muestra en tiras de 0,5 cm² pesó 0,5 g, que se maceró en un mortero adicionando 5 mL de solución de acetona al 80 %, hasta extraer todo el pigmento de la muestra; posteriormente, la muestra se depositó en un tubo y se centrifugó a 2.000 rpm por 10 minutos. Se separó el sobrenadante que contiene los pigmentos, ajustando cada tubo a 6 mL con acetona al 80 %; se tomaron 0,5 mL del sobrenadante de cada uno de los extractos y se diluyó hasta 5 mL con acetona al 80 %. La absorbancia se midió en un espectrofotómetro marca Thermo spectronic, modelo Genesys 6, a longitudes de onda de 645 y 663 nm, utilizando una muestra de acetona al 80 % como blanco. Los resultados se expresaron

como el promedio de 3 muestras por tratamiento. Para la cuantificación de clorofila total se utilizó la siguiente ecuación: $\text{Clorofila Total} = (20,2 \times \text{Abs}_{645\text{nm}}) + (8,02 \times \text{Abs}_{663\text{nm}})$.

Análisis estadístico

Diseño compuesto central rotatable (DCCR)

Se empleó un diseño de superficie de respuesta compuesto central rotatable con arreglo 2^4 , analizando los datos con la ayuda del programa Minitab 17. Los niveles experimentales codificados de las variables independientes se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Diseño compuesto central rotatable de la metodología de superficie de respuesta

Corrida	Concentración de ozono (codificado)	Tiempo de almacenamiento (codificado)	Concentración de ozono (ppm)	Tiempo de almacenamiento (días)
1	-1	-1	0	0
2	-1	0	0	15
3	-1	1	0	30
4	0	-1	5	0
5	0	0	5	15
6	0	1	5	30
7	1	-1	10	0
8	1	0	10	15
9	1	1	10	30
10	0	0	5	15
11	0	0	5	15

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en las características fisicoquímicas luego de aplicar un diseño compuesto central rotatable de la metodología de superficie de respuesta, lo cual permitió modelar el comportamiento de estas variables dependientes en función de la concentración de ozono gaseoso y tiempo de almacenamiento.

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos al aplicar diseño compuesto central rotatable

Concentración de ozono (ppm)	Tiempo de almacenamiento (días)	Pérdida de peso (%)	Luminosidad (L)	Firmeza (N)	Clorofila (mg/100 g muestra)	Contenido de lignina (mg/100 g muestra)
0	0	0	53,15	13,58	17,06	2,54
0	15	7,16	50,94	11,24	11,21	6,25
0	30	15,19	495,7	9,66	7,53	9,17
5	0	0	52,9	13,55	17,84	2,26
5	15	4,88	51,73	12,14	14,21	5,23
5	30	11,26	50,38	11,34	11,39	7,52
10	0	0	52,87	13,53	17,64	2,17
10	15	3,12	51,98	12,00	14,75	4,39
10	30	8,89	50,46	11,56	13,16	6,25
5	15	5,21	51,47	12,02	14,07	5,34
5	15	5,07	51,62	11,98	14,17	5,22

Fuente: Elaboración propia

Efecto de la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento sobre la pérdida de peso

En la figura 1 se puede observar que, ante las concentraciones de ozono gaseoso de 6 a 10 ppm hasta un tiempo de almacenamiento de 20 a 25 días, se produjo una pérdida de peso hasta niveles aceptables para productos frescos y mínimamente procesados (menor a 10 %), en comparación con las muestras a menores concentraciones, incluyendo la sin ozonizar. El análisis de varianza denotó que el modelo cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0,05$), elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 99,51$ %) y falta de ajuste $p > 0,05$, lo que explica una buena fijación de los datos al modelo (tabla 3).

El efecto del ozono gaseoso sobre la pérdida de peso en otros productos vegetales presentó resultados similares a esta investigación. Así tenemos que Glowacs y Rees (2016) en pimiento verde y rojo, con aplicación continua a 0,045 a 0,2 ppm durante 14 días de almacenamiento a 10 °C, disminuyó la pérdida de peso hasta 3,70 %; Glowacs et al. (2015) en zucchini (*Curcubita pepo*), con aplicación continua 0,01 ppm durante 17 días de almacenamiento a 8 °C, redujo la pérdida de peso hasta 5 %.

