



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**EVALUACIÓN DE TRES TÉCNICAS DE
CONSERVACIÓN SOBRE LA CALIDAD
POSCOSECHA DE FRUTOS DE LULO**

(Solanum quitoense Lam)

ANDREA JOHANA REYES MEDINA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Posgrados
Bogotá, Colombia

2023

**EVALUACIÓN DE TRES TÉCNICAS DE
CONSERVACIÓN SOBRE LA CALIDAD
POSCOSECHA DE FRUTOS DE LULO
(*Solanum quitoense* Lam)**

ANDREA JOHANA REYES MEDINA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Prof. Helber Enrique Balaguera López, PhD

Codirector:

Prof. Diego Alberto Castellanos Espinosa, PhD

Línea de Investigación:

Fisiología de Cultivos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Posgrados

Bogotá DC, Colombia

2023

Dedicatoria

A mis padres y hermanos

A Juan, Laura y Viviana por no soltar mi mano en todo este camino.

Carpe Diem

Declaración de obra original

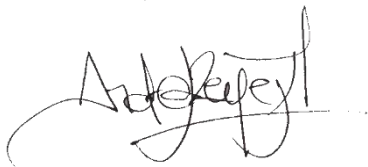
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Andrea Johana Reyes Medina

Fecha 23/01/2023

Agradecimientos

A mis padres por todo el apoyo recibido. Mis hermanos Adriana, Santiago y Mario quienes siempre me recordaron el propósito y me dieron el impulso para continuar.

A la Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá y la escuela de posgrados de la Facultad de Ciencias Agrarias por permitirme hacer parte recibir la formación académico científica de Magister en Ciencias Agrarias y el financiamiento para ejecutar el proyecto a través de la convocatoria para la financiación parcial de proyectos de tesis de Doctorado y Maestría de la Facultad de Ciencias Agrarias, sede Bogotá- Fondo de Investigación UGI-2021

A los profesores Helber Enrique Balaguera López, director de tesis, y Diego Alberto Castellanos Espinosa, codirector de tesis, por su valioso tiempo, acompañamiento académico y científico, su confianza y apoyo en la ejecución de este proyecto. Al profesor Javier Álvarez por su apoyo en todo mi proceso de formación profesional, su guía, consejos y apoyo en la realización de mis estudios de maestría.

Al equipo del Laboratorio de Calidad y Poscosecha y al Laboratorio de Empaques y Vida Útil de Alimentos del ICTA. A Sandra Mendoza por todo su apoyo y acompañamiento y a todas las personas que aportaron para que se llevara a cabo este proyecto de investigación.

Resumen

Evaluación de tres técnicas de conservación sobre la calidad poscosecha de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam)

El lulo (*Solanum Quitoense* Lam) es un frutal tropical cuyo centro de origen ha sido establecido en los bosques de la región andina comprendido entre Perú, Ecuador y Colombia. El fruto de lulo es apetecido por el mercado nacional y cuenta con potencial de exportación por sus características organolépticas y beneficios a la salud. Por su proceso de maduración, al ser considerado un fruto climatérico, presenta un tiempo de vida útil reducido, lo cual genera pérdidas significativas para los productores y comercializadores ya sea para el uso del producto en fresco o como insumo para otros procesos agroindustriales. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de bajas temperaturas de conservación, 1-Metilciclopropeno (1-MCP) y atmósferas modificadas (AM) sobre la calidad poscosecha de los frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam). El trabajo fue dividido en tres fases las cuales contemplaron el tiempo en almacenamiento y el tiempo de anaquel. En la primera fase se evaluó el comportamiento de las características fisicoquímicas y propiedades de calidad del fruto de lulo almacenados a 5, 8 y 18°C. Se seleccionaron frutos de lulo con una madurez intermedia (tonalidad en la epidermis 75% de color naranja y 25% color verde). Los frutos almacenados a 5°C y 8°C no presentaron diferencias significativas en la intensidad respiratoria, cambio de color, azúcares, sólidos solubles (SST) y acidez titulable (ATT). Sin embargo, la firmeza fue menor en los frutos almacenados a 18°C y 5°C. La mayor concentración de azúcares reductores y ácido ascórbico se presentó en los frutos almacenados a 8°C. Durante la fase de anaquel, los frutos almacenados a 5°C presentaron un porcentaje de pérdida de peso y firmeza. Sin embargo, el mayor índice de deterioro se evidencio en los frutos almacenados originalmente a 8°C. Dado el comportamiento general de los frutos durante el almacenamiento y el anaquel, la temperatura de 5 °C resultó ser más favorable para la preservación. En la segunda fase se estudió el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del fruto de lulo sometido a diferentes concentraciones de 1-Metilciclopropeno y diferentes tiempos de exposición encontrando las condiciones óptimas para retardar la maduración poscosecha. Para ello se seleccionaron frutos en grado 3, es decir, 75%

amarillo y 25% verde, los cuales se fueron divididos en 7 tratamientos configurados con una dosis de 1-MCP ($0 \mu\text{g L}^{-1}$; $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$; $0,70 \mu\text{g L}^{-1}$ y $1 \mu\text{g L}^{-1}$) y el tiempo de inmersión (10 minutos y 15 minutos) en la dosis correspondiente. Los frutos tratados con $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión presentaron la menor tasa de producción de CO_2 y producción de etileno. El menor consumo de O_2 , la menor pérdida de firmeza, pH y ácido ascórbico se presentó en los frutos tratados con $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión. El menor porcentaje de pérdida de peso y ATT se registró en los frutos tratados con $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión. Los azúcares reductores e índice de color presentaron los cambios más representativos en los frutos tratados con $0,70 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión. Durante el anaquel, los frutos tratados con $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión registraron la menor tasa respiratoria, producción de etileno y contenido de sacarosa y los frutos tratados con 1-MCP + 15 minutos de inmersión mostraron el menor porcentaje de pérdida de peso, así como la menor variación en el índice de color y el ácido ascórbico. Dados los resultados obtenidos en ambas etapas, la aplicación de $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión fue la dosis más favorable para la conservación de la calidad durante la fase poscosecha y de anaquel del fruto. Finalmente, en la tercera fase se evaluaron los cambios fisicoquímicos del fruto de lulo conservado en empaques con atmósfera y tratados con 1-MCP, almacenados a baja temperatura. Se evaluaron 7 tratamientos conformados con la aplicación de $0,35 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión y presencia o ausencia de AM. En el almacenamiento los frutos tratados con $5^\circ\text{C}/\text{AM}/1\text{-MCP}$ registraron una menor tasa respiratoria, producción de etileno, porcentaje de pérdida de peso, cambio en el color y ATT y el tratamiento de $5^\circ\text{C}/\text{abierto}/1\text{-MCP}$ registró la mayor retención de la firmeza y una RM más alta, así como los cambios representativos en el contenido de los azúcares y ácido ascórbico. En el anaquel, los frutos de lulo con $5^\circ\text{C}/\text{AM}/1\text{-MCP}$ y $5^\circ\text{C}/\text{abierto}/1\text{-MCP}$ mostraron la menor tasa respiratoria, SST, pH y la RM más alta. El menor porcentaje de la pérdida de firmeza y el mejor IC se observó en los frutos tratados $5^\circ\text{C}/\text{abierto}/1\text{-MCP}$. Los resultados observados evidencian que con la implementación de las tecnologías seleccionadas se puede incrementar la vida útil del fruto de lulo y pueden ser una base para desarrollar un sistema de conservación que permita la comercialización de este producto en un amplio rango de mercados reduciendo el deterioro y la pérdida de calidad.

Palabras clave: temperatura de almacenamiento, 1-metilciclopropeno, atmósferas modificadas, etileno, anaquel

Abstract

Three preservation techniques evaluation on the lulo (*Solanum quitoense* Lam) fruits's postharvest quality.

Lulo (*Solanum Quitoense* Lam) is a tropical fruit, whose center of origin has been established in the forests of the Andean region between Peru, Ecuador, and Colombia. The lulo fruit is sought after by the consumers and it has a huge market potential due to its organoleptic characteristics and health benefits. Due to its ripening process, being considered a climacteric fruit, it has a short shelf life and fast deterioration, which generates significant losses for producers and marketers, either for the fresh product or as a raw material for other agro-industrial processes. The objective of this research was to evaluate the effect of storage temperature, 1-methylcyclopropene (1-MCP), and modified atmosphere packaging (MAP) on the postharvest quality and shelf life of lulo fruit (*Solanum quitoense* Lam). The work was divided into three phases in order to determine the effect of the variables evaluated under refrigerated storage and shelf life. In the first phase, the behavior of the physicochemical characteristics and quality properties of lulo fruit stored at 5, 8, and 18°C were evaluated. Lulo fruit with intermediate maturity (epidermis color 75% orange and 25% green) were selected. Fruit stored at 5 and 8 °C showed no significant differences in respiration intensity, color change, sugars, soluble solids (TSS), and titratable acidity (TA). However, firmness was lower in the fruit stored at 18 and 5 °C. The highest concentrations of reducing sugars and ascorbic acid were found in fruit stored at 8 °C. During the shelf preservation phase, fruit stored at 5 °C showed a percentage loss of weight and firmness. However, the highest rate of deterioration was evidenced in fruit originally stored at 8°C. Given the general behavior of the fruit during storage and shelf life, the temperature of 5°C proved to be more favorable for preservation. In the second phase, the behavior of the physicochemical properties of lulo fruit subjected to different concentrations of 1-methylcyclopropene and different exposure times were studied to find the optimum conditions for

delaying postharvest ripening. For this purpose, fruits were selected in stage 3, that is, 75% yellow and 25% green and the samples were divided into 7 treatments configured with a dose of 1-MCP ($0 \mu\text{g L}^{-1}$; $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$; $0.70 \mu\text{g L}^{-1}$ and $1 \mu\text{g L}^{-1}$) at two immersion times (10 minutes and 15 minutes) in the corresponding dose. Fruits treated with $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 min immersion showed the lowest CO_2 production rate and ethylene production. The lowest O_2 consumption, lowest loss of firmness, pH, and ascorbic acid occurred in fruits treated with $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 min immersion. The lowest percentage of weight loss and ATT was recorded in fruits treated with $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 min immersion. Reducing sugars and color index presented the most representative changes in fruits treated with $0.70 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 min immersion. During shelf time, fruits treated with $35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 min immersion recorded the lowest respiratory rate, ethylene production and sugar content and fruits treated with 1-MCP + 15 min immersion showed the lowest weight loss percentage, as well as the lowest variation in color index and ascorbic acid. Given the results obtained in both stages, the application of $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutes of immersion was the most favorable dose for quality conservation during the postharvest and shelf life of the fruit. Finally, in the third phase, the physicochemical changes of lulo fruit preserved in MAP and treated with 1-MCP, stored at low temperature, were evaluated. Seven treatments, consisting of the application of $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutes of immersion and the presence or absence of MAP were evaluated. In storage, fruits treated with $5^\circ\text{C}/\text{AM}/1\text{-MCP}$ recorded lower respiratory rate, ethylene production, percentage weight loss, color change and ATT and the $5^\circ\text{C}/\text{open}/1\text{-MCP}$ treatment recorded the highest firmness retention and higher Ripeness ratio as well as representative changes in sugar and ascorbic acid content. During the shelf life, lulo fruits at $5^\circ\text{C}/\text{AM}/1\text{-MCP}$ and $5^\circ\text{C}/\text{open}/1\text{-MCP}$ showed the lowest respiration rate, TSS, pH and the highest MR. The lowest percentage of firmness loss and the best CI were observed in the $5^\circ\text{C}/\text{open}/1\text{-MCP}$ treated fruits. The observed results show that with the implementation of the selected technologies, the lulo fruit's shelf life can be increased and can become a basis for developing a preservation system that will allow the commercialization of this product in a wide range of markets, reducing deterioration and quality loss.

Keywords: storage temperature, 1-methylcyclopropene, modified atmosphere packaging, ethylene, shelf life

Contenido

Resumen	VII
Abstract	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
1. Revisión de literatura	26
1.1 Fisiología y bioquímica del fruto de lulo (<i>Solanum quitoense</i> Lam) durante la poscosecha y principales estrategias de conservación.....	26
1.1.1 Resumen	26
1.1.2 Introducción	26
1.1.3 Patrón de respiración y producción de etileno	28
1.1.4 Cambios en la firmeza del fruto	29
1.1.5 Los pigmentos y el cambio de color.....	30
1.1.6 Carbohidratos	31
1.1.7 Actividad antioxidante	32
1.1.8 Tecnologías poscosecha	33
1.1.9 Conclusiones	43
1.1.10 Referencias.....	44
2. Efecto de la temperatura de refrigeración en el almacenamiento poscosecha de frutos de lulo (<i>Solanum quitoense</i> Lam)	59
2.1 Resumen.....	59
2.2 Introducción.....	59
2.3 Materiales y métodos	60
2.4 Resultados y discusión	63
2.5 Conclusiones y recomendaciones.....	80
2.6 Referencias	81
3. Efecto del tiempo de exposición y de la concentración de 1-Metilciclopropeno en el almacenamiento refrigerado de frutos de lulo (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	91
3.1 Resumen.....	91
3.2 Introducción.....	92
3.3 Materiales y métodos	93
3.4 Resultados y discusión	94
3.5 Conclusiones y recomendaciones.....	112
3.6 Referencias	113
4. Evaluación del efecto de 1-Metilciclopropeno (1-MCP) y atmósferas modificadas (AM) en la conservación en poscosecha de frutos de lulo (<i>Solanum quitoense</i> L.)	120

4.1	Resumen	120
4.2	Introducción	121
4.3	Materiales y métodos	122
4.3.1	Resultados y discusión.....	124
4.4	Conclusiones y recomendaciones	139
4.5	Referencias.....	140
5.	Conclusiones y recomendaciones	145
5.1	Conclusiones	145
5.2	Recomendaciones.....	145

Lista de figuras

- Figura 2-1** Intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$). 63
- Figura 2-2** Tasa de producción de etileno de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$). 64
- Figura 2-3** Índice de color de la epidermis de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$). 66
- Figura 2-4** Porcentaje de pérdida de peso de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$) 67
- Figura 2-5** Porcentaje de pérdida de firmeza de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$) 68
- Figura 2-6** Sólidos solubles totales de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$) 69
- Figura 2-7** Acidez total titulable de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$) 70
- Figura 2-8** Relación de madurez de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$) 71

- Figura 2-9** pH de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4) 73
- Figura 2-10** Tasa respiratoria de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba t-Student ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4) 74
- Figura 2-11** Pérdida de peso de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de T-Student ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4) 75
- Figura 2-12** Firmeza de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 76
- Figura 3-1:** Efecto del 1-MCP sobre la intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a temperatura ambiente (23°C). A) Variación del contenido de CO₂. B) Variación del contenido de O₂. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 96
- Figura 3-2:** Efecto del 1-MCP sobre la intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a 5°C. La línea punteada vertical señala el paso del periodo de almacenamiento y anaquel. A. Variación del contenido de CO₂. B. Variación del contenido de O₂. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 97
- Figura 3-3** Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento sobre concentración de etileno de frutos de lulo. La línea vertical muestra el inicio de la fase del anaquel. A) Frutos refrigerados a 5°C (a) fase de refrigeración. b) fase de anaquel). B) Frutos conservados a 23°C. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 98
- Figura 3-4** Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre la pérdida de peso de frutos de lulo. * y letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 99
- Figura 3-5:** Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre el índice de color de frutos de lulo. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4) 101
- Figura 3-6** Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre la firmeza de frutos de lulo. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de

- Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error ($n=4$) 102
- Figura 3-7:** Cambios en la pérdida de peso de frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias estadísticas significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)..... 107
- Figura 3-8:** Cambios en la firmeza de frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias estadísticas significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)..... 108
- Figura 3-9:** Cambios en el índice de color en frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias estadísticas significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)..... 109
- Figura 4-1** Efecto del 1-MCP y AM sobre la tasa respiratoria de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento (a) y fase de anaquel (b). A) Variación del contenido de CO₂. B) Variación del contenido de O₂. La línea punteada vertical representa el paso de almacenamiento a anaquel. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$). 125
- Figura 4-2** Efecto del 1-MCP y AM sobre la producción de etileno de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento (a) y fase de anaquel (b). La línea vertical indica el cambio de almacenamiento a anaquel. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$) ... 126
- Figura 4-3:** Efecto del 1-MCP y AM sobre la firmeza de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$) ... 127
- Figura 4-4:** Efecto del 1-MCP y AM sobre la pérdida de peso de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$) ... 128
- Figura 4-5** Efecto del 1-MCP y AM sobre el IC de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$) 129
- Figura 4-6** Efecto del 1-MCP y AM sobre la firmeza de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$) 134

Figura 4-7 Efecto del 1-MCP y AM sobre la pérdida de peso de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=3)