La respiración, transpiración y exudado por el cortado y manipulación del vegetal son las posibles causas de la pérdida de agua y consecuente pérdida de peso en hortalizas mínimamente procesadas (Glowacz et al., 2015). El ozono podría tener un efecto limitante sobre alguno de estos factores y así restringir la pérdida de peso. Los estomas en las plantas podrían cerrarse en respuesta al estrés oxidativo causado por el ozono y, como resultado, la cantidad de agua retenida en las muestras tratadas con ozono es mayor que en las muestras sin exposición a este (Tabakoglu & Karaca, 2018). Por su parte, Pretell et al. (2016) mencionan que el impacto benéfico de la aplicación de ozono en vegetales podría manifestarse por una serie de efectos como la inhibición del daño en las membranas celulares y por retardo en las funciones asociadas

a la membrana, lo cual explicaría los menores valores de pérdida de peso de los frutos ozonificados, en comparación con la muestra control.

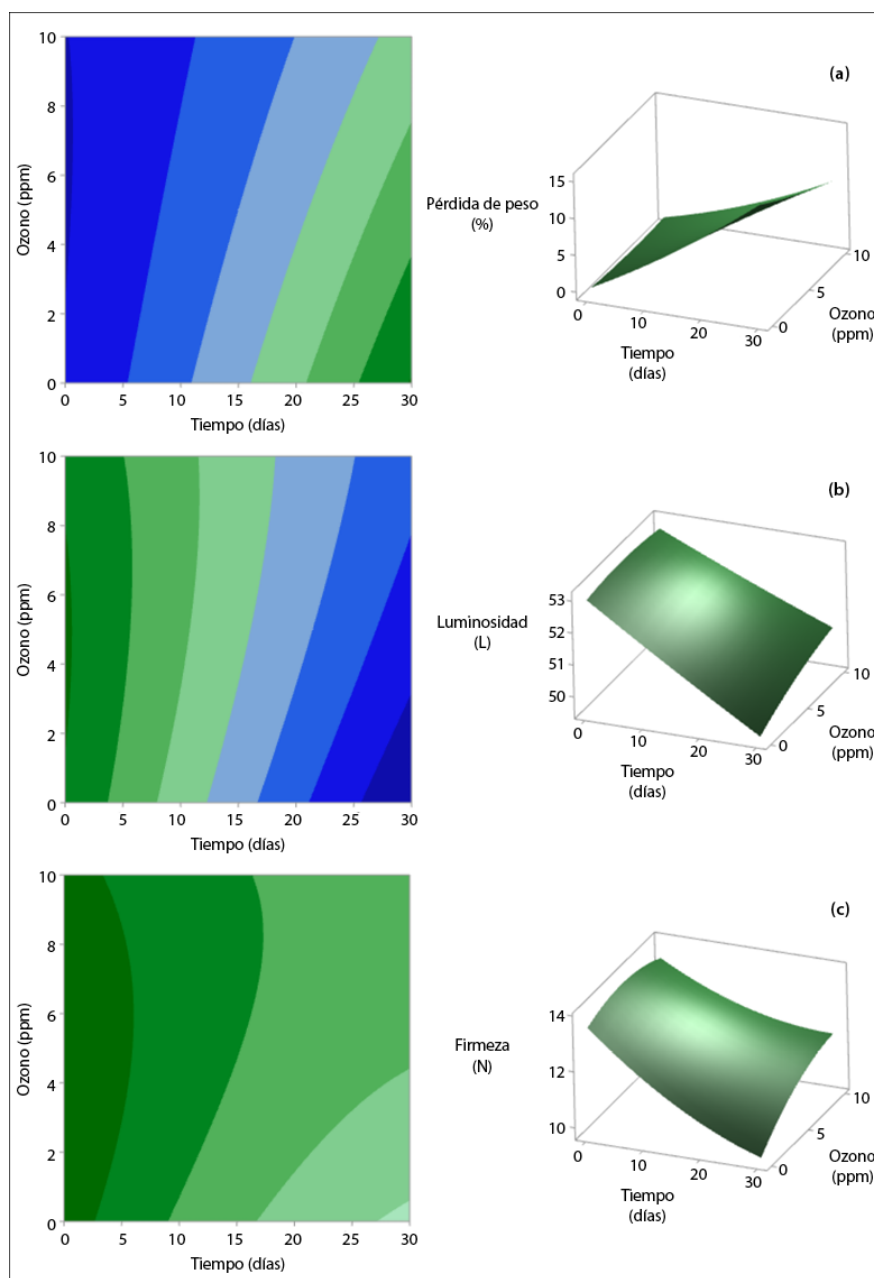


Figura 1. Contorno y manta de superficie de respuesta de (a) pérdida de peso, (b) luminosidad y (c) firmeza para la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia

Se sabe que durante la pérdida parcial de agua posterior a la cosecha el estrés hídrico causa estrés oxidativo con un aumento de las actividades de lipoxigenasa y peroxidasa. Las células vegetales tienen un sistema de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos que mantienen las ROS (especies de oxígeno reactivo) en los niveles correctos (Chkaiban et al., 2007). Las enzimas involucradas en la eliminación de ROS, como CAT (catalasa), APX (ascorbato peroxidasa), GPX (guayacol peroxidasa) y SOD (superóxido dismutasa),

muestran mayor actividad durante la pérdida de agua, lo que sugiere que el sistema antioxidante se activa como consecuencia del estrés hídrico (Fan et al., 2016). El efecto del ozono depende en gran medida de la concentración y el tiempo de aplicación; una combinación de concentración baja y tiempo de aplicación corto, por lo tanto, podría actuar como un agente oxidante ligero, estimulando las actividades de estas enzimas para la protección de las células de los vegetales, disminuyendo la pérdida de agua (Modesti et al., 2018).

Efecto de la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento sobre el color

En la figura 1 se observa que, entre las concentraciones de ozono gaseoso de 6 a 10 ppm hasta un tiempo de almacenamiento entre 25 a 27 días, existió una leve disminución de la luminosidad en los turiones, en comparación con las muestras tratadas a menor concentración, incluyendo la sin ozonizar, donde se denotó un mayor oscurecimiento. El análisis de varianza denotó que el modelo cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0,05$), elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 95,61 \%$) y falta de ajuste ($p > 0,05$), lo que explica una buena fijación de los datos al modelo (tabla 3).

Gutiérrez et al. (2016a) estudiaron la aplicación de ozono gaseoso a 1, 2 y 5 ppm durante 12 días de almacenamiento a 5 °C en rúcula (*Eruca sativa* Mill.), obteniendo un menor oscurecimiento en las hojas, en comparación con las muestras sin ozonificar. Glowacs et al. (2015) evaluaron la aplicación continua de ozono gaseoso a 0,01 ppm durante 17 días de almacenamiento 8 °C en zucchini, obteniendo resultados similares a esta investigación. Asimismo, Han et al. (2017) evaluaron el efecto del preenfriamiento y aplicación inicial de ozono gaseoso a 2 ppm almacenados durante 15 días a 0 °C sobre la luminosidad en moras, obteniendo menor oscurecimiento que la muestra sin ozonificación.

Bermúdez-Aguirre y Barbosa-Cánovas (2013) indican que hortalizas como la lechuga representan, en cuanto a color, un sistema complejo constituido por enzimas (peroxidasa y polifenoloxidasas), pigmentos (carotenoides y clorofila) y ácido ascórbico. Santisteban (2016) describe que otra causa de deterioro de la calidad es el cambio de color original, como el que se torna oscuro en espárragos verdes frescos, fenómeno que se debe a la pérdida de clorofila, producido durante el periodo de almacenamiento.

Glowacs y Rees (2016) mencionan que la exposición al ozono gaseoso disminuye la actividad de la catalasa y peroxidasa, enzima que cataliza la oxidación de fenoles propios de las células a quinonas que generan colores pardos u oscurecimiento en vegetales.

Efecto de la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento sobre la firmeza

En la figura 1 se observa que, entre las concentraciones de ozono gaseoso de 5 a 10 ppm hasta un tiempo de almacenamiento entre 25 a 30 días, se produjo menor disminución de la firmeza en los turiones, en comparación con las muestras tratadas a menor concentración, incluyendo la sin ozonizar. El análisis de varianza denotó que el modelo cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0,05$), elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 97,04 \%$) y falta de ajuste ($p > 0,05$), lo que explica una buena fijación de los datos al modelo (tabla 3).

Glowacs et al. (2015) investigaron la aplicación continua de ozono gaseoso a 0,01 ppm durante 17 días de almacenamiento a 8 °C en zucchini, obteniendo tendencia similar a esta investigación. Han et al. (2017) evaluaron el efecto del preenfriamiento y aplicación inicial de ozono gaseoso a 2 ppm almacenados durante 15 días a 0 °C en moras, reportando mayor firmeza en las bayas tratadas, que la muestra sin ozonificación. Ali et al. (2014) estudiaron la aplicación continua de ozono gaseoso a 1,5, 2,5, 3,5 y 5,0 ppm durante 14 días de almacenamiento a 25 °C en papaya (más una muestra control sin ozonificar); en cuanto a la firmeza obtuvieron resultados similares a los antes mencionados. Goffi et al. (2018) reportaron la aplicación continua de ozono gaseoso a 150 ppb por la mañana y 180 ppb por la noche, durante 6 semanas de almacenamiento a 0 °C en kiwi, indicando que el tratamiento permitió una mayor retención de firmeza, en comparación con la muestra control.