..... 135

Figura 4-8 Efecto del 1-MCP y AM sobre el IC de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=3)..... 136

Lista de tablas

Tabla 1-1 Resultados del uso de diferentes temperaturas en la conservación de frutos de lulo	38
Tabla 1-2 Resultados del uso de 1-MCP en la conservación de frutos de lulo.....	39
Tabla 1-3 Resultados del uso de AM en la conservación de frutos de lulo	40
Tabla 1-4 Resultados del uso de radiación UV-C en la conservación de frutos de lulo	41
Tabla 1-5 Resultados del uso de radiación gamma en la conservación de frutos de lulo.....	41
Tabla 1-6 Resultados del uso de ozono gaseoso en la conservación de frutos de lulo	42
Tabla 2-1 Concentración de sacarosa, glucosa, fructosa y ácido ascórbico en frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas	72
Tabla 2-2 Índice de color de la epidermis (IC), sólidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH e índice de daño (ID) de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas.....	76
Tabla 3-1. Sólidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH de frutos de lulo tratados con 1-MCP y almacenados a 5°C.....	102
Tabla 3-2 Cambios en los azúcares reductores (sacarosa, glucosa, fructosa) y ácido ascórbico de frutos de lulo tratados con 1-MCP y almacenados a 5°C.	104
Tabla 3-3 Sólidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH de frutos de lulo tratados con 1-MCP en diferentes tipos de inmersión durante la fase de anaquel.	109
Tabla 4-1 Efecto del 1-MCP y AM sobre los azúcares reductores (sacarosa, glucosa, fructosa) y ácido ascórbico de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento	132
Tabla 4-2 Efecto del 1-MCP y AM sobre los SST, ATT RM y pH de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento.....	136

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar	
ha	Hectárea	m ²
Ton	Tonelada	
mm	Milímetro	
PPP	Pentosas fosfato	
EMP	Embden-Meyerhof-Parnas	
TCA	Ciclo del ácido tricarboxílico	
CCP	Vía del citocromo	
O ₂	Oxígeno	
CO ₂	Dióxido de carbono	
AM	Atmósferas modificadas	
NO	Óxido nítrico	
ACS	ACC sintasa	
ACC oxidasa	ACO	
ABA	Ácido abscísico	
MT	Melatonina (N -acetil-5-metoxitriptamina	
1-MCP	1-Metilciclopropeno	
pH	Potencial hidronio	
PME	Pectin metilesterasa	
PG	poligalacturonasa	
Cel	celulasa	
β-glu	β-glucosidasa	

Símbolo	Término	Unidad
SST	Sólidos solubles totales	
ATT	Acidez total titulable	
NA	No aplica	
ID	Índice de deterioro	
ETR1	Receptores de etileno	
⁶⁰ Co	cobalto	
¹³⁷ Cs	cesio	
Gy	Gray	Gray
Bal	Bacterias ácido-lácticas	
PLA	Ácido poliláctico	
IR	Intensidad respiratoria	cm ³ kg ⁻¹ d ⁻¹
yO ₂ , yCO ₂	Concentración fracción molar O ₂ y CO ₂	
L*	Luminosidad	
IDF	índice de daño por frío	
DDA	Días después de almacenamiento	
FW	Peso fresco	
DW	Peso seco	

Introducción

El lulo (*Solanum Quitoense* Lam) es un frutal de la familia Solanaceae (Gómez-Merino et al., 2014). Los bosques húmedos subtropicales de Colombia, Ecuador y Perú son considerados como el centro primario de diversidad genética del lulo (Lobo-Arias et al., 2007). En Colombia, se cultivan dos variedades de lulo *Solanum quitoense* var. Quitoense, la cual es dulce y sin espinas, y *Solanum quitoense* var. Septentrionale, que es ácida y con espinas, la primera es cultivada entre 1600 a 2000 m.s.n.m y la segunda se desarrolla mejor entre 1900 y 2500 m.s.n.m. (Ochoa-Vargas et al., 2016; Ramírez et al., 2018). El área destinada al cultivo de lulo en Colombia para el año 2020 fue de 9119.69 ha con una producción 89401.44 ton y un rendimiento de 9,8 ton ha⁻¹ (Agronet, 2022). En el país, el 74% del área destinada al cultivo de lulo pertenece a estructuras de economía campesina tradicional y el 26% en regiones de economía empresarial (Restrepo et al., 2017). Los cultivos se ubican en zonas de ladera entre los 1.300 hasta los 2.800 msnm, a una temperatura de 14 a 18°C y una precipitación de 1500 y 2000mm (Ochoa-Vargas et al., 2016).

El lulo se encuentra dentro del grupo de los frutos promisorios tropicales de la región, con capacidad para exportación gracias a su palatabilidad, valor nutricional y características organolépticas de interés para la agroindustria (Vargas y Rendón, 2015; Almanza-Merchán et al., 2016). Sin embargo, el manejo poscosecha del fruto de lulo presenta múltiples retos al ser un fruto altamente perecedero (Andrade-Cuvi et al., 2021). El evaluar el comportamiento de los frutos de lulo durante la poscosecha e identificar una metodología adecuada que permita disminuir o retrasar el efecto generado por la síntesis del etileno, brindará opciones viables y asequibles que permitan un mejor aprovechamiento del fruto al conservar las características de calidad de interés para el consumidor. Por lo anterior, el manejo adecuado del fruto durante el tiempo de poscosecha es esencial para garantizar la conservación de su calidad nutricional y reducir las pérdidas generadas durante el tiempo de vida en anaquel las cuales pueden llegar a ser hasta del 50% (Forero et al., 2014).

La maduración y senescencia del fruto están coordinados por múltiples factores tanto internos (niveles de hormonas, cambios metabólicos), como externos (temperatura, daños mecánicos), cuyo

grado de afectación se basa en la regulación de los mismos, y dan como resultado una red compleja de procesos metabólicos que determinan las características de calidad del fruto (Bai et al., 2021; Adaskaveg and Blanco-Ulate, 2023; Chen et al., 2023; Kim et al., 2023). La actividad respiratoria es uno de los principales procesos metabólicos relacionados con los eventos de maduración y senescencia de los frutos (Lin et al., 2019). Las vías metabólicas involucradas en este proceso son la ruta de glucólisis, el ciclo del ácidotricarboxílico (TCA), la vía del citocromo (CCP) y la vía de las pentosas fosfato (PPP) (Heidarvand et al., 2017). En productos como brócoli (Li et al., 2016) y tomate (Guo et al., 2014), se ha observado que una relación inversamente proporcional de PPP y de EMP, siendo en menor proporción el primero y en mayor el segundo, se estimula la senescencia y se reduce el tiempo de vida útil de los cultivos hortícolas. De igual forma, estas vías respiratorias pueden verse afectadas por los cambios en la actividad de las enzimas relacionadas con la respiración, las cuales son influenciadas por el estado de madurez del fruto y la temperatura ambiente o de refrigeración a la cual se conserva el fruto, debido a que estas condiciones influyen en la velocidad de las reacciones de dichas enzimas respiratorias y en consecuencia afectan la velocidad de respiración del fruto (Lin et al., 2019).

La temperatura es la variable más importante para el control de los procesos de maduración y deterioro del fruto (Ma et al., 2022). El almacenamiento a temperatura ambiente incrementa la pérdida de agua, debido a que afecta de forma directa la respiración, transpiración, oxidación, al igual que modifica las características antioxidantes del fruto y, en consecuencia, acelera la senescencia y reduce la calidad del producto (Villalobos et al., 2016). La refrigeración a bajas temperaturas de almacenamiento es la técnica con mayor efectividad para mantener la calidad poscosecha de los productos hortofrutícolas, dado que, permite regular los procesos enzimáticos del producto al reducir la velocidad de respiración, la producción de etileno, el proceso de maduración, la senescencia, la pérdida de agua por transpiración y se reduce el crecimiento microbiano; así mismo, la alta humedad relativa durante el almacenamiento minimiza la pérdida de agua de las frutas (Zhao et al., 2022). Pese a que el tiempo prolongado de almacenamiento a bajas temperaturas permite conservar las características de calidad del fruto, una temperatura por debajo de los límites recomendados podría, en algunos casos, tener un efecto indeseado al generar alteraciones metabólicas que desencadenen pérdidas nutricionales, cambios en el sabor y la concentración de volátiles característicos del fruto (Ma et al., 2022). En frutos de tomate, por ejemplo, se presentan daños por frío a temperaturas inferiores a 10 °C durante su etapa de etapa de

madurez verde y 5 °C en etapa de madurez roja (Wang et al., 2018). En frutos de lulo, los rangos de temperatura del almacenamiento oscilan 6 a 10°C y humedad relativa entre el 70 y el 80 % (García y García, 2001; Gallozzi y Duarte, 2007). En cuanto a las temperaturas críticas, Torres (2020), reportó que frutos de lulo en cuartos fríos a 3°C presentaron daños por frío luego de nueve días de almacenamiento.

Para contrarrestar los efectos negativos del proceso de maduración y senescencia de los frutos, se han desarrollado diversas tecnologías poscosecha que permiten mantener la calidad del producto, al ralentizar flujo respiratorio y la producción de etileno y reducir las pérdidas económicas. Dentro de las tecnologías más implementadas se encuentran las atmosferas modificadas o AM, las cuales tienen como objetivo regular la concentración de O₂ y de CO₂ en la atmósfera que rodea el producto a conservar, a través del diseño de sistemas de empaque o envasado (Patiño et al., 2018). Dado que, dentro de los procesos metabólicos, la respiración está directamente involucrada con la senescencia y la vida útil de los productos hortofrutícolas (Lin et al., 2020), los empaques con AM generan un cambio en los niveles de gases dentro del empaque, donde se encuentra dispuesto el fruto o vegetal, con el fin de lograr la composición deseada al reducir la frecuencia respiratoria, retrasar la senescencia, preservar el color y la frescura y disminuir el desarrollo microbiano, la producción de etileno y mantener los atributos de calidad al incrementar la vida útil del producto (Patiño et al., 2018; Torales et al., 2020; Kumar et al., 2020).

Entre los productos generados naturalmente desde el fruto y que tiene grandes implicaciones en la conservación durante el periodo poscosecha se encuentra el etileno (Guo, 2022; Vall-llaura et al., 2022). Este gas genera un estímulo para la expresión de genes que se encuentran relacionados con la maduración y senescencia de los productos hortofrutícolas y en consecuencia regula la maduración y senescencia de frutas y vegetales a nivel molecular, bioquímico y fisiológico (Balaguera-López et al., 2014). La producción de esta hormona durante la poscosecha promueve el desarrollo de las características de calidad del producto ideales para su consumo, sin embargo, su generación también ocasiona la senescencia de los tejidos, dado que incrementa la producción de las especies reactivas de oxígeno (ROS), lo cual genera trastornos fisiológicos que reducen la calidad el fruto como el ablandamiento y oscurecimiento de la pulpa desde el núcleo, los cuales son efectos desfavorables en la calidad (Bapat et al., 2010; Zhai et al., 2018).

Para controlar la producción y efectos del etileno se han utilizado varios tipos de compuestos con diferentes mecanismos de acción. El óxido nítrico (NO) es una pequeña molécula endógena que actúa como un elicitador e incrementa la resistencia a enfermedades durante la poscosecha (Zhang, et al., 2020). La aplicación de NO durante la poscosecha produce un retraso en la lignificación de los frutos como respuesta a la regulación de la biosíntesis de etileno y del ácido abscísico (ABA) (Zhang et al., 2020). Suzuki y Nagata, (2019), mencionan un incremento en la lignificación de los tejidos del fruto como resultado de la síntesis de etileno lo que promueve la maduración y la senescencia durante la poscosecha. El NO inhibe la actividad de la ACC sintasa (ACS) y la ACC oxidasa (ACO) y, por lo tanto, suprime la actividad del etileno, dando como resultado un retraso en la senescencia del fruto (Mukherjee, 2019).

La melatonina (N -acetil-5-metoxitriptamina) (MT) es un compuesto de bajo peso molecular, el cual se considera un supresor de radicales libres e inductor de resistencia a estreses bióticos y abióticos (Onik et al., 2021). El uso de MT puede retrasar la maduración del fruto al inhibir la síntesis de etileno y reducir la tasa respiratoria en frutos cosechados. Se ha visto un efecto positivo en la calidad de frutos de tomates (Sun et al., 2016), fresa (Aghdam y Fard, 2017 , Liu et al., 2018), retraso en la senescencia y el daño por frío de los melocotones (Gao et al., 2018), reducción del deterioro de yuca (Ma et al., 2016) y ralentización de la maduración de los bananos en almacenamiento (Gao et al., 2016)

El 1-Metilciclopropeno (1-MCP), es un compuesto químico que actúa como antagonista del etileno, el cual reduce la producción de etileno endógeno y como consecuencia retrasa la maduración de frutas y hortalizas, (Lv et al., 2020). El mecanismo de acción del 1-MCP se basa en el bloqueo de los receptores de etileno al tener una afinidad diez veces mayor (Blankenship y Dole, 2003). Según lo descrito por Balaguera et al (2021), el bloqueo generado por el 1-MCP sobre los receptores del etileno puede causar una alteración en la expresión de genes involucrados en la biosíntesis del etileno, lo cual, no solo inhibe el efecto del etileno, sino que también retrasa la producción autocatalítica de este. Su efectividad en los frutos de lulo, al igual que ocurre en otros frutos tropicales, puede depender de la dosis, forma y tiempos de aplicación, por lo cual, el evaluar estos parámetros otorga la posibilidad de conservar las características de calidad del fruto al identificar las condiciones apropiadas de su aplicación.

Para obtener un efecto preservante integrado que permita minimizar el deterioro del producto durante la poscosecha se pueden combinar varias técnicas tales como la refrigeración para reducir la cinética de degradación, la regulación de gases a través del uso de empaques con AM y el uso de compuestos como el 1-MCP para controlar la acción del etileno. La combinación de estas técnicas de preservación puede resultar en un incremento importante de vida útil y un retraso en los procesos de senescencia al ejercer un control sobre varias de las variables extrínsecas e intrínsecas que llevan a la degradación de sustratos y al crecimiento de microorganismos. Se han visto resultados favorecedores al combinar AM y 1-MCP en frutos de tomate (Tilahun et al., 2021), peras (Lwin et al., 2021), manzana (Both et al., 2018) y ciruela (Bi et al., 2022).

La producción, el potencial de exportación y el consumo nacional de lulo de ha venido incrementando sostenidamente y es necesario que se den nuevas soluciones para desarrollar técnicas de conservación poscosecha que permitan reducir las pérdidas por deterioro del producto manteniendo su calidad sensorial y nutricional durante la etapa de poscosecha (Gallego et al., 2003).

Con esta investigación se buscó determinar el efecto de las tres técnicas de conservación seleccionadas (refrigeración, 1-MCP y AM) en los cambios físicos y químicos propios de la maduración durante la etapa poscosecha, con el fin de retardar o suprimir la síntesis y/o acción del etileno y, en consecuencia, prolongar la vida poscosecha de los frutos de lulo y conservar las características de calidad por más tiempo. Por lo anterior, surge la pregunta de investigación, ¿Cuál es el efecto de la aplicación de atmósferas modificadas, 1-Metilciclopropeno y bajas temperaturas de almacenamiento en la poscosecha de frutos de lulo?

Para el desarrollo de esta investigación se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de bajas temperaturas de conservación, 1-Metilciclopropeno y atmósferas modificadas sobre la calidad poscosecha de los frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam).

Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento de las características fisicoquímicas y propiedades de calidad del fruto de lulo sometido a diferentes temperaturas de refrigeración.

- Estudiar el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del fruto de lulo sometido a diferentes concentraciones de 1-Metilciclopropeno y diferentes tiempos de exposición encontrando las condiciones óptimas para retardar la maduración poscosecha.
- Evaluar los cambios fisicoquímicos del fruto de lulo conservado en empaques con atmósfera y tratados con 1-MCP, almacenados a baja temperatura.

1. Revisión de literatura

1.1 Fisiología y bioquímica del fruto de lulo (*Solanum quitoense* Lam) durante la poscosecha y principales estrategias de conservación

1.1.1 Resumen

El fruto de lulo es proveniente de la región andina cuyo interés por el consumidor radica en su sabor ácido y aroma, sumado al contenido de antioxidantes, minerales, carbohidratos y proteínas. El lulo se ha catalogado como un fruto climatérico cuya tasa respiratoria es más baja que otros frutos dentro de este grupo. Durante su proceso de maduración se presentan cambios como el paso de tonalidades verdes a amarillas en su pulpa y cascara, un incremento en su concentración de azúcares, ácido ascórbico, tasa respiratoria y producción de etileno, así como, una reducción en firmeza y acidez. Dada la naturaleza de su proceso de maduración se considera un fruto altamente perecedero. Por lo anterior, es necesario conocer su comportamiento fisiológico y bioquímico durante la poscosecha con el propósito de seleccionar las tecnologías de conservación más apropiadas. El objetivo de esta revisión fue presentar y describir los principales cambios fisiológicos, tales como patrón de respiración, producción de etileno y los cambios bioquímicos vinculados con la reducción de firmeza y variación de pigmentos que experimenta el fruto de lulo, así como, las principales tecnologías implementadas durante la etapa poscosecha.

Palabras clave: Tecnologías poscosecha, carbohidratos, pigmentos, etileno, actividad antioxidante

1.1.2 Introducción

El fruto de lulo tiene una forma ovalada o redonda, la cual depende de la variedad. El diámetro de este puede variar entre los 4 cm a 9 cm (Gargiullo et al., 2008). La superficie del fruto está cubierta

por tricomas de color marrón o negro y el color de la epidermis cambia de un tono verde oscuro a naranja brillante cuando alcanza la madurez fisiológica. La pulpa es translúcida de color amarillo verdoso y sus semillas son redondas, planas con un diámetro de 2 a 3 mm, y cada fruto puede llegar a tener entre 800 a 1200 semillas (Gargiullo et al, 2008; Ramírez et al., 2018).

Como parte del grupo de frutos considerados exóticos, el lulo es apetecido por su delicioso sabor ácido y atractivo aroma como resultado de la producción de carotenoides y compuestos fenólicos en su pulpa y piel, su contenido de antioxidantes que mejoran la salud y es fuente de vitaminas E, C, B1 , B2 , B3 , B6 y provitamina A, minerales como hierro, calcio, fósforo, potasio y nitrógeno, carbohidratos y proteínas (Gancel et al., 2008; Pratt et al., 2008; Ramírez et al., 2018).

De acuerdo con Forero et al. (2014), durante la maduración los frutos de lulo presentan un cambio de color al pasar de una tonalidad verde a una amarilla, como consecuencia de la degradación de la clorofila. En paralelo a este proceso, se genera un descenso en el pH y la acidez del fruto, como resultado de la acumulación de ácidos orgánicos y su posterior degradación en los procesos de respiración, y se incrementa la concentración de sólidos solubles totales y el contenido de vitamina C hasta alcanzar su mayor grado de madurez (Andrade-Cuvi et al. 2016; González-Loaiza et al., 2013). A medida que el fruto madura, se reduce la firmeza, lo cual puede ser el resultado del proceso de hidrólisis del almidón y la degradación enzimática de pectinas y hemicelulosas (Ochoa-Vargas et al., 2016).

El fruto de lulo puede llegar a presentar una perecibilidad de hasta el 50% durante la fase de poscosecha dependiendo de las condiciones del manejo, transporte y condiciones en el anaquel (Forero et al., 2014), por lo cual el desarrollo y aplicación de tecnologías poscosecha que permitan prolongar la calidad del producto de interés y especialmente reducir las pérdidas entre la cosecha se ha convertido en uno de los aspectos más importantes de investigación a nivel agrícola (Hernández et al., 2014). Existen varios tratamientos físicos que pueden ser aplicados con el fin de que el producto retrase su senescencia y mantenga la calidad deseada. Entre estas técnicas se tiene el control de temperaturas, las atmósferas modificadas (Fallik y Ilic, 2018), la radiación UV-C (Zhang y Jiang, 2019), el 1-Metilciclopropeno y la aminoetoxivinilglicina (DeLong y Prange, 2003) y los recubrimientos con ceras (Li et al., 2018). La efectividad de cada técnica dependerá de los estándares

y condiciones de uso y manejo de las mismas para lograr el objetivo deseado, incrementar la vida poscosecha del fruto de lulo y reducir sus pérdidas durante la misma etapa.

El objetivo de esta revisión fue presentar y describir los principales cambios fisiológicos, tales como patrón de respiración, producción de etileno y los cambios bioquímicos vinculados con la reducción de firmeza y variación de pigmentos que experimenta el fruto de lulo, así como, las principales tecnologías implementadas durante la etapa poscosecha.

1.1.3 Patrón de respiración y producción de etileno

Durante la maduración y la poscosecha los frutos denominados climatéricos presentan dos eventos característicos, 1) es la producción autocatalítica de etileno y 2) el incremento en la tasa de respiración (Martínez-González et al., 2017). El fruto de lulo es considerado un fruto climatérico cuya tasa respiratoria es más baja que otros frutos climatéricos, aun cuando se presenta el pico climatérico (Acosta, 2009). Su velocidad de respiración se ha registrado cerca a los 13,91 mg de CO₂ kg⁻¹h⁻¹ al momento de la cosecha (Ochoa-Vargas et al., 2016) y alcanza valores de 28 mg de CO₂ kg⁻¹h⁻¹ durante el pico climatérico (Arango et al., 1999). Sin embargo, son limitados los estudios en cuanto el desarrollo del patrón climatérico del fruto de lulo, en nuestro estudio, por ejemplo, no se presentaron cambios significativos en la concentración de azúcares y ácidos orgánicos, cambios de color, así como los cambios en la respiración y producción de etileno (Capítulo 4, 5 y 6), lo que podría llevar a considerar una evaluación más rigurosa sobre el patrón climatérico del fruto.

Por su parte, el etileno es una fitohormona gaseosa que actúa como regulador clave de muchos procesos fisiológicos de las plantas incluida la maduración de frutos y tiene un efecto aún más marcado en los frutos climatéricos (Mata et al., 2021). De acuerdo con Balaguera-López et al. (2014), el etileno genera un estímulo para la expresión de genes que se encuentran relacionados con la maduración y senescencia de los productos hortofrutícolas y, en consecuencia, regula estos procesos en las frutas y vegetales a nivel molecular, bioquímico y fisiológico. La producción de etileno durante la poscosecha promueve el desarrollo de las características de calidad del producto, ideales para su consumo, sin embargo, la producción de esta hormona también ocasiona la senescencia de los tejidos, lo que desencadena efectos desfavorables en la calidad (Bapat et al., 2010). Andrade-Cuvi et al. (2018), mencionan que el fruto de lulo presenta cambios en tasa de producción de etileno

durante la poscosecha que oscila entre los 1,6 mg C₂H₄ kg⁻¹h⁻¹ y 11.8 mg C₂H₄ kg⁻¹h⁻¹ entre los 0 y 21 días después de cosecha, comparados con frutos de tomate de frutos de tomate en donde se ha reportado una concentración máxima de 2,4*10⁻⁶mg C₂H₄ kg⁻¹h⁻¹ siendo su valor máximo en los primeros 10 días de poscosecha (Tao et al., 2022).

Pese a los datos anteriormente descritos, cabe destacar que son escasos los estudios que describen el comportamiento de la tasa respiratoria durante la etapa poscosecha de frutos de lulo, así como su relación con la producción de etileno durante la misma etapa. Forero et al. (2014), mencionaron que la intensidad respiratoria no tuvo una relación directa con el tiempo de almacenamiento, tipo de empaque, ni la temperatura de almacenamiento en su investigación. Por su parte, Andrade Cuvi (2018) en frutos tratados con 1-MCP observaron una reducción del 27 % en la tasa respiratoria en los frutos de lulo tratados con respecto a los controles durante todo el periodo de almacenamiento.

1.1.4 Cambios en la firmeza del fruto

Uno de los principales factores de calidad de los productos hortofrutícolas durante la poscosecha es la firmeza (Martínez-González et al., 2017). El ablandamiento extremo reduce la vida de anaquel de los productos, debido a que es uno de los síntomas asociados con la senescencia del fruto (Wang et al., 2022; Gao et al., 2020). Los cambios de textura en la fruta durante la maduración y el almacenamiento poscosecha están asociados principalmente con la disolución de la laminilla media y el desmontaje de la pared celular primaria, los cuales ocurren por la acción de la pectin metilesterasa (PME), la poligalacturonasa (PG), la celulasa (Cel) y la β-glucosidasa (β-glu) (Lin et al., 2020; Lijun et al., 2022). Quiroga y Murillo (2012), mostraron que en frutos de lulo, durante los 11 días de evaluación, la actividad de la enzima β-xilosidasa aumentó a medida que se presentaron cambios en la maduración de los frutos de lulo como la reducción de la firmeza y cambios de color, lo cual se atribuye a su papel en la hidrólisis de la hemicelulosa presente en la pared primaria de la corteza que es producto de la acumulación de micro fibrillas de celulosa y forma una red laxa que permite el crecimiento celular. Ospina et al. (2007), evaluaron la fuerza de fractura y la fuerza de firmeza en frutos de lulo en diferentes estados de madures, y como resultado obtuvieron que los frutos pintones presentan una resistencia de carga longitudinal de 226N y transversal de 84,8N y una

fuerza de firmeza de 1,1N, mientras que para los frutos maduros la fuerza de fractura media en posición longitudinal de 180 N y transversal de 68,5N y una fuerza de firmeza de la pulpa de 1,4 N.

1.1.5 Los pigmentos y el cambio de color

El color de frutos es una de las características de calidad sensorial clave para los consumidores y determina la aceptación de un producto. Por lo tanto, la evaluación del color es muy relevante dentro de la estimación de la calidad del producto (Ayustaningwarno et al., 2021). Caicedo (1999) describió el cambio de color del fruto de lulo durante el proceso de maduración. Durante esta etapa la epidermis del fruto cambia gradualmente de verde oscuro a verde claro y luego obtiene tonalidades amarillas desde los costados hasta llegar al color amarillo uniforme característico de los frutos maduros. De acuerdo con Franco et al. (2002) y Casierra-Posada et al. (2004), el fruto de lulo menciona cinco grados de madurez a partir del porcentaje de variación del color, estos grados de madurez son utilizados para definir el tiempo de cosecha del fruto, al considerarlo como un parámetro de referencia de maduración.

Durante la maduración de la fruta los cambios en el color en los frutos generalmente implican la destrucción de la clorofila, que permite revelar otros pigmentos ya presentes y también puede implicar la síntesis de pigmentos adicionales (Kasampalis, et al. 2020). Mejía et al. (2012), analizaron el cambio de color de frutos de lulo en seis estados de madurez y encontraron ligeros cambios visuales durante las primeras etapas de maduración (0-2), seguido de un marcado aumento durante las etapas 3-4 y un descenso en hacia la última etapa de maduración. Este comportamiento es originado como consecuencia de la degradación de la clorofila y el aumento de la concentración de pigmentos carotenoides debido a un aumento en la concentración de etileno (Acosta, et al., 2009; Andrade-Cuvi et al., 2015). Resultados similares fueron encontrados por Andrade-Curvi et al. (2016) en tres variedades de lulo Inap-Quitoense 2009, Baeza y Agria en donde los valores de L^* y b^* se incrementaron en un 20% y 30% en los estados de maduración 3 a 5 en las tres variedades. Asimismo, Andrade-Cuvi et al. (2019), encontraron un incremento en la coordenada a^* de 29,2 a 30,9 en los 21 días de muestreo, lo cual fue atribuido a la acumulación de compuestos como licopeno o carotenos en reemplazo de la clorofila por acción de la clorofilasa y clorofila oxidasa (Arteaga-Dalgo et al., 2014; Pinheiro et al., 2015).

El contenido de carotenoides puede llegar a variar de acuerdo con el tejido evaluado en el fruto. Gancel et al. (2008), encontraron en frutos de lulo que el contenido total de carotenoides fue 23,0 mg de equivalentes de β - caroteno por 100 g de DW en piel del fruto en comparación de tejidos de la placenta (5.0mg) o pulpa (7.4mg) en comparación con otras frutas tropicales, el contenido de las partes comestibles fue similar a los de la manzana de anacardo (5,3 μ g de equivalentes de β - caroteno por g de FW) y la naranja cv. "Pêra", pero menor que los de mango y papaya (Mélo et al., 2006). Por su parte, Acosta et al (2009) reportaron que el contenido de carotenoides fue menor en frutos de lulo procedentes de Costa Rica, Colombia y Ecuador, en comparación con frutos como pomelo y nectarina con una concentración superior de 20 μ g g⁻¹.

Acosta et al. (2009) identificaron que el *β -caroteno* es el principal carotenoide presente en frutos de lulo, de los cuales resaltan *all-trans- β -caroteno* y el *13- cis- β -caroteno*, así como la luteína, lo que concuerda con lo obtenido por Rosso y Mercante (2007). De igual forma, Acosta et al. (2009) encontraron que el *all-trans- β -caroteno* es el principal carotenoide presente en el fruto de lulo y puede llegar a representar hasta el 45% del contenido total de carotenoides, encontrándose en mayor proporción en la cascara (3622 μ g100gFW) seguido de la pulpa (380 μ g100gFW) y los tejidos de la placenta (208 μ g100gFW), lo cual concuerda con el cambio de color observado, en donde la cáscara presentó una tonalidad naranja, la pulpa una coloración amarilla y los tejidos de la placenta verde amarillento.

1.1.6 Carbohidratos

Dentro de los cambios metabólicos involucrados en la calidad sensorial de los frutos, la variación en la concentración de azúcares y ácidos orgánicos es uno de los parámetros de mayor importancia dado que afectan el sabor del producto (Schulz et al., 2021). La proporción de ácidos y azúcares establecen la calidad organoléptica del fruto. En frutos de lulo se ha reportado una concentración de °Brix que oscila entre 1,7 y 10 y un porcentaje de acidez entre 2,2% y 4,7%, dependiendo del grado de madurez, tipo de almacenamiento y manejo durante la poscosecha (Molano-Díaz et al., 2021; Torres, 2020; Andrade-Cuvi. et al., 2018 y Escobar, 2022). Los principales azúcares solubles son la fructosa, glucosa y sacarosa y los principales ácidos orgánicos son el ácido málico, cítrico y oxálico (Jawad et al., 2020). En frutos de lulo, se ha reportado un contenido de azúcares en la pulpa de 24,57 μ g de

glucosa g^{-1} tejido para frutos de lulo en grado de madurez 5 y en la piel del fruto los valores variaron 56,52 y 141,83 μg de glucosa g^{-1} tejido en base seca para los grados de madurez 1 y 5, respectivamente (Andrade-Cuvi et al., 2021). Acosta et al., (2009), reporta un valor individual del contenido de sacarosa, glucosa y fructosa de 1,6g 100g^{-1} peso fresco; 0,68g 100g^{-1} peso fresco y 0,7g 100g^{-1} peso fresco. En cuanto a la concentración de ácidos en el fruto de lulo, referida a la concentración de ácido cítrico, por ser el ácido en mayor concentración en el fruto, se han reportado incrementos promedio durante todo el periodo de maduración pasando de 2,3 mg vitamina C $100\text{g}^{-1}\text{ml}^{-1}$ de filtrado a 31,2 mg vitamina C $100\text{g}^{-1}\text{ml}^{-1}$ de filtrado, mostrando un aumento del 90 % de vitamina C (Acosta et al., 2009; González et al., 2013 y Andrade-Cuvi et al., 2021).

1.1.7 Actividad antioxidante

La tendencia mundial hacia una alimentación más sana y balanceada ha llevado a la población a una mayor exigencia en cuanto a los beneficios y aportes nutricionales que obtiene de los productos a consumir. Los antioxidantes son compuestos que otorgan beneficios a la salud humana dado que protegen el organismo del daño causado por los radicales libres (Mejía-Reyes et al., 2022). Dentro de los compuestos antioxidantes presentes en los frutos de lulo se encuentran los ácidos clorogénicos y sus hexósidos en la pulpa y los tejidos de la placenta, y glucósidos de flavonol en la piel (Gancel et al., 2008 ; Lim, 2013). También es fuente de vitaminas E, C, B 1, B 2, B 3, B 6 y provitamina A, minerales como hierro, calcio, fósforo, potasio y nitrógeno, carbohidratos y proteínas (Ramírez et al., 2018). De acuerdo con Vasco et al. (2008), el fruto de lulo contiene entre 11 y 13 mg de ácido ascórbico/ 100 g de peso fresco, el contenido total de compuestos fenólicos solubles se considera bajo (91 mg GAE 100g^{-1} de muestra) y su capacidad es baja con un valor de 3.2 $\mu\text{mol Trolox g}^{-1}$ muestra PF en contraste con otras frutas.

Acosta et al. (2009), encontraron que la epidermis del fruto de lulo presenta un contenido de polifenoles totales con valores de 1,5 y 2,6 veces más que la pulpa y el tejido placentario, respectivamente, y un contenido de ácido ascórbico de las tres partes del fruto de 125, 69 y 20 mg por 100 g de peso seco para tejidos placentarios, pulpa y piel, respectivamente. Sin embargo, la capacidad antioxidante de diferentes partes del lulo no puede atribuirse únicamente al ácido ascórbico, según Llerena et al. (2020), la actividad antioxidante del fruto de lulo es el resultado de la interacción de sus componentes libres solubles en agua (ácidos orgánicos, vitamina C), algunos

compuestos fenólicos solubles en agua y carotenoides. De igual forma se han reportado niveles de ácido gálico que van desde los 510,72 mg de ácido gálico en 100 g de peso hasta 897,58 mg de ácido gálico en 100 g de peso (Vasco et al., 2008; Contreras-Calderón, 2011; Acosta et al., 2009 y Llerena et al., 2014).