El tratamiento con ozono retrasó el endurecimiento del tejido en palitos de zanahoria. Estas modificaciones se asociaron con cambios en el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, principalmente debido a la reducción de la lignificación de las paredes celulares. Sin embargo, el grosor de la cutícula y la composición de cada vegetal a menudo dependen del cultivar y la madurez, lo que dificulta aún más la selección de una dosis óptima de ozono (De Souza et al., 2018). La disminución en la firmeza de los vegetales es un problema porque reduce su valor comercial (Glowacs et al., 2015). Así mismo, Glowacs y Rees (2016) sugieren que los vegetales expuestos a ozono gaseoso continuo pueden reducir la pérdida de agua durante el almacenamiento, mejorando el mantenimiento de la firmeza.

Efecto de la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento sobre el contenido de clorofila

En la figura 2 se observa que las concentraciones de 4 a 8 ppm de ozono gaseoso generaron un ligero efecto en la retención del contenido de clorofila en los turiones con tendencia a disminuir durante los 30 días de almacenamiento, en comparación con la muestra sin ozonificar. El análisis de varianza denotó que el modelo cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0,05$), elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 99,41\%$) y falta de ajuste ($p > 0,05$), lo que explica una buena fijación de los datos al modelo (tabla 3).

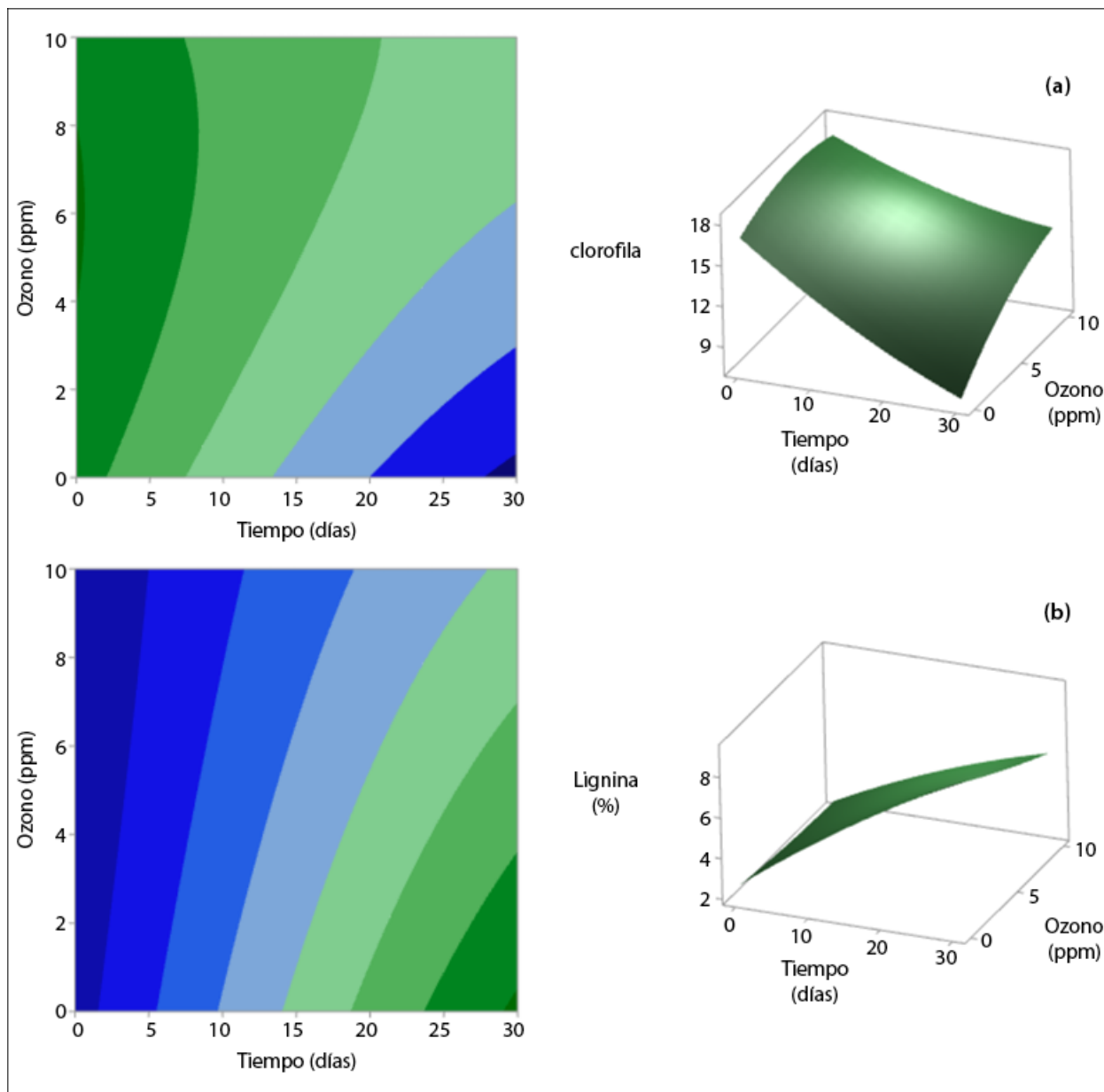


Figura 2. Contorno y manta de superficie de respuesta de (a) contenido de clorofila y (b) contenido de lignina para la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia

Gutiérrez et al. (2016a) estudiaron la aplicación de ozono gaseoso a 1, 2 y 5 ppm durante 12 días de almacenamiento a 5 °C en rúcula, indicando que no se produjeron cambios significativos en el contenido de clorofila. Karaca y Velioglu (2014) no encontraron una disminución sustancial en el contenido de clorofila en perejil con aplicación de ozono gaseoso a 0,95 ppm por 20 minutos a temperatura ambiente. Sin embargo, se informó que el ozono produjo ligeras decoloraciones en lechugas y espinacas.

Tabla 3. Modelos y falta de ajuste para pérdida de peso, luminosidad, firmeza, clorofila y fenoles

Variable	Ecuación	R ² (%)	Valor p	Falta ajuste
Pérdida peso	$y = 0,230 - 0,1282 \text{ ozono} + 0,3995 \text{ tiempo} + 0,00985 \text{ ozono} * \text{ozono} + 0,003273 \text{ tiempo} * \text{tiempo} - 0,02100 \text{ ozono} * \text{tiempo}$	99,51	0,026	0,139
Luminosidad	$y = 52,945 + 0,0511 \text{ ozono} - 0,1198 \text{ tiempo} - 0,00546 \text{ ozono} * \text{ozono} + 0,000193 \text{ tiempo} * \text{tiempo} + 0,00390 \text{ ozono} * \text{tiempo}$	95,61	0,000	0,171
Firmeza	$y = 13,475 + 0,1467 \text{ ozono} - 0,1801 \text{ tiempo} - 0,01572 \text{ ozono} * \text{ozono} + 0,001920 \text{ tiempo} * \text{tiempo} + 0,00650 \text{ ozono} * \text{tiempo}$	97,04	0,026	0,099
Clorofila	$y = 16,831 + 0,4558 \text{ ozono} - 0,4017 \text{ tiempo} - 0,03833 \text{ ozono} * \text{ozono} + 0,003008 \text{ tiempo} * \text{tiempo} + 0,01683 \text{ ozono} * \text{tiempo}$	99,41	0,002	0,055
Lignina	$y = 2,5781 - 0,0849 \text{ ozono} + 0,26370 \text{ tiempo} + 0,00407 \text{ ozono} * \text{ozono} - 0,001458 \text{ tiempo} * \text{tiempo} - 0,008500 \text{ ozono} * \text{tiempo}$	99,87	0,008	0,386

Fuente: Elaboración propia

Efecto de la concentración de ozono y tiempo de almacenamiento sobre el contenido de lignina

En la figura 2 se observa que, entre las concentraciones de ozono gaseoso de 7 a 10 ppm hasta un tiempo de almacenamiento entre 20 a 30 días, existió un leve incremento del contenido de lignina en los turiones, en comparación con las muestras tratadas a menor concentración, incluyendo el control (sin ozonizar). El análisis de varianza denotó que el modelo cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0,05$), elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 99,87\%$) y falta de ajuste ($p > 0,05$), lo que explica una buena fijación de los datos al modelo (tabla 3).

An et al. (2007) investigaron la aplicación de ozono en solución a 1 ppm por 30 minutos en espárrago verde y almacenado durante 25 días a 3 °C, reportando una tendencia similar a esta investigación. Chauhan et al. (2011) evaluaron la aplicación inicial de ozono gaseoso a 10 ppm y almacenamiento durante 30 días a 6 °C, donde el contenido de lignina en trozos de zanahoria fue menor que la muestra sin ozonificación.