1.1.8 Tecnologías poscosecha

Las tecnologías de conservación poscosecha de han desarrollado con el objetivo de mantener durante el mayor tiempo posible la calidad de los productos hortofrutícolas, en especial para aquellos que son de mayor interés para el consumidor dados los beneficios que otorgan a la salud (Kader, 2011). Sin embargo, la selección, rigurosidad y aplicación de estas estrategias dado que afectan de forma directa y específicamente el comportamiento de las características de calidad dependiendo del producto por la fisiología del mismo y la sensibilidad que pueda tener a una o más tecnologías de conservación, son parámetros vitales considerar para no generar daños en el producto. A continuación, se presenta una descripción de las tecnologías utilizadas en la conservación de frutos de lulo, así como los resultados obtenidos en cada estudio.

- ***Temperatura***

Altas temperaturas (> 20 °C) generan una rápida degradación del fruto, al acelerar la tasa de respiración y de producción de etileno, así como el desarrollo de enfermedades (Kader, 2011). En consecuencia, el uso de bajas temperaturas de almacenamiento es considerada la principal técnica de conservación de calidad de los productos agrícolas dada su efectividad en retrasar la senescencia del producto (Zhao et al., 2022). Sin embargo, los productos hortofrutícolas presentan diferentes límites de tolerancia a las bajas temperaturas y, por lo tanto, la presencia de fisiopatías o daños por frío durante el almacenamiento es uno de los parámetros a considerar al seleccionar la temperatura de conservación (Pareek, 2016). La presencia de daño por frío depende del cultivo y puede presentarse a partir de los 0°C, en donde, dependiendo del grado de daño los frutos y vegetales se han catalogado en tres grupos: (1) resistentes al frío, los cuales a menor temperatura mayor será el tiempo de conservación y vida útil, (2) sensibles al frío, donde el almacenamiento de los frutos debe estar por encima de la temperatura límite de tolerancia (generalmente entre 10°C y 13°C), o se presentara una reducción de su vida útil con forme baja la temperatura y (3) ligeramente sensibles al

frío para aquellos frutos que resisten temperaturas entre 3°C y 4°C (Barman et al., 2019). En frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas se han reportado pérdidas de firmeza hasta del 30,6%, una concentración de °Brix entre los 7.6 y 10 °Brix, pérdidas de peso mayores al 10% (Molano-Díaz et al., (2021); Torres, (2020); Balaguera-López et al., (2014), los demás resultados se presentan en la tabla 1-1.

- ***1-Metilciclopropeno***

El 1-Metilciclopropeno (1-MCP) es un hidrocarburo gaseoso usado comercialmente para mantener la calidad de los productos poscosecha y extender su vida útil (Joy y Periyasamy, 2020). El 1-MCP es un eficiente inhibidor del receptor del etileno cuyo modo de acción se centra en bloquear la señalización del etileno al unirse de forma irreversible a los receptores de etileno (ETR1) con una afinidad diez veces mayor que el mismo etileno y, en consecuencia, anula las respuestas relacionadas con el etileno (Blankenship and Dole, 2003; Silser et al., 2003), lo cual retrasa la maduración y senescencia del producto, además de regular la producción autocatalítica del etileno (Blankenship and Dole, 2003; Shu et al., 2020; Balaguera-López et al., 2022). El 1-MCP es mayormente usado en frutos climatéricos y su método, tiempo de aplicación y dosis dependen del fruto y vegetal que vaya a ser evaluado (Li et al., 2022). Se han reportado casos en los que el uso de 1-MCP ha incrementado hasta 12 días la vida útil del fruto climatérico (Yan et al., 2013). La aplicación de 1-MCP puede hacerse en pre y poscosecha. En precosecha se ha reportado su efecto en la reducción de la caída del fruto, un incremento en el peso y firmeza (McArtney et al., 2008). Durante la poscosecha, la aplicación de 1-MCP ha mostrado beneficios en cuanto a la inhibición de la síntesis de etileno, evita la pérdida de firmeza del fruto y puede disminuir la presencia de fisiopatías durante el almacenamiento (Li et al., 2022). Específicamente en lulo tratados con 1-MCP (tabla 1-2), se han reportado cambios en el color con un $L^* = 61$ y $Cr^* = 39$, SST entre 7,7 y 8.4°Brix, y una pérdida de peso entre 8 y 9% (Molano-Díaz et al., (2021) y Andrade-Cuvi, (2018)).

- ***Atmósferas modificadas***

La tecnología de almacenamiento de atmósferas modificadas (AM) es comúnmente utilizada en la conservación de frutas y verduras para incrementar su tiempo de vida útil (Wood et al., 2022). Para los productos conservados sin ningún tipo de procesamiento de acuerdo con Castellanos et al., (2016), se debe crear un equilibrio entre la respiración y el paso de gases a través del empaque mediante la disminución de la concentración de O₂ y mantener la concentración CO₂ en la parte

superior del empaque de forma controlada. Para garantizar el equilibrio en la AM, los materiales más utilizados son películas poliméricas de diferentes calibres y tamaños, las cuales pueden ser flexibles o semiflexibles, con o sin perforaciones (Castellanos y Herrera, 2017).

Dentro de los beneficios que presenta AM se encuentran el retraso en la maduración del producto, menor producción de etileno, reducción de daños por frío y en el desarrollo de enfermedades fitopatógenas, entre otros (Barreiro y Sandoval 2006). Pese a los beneficios, también pueden presentarse afectaciones negativas durante el almacenamiento cuando se presentan procesos relacionados con el metabolismo anaerobio dando origen a alcoholes y aldehídos que desencadenan olores y sabores poco agradables al paladar (De la Vega et al., 2017). En frutos de lulo en condiciones de AM Guevara, (2017); Llive, (2018); Escobar, (2022), reportaron una tasa respiratoria $580 \text{ cm}^3\text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ de O_2 consumido y $493,4 \text{ cm}^3\text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ de CO_2 producido, menor concentración de flavonoides totales y una menor afectación microbiana (tabla 1-3).

- ***Radiación UV-C***

Adicional a los beneficios que se obtienen de la aplicación de métodos sobre la conservación de la calidad del producto al extender el tiempo de vida útil, la tendencia mundial de un manejo ambiental amigable también aplica a las tecnologías poscosecha. Dentro de las llamadas “tecnologías emergentes” para la conservación de frutas y verduras se encuentra la aplicación de radiación UV, la cual ha cobrado fuerza dada su fácil implementación y su alta efectividad sobre la actividad microbiana que afecta al producto y su bajo impacto ambiental (Andrade- Cuvi-2018; Michailidis et al., 2019).

Se ha determinado que la aplicación de radiación UV-B o UV-C tiene un efecto positivo sobre el control de daños causado por fitopatógenos, retarda la senescencia, así como el cambio de color y la síntesis de los antioxidantes y compuestos fenólicos (Abdipour et al., 2019). Se sabe que la radiación UV-C (200–280 nm), con una exposición de 3 a 5 minutos durante el periodo poscosecha está relacionado con la ralentización del proceso de ablandamiento e incrementa los metabolitos secundarios de frutos carnosos, inhibe la pérdida de la firmeza y la aparición de pardeamientos debido a la inhibición del daño (Ma et al., 2021; Andrade- Cuvi-2018). Sin embargo, Severo et al., (2015) mencionan que la radiación UV-C puede activar la expresión de los genes relacionados con

el receptor de respuesta del etileno lo que acelera el proceso de maduración del fruto. Resultados favorables del uso de UV-C se han reportado en manzanas (Lu et al., 1991), melocotones (González-Aguilar et al., 2004), caquis (Imaizumi et al., 2018), fresas (Li et al., 2014) y tomates (Bu et al., 2014; Pinheiro et al., 2015; Mditshwa et al., 2017). En lulo (Andrade-Cuvi et al., 2013) encontró un índice de deterioro reducido frente a los frutos no tratados, la firmeza paso de 17N a 2N y un menor cambio de color en los frutos tratados con radiación UV-C (tabla 1-4).

- ***Radiación gamma***

La radiación gamma es una radiación ionizante no térmica emitida por fuentes de cobalto (^{60}Co) o de cesio (^{137}Cs), que genera radiaciones electromagnéticas de una longitud de onda muy corta, tal como ocurre con los rayos X, luz ultravioleta, visible infrarroja y microondas (Andrade-Cuvi, et al., 2019). El uso de la radiación gamma está enfocado al control de plagas y enfermedades durante la poscosecha, no genera ningún tipo de daño ambiental, no altera la calidad del fruto y extiende su vida útil poscosecha (Lizarazo-Peña et al., 2022). Sin embargo, no se han determinado los rangos de dosis de radiación gamma a aplicar dependiendo del objetivo. La cantidad de energía absorbida por el producto tratado es considerada la dosis de radiación gama, cuya unidad de medida es el Gray (Gy). Se ha estipulado que los rangos de dosis para minimizar la presencia y actividad microbiana y extender el tiempo de vida útil de productos hortofrutícolas esta entre 1kGy y 10kGy y dosis menores de 1kGy pueden ralentizar la maduración para retrasar procesos de maduración y senescencia de frutas y vegetales (USDA, 2005). La efectividad de los rayos gamma se ha evaluado en frutos de lulo (Valarezo, 2019), en donde los frutos tratados presentaron un índice de deterioro leve frente a los frutos control los cuales mostraron un índice de daño severo (tabla 1-5). Otros resultados favorables fueron vistos en frutos de mandarina (Jeong et al., 2016), granada (Shahbaz et al., 2014), piña (Jenjob et al., 2017), y arándano (Lires et al., 2017).

- ***Ozono***

El ozono (O_3) es considerado un agente oxidante de uso gaseoso o acuoso cuyo efecto retardante en la pérdida de las características físicas del fruto, así como la reducción del daño por microorganismos ha sido reportado en diferentes frutos (Oyom et al., 2022). Dentro de las características que lo hacen atractivo de forma comercial para el uso en poscosecha, la principal es que no deja residuos de tipo cancerígeno en los productos tratados como ocurre con los tratamientos químicos, por lo cual no

tiene efectos negativos en la salud de los consumidores (Chen et al., 2020). Por su capacidad oxidante puede degradar la estructura de la pared celular, así como limitar su proliferación a través de las esporas de los agentes microbianos (Ong y Ali, 2015; Glowacz y Rees, 2016). Además, Tan et al. (2022), reportan que su aplicación puede inhibir la acción de las poligalacturonasa y las pectinas metilesterasas, involucradas en la degradación de la pared celular, dando como resultado un retraso en el ablandamiento del fruto. En frutos de lulo Andrade-Cuvi et al. (2018), reportaron que la producción de etileno en frutos tratados con ozono gaseoso fue la mitad de lo producido en los frutos control y la capacidad antioxidante los frutos tratados presentaron 21% mayor frente a los controles (tabla 1-6).

Tabla 1-1 Resultados del uso de diferentes temperaturas en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/Días de evaluación	Tasa respiratoria /Producción de etileno	Pérdida de firmeza	Color	SST/ATT/pH	Pérdida de peso	Índice de Deterioro (ID)	Autor
2°C, 4°C y 14°C/ 32 días	Los valores más bajos de IR se obtuvieron en los frutos refrigerados a 2°C, seguidos por los almacenados a 4°C y 14°C	Frutos a 14°C = 42 % Frutos a 2°C = 30,6% 4°C = 27,3 %	L*:14°C= 57,2 ± 0,35 en los 32 ddc 2 y 4 °C descendió a los 12 y 28 ddc. a* y b* no presentaron cambios significativos	SST: pasó de 10,1 a 9,0 en promedio. ATT: 2°C > 4 y 14°C a los 8ddc. pH: Se presentaron diferencias a los 8 y 16 ddc.	14°C =11,3 % a los 20 ddc 2°C = 4,9% a los 32ddc 4°C= 5,8% a los 32ddc	NA	Molano- Díaz et al., (2021)
INIAP Palora e Híbrido Puyo a 3°C, 7°C y 17°C /12 días	NA	Las temperaturas de 3°C y 17 °C presentaron los mayores cambios	NA	SST: 17°C= 7,63°Brix, 3°C=8,33°Brix 7°C=9,00°Brix ATT: 3°C= 2,80%, 7 °C = 2,76%, 17°C= 2,20% de ácido cítrico a 12 ddc	Frutos a 3 °C presentó el menor porcentaje de pérdida de peso a los 6, 9 y 12 días de almacenamiento.	En general todos los tratamientos presentaron un ID leve al día 3 y moderado al día 12	Torres, (2020)
8°C y 18°C / CaCl ₂ al 3% de Ca /(tiempo d inmersión 0, 5, 10 y 15 min)	NA	15 min + 8°C: Mayor conservación de firmeza con 56,53 N a los 29ddc	10 min + 8°C: mayor retención del color verde	NA	Control: 12,86%, 10min+8°: < 10%	NA	Balaguera- López et al., (2014)

Tabla 1-2 Resultados del uso de 1-MCP en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/D ías de evaluación	Tasa respiratoria /Producción de etileno	Pérdida de firmeza	Color	SST/ATT/pH	Pérdida de peso	Índice de deterioro (ID)	Microbiológicos	Bioquímica	Autor
0 $\mu\text{g L}^{-1}$, 280 $\mu\text{g L}^{-1}$ y 560 $\mu\text{g L}^{-1}$ / (tiempo de inmersión 10 min) /32 días	No se presentaron diferencias significativas. El pico climatérico se observó a los 16 días de almacenamiento.	32,4 % en promedio durante los 32 ddc sin presentar diferencias entre tratamientos.	a*=14,9 a 20,9 en promedio. b*= fueron más bajos para la dosis de 280 $\mu\text{g L}^{-1}$ IC se incrementó hasta el día 16 en los frutos con aplicación de 1-MCP, Control= disminuyó lenta y significativamente.	SST: 280 $\mu\text{g L}^{-1}$ =8,4°Brix 560 $\mu\text{g L}^{-1}$ =7,7°Brix ATT: Control 9,1% y 21,1 % más 280 y 560 $\mu\text{g L}^{-1}$ de 1-MCP a 16 ddc	En promedio para todas las dosis de 1- MCP de 8,33 %	NA	NA	NA	Molano- Díaz et al., (2021)
0,5 μLL^{-1} de 1-MCP (tiempo de exposición 8, 12 y 24 h) a 4°C /28 días	1-MCP redujo la TR 27% respecto al control. 1- MCP presentó un leve incremento en la concentración. El pico climatérico se alcanzó a los 14 días.	1-MCP= 8,86N a 6,07 N al día 21 ddc. Control = 7,85 N a 4,42 N al final del almacenamiento	Hue se redujo de 10 y 3 unidades en frutos control y tratados. 1-MCP = L*= 61 y Cr* =39. Control=se redujeron en L*=19 y Cr* 13 unidades	SST: Control= incrementó °Brix hasta el día 7 se redujeron en 18% al 21 ddc y 1-MCP= incrementó °Brix hasta el día 14 y se redujo 28% al 21 ddc. ATT: 1-MCP= 4,7% al 21 ddc control= 3,9% al 21 ddc pH: se mantuvo estable durante todo el periodo de almacenamiento	Control: 10 % para 1-MCP: 8-9 % durante 8, 12 y 24 h	1-MCP 8 y 12 h = ID: daño ligero a moderado a 28 ddc. 1-MCP 24h ID= daño fue moderado a severo a 28 ddc	Control: 6,5 log UFCg ⁻¹ a 21 ddc 1-MCP: 9 log UFCg ⁻¹ de aerobios mesófilos totales.	Capacidad antioxidante Control: disminuyó a partir del día 7 en 19 % frente al día 0. 1-MCP= incremento del 15 % respecto al día 0.	Andrade- Cuvi (2018)