An et al. (2007) mencionan que el endurecimiento producido en el espárrago verde unos días después de la cosecha se atribuye al aumento de los niveles de lignina durante el almacenamiento. Asimismo, los autores sugieren que uno de los factores determinantes que conducen al endurecimiento es el engrosamiento de los componentes estructurales polisacáridos de las paredes celulares. Qiu et al. (2013) y Wang y Fang (2019) indican que la lignificación en el espárrago es controlada por diferentes enzimas, entre ellas la fenilalanina amonionialiasa (PAL), que es una enzima clave en la ruta biosintética de la lignina; por lo tanto, la aplicación de ozono podría retardar la biosíntesis de este componente de la fibra dietética insoluble.

Optimización

Para la optimización de las variables independientes se utilizó la técnica de superposición de contornos de las variables respuestas *firmeza*, *contenido de clorofila* y *contenido de lignina*, consideradas como las más importantes para mantener la calidad de los turiones de espárrago verde durante la cadena logística y de comercialización de este producto mínimamente procesado (figura 3). Se obtuvo como resultado que las

regiones de interés que determina el área óptima corresponden a una concentración de 6,98 ppm de ozono gaseoso hasta los 30 días de almacenamiento, indicando las siguientes como las mejores características de calidad: 11,42 N, *firmeza*; 12,33 mg/100 g, *muestra de clorofila*, y 7 mg/100 g, *muestra de lignina*.

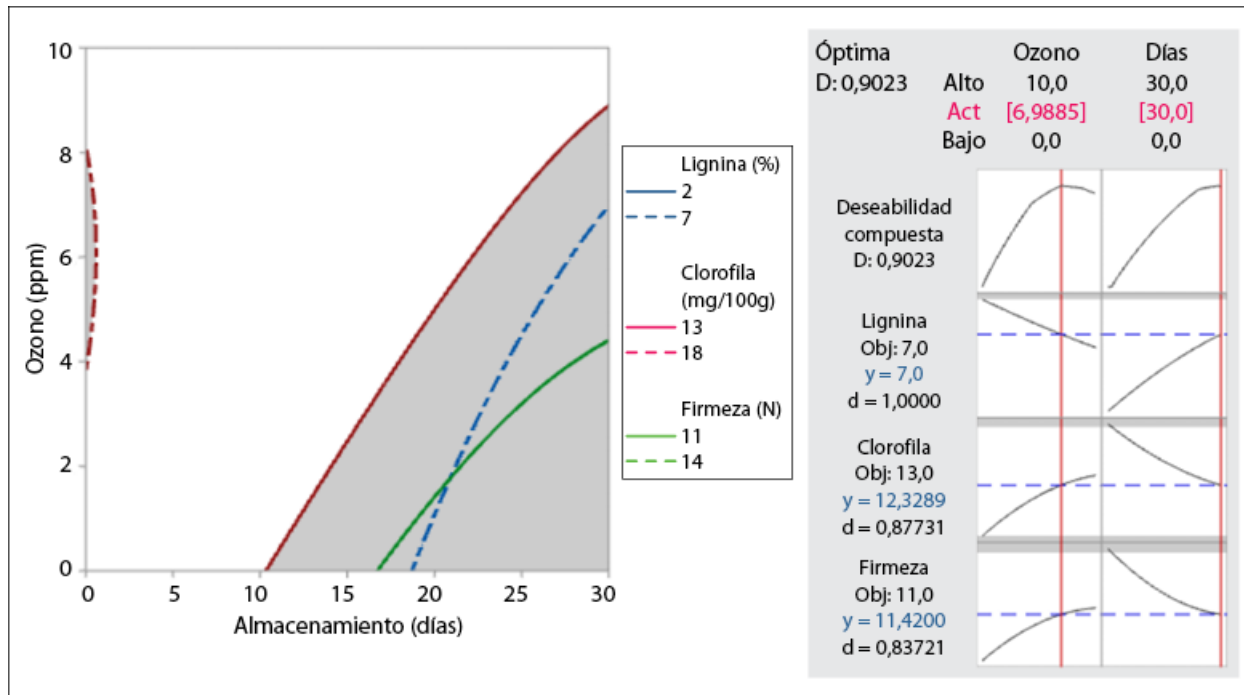


Figura 3. Optimización de las principales características de calidad en espárrago verde fresco.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

A través de la metodología de superficie de respuesta, se determinó la región de interés para una óptima retención de firmeza, contenido de clorofila y contenido de lignina en el espárrago verde durante la poscosecha, recomendándose utilizar la aplicación inicial de ozono gaseoso entre 4 a 7 ppm permitiendo 30 días de almacenamiento a 1 °C. Los resultados permiten sugerir esta tecnología como una buena alternativa en la conservación de hortalizas frescas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Privada Antenor Orrego el apoyo con los equipos para realizar la parte experimental de la investigación.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Agronline. (8 de abril de 2019). Perú, segundo productor de espárragos a nivel mundial con un 4 % del total. *Agronline*. <http://www.agronline.pe/noticias/peru-segundo-productor-de-esparragos-a-nivel-mundial-con-un-4-del-total/>
- Albanese, D., Russo, L., & Cinquanta, L. (2007). Physical and chemical changes in minimally processed green asparagus during cold-storage. *Food Chemistry*, *101*(1), 274-280. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.048>
- Ali, A., Kying-Ong, M., & Forney, C. (2014). Effect of ozone pre-conditioning on quality and antioxidant capacity of papaya fruit during ambient storage. *Journal Food Chemistry*, *142*, 19-26. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.039>
- An, J., Zhang, M., & Lu, Q. (2007). Changes in some quality indexes in fresh-cut green asparagus pretreated with aqueous ozone and subsequent modified atmosphere packaging. *Journal of Food Engineering*, *78*(1), 340-344. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.001>
- Arias-Nava, E., Ríos-Lira, A., Vásquez-López, J., & Pérez-González, R. (2015). Estudio comparativo entre los enfoques de diseño experimental robusto de Taguchi y tradicional en presencia de interacciones de control por control. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, *16*(1), 131-142. [http://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72114-1](http://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72114-1)
- Aziz, K., & Ding, P. (2018). Ozone application in fresh fruits and vegetables. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, *4*(2), 29-35. <https://pdfs.semanticscholar.org/1faa/111445fd68ff6e311dba221038022d344c05.pdf>
- Bermúdez-Aguirre, D., & Barbosa-Canovas, G. (2013). Disinfection of selected vegetables under nonthermal treatments: Chlorine, acid citric, ultraviolet light and ozone. *Journal Food Control*, *29*(1), 82-90. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.073>
- Chkaiban, L., Botondi, R., & Bellincontro, A. (2007). Influence of postharvest water stress on lipoxygenase and alcohol dehydrogenase activities, and on the composition of some volatile compounds of Gewurztraminer grapes dehydrated under controlled and uncontrolled thermohygrometric conditions. *Australian Journal Grape Wine Research*, *13*(3), 142-149. <http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2007.tb00244.x>
- Chauhan, O. P., Raju, P. S., Ravi, N., Singh, A., & Bawa, A. S. (2011). Effectiveness of ozone in combination with controlled atmosphere on quality characteristics including lignification of carrot sticks. *Journal of Food Engineering*, *102*(1), 43-48. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.033>
- Cosio, E. (2017). Medición de vida de anaquel de espárragos verdes. *Redagícola*. <http://www.redagricola.pe/medicion-vida-anaquel-esparragos-verde/>
- Dellino, G., Kleijnen, J., & Melon, C. (2010). Robust optimization in simulation: Taguchi and Response Surface Methodology. *International Journal Production Economics*, *125*(1), 52-59. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.12.003>
- De Souza, L. P., Faroni, L. R. D., Heleno, F. F., Cecon, P. R., Gonçalves, T. D. C., Silva, G. J., & Prates, L. H. F. (2018). Effects of ozone treatment on postharvest carrot quality. *LWT-Food Science and Technology*, *90*, 53-60. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.057>
- Fan, L., Shi, J., Zuo, J., Gao, L., Lv, J., & Wang, Q. (2016). Methyl jasmonate delays postharvest ripening and senescence in the non-climacteric eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *120*, 76-83. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.05.010>
- Glowacz, M., Colgan, R., & Rees, D. (2015). Influence of continuous exposure to gaseous ozone on the quality of red bell peppers, cucumbers and zucchini. *Postharvest Biology and Technology*, *99*, 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.06.015>
- Glowacz, M., & Rees, D. (2016). Exposure to ozone reduces postharvest quality loss in red and green chilli peppers. *Food Chemistry*, *210*, 305-310. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.119>