Tabla 1-3 Resultados del uso de AM en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/Días de evaluación	Tasa respiratoria	Pérdida de firmeza	Color	SST/ATT/pH	Pérdida de peso	Índice de deterioro (ID)	Microorganismos	Bioquímica	Autor
10 días Concentración de gases: G1=O ₂ :2,5; CO ₂ :2,5 N ₂ :95. G2=O ₂ :2,5; CO ₂ :5 N ₂ :92,5; G3=O ₂ :80; CO ₂ :10 N ₂ :10; G4=O ₂ :80; CO ₂ :20 N ₂ :0 G5=O ₂ :90; CO ₂ :10 N ₂ :0	G2= no presentó diferencias de consumo de O ₂ . Producción de CO ₂ = no se presentaron diferencias entre tratamientos	La menor pérdida de firmeza se presentó en los frutos con mezcla G1	No se presentaron diferencias entre los tratamientos	SST: Se presentaron diferencias únicamente en los frutos con la mezcla G3. ATT: Todos los tratamientos presentaron diferencias a excepción del tratamiento G3. pH= sin diferencias	G1, G4 y G5= pérdida de peso entre 14 y 32%	G1, G2, G4= visualmente redujeron el grado de marchitamiento. G2= mejor uniformidad de la maduración. G1 y G5 no se vieron afectadas y G3 y G4 se vieron altamente deteriorados	BAL G1: 133 UFCg ⁻¹ G4: 167 UFCg ⁻¹ . G5: > contenido de aerobios mesófilos. El crecimiento de mohos y levaduras fue significativo para G2, G4 y G5.	G1 Y G4= diferencias sig. polifenoles totales expresado en mg ac. Gálico 100g ⁻¹ ms ⁻¹ . G1 y G5= < concentración flavonoides totales G1, G2 y G4= Diferencias significativas en carotenoides. clorofila total no presentó diferencias entre tratamientos	Guevara, (2017) y Llive, (2018)
PLA, PLA + Rem 4g y PLA + Rem 8g a 5°C, 12°C y 23°C / 30 días	23°C= 580 y 493,4 cm ³ kg ⁻¹ d ⁻¹ de O ₂ consumido y CO ₂ producido, respectivamente, valores inferiores a otros frutos climaterios	NA	a*= valores más altos en PLA + Rem 4g L*= 47,1 - 61,3 y b*=34,3 - 63,1 a 5 ddc y se mantuvieron estables hasta el final de almacenamiento	SST= sin diferencias significativas. ATT: PLA presentó el mayor porcentaje de acidez. pH= sin diferencias	Control = 3% a los 15 días de almacenamiento	NA	NA	NA	Escobar, (2022)

Tabla 1-4 Resultados del uso de radiación UV-C en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/Días de evaluación	Pérdida de firmeza	Color	Pérdida de peso	Índice de daño (ID)	Autor
5kJm ⁻¹ de radiación inoculados con <i>Rhizopus</i> y <i>Phytophthora</i> /12 días a 27°C	A partir del día 6 paso de 17N a 2N en promedio para todos los frutos	ΔE fue menor para los frutos tratados con radiación e inoculados	<i>Rhizopus</i> = sin diferencias <i>Phytophthora</i> +zradiación= 14,7% control= 17,5%	<i>Rhizopus</i> no tratados y controles= ID moderado a 9ddc. Radiación UV-C= daño leve a 9ddc. <i>Phytophthora</i> y no tratados con radiación, así como los controles perdieron totalmente su calidad.	Andrade-Cuvi et al., (2013)

Tabla 1-5 Resultados del uso de radiación gamma en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/Días de evaluación	Tasa respiratoria/producción de etileno	Pérdida de firmeza	Color	Pérdida de peso	Índice de deterioro (ID)	Microorganismos	Autor
Control y 500 Gy 21 días 8°C)	Control= 7,3mgL ⁻¹ CO ₂ kg ⁻¹ ¹ *h ⁻¹ 2,5 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹ Radiación =9 mgL ⁻¹ CO ₂ kg ⁻¹ ¹ *h ⁻¹ 1,6 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	Control: 2,93N (77%) Radiación: 2,88 N (78 %)	Radiación: L*= incrementó 52,28 % Control: disminución de 8,10 %. a* y b* no se presentaron diferencias significativas	Control =2,1% 500 Gy 1,7 %	Control=ID daño moderado-severo reflejado en la presencia o desarrollo de mohos en el cáliz de los frutos. 500Gy =ID daño moderado-leve, relacionado con descenso en la firmeza al tacto y aparición de zonas blandas en las muestras	Control = 5,1 Log UFCg ⁻¹ 500Gy= 1,4 Log UFCg-1	Valarezo (2019)

Tabla 1-6 Resultados del uso de ozono gaseoso en la conservación de frutos de lulo

Dosis / Empaque/Días de evaluación	Tasa respiratoria /Producción de etileno	Pérdida de firmeza	Color	SST/ATT/pH	Pérdida de peso	Bioquímica	Autor
1.5 mgL ⁻¹ con un tiempo de exposición de 5 minutos y un flujo controlado manualmente al 30%. / 21 días a 4°C	Control: 46.1 mgCO ₂ Kg ⁻¹ h ⁻¹ y 1.6 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ h ⁻¹ a 11.8 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ h ⁻¹ Tratados: 48.1 mgLCO ₂ Kg ⁻¹ h ⁻¹ y 2.2 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ h ⁻¹ a 5.5 mgC ₂ H ₄ ·kg ⁻¹ h ⁻¹	Control: 13.7 Tratados: 8.9 N	Control: L*= 55 en el día 21 y b*= 64 Tratadas: L*=62 y b*= 65	SST: Control= se incrementó en 2,8°Brix. Tratadas= se incrementó en 3,1°Brix. ATT= Se mantuvo un rango de 3,2 y 3,6 para todos los frutos. pH= Se mantuvo un rango de 3,2 y 3,6 para todos los frutos	Control: 3,9% Tratados: 5,9	Control: Al día 21 se determinó 20% mayor concentración de AsA respecto al día 0. Tratados: un contenido 52% mayor de AsA el día 0 y al día 21 se produjo una reducción del 42% de AsA en relación a los valores iniciales. El contenido de carotenoides al final del almacenamiento presentó valores de 8.2 y 28% mayores al día 0, para frutos control y tratados, respectivamente. Para el final del almacenamiento los frutos control presentaron 23% mayor contenido de fenoles totales que las muestras tratadas. La capacidad antioxidante estuvo entre 445 y 883 μmoles Trolox g ⁻¹ tejido seco. En el día 21, las muestras tratadas presentaron 21% mayor capacidad antioxidante que los controles.	Andrade-Cuvi. et al., (2018)

1.1.9 Conclusiones

Dados los efectos variados que pueden presentarse dependiendo del tipo de tecnología implementada y la combinación de las mismas, es importante reconocer cuales de estas tienen un mayor o mejor efecto en cuanto a la conservación de las características fisicoquímicas de calidad de los frutos y cuales, adicionalmente, tienen efecto sobre la actividad microbiana presente durante la poscosecha. Para el caso del lulo y de acuerdo con los resultados compilados, la aplicación de bajas temperaturas generalmente se encuentra asociada a otra tecnología con el objetivo de incrementar el tiempo de vida útil del fruto. El uso de radiación gamma, radiación UV-C y AM ha mostrado efectos positivos en cuanto a la reducción de la actividad microbiana, así como en la conservación de las características físicas y químicas y bioquímicas de los frutos. Por otra parte, la aplicación de 1-MCP y ozono gaseoso ha mostrados resultados satisfactorios únicamente en cuanto a las características físicas y bioquímicas de los frutos de lulo.

En el desarrollo de la presente investigación, fueron seleccionadas las tecnologías de baja temperatura de almacenamiento, aplicación de 1-MCP y AM, con el fin de evaluar su efecto en las características de calidad en frutos de lulo. Su selección fue basada en las respuestas obtenidas previamente en frutos con el mismo comportamiento durante la maduración, su efectividad en el incremento del tiempo de vida del producto hortofrutícola tratado y el bajo costo requerido en su implementación. Como se describió previamente, los beneficios de la radiación gamma, radiación UV-C y el gas ozono son notorios y sus efectos pueden verse no solo en el desarrollo del proceso de maduración del fruto, también en el control de la actividad microbiana que puede llegar a afectarlo durante la poscosecha. Las tecnologías seleccionadas pueden ser implementadas desde el momento de la cosecha hasta la comercialización, sin requerir equipos o instalaciones de alta complejidad y, por lo tanto, puede contribuir a la reducción de las pérdidas durante la poscosecha a un bajo costo, ser implementadas tanto por los productores como por los comercializadores y obtener la calidad deseada y optima de consumo o procesamiento del fruto de lulo.

1.1.10 Referencias

- Abdipour, M., Hosseinfarahi, and Naseri, N. (2019). Combination method of UV-B and UV-C prevents post-harvest decay and improves organoleptic quality of peach fruit. *Scientia Horticulturae*. 256:108564. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108564
- Acosta, Ó., Pérez, A and Vaillant, F. (2009). Chemical characterization, antioxidant properties and volatile constituents of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) cultivated in Costa Rica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 59(1): 88- 94
- Aghdam, M and Fard, J.2017. Melatonin treatment attenuates postharvest decay and maintains nutritional quality of strawberry fruits (*Fragaria x anannasa* cv. Selva) by enhancing GABA shunt activity. *Food Chemistry* 221.1650–1657. Doi: 10.1016/j.foodchem.2016.10.123
- Agronet, (2020). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo; [Consultado 2020 nov]- <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Almanza-Merchán, P., Velandia, J.D and Tovar, Y.P. (2016). Propiedades fisicoquímicas durante el crecimiento y desarrollo de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2): 222-231.
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Guijarro-Fuentes, M and Concellón, A. (2015). Caracterización de la naranjilla (*solanum quitoense*) común en tres estados de madurez. *Rev. Iber. Tecnología Postcosecha*. 16(2):215-221
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Bravo-Vásquez, J., Guijarro-Fuentes, M., Monar-Bosquez, V., Cevallos-Navarrete, C and Concellón, A. (2016). Efecto del estado de madurez sobre la calidad de tres variedades de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam). *Ver. Iber. Tecnología Postcosecha*. 17(2): 217-230
- Andrade-Cuvi, M.J. (2018). Calidad poscosecha de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam) y alternativas tecnológicas para retrasar el deterioro. Elaboración de un producto panificado enriquecido con naranjilla. [Tesis Doctoral] Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata, Argentina
- Andrade-Cuvi, M., Guijarro-Fuertes, M., Jara-Gómez, S., Narváez-López, P., Moreno-Guerrero, C and Concellón, A. (2018). Efecto del tratamiento con ozono gaseoso sobre la calidad fisicoquímica y capacidad antioxidante de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam). *Revista*

- Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 19 (2).
En: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81357541004>
- Andrade-Cuvi, M., Valarezo, L., Guijarro-Fuertes, M., Lárraga-Zurita, P., Alcívar León., C.D., Vasco, C and Vargas-Jentzch, P. (2019). Evaluación del uso de radiación gamma como tratamiento poscosecha en naranjilla (*Solanum quitoense*). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 20 (1):36-50
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Concellón, A and Chicaiza-Vélez, B. (2013). Efecto de la radiación UV-C sobre el desarrollo de *Rhizopus* y *Phytophthora* en naranjilla (*Solanum quitoense*). Rev. Iber. Tecnología Postcosecha. 14(1):64-71.
- Andrade-Cuvi, M., Guijarro-Fuertes, M and Luzcando, J. (2021). Evaluación fisicoquímica y antioxidante de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) durante la maduración. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 22(2)
- Arango, H., Vaillant, F., Vélez, V and Millan, P. (1999). Evaluation of post-harvest performance of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) fruits packed under modified atmosphere (MA). Fruits, 54(4):261-270.
- Arteaga-Dalgo, M., Andrade-Cuvi, M. and Moreno-Guerrero, C. (2014). Relación del desarrollo del color con el contenido de antocianinas y clorofila en diferentes grados de madurez de mortiño (*Vaccinium floribundum*). Revista Enfoque UTE, 5(2): 24-28. Doi: 10.29019/enfoqueute.v5n2.37
- Ayustaningwarno, F Fogliano, V., Verkerk, R and Dekker, M. (2021). Surface color distribution analysis by computer vision compared to sensory testing: Vacuum fried fruits as a case study. Food Research International. 143:110230. Doi: 10.1016/j.foodres.2021.110230
- Bai, C., Wub, C., Mac, L., Fu, A., Zhengc Y., Han, J., Li, C., Yuan, S., Zheng, S., Gao, L., Zhange, X., Wang, Q., Meng, D and Zuo, J. (2021). Transcriptomics and Metabolomics Analyses Provide Insights into Postharvest Ripening and Senescence of Tomato Fruit Under Low Temperature. Horticultural Plant Journal. Journal Pre-proof. Doi: 10.1016/j.hpj.2021.09.001

- Balaguera-López, H., Salamanca-Gutiérrez, F., García, C and Errera-Arévalo, A. (2014). Etileno y retardantes de la maduración en la poscosecha de productos agrícolas. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2): 302-31. Doi: 10.17584/rcch.2014v8i2.3222
- Balaguera-López, H., Espinal-Ruiz, M., Rodríguez-Nieto, J., Herrera-Arévalo, A and Zacarías, L. (2022). 1-Methylcyclopropene inhibits ethylene perception and biosynthesis: A theoretical and experimental study on cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Postharvest Biology and Technology*. 174: 111467. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111467
- Bapat, V.A., P.K. Trivedi, A. Ghosh, V.A. Sane, T.R. Ganapathi and P. Nath. (2010). Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. *Biotechnol. Adv.* 28, 94-107. Doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.10.00
- Barman, K., Sharma, S and Siddiqui, M. (2019). Emerging postharvest treatment of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. Chapter 1. Postharvest treatments to alleviate chilling injury in fruits and vegetables. Apple Academic Press Inc. p 2.
- Barreiro, J and Sandoval, J. (2006). Operaciones de Conservación de Alimentos por Bajas Temperaturas, 1a edición, 100-101. Equinoccio, Caracas, Venezuela
- Blankenship, S.M and Dole, J.M. (2003). 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biol. Technol.* 28, 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6).
- Brummell, D.A. (2006). Cell wall disassembly in ripening fruit. *Review. Funct. Plant Biol.* 33:103–119. Doi: doi.org/10.1071/FP05234
- Bu, J., Ni, Z., Aisikaer, G., Jiang, Z., Khan, Z.U., Mou, W and Ying, T. (2014). Postharvest ultraviolet-C irradiation suppressed Psy 1 and Lcy- β expression and altered color phenotype in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 89, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.10.005>.
- Caicedo, D. (1999). Cosecha y poscosecha. En: Gómez, C. et al. (eds.). *Manejo integrado del cultivo del lulo*. Convenio Corpoica-Plante-Sena. Ibagué. Tecnimpresos. p. 85 - 96.
- Casierra-Posada, F., García, E and Y Lüdders, P. (2004). Determinación del punto óptimo de cosecha en el lulo (*Solanum quitoense* Lam. var. *quitoense* y *septentrionale*). *Agronomía Colombiana*, 22 (1): 32-39.

- Castellanos, D., Herrera, D and Herrera, A. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. *Biosystems Engineering*. 151: 218-230. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.015
- Castellanos, D and Herrera, A. (2017). Postharvest Handling. *Modified Atmosphere Packaging: Design and Optimization Strategies for Fresh Produce*. Chapter 5. Ed. INTECH. 86-106p.
- Chen, C., Zhang, H., Zhang, X., Dong, C., Xue, W and Xu, W. (2020). The effect of different doses of ozone treatments on the postharvest quality and biodiversity of cantaloupes. *Postharvest Biology and Technology*. 163: 111124. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2020.111124
- Contreras-Calderón, J., Calderón-Jaimes, L., Guerra-Hernández, E and García-Villanova, B. (2011). Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. / *Food Research International*. 44: 2047–2053. Doi: 10.1016/j.foodres.2010.11.003
- Delong, J and Prange, R. (2003). *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Postharvest Physiology Storage. Pages 823-835. Doi: 10.1016/B0-12-227050-9/00079-X
- De la Vega, J., Cañarejo, M and Pinto, N. (2017). Avances en Tecnología de Atmósferas Controladas y sus Aplicaciones en la Industria. Una Revisión. *Información Tecnológica*. 28(3): 75-86. Doi: 10.4067/S0718-07642017000300009
- Escobar, J. (2022). Evaluación de un removedor de oxígeno y un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo para la preservación de lulo (*Solanum quitoense*) en fresco. Tesis: Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá Colombia
- Fallik, E And Ilic. (2018). Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality. Chapter 6 - Pre- and Postharvest Treatments Affecting Flavor Quality of Fruits and Vegetables. 151p. Doi: 10.1016/B978-0-12-809807-3.00006-8
- Forero, N., Gutierrez, S., Sandoval, R., Camacho, J and Meneses, M. (2014). Evaluación poscosecha de las características del lulo (*Solanum quitoense*) cubierto con hoja de plátano. *Temas Agrarios*, 19(1): 73-85.