- Goffi, V., Modesti, M., Forniti, R., & Botondi, R. (2018). Quality of green (*Actinidia chinensis* var. *deliciosa* 'Hayward') and yellow (*A. chinensis* var. *chinensis* 'Soreli') kiwifruit during cold storage at 0 °C in normal atmosphere and with gaseous ozone. *Acta Hortícola*, 1218(65), 473-480. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1218.65>
- Gutiérrez, D., Chaves, A., & Rodríguez, S. (2016a). Use of UV-C and gaseous ozone as sanitizing agents for keeping the quality of fresh-cut rocket (*Eruca sativa* Mill). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12968. <http://doi.org/10.1111/jfpp.12968>
- Gutiérrez, D., Ruíz, G., Sgroppo, S., & Rodríguez, S. (2016b). Uso de la radiación UV-C en el proceso de elaboración de hortalizas de IV gama. *Agrociencia Uruguay*, 20(2), 7-13. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482016000200002
- Han, Q., Gao, H., Chen, H., Fang, X., & Wu, W. (2017). Precooling and ozone treatments affects postharvest quality of black mulberry (*Morus nigra*) fruits. *Food Chemistry*, 221, 1947-1953. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.152>
- Indecopi (2008). *Norma Técnica Peruana: NTP 011.109:2008*. Espárrago fresco, requisitos; 3ra edición. Indecopi.
- Karaca, H., & Velioglu, Y. (2014). Effects of ozone treatments on microbial quality and some chemical properties of lettuce, spinach, and parsley. *Postharvest Biology and Technology*, 88, 46-53. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.09.003>
- Mercado-Ruiz, J., Jara-Díaz, K., García-Robles, J., & Baez-Sañudo, R. (2013). Calidad de espárrago verde en fresco (*Asparagus officinalis* L.): cubiertas comestibles y ácido acetilsalicílico. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 14(2), 195-203. <http://www.redalyc.org/pdf/813/81329290014.pdf>
- Modesti, M., Petriccione, M., Forniti, R., Zampella, L., Scortichini, M., & Mencarelli, F. (2018). Methyl jasmonate and ozone affect the antioxidant system and the quality of wine grape during postharvest partial dehydration. *Food Research International*, 112, 369-377. <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.061>
- Pascualetti, M., Castagnino, A., Rosini, M., Durante, M., & Zubiría, A. (2013). Margen bruto de diferentes híbridos de espárrago verde (*Asparagus officinalis* var. *altilis* L.), en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2), 201-216. <http://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2235>
- Pretell, C., Márquez, L., & Siche, R. (2016). Efecto del ozono gaseoso sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas y apariencia general de *Punica Granatum* L. wonderful fresca. *Scientia Agropecuaria*, 7(3), 173-180. <http://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.03>
- Qiu, M., Jiang, H., Ren, G., Huang, J., & Wang, X. (2013). Effect of chitosan coatings on postharvest green asparagus quality. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 2027-2032. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.070>
- Ribeiro, C., Canada, J., & Alvarenga, B. (2012). Prospects of UV radiation for application in postharvest technology. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 24(6), 586-597. <http://doi.org/10.9755/ejfa.v24i6.14677>
- Ruiz Santiago, F. L., Ruiz Velázquez, J. A., Hernández Becerra, J. A., García Jiménez, R., & Valadez Villarreal, A. (2019). Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco. *Revista Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 944-949. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/126.pdf>
- Santisteban, J. (2016). *Procesamiento de espárrago verde fresco para exportación. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero en industrias alimentarias. Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo. Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias. Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias. Lambayeque*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Lambayeque]. Repositorio UNPRG. <http://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/UNPRG/871/BC-TE54824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Soleno, R. (2015). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. Una revisión. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2, 73-83. <http://doi.org/10.23850/24220582.172>
- Tabakoglu, N., & Karaca, H. (2018). Effects of ozone-enriched storage atmosphere on postharvest quality of black mulberry fruits (*Morus nigra* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 92, 276-281. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.044>

- Torres, J., Alvis, A., Gallo, L., Acevedo, D., Montero, P., & Castellanos, F. (2018). Optimización del proceso de fritura por inmersión de la arepa con huevo utilizando metodología de superficie de respuesta. *Revista Chilena de Nutrición*, 45(1), 50-59. <http://doi.org/10.4067/s0717-75182018000100050>
- Tzortzakis, N., & Chrysargyris, A. (2016). Postharvest ozone application for the preservation of fruits and vegetables. *Food Reviews International*, 33(3), 270-315. <http://doi.org/10.1080/87559129.2016.1175015>
- Wang, J. & Fan, L. (2019). Effect of ultrasound treatment on microbial inhibition and quality maintenance of green asparagus during cold storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104631>