- Franco, G., J. Bernal, M., Giraldo, P., Tamayo, O., Castaño, A., Tamayo, J., Gallego, M., Botero, J., Rodríguez, N., Guevara, J., Morales, M., Londoño, G., Ríos, J., Rodríguez, J., Cardona, J., Zuleta, J., Castaño, J and Ramírez, M (2002). El cultivo del lulo. Manual técnico. CORPOICA, Regionales cuatro y nueve - Fondo Nacional Hortifrutícola - Asohofrucol. Manizales. 103 p
- Gao, M, Wei, Q., Bian, R and Jingping, R. (2020). Differences In Tissue Structure And Physiological Changes of 'Xuxiang' and 'Hayward' Kiwifruit Fruits During Cold Storage[J]. Acta Horticulturae Sinica. 47(7): 1289-1300.
- Gallego, S., Riaño, C. and Orozco, L. (2003). Determinación del comportamiento químico y fisiológico de *Feijoa sellowiana* en almacenamiento. Cenicafé, 54 (1), 50- 62.
- Gallozzi, R and Duarte, O. (2007). Cultivos De diversificación para pequeños productores de frijol y maíz en América central, Naranja y Cocona. Guía práctica de manejo agronómico, cosecha, poscosecha y procesamiento de naranja. (pp. 49). Managua-Nicaragua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)
- Gancel, A., Alter, P., Dhuique-Mayer, C., Ruales, J and Vaillant, F. (2008). Identifying carotenoids and phenolic compounds in Naranja (*Solanum quitoense* Lam. Var. Puyo Hybrid), an Andean fruit J. Agric. Food Chem. 56: 11890-11899. Doi:10.1021/jf801515p
- Gargiullo, M., Kimball, L and Magnuson, B. (2008). A Field Guide to Plants of Costa Rica. Oxford University Press, Oxford (2008)
- Gao, H., Zhang, Z., Lv, X., Cheng, N., Peng B and Cao, W. (2016). Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms. Postharvest Biology and Technology 111. 390–397. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.031
- Gao, H., Lu, Z., Yang, Y., Wang, D., Yang, T., Cao, M and Cao, W. (2018). Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism. Food Chemistry 245. 659–666. Doi:10.1016/j.foodchem.2017.10.008
- Gómez-Merino, F., Trejo-Téllez, L., García-Albarado, J and Cadeña-Íñiguez, J. (2014). Lulo (*Solanum quitoense* [Lamarck.]) como cultivo novedoso en el paisaje agroecosistémico mexicano. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 9:1741-1753

- González-Loaiza, D., Ordoñez, L., Vanegas, P and Vásquez, H. (2013). Cambios en las propiedades fisicoquímicas de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) cosechados en tres grados de madurez. *Acta Agronómica*. 63 (1):11-17. Doi: 10.15446/acag.v63n1.31717
- González-Aguilar, G., Wang, C and Buta, G. (2004). UV-C irradiation reduces breakdown and chilling injury of peaches during cold storage. *J. Sci. Food Agric.* 84, 415–422. Doi:10.1002/jsfa.1675.
- Goulao, L.F., Oliveira, C.M. (2008). Cell wall modification during fruit ripening: when a fruit is not the fruit. *Trends Food Sci. Technol.* 19, 4–25. Doi: 10.1016/j.tifs.2007.07.002
- Guevara, J. (2017). Mejora de la conservación postcosecha de la naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) mediante atmósferas modificadas. Tesis. Ingeniería en Alimentos, Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos, Universidad Técnica de Ambato. Ambato – Ecuador.
- Guo, Q., Wu, B., Peng, X., Wang, Y., Li, Q., Jin, J and Ha, Y. (2014). Effects of chlorine dioxide treatment on respiration rate and ethylene synthesis of postharvest tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology* 93. 9–14. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.01.013
- Heidarvand, L., Millar, A and Taylor, L. (2017). Responses of the Mitochondrial Respiratory System to Low Temperature in Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36:4, 217-240, DOI: 10.1080/07352689.2017.1375836
- Heiser Cb and Anderson G. (1999). “New Solanums” En: Janick J (ed.) *Perspectives on New Crops and New Uses*. ASHS Press. Alexandria, Virginia, USA, pp. 379-384.
- Hernández, A., Márquez, C., Restrepo, C., Cano, A and Patiño, J. (2014). Aplicación de tratamiento térmico, recubrimiento comestible y baño químico como tratamientos poscosecha para la conservación de hortalizas mínimamente procesadas. *Acta Agronómica*. 63 (1): 1-10
- Huang, W., Billing, D., Cooney, J., Wang, R and Burdon, J. (2021). The role of ethylene and abscisic acid in kiwifruit ripening during postharvest dehydration. *Postharvest Biology and Technology* 178.111559. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111559>.
- Imaizumi, T., Yamauchi, M., Sekiya, M., Shimonishi, Y and Tanaka, F. (2018). Responses of phytonutrients and tissue condition in persimmon and cucumber to postharvest UV-C

- irradiation. *Postharvest Biol. Technol.* 145, 33–40. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.06.003>
- Jawad, U., Gao, L., Gebremeskel, H., Safdar, L., Yuan, P., Zhao, S., Xuqiang, L., Nana, H., Hongju, Z and Liu, W. (2020). Expression pattern of sugars and organic acids regulatory genes during watermelon fruit development. *Scientia Horticulturae* 265: 109102. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.109102
- Jeong, R., Chu, H., Lee, G., Cho, C and Park, H. (2016). Inhibitory effect of gamma irradiation and its application for control of postharvest green mold decay of Satsuma mandarins. *Int. J. Food Microbiol.* 234: 1–8. Doi: 10.1016/j.ijfoodmicro. 2016.06.026
- Jenjob, A., Uthairatanakij, A., Jitareera, P., Wongs-Aree, C and Aiamla-Or, S. (2017). Effect of harvest seasonal and gamma irradiation on the physicochemical changes in pineapple fruit cv. Pattavia during stimulated sea shipment. *Food Sci. Nutr.* 5. 997–1003. Doi: 10.1002/fsn3.485
- Kasampalis, D., Tsouvaltzis, P and Siomos, A. (2020). Chlorophyll fluorescence, non-photochemical quenching and light harvesting complex as alternatives to color measurement, in classifying tomato fruit according to their maturity stage at harvest and in monitoring postharvest ripening during storage. *Postharvest Biology and Technology* 161: 111036. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111036
- Kumar, V., Ranjan, V., Muthukaliannan, K and Pareek, S. (2020). Exogenous gibberellic acid treatment extends green chili shelf life and maintain quality under modified atmosphere packaging. *Scientia Horticulturae* 269: 108934. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108934
- Llerena, W., Samaniego, I., Ramos, M and Brito B. (2014). Characterization físicoquímica y funcional de seis frutas tropicales y andinas ecuatorianas. *Alimentos Ciencia e Ingeniería* 22(2): 3-22
- Llerena, W., Samaniego, I., Navarro, M., Ortíz, J., Angós, I and Carrill, W. (2020). Effect Of Modified Atmosphere Packaging (MAP) In The Antioxidant Capacity Of Arazá (*Eugenia Stipitata* Mcvaugh), Naranja (*Solanum Quitoense* Lam.), And Tree Tomato (*Solanum Betaceum* Cav.) Fruits From Ecuador. *Journal Of Food Processing And Preservation.* 44 (10):14757. Doi: 10.1111/Jfpp.14757

- Lobo-Arias, M.; Medina-Cano, C., Delgado-Paz, O. and Bermeo-Giraldo, A. (2007). Variabilidad morfológica de la colección colombiana de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) y especies relacionadas de la sección Lasiocarpa. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 60:3939-3964.
- Lires, C., Docters, A and Horak, C. (2017). Evaluation of the quality and shelf life of gamma irradiated blueberries by quarantine purposes. *Radiat. Phys. Chem.* Doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.025.
- Llive, M. (2018). Evaluación del efecto de la aplicación de atmósferas modificadas sobre la composición bioquímica de la naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.). Tesis. Ingeniería en Alimentos. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Universidad Técnica De Ambato. Ambato- Ecuador
- Lizarazo-Peña, P., Darghan, E and Herrera, A. (2022). Effects of gamma radiation on the quality of Hass avocado fruits (*Persea americana* Mill.). *Radiation Physics and Chemistry.* 190:109817. Doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109817
- Li, F., Zhang, X., Wang, J., Jiang, Y., Zhang, X and Li, X. (2022). Preharvest application of 1-methylcyclopropene and Ethephon altered cuticular wax biosynthesis and fruit quality of apples at harvest and during cold storage. *Horticultural Plant Journal.* 8(2):143-152. Doi: 10.1016/j.hpj.2021.11.008
- Li, L., Lv, F., Guo, Y and Wang, Z. (2016). Respiratory pathway metabolism and energy metabolism associated with senescence in postharvest Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) florets in response to O₂/CO₂ controlled atmospheres. *Postharvest Biology and Technology* 111. 330–336. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.09.032
- Li, D., Luo, Z., Mou, W., Wang, Y., Ying, T and Mao, L. (2014). ABA and UV-C effects on quality, antioxidant capacity and anthocyanin contents of strawberry fruit (*Fragaria ananassa* Duch.). *Postharvest Biol. Technol.* 90: 56–62. Doi: 10.1016/j. postharvbio.2013.12.006.
- Li, X., Zhu, X., Wang, H., Lin, X., Lin, H and Chen, X. (2018). Postharvest application of wax controls pineapple fruit ripening and improves fruit quality. *Postharvest Biology and Technology.* 136: 99-110. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.10.012

- Lijun, S., Zhang, W., Li, Q., Jiang, Z., Wang, Y., Xuan, S., Zhao, J., Luo, S., Shen, S and Chen, X. (2022). Melatonin alleviates chilling injury and maintains postharvest quality by enhancing antioxidant capacity and inhibiting cell wall degradation in cold-stored eggplant fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 194: 112092. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112092
- Lin, L., Lin, Y., Lin, H., Lin, M., Ritenour, M., Chen, Y., Wang, H., Hung, Y and Lin, Y. (2019). Comparison between 'Fuyan' and 'Dongbi' longans in aril breakdown and respiration metabolism. *Postharvest Biology and Technology* 153. 176–182. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.04.008
- Lin, Y., Lin, H., Wang, H., Lin, M., Chen, Y., Fan, Z., Hung, Y and Lin, Y. (2020). Effects of hydrogen peroxide treatment on pulp breakdown, softening, and cell wall polysaccharide metabolism in fresh longan fruit. *Carbohydrate Polymers*. 242: 116427. Doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116427
- Lin, Y., Lin, H., Chen, Y., Wang, H., Lin, M., Ritenour, M and Lin, Y. (2020). The role of ROS-induced change of respiratory metabolism in pulp breakdown development of longan fruit during storage. *Food Chemistry*. 305: 125439. Doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125439
- Li, Z., Zhang, W., Li, X., Liu, H., Li, F and Zhang, X. (2022). Combined effects of 1-methylcyclopropene and tea polyphenols coating treatment on the postharvest senescence and reactive oxygen species metabolism of bracken (*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*). *Postharvest Biology and Technology*. 185: 111813. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111813
- Liu, Zheng, H., Sheng, K., Liu, W and Zheng, L. (2018). Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology* 139. 47–55. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.01.016
- Lu, J., Stevens, C., Khan, A and Kabwe, M., (1991). The effect of ultraviolet irradiation on shelf-life and ripening of peaches and apples. *J. Food Qual.* 14, 299–305. M
- Lv, J., Zhang, J., Han, X., Xu, D., Ding, S., Ge, Y., Li, C and Li, J. (2020). Genome wide identification of superoxide dismutase (SOD) genes and their expression profiles under 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment during ripening of apple fruit. *Scientia Horticulturae* 271: 109471. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109471>

- Ma, L., Wang, Q., Li, L., Grierson, D., Yuan, S., Zheng, S., Wang, Y., Wang, B., Bai, C., Fu, A., Gao, L., Zhu, B., Luo, Y., Mu, J and Zuo, J. (2021). UV-C irradiation delays the physiological changes of bell pepper fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*.180:111506. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111506
- Martínez-González, M., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M., Palomino-Hermosillo, Y and López-Gúzman, G. (2017). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 19: 4075-4087. Doi: 10.29312/remexca.v0i19.674
- McArtney, S and Obermiller, J. (2008). Preharvest 1-Methylcyclopropene Delays Fruit Maturity and Reduces Softening and Superficial Scald of Apples During Long-term. *Hortscience*. 43(2):366–371. Doi: 10.21273/HORTSCI.43.2.366
- Mejía, C., Gaviria, D., Duque, A., Rengifo, L., Aguilar, E and Alegría, A. (2012). Physicochemical characterization of the lulo (*Solanum quitoense* Lam.) castilla variety in six ripening stages. *Vitae*. 19 (2): 157-16
- Mejía-Reyes, J., García-Cabrera, K., Velázquez-Ovalle, G and Vázquez-Ovando, A. (2022). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. 9(1): 9-33. Doi: 10.23850/24220582.4023
- Mélo, E. A., Lima, V., Maciel, M., Caetano, A and Leal, F. (2006). Polyphenol, ascorbic acid and total carotenoid contents in common fruits and vegetables. *Braz. J. Food Technol.* 236.
- Mercado, J.A., Pliego-Alfaro, F and Quesada, M.A. (2011). Fruit shelf life and potential for its genetic improvement. In: Jenks, M.A., Bebeli, P.J. (Eds.), *Breeding for Fruit Quality*. John Wiley & Sons, Oxford, pp. 81–104.
- Mercado, L.A., Matas, A.J and Posé, S. (2018). Fruit and Vegetable Texture: Role of Their Cell Walls. *Encyclopedia of Food Chemistry*, pp 1-7. Doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21679-X
- Michailidis, M., Karagiannis, E., Polychroniadou, C., Tanou, G., Karamanoli, K and Molassiotis, A. (2019). Metabolic features underlying the response of sweet cherry fruit to postharvest

- UV-C irradiation. *Plant Physiology and Biochemistry*. 144: 49–57. Doi: 10.1016/j.plaphy.2019.09.030
- Mditshwa, A., Magwaza, L.S., Tesfay, S.Z and Mbili, N.C. (2017). Effect of ultraviolet irradiation on postharvest quality and composition of tomatoes: a review. *J. Food Sci. Technol.* 54: 3025–3035 Doi: 10.1007/s13197-017-2802-6.
- Molano-Díaz, J., Reyes-Medina, A and Álvarez-Herrera, J. (2022). El 1-metilciclopropeno y la temperatura de almacenamiento en la poscosecha de lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 20 (2):60-75. Doi: 10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1815
- Mukherjee, S. (2019). Recent advancements in the mechanism of nitric oxide signaling associated with hydrogen sulfide and melatonin crosstalk during ethylene-induced fruit ripening in plants. *Nitric Oxide* 82, 25–34. Doi: 10.1016/j.niox.2018.11.003
- Ochoa-Vargas, L.M., Balaguera-López, H.E., Ardila-Roa, G., Pinzón-Sandoval, E.H and Álvarez-Herrera, J.G. (2016). Crecimiento y desarrollo del fruto de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el municipio de San Antonio del Tequendama (Colombia). *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.* 17, 347. http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:512
- Onik, J., Wai, S., Li A., Lin, O Sun, Q., Wang, Z and Duan, Y. (2021). Melatonin treatment reduces ethylene production and maintains fruit quality in apple during postharvest storage. *Food Chemistry* 337. 127753. Doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127753
- Ong, M. and Ali, A., (2015). Antifungal action of ozone against *Colletotrichum gloeosporioides* and control of papaya anthracnose. *Postharvest Biol. Technol.* 100, 113–119. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.09.023.
- Ospina, D., Ciro, H and Aristizábal, I. (2007). Determinación de la fuerza de la fractura superficial y fuerza de firmeza en frutas (*Solanum quitoense* x *Solanum hirtum*). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. 60(2): 4163-4178.
- Oyom, W., Li, Y., Prusky, D., Zhang, Z., Bi, Y and Tahergorabi, R. (2022). Recent advances in postharvest technology of Asia pears fungi disease control: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 117: 101771. Doi: 10.1016/j.pmpp.2021.101771

- Pareek, S. (2016). *Postharvest Ripening Physiology of Crops*. Boca Raton. Estados Unidos. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- Patiño, L., Castellanos, D and Herrera, A. (2018). Influence of 1-MCP and modified atmosphere packaging in the quality and preservation of fresh basil. *Postharvest Biology and Technology* 136: 57–65. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.10.010
- Pinheiro, J., Alegria, C., Abreu., M., Sol., M., Goncalves, E and Silva, C. (2015). Postharvest quality of refrigerated tomato fruit (*Solanum lycopersicum*, cv Zinac) at two maturity stages following heat treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6):697-709. Doi: 10.1007/s13197-014-1550-0
- Pratt, R.C., Francis, D.M. and Meneses, L. (2008). Genomics of tropical solanaceous species: established and emerging crops. P.H. Moore, R. Ming (Eds.), *Genomics of Tropical Crop Plants.*, Springer, New York. pp. 453-467. Doi:10.1007/978-0-387-71219-2_19
- Quiroga, L and Murillo, L. (2012). Comportamiento cinético de la β -xilosidasa durante la maduración del lulo *Solanum quitoense*. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Microbiología Industrial, Bogotá D.C.
- Ramírez, F., Kallarackal, J and Davenport, T. (2018). Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) reproductive physiology: A review. *Scientia Horticulturae* 238:163–176. Doi: 10.1016/j.scienta.2018.04.046
- Restrepo, P., Betancourt, M., Palacios, S., García, B., Tabaraes, A and Díaz, C. (2017). El cultivo de lulo “La Selva” en el departamento de Risaralda. Proyecto fortalecimiento del sector agropecuario y agroindustrial mediante la innovación ciencia y tecnología en el departamento de TRisaralda – UNISARC. Santa Rosa de Cabal, Colombia.
- Rosso, V. and Mercadante, A. (2007). Identification and Quantification of Carotenoids, By HPLC-PDA-MS/MS, from Amazonian Fruits. *J. Agric. Food Chem.* 55, 5062–5072
- Sun, Q., Na, Z., Wang, J., Cao, Y., Li, X., Zhang, H., ... Guo, Y. D. (2016). A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato. *Journal of Pineal Research*, 61, 138–153. Doi: 10.1111/jpi.12315

- Suárez, J., Pérez De Camacaro, M and Giménez, A. (2009). Efecto de la temperatura y estado de madurez sobre la calidad poscosecha de la fruta de guayaba (*Psidium guajava* L.) procedente de MERCABAR, estado Lara, Venezuela. *Revista UDO Agrícola* 9 (1): 60-69
- Severo, J., Tiecher, A., Pirrello, J., Regad, F., Latché, A., Pech, J., Bouzayen, M and Rombaldi, C. (2015). UV-C radiation modifies the ripening and accumulation of ethylene response factor (ERF) transcripts in tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 102: 9–16. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.02.001
- Shahbaz, H., Ahn, J., Akram, K., Kim, H., Park, E and Kwon, J. (2014). Chemical and sensory quality of fresh pomegranate fruits exposed to gamma radiation as quarantine treatment. *Food Chem.* 145, 312–318. Doi: 10.1016/j.foodchem.2013.08.052
- Schulz, M., Brugnerotto, P., Tischer, S., Gonzaga, L., Campelo, G and Oliveira, A. (2021). Aliphatic organic acids and sugars in seven edible ripening stages of juçara fruit (*Euterpe edulis* Martius). *Journal of Food Composition and Analysis* 95: 10368. Doi: 10.1016/j.jfca.2020.103683
- Shu, P., Min, D., Zhou, J., Ai, W., Li, J., Li, Z., Zhang, X., Shi, Z., Sun, Y., Li, F., Li, X. and Guo, Y., (2020). The synergism of 1-Methylcyclopropene and ethephon preserves quality of “Laiyang” pears with recovery of aroma formation after long-term cold storage. *Front. Plant Sci.* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00490>.
- Silser, E., Dupille, E., Serek, M and Gorenand, R. (2003). Compounds interacting with the ethylene receptor plants. Review article. *Plant Bio.* 473-480. Doi: 10.17660/ActaHortic.2001.553.32
- Suzuki, Y and Nagata, Y. (2019). Postharvest ethanol vapor treatment of tomato fruit stimulates gene expression of ethylene biosynthetic enzymes and ripening related transcription factors, although it suppresses ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 152, 118–126. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.03.006
- Tan, G., Ali, A and Siddiqui, Y. (2022). Current strategies, perspectives and challenges in management and control of postharvest diseases of papaya. *Scientia Horticulturae*. 301: 111139. Doi: 10.1016/j.scienta.2022.111139
- Tanga, N., Ana, J., Denga, W., Gaoa, Y., Chenb, Z and Li, Z. (2020). Metabolic and transcriptional regulatory mechanism associated with postharvest fruit ripening and senescence in cherry

- tomatoes. *Postharvest Biology and Technology* 168:111274. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111274>
- Tao, X., Wu, Q., Fu, X., Zhu, B., Chen, F., Liu, B., Mao, L., Luo, Z., Li, L and Ying, T. (2022). Understanding of exogenous auxin in regulating sucrose metabolism during postharvest tomato fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*. 189: 111913. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.111913
- Torales, A., Gutiérrez and Rodríguez, S. (2020). Influence of passive and active modified atmosphere packaging on yellowing and chlorophyll degrading enzymes activity in fresh-cut rocket leaves. *Food Packaging and Shelf Life* 26:100569. Doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100569
- Torres, P. (2020). Evaluación del comportamiento poscosecha de dos híbridos de naranjilla (*Solanum quitoense* L.) conservados a diferentes condiciones de almacenamiento. Tesis. Ingeniería Agronómica, Facultad De Ciencias Agrícolas, Universidad Central Del Ecuador. Quito, Ecuador.
- USDA. (2005). Beneficios de la irradiación radiación gamma. Recuperado el 15 de julio de 2022, de <http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/Beneficios.pdf>
- Vargas, J and Rendón, S. (2015). Inteligencia de mercados para la cadena del lulo (*Solanum quitoense*). *Jurnal of Agriculture and Animal Science*. 3(2): 38-47
- Vasco, C., Ruales, J And Kamal-Eldin, A. (2008). Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. *Vasco, C Ruales, J. Kamal-Eldin A* 111, 816–823. 10.1016/j.foodchem.2008.04.054.
- Villalobos, M.D.C., Serradilla, M.J., Martín, A., Ruiz-Moyano, S., Pereira, C., Córdoba, M. (2016). Synergism of defatted soybean meal extract and modified atmosphere packaging to preserve the quality of figs (*Ficus carica* L.). *Postharvest Biol. Technol.* 111, 264–273. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.09.025.
- Wang, W., Yu, J., Du, M., Wang, J and Hu, D. (2022). Basic helix-loop-helix (bHLH) transcription factor MdbHLH3 negatively affects the storage performance of postharvest apple fruit. *Horticultural Plant Journal*, 8 (6): 1-13. Doi: 10.1016/j.hpj.2022.08.005

- Wood, R., Thewes, F., Reynaud, M., Kitemann, D., Sautter, C., Wünsche, J and Neuwald, D. (2022). Apple fruit recovery from anoxia under controlled atmosphere storage. *Food Chemistry*. 371:131152. Doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131152
- Whalen Md, Costich De and Heiser Cb. (1981). Taxonomy of *Solanum* section *lasiocarpa*. *Gentes Herbarium* 12(2):41-129.
- Yan, R., Yokotani, N., Yamaok, T., Ushijim, K., Nakano, R., Yano, K., Aoki, K and Kubo, Y. (2013). Characterization of ripening-associated genes using a tomato DNA microarray, 1-methylcyclopropene, and ripening-impaired mutants. *Postharvest Biology and Technology*. 86:159–170. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.06.028
- Yang, Z., Cao, S., Su, X. and Jian, Y. (2014). Respiratory activity and mitochondrial membrane associated with fruit senescence in postharvest peaches in response to UV-C treatment. *Food Chemistry*. 161:16-21. Doi: 10.1016 / j.foodchem.2014.03.120
- Zhai, R., Liu, J., Liu, F., Zhao, Y., Liu, L., Fang, C., Wang, H., Li, X., Wang, Z., Ma, F and Xu, L. (2018). Melatonin limited ethylene production, softening and reduced physiology disorder in pear (*Pyrus communis* L.) fruit during senescence. *Postharvest Biology and Technology*. 139: 38–46. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.01.017
- Zhang, W and Jiang, W. (2019). UV treatment improved the quality of postharvest fruits and vegetables by inducing resistance. *Trends in Food Science & Technology*. 92: 71–80. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.012>
- Zhang, W., Zhaos, S., Zhang, L., Xing, Y and Ji, W. (2020). Changes in the cell wall during fruit development and ripening in *Fragaria vesca*. *Plant Physiology and Biochemistry* 154: 54-65. Doi: 10.1016/j.plaphy.2020.05.028
- Zhang, W., Cao, J., Fan, X and Jiang, W. (2020). Applications of nitric oxide and melatonin in improving postharvest fruit quality and the separate and crosstalk biochemical mechanisms. *Trends in Food Science & Technology* 99. 531–541. Doi: 10.1016/j.tifs.2020.03.024
- Zhao, K., Song, H., Wang, Z., Xing, Z., Tian, X., Wang, Q., Meng, L and Xu, X. (2022). Knockdown Of Sly-Mir164a By Short Tandem Target Mimic (Sttm) Enhanced Postharvest Chilling Tolerance Of Tomato Fruit Under Low Temperature Storage. *Postharvest Biology and Technology* 187.111872. Doi: 10.1016/J.Postharvbio.2022.111872

2. Efecto de la temperatura de refrigeración en el almacenamiento poscosecha de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam)

2.1 Resumen

El lulo es un fruto tropical considerado promisorio con características organolépticas y de impacto positivo para la salud del consumidor ya sea en consumo fresco o procesado. Dada su perecibilidad inherente a su proceso de maduración es necesario la implementación de tecnologías poscosecha que permitan la conservación de las características de calidad para el consumo nacional o de exportación. El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de las características fisicoquímicas y propiedades de calidad del fruto de lulo sometido a diferentes temperaturas de refrigeración. Se recolectaron frutos de lulo cv Casilla con un grado de madurez 3 de un cultivo comercial en el municipio de Ramiriquí- Boyacá. El mismo día de la cosecha los frutos fueron llevados al laboratorio de Calidad y Poscosecha en donde fueron separados en tres grupos de acuerdo a las temperaturas de almacenamiento a evaluar 5°C, 8°C y 18°C. Los frutos permanecieron durante 32 días en condiciones de almacenamiento y 8 días de anaquel. Los resultados mostraron que no se presentaron diferencias importantes en las características de calidad en los frutos almacenados a 5°C y 8°C, sin embargo, el proceso de maduración y senescencia fue más lento que en los frutos almacenados a 18°C.

2.2 Introducción

El lulo es un fruto andino catalogado dentro de los frutos climatéricos cuya tasa de respiración es relativamente baja, aún durante el pico climatérico (Acosta et al., 2009). El fruto tiene una forma redonda-ovalada, el cual, internamente se encuentra dividido por membranas en cuatro compartimentos en donde se encuentra la pulpa de color verde-amarillento, con un sabor ligeramente ácido (Riera y Gómez 2019). El lulo se caracteriza por tener propiedades antioxidantes, carotenoides y compuestos fenólicos lo cual sumado a sus características organolépticas como sabor y aroma lo convierte en un producto de interés dado su potencial nutricional e industrial (Andrade-Cuvi et al., 2015).

Sin embargo, debido a su condición de fruto climatérico, las pérdidas de lulo durante la fase poscosecha pueden alcanzar hasta el 50% del total de la producción (Forero et al., 2014). Usualmente, se recomienda almacenar la mayoría de los productos hortofrutícolas a baja temperatura para incrementar la vida útil y retardar la pérdida de la calidad nutricional. Por lo tanto, el almacenamiento del fruto a bajas temperaturas en el menor tiempo posible luego de la cosecha juega un papel esencial, dado que dicha condición tiene un mayor efecto en la disminución de los procesos metabólicos como la respiración y la maduración, fisiológicos y patológicos que determinan la calidad del producto (Inestroza-Lizardo et al., 2016). Forero et al. (2014), por ejemplo, combinó el almacenamiento a bajas temperaturas junto con hojas de plátano como un empaque poco convencional, lo cual disminuyó en un rango de 6,4 % a 4,6 % la pérdida de peso y una prolongación en el tiempo para el cambio de color en el fruto. Pese a los beneficios que presenta esta técnica de conservación, algunos productos son sensibles a bajas temperaturas, y en consecuencia son propensos a daños por frío, lo cual genera una alteración en las membranas celulares que desencadena la difusión de solutos y un aumento de la permeabilidad tisular, estas disfunciones celulares se conocen como daños por frío (Babellahi et al., 2020; Concellón et al., 2005).

Son escasos los reportes sobre el efecto de la temperatura de almacenamiento en la poscosecha del fruto de lulo, sin embargo, Torres (2020) evaluó la conservación de dos híbridos de lulo a 3°C y 7°C, en donde se presentaron daños por frío a la temperatura más baja, lo cual aunado al daño por patógenos, afectó de forma irreversible la calidad de los frutos de lulo. Por su parte, Casierra-Posada (2004) utilizó temperaturas de 13°C para evaluar el comportamiento de frutos de lulo en diferentes estados de madurez y encontró que la temperatura de almacenamiento presenta menor efecto en los frutos cosechados en estados de madurez avanzados, lo cual puede atribuirse al rango de temperatura.

De acuerdo con lo anterior, en este capítulo se planteó evaluar el comportamiento de las características fisicoquímicas y propiedades de calidad del fruto de lulo sometido a diferentes temperaturas de refrigeración, para mejorar el proceso de conservación de esta especie.

2.3 Materiales y métodos

Material vegetal

Se recolectaron frutos de lulo cv. Castilla en un cultivo comercial de un año y medio de edad en el municipio de Ramiriquí Boyacá, vereda Poteros, finca la Loma, ubicado a 2325 m.s.n.m, latitud 5°24'53.8"N longitud 73°20'04.8"W. Su precipitación promedio anual es de 1135 mm, la temperatura oscila entre los 8 °C (mínima) y 20 °C (máxima) y humedad relativa media de 85%. Los

frutos fueron cosechados de acuerdo a lo descrito por Mejía et al. (2012), es decir, en un grado de madurez 3, 75 % naranja y 25 % verde, libres de daños mecánicos y sin afectaciones por patógenos o insectos de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-5093.

Ensayos de refrigeración

Se utilizó un diseño completo al azar, conformado por 3 tratamientos y 5 repeticiones. Los tratamientos correspondieron a tres temperaturas de almacenamiento, 5°C, 8°C y 18°C, a una humedad relativa (HR) del 90%. Cada repetición estuvo configurada por 6 frutos, para un total de 90 frutos evaluados. Se realizó un proceso de desinfección de los frutos una solución de hipoclorito al 1%. Para esto se diluyó 1ml de hipoclorito en 1L de agua y los frutos fueron sumergidos durante 3 minutos, posteriormente fueron secados con toallas de papel para retirar los excesos de la solución. Los frutos fueron dispuestos en bandejas de poliestireno expandido de acuerdo a los tratamientos, y luego de 30 días de almacenamiento refrigerado fueron dejados al 18°C durante 8 días como periodo de anaquel.

Las mediciones poscosecha se realizaron con intervalos de 3 días para las variables no destructivas y de 8 días para las variables destructivas de la siguiente forma: la tasa respiratoria: aproximadamente 400g de frutos fueron puestos en una cámara hermética de 2 L, en la cámara fue ubicado un sensor infrarrojo de CO₂, el cual se conectó a un equipo de captura de datos marca Vernier con interfaz Labquest 2® (Vernier Software & Technology, Beaverton, USA). Cada 4 segundos y durante 5 minutos se registraron los valores de CO₂, con estos valores se calculó la pendiente, que correspondió a la tasa respiratoria, se tuvo en cuenta el peso de los frutos y el volumen de la cámara para convertir los datos a mg de CO₂ kg⁻¹ h⁻¹. El color se midió a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, colorímetro digital Minolta CR 410 (marca Konica Minolta, Hong Kong), con estos datos se calculó el índice de color mediante la ecuación 1. La firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un Texturómetro digital marca Lloyd LS1 con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus; Pérdida de peso (%): a una muestra de aproximadamente 400 g de frutos se le realizó medición de la masa fresca en balanza de precisión con aproximación de 0,001g y se calculó el porcentaje de pérdida de peso utilizando la fórmula 2.

$$IC = ((1000 \times a^*) / (L^* \times b^*)) \quad (1)$$

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \left(\frac{(P1 - P2)}{P1} \times 100 \right) \quad (2)$$

Sólidos solubles totales (SST): se utilizó un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix para las mediciones de grados Brix. Para la determinación de la acidez total titulable (ATT) se empleó un titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza); la relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT. La concentración de etileno se determinó a través de una muestra de 450 ± 50 g de frutos de lulo almacenados en cada condición, se colocó en un recipiente de plástico hermético de 2L durante todo el ensayo y se tomó la muestra de gas con una jeringa de 1cm³ de capacidad a través de la septa en la parte superior del recipiente y se inyectó en un cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA), equipado con un detector de ionización de llama (FID, por sus siglas en inglés) y una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm). El contenido de azúcares reductores y ácidos orgánicos se determinó a través del método de extracción individual para HPLC. Las suspensiones de lulo (20g) se diluyeron con 30mL de agua tipo I para análisis individuales de azúcares (Glucosa, sacarosa, fructuosa) y ácidos orgánicos (ácido ascórbico), respectivamente. El homogenizado se centrifugó a 3500 rpm durante 35 min. Los sobrenadantes se pasaron a través de Cartuchos C-18 SPE de fase invertida (Sep-Pak C18 35 cc Vac Cartridge, 10 g Sorbent per Cartridge, 55 - 105 µm, 10/pk) y se filtraron a través de filtros de membrana de 0,22µm. Los análisis se llevaron a cabo utilizando un sistema de HPLC Ultimate 3000 Thermo Scientific equipado con un sistema de procesamiento de datos Chromeleon 7.2, inyector automático con loop de 20 µL, una bomba cuaternaria, un detector UV de onda variable (Thermo scientific DAD) y un detector de IR (Thermo Scientific, RefractoMax 521). Índice de deterioro: Se evaluaron visualmente los parámetros de zonas blandas, decaimiento (desarrollo de hongos) y manchas superficiales después de transferirlos desde la temperatura de almacenamiento hasta la temperatura ambiente (18°C). Se utilizó una escala subjetiva de 1 a 5 descrita por Montenegro (2015), donde: 5 = sin daño; 4 = daño ligero; 3: daño moderado; 2 =0 daño severo; 1= daño extremo.

Los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y homogeneidad (test de Levene), luego se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0,05$). Cuando solo se compararon dos temperaturas, el análisis se realizó con la prueba t-Student ($P \leq 0,05$). El análisis se hizo mediante el software estadístico SPSS v. 21.

2.4 Resultados y discusión

Fase de almacenamiento

Intensidad respiratoria: en los frutos almacenados a 18°C la intensidad respiratoria presentó un incremento desde el inicio del almacenamiento hasta la senescencia de los frutos a los 24 dda (días de almacenamiento). Por el contrario, los frutos almacenados a 5°C y 8°C presentaron significativamente menor tasa respiratoria hasta los 30 dda (Figura 2-1). Dado que el objetivo de las bajas temperaturas es disminuir la tasa respiratoria y el calor de respiración, reducir la producción de etileno y minimizar la pérdida de agua (Kader, 2013), puede comprenderse el comportamiento de la tasa respiratoria de los frutos, así como su similitud con lo encontrado por Forero et al. (2014), quienes almacenaron frutos de lulo envueltos en hojas de plátano a 7.5°C y cuya intensidad respiratoria fue inferior a los conservados a temperatura ambiente. Según Araújo et al. (2017) y Pareek (2016), las bajas temperaturas son cada vez más empleadas en la conservación de productos hortofrutícolas, debido a que, ralentiza la tasa respiratoria y disminuye la actividad enzimática, en consecuencia, reduce el deterioro de algunos rasgos organolépticos. Estudios realizados por Nkolisa et al. (2018), en tomate mostraron una reducción de la tasa respiratoria como consecuencia del uso de bajas temperaturas, lo cual permitió incrementar la vida útil de los frutos y coincide con los resultados en frutos de lulo.

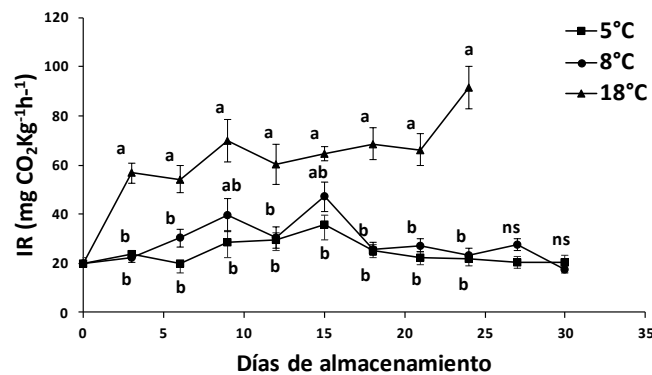


Figura 2-1 Intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$).

Tasa de producción de etileno: La tasa de producción de etileno fue mayor en los frutos almacenados a 5°C durante todo el periodo de evaluación (Figura 2-2). Se observaron diferencias

significativas a los 6dda ($0,01 \pm 0,001 \mu\text{Lkg}^{-1}\text{día}^{-1}$), 12dda ($0,01 \pm 0,001\mu\text{Lkg}^{-1}\text{día}^{-1}$) y 18 dda ($0,01 \pm 0,0027\mu\text{Lkg}^{-1}\text{día}^{-1}$), en donde se presentó un incremento en la concentración de etileno en todos los tratamientos. Los resultados fueron similares a los reportados en aguacate en donde la velocidad de producción de etileno se incrementó a partir de los 14 días (Herrera-González et al., 2017). Por el contrario, en frutos de tomate almacenados a temperatura ambiente, 7 y 9°C, se presentaron los valores en la concentración de etileno más bajos que los conservados a temperatura ambiente (Ramírez et al., 2004). La capacidad el almacenamiento de los productos hortofrutícolas se encuentra afectada por la producción o inhibición del etileno y los cambios en la expresión génica que esto implica, lo cual tiene un impacto directo en los procesos de maduración (Tilahun et al., 2020). Se han reportado casos en los que las bajas temperaturas de almacenamiento pueden inducir la biosíntesis del etileno. En peras 'Passe-Crassane', por ejemplo, la producción endógena de etileno como respuesta a la refrigeración permitió el incremento de ACC y la actividad de la ACC oxidasa y, en menor medida, con la actividad de la ACC sintasa (Chiriboga et al., 2013). Por su parte, en frutos de tomate (Mata et al., 2019), mencionan que la expresión del gen de factor de respuesta al etileno ERF2 inducida por la refrigeración, incrementó la producción de etileno, así como, aumentó la tolerancia a la congelación y redujo la fuga de electrolitos.

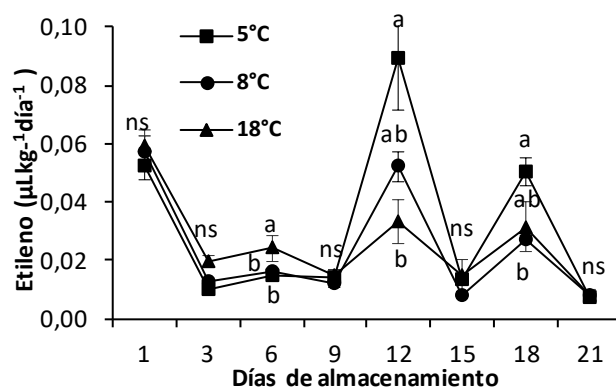


Figura 2-2 Tasa de producción de etileno de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$).

Índice de color de la epidermis: en general el IC para todos los tratamientos no presentó variaciones importantes durante el almacenamiento. Se presentaron diferencias significativas entre todos los tratamientos del día 9 al día 24 de almacenamiento. La mejor temperatura fue de 5°C al mantener durante un mayor periodo de tiempo la coloración verde en los frutos de lulo. Los valores de IC

pasaron de 7,96 para los todos los frutos evaluados a 10,9 a los 24 dda para los frutos almacenados a 18°C y de 8,8 y 9,9 a los 44 dda para los frutos conservados 5°C y 8°C respectivamente (Figura 2-3). Los valores promedio de L*: 55,53; a*: 27,36 y b*: 57,15 a 5°C, L*:57,02; a*: 29,04 y b*: 54,89 a 8°C y L: 59,43; a*: 33,91 y b*: 58,41 a 18°C. Los resultados obtenidos en los frutos de lulo fueron similares a los obtenidos en frutos de uchuva almacenados a 4°C y 12°, en donde, a pesar de la diferencia de temperatura de almacenamiento las los cambios en los parámetros de color fueron mínimos. El comportamiento de los valores de L* a* y b* está asociado con la estabilización de los procesos metabólicos luego del estrés que se genera en el fruto al ser almacenado a bajas temperaturas, las cuales también afectan el índice de madurez (Velásquez-Barreto et al., 2022), lo cual también fue observado en los frutos de lulo. De acuerdo con Gómez-Merino et al. (2014), el fruto de lulo debe ser cosechado cuando éste alcanza un 75% de su madurez, esto es, cuando su epicarpio presenta una tonalidad del 75% amarillo y 25% verde (Casierra-Posada, 2004), parámetro que se cumplió al seleccionar los frutos para el establecimiento del ensayo, lo cual puede explicar el leve cambio del IC en todos los tratamientos.

La variación en el color del fruto de lulo es causada por la por la acción de varias encimas dentro del proceso catabólico a través del cual se produce la degradación de la clorofila, dando como resultado una reducción en la concentración del pigmento, lo permite el desenmascaramiento de otros pigmentos como los carotenoides (Ulloa-Gómez et al., 2021), que en el caso del lulo el 13- cis - β -caroteno, 9- cis - β -caroteno, all- trans - β -caroteno y la luteína son prevalentes, dando paso a coloraciones naranjas y amarillas (Salinas et al. 2010; Ramírez et al., 2018). En la mayoría de los casos, las bajas temperaturas retardan la acumulación de carotenoides al disminuir el porcentaje de degradación de la clorofila (Xia et al., 2020) y, en consecuencia, la expresión del color amarillo-naranja típico de maduración del fruto se hace de forma más pausada. Lo anterior puede explicar el comportamiento del IC de los frutos de lulo, en donde los frutos almacenados a 5°C conservaron la coloración verdosa hasta por 5 días más que los frutos conservados a 18°C. Resultados similares se han reportado en frutos de tomate negro (Park et al., 2018), kiwi (Xia et al., 2020) y pomelo rojo (Lado et al., 2019), en donde su almacenamiento por debajo de los 8 °C redujo la acumulación de carotenoides y evitó el cambio natural de color.

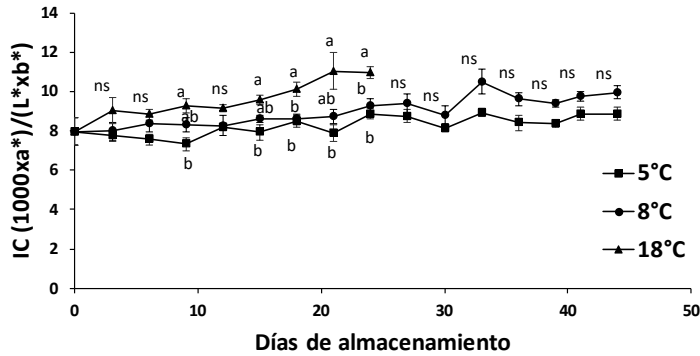


Figura 2-3 Índice de color de la epidermis de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$).

Pérdida de peso: Se registró un aumento continuo de la pérdida de peso de los frutos de lulo. Se presentaron diferencias significativas únicamente a los 21 dda, momento en que los frutos almacenados a temperatura ambiente alcanzaron una pérdida de peso del 10,23 % y culminaron su vida útil. Por su parte, los frutos almacenados a 5 °C y 8 °C llegaron al 12,64 % y 15,12 % respectivamente, al final del almacenamiento (Figura 2-4). La temperatura es un factor que afecta directamente la pérdida de peso en los frutos, dado que regula la transpiración de los tejidos (Cheng et al., 2021). Dicha pérdida de agua es la causa principal de la disminución del peso del fruto durante la poscosecha y acelera los cambios durante la maduración y la senescencia, lo cual reduce la vida útil del producto (Balaguera-López y Palacio, 2018). En consecuencia, en condiciones de almacenamiento a bajas temperaturas, la pérdida de agua es reducida, lo que se traduce en una menor pérdida de peso y alteración de las características de calidad, como se observa en los resultados. En frutos de tomate, *Lycopersicon esculentum* Mill. Cv. Clermon (Javanmardi y Kubota, 2006), berenjena, *Solanum melongena* L. cv. Lucía (Concellón et al., 2012) y uchuva, *Physalis peruviana* L. (Olivares-Tenorio et al., 2017) la refrigeración a baja temperatura también contribuyó a la disminución de la pérdida de peso durante el almacenamiento.

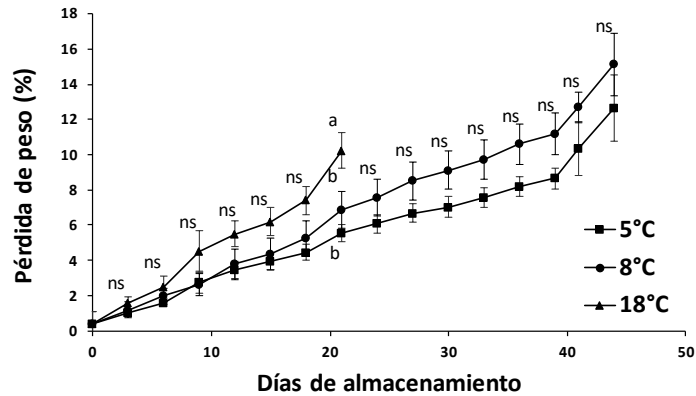


Figura 2-4 Porcentaje de pérdida de peso de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Firmeza: se observó una reducción continua en la firmeza de los frutos durante el almacenamiento. Se presentaron diferencias significativas en todos los puntos de muestreo. Los frutos con mayor pérdida de firmeza fueron aquellos almacenados a 18°C, pasando de $50,28 \pm 2,26$ N a $11,64 \pm 0,66$ N. Los frutos de lulo almacenados a 5°C presentaron la menor pérdida de firmeza al lograr un valor final de $23,09 \pm 1,13$ N (Figura 2-5). Durante el almacenamiento a bajas temperaturas, la pérdida de firmeza y la pérdida de agua de los frutos disminuyen, lo que favorece la alteración de la textura del fruto y el deterioro de su calidad (Strano et al., 2021). En frutos de lulo al hacer parte del grupo de los frutos climatéricos, el proceso de maduración luego de la cosecha puede incidir en la reducción de la firmeza, al producirse una mayor actividad de desdoblamiento de almidones en azúcares, lo que ocasiona un debilitamiento de las paredes celulares de los tejidos del epicarpio y del mesocarpio del fruto (Ospina et al., 2007). Según Ochoa-Vargas (2016), el fruto de lulo hace parte del grupo de frutos que se caracterizan por su rápido ablandamiento, dada la velocidad con la cual pierde su firmeza. Como en todo fruto la pérdida de firmeza es ocasionada por el cambio metabólico de los carbohidratos de la pared celular lo cual altera su composición estructural, dada la reducción de la pectina soluble y el desmontaje de las estructuras de la pared celular primaria y lamela media (Chen et al., 2015).

Diversos estudios han demostrado que el ablandamiento de los frutos es el resultado de la acción de enzimas que degradan la pared celular la poligalacturonasa (PG), la pectato liasa (PL), la pectina metil esterasa (PE), la celulasa (Cx), la β -galactosidasa (β -Gal), xilosidasa y la desintegración y

despolimerización de proteínas de la pared celular no enzimáticas (Johnston, 2015; Tucker et al., 2017; Zhou et al., 2021). De igual forma, se han identificado genes clave que codifican enzimas que degradan la pared celular para tomate, fresa, melocotón, manzana y cereza dulce (Uluisik, S., 2016 ; Paniagua et al., 2015 ; Gwanpu et al., 2016). Sin embargo, las bajas temperaturas de almacenamiento pueden anular la despolimerización y la degradación de la celulosa y la hemicelulosa, al reducir la actividad de las enzimas encargadas la degradación de la pared celular, dando como resultado un retardo en el ablandamiento del fruto (Chen et al 2015), como se ve en los resultados, en donde los frutos de lulo almacenados a 5 °C presentaron una mayor firmeza que aquellos refrigerados a 8 °C y los conservados a 18 °C.

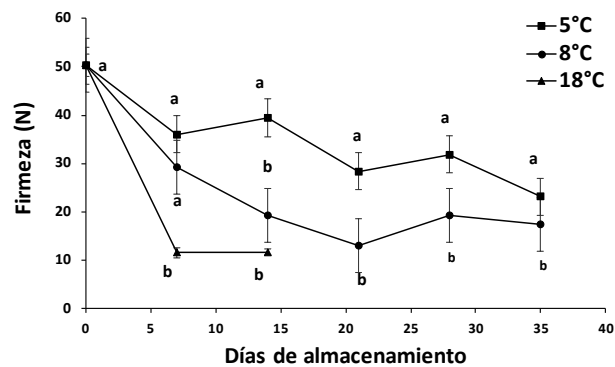


Figura 2-5 Porcentaje de pérdida de firmeza de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Sólidos solubles totales: No se presentaron variaciones relevantes en la concentración de sólidos solubles totales para ningún tratamiento. El valor máximo registrado fue de 9,2°Brix, tanto en los frutos almacenados a 5°C como en los almacenados a 8°C (Figura 2-6), lo cual concuerda con lo encontrado por Forero et al. (2014) en donde los valores de SST alcanzaron un máximo de 9,3 % en frutos almacenados a 7,5 °C. La concentración de azúcares normalmente se incrementa a medida que el fruto sigue su proceso natural de maduración, debido a la hidrólisis de carbohidratos poliméricos como el almidón o a la conversión a partir de ácidos orgánicos (Montenegro, 2015), proceso conocido como gluconeogénesis. Casierra-Posada et al. (2004), reportaron que, durante la maduración, en los frutos de lulo la concentración de SST puede oscilar entre 8% y 10%. Si bien es cierto que las bajas temperaturas influyen en la disminución de la intensidad del proceso respiratorio del fruto, lo cual tiene un impacto en la concentración de azúcares, el grado de madurez en el cual se cosecha el fruto es uno de los parámetros que puede generar variación en la concentración de SST

(Casierra-Posada et al., 2004). Cabe mencionar, que la recolección de frutos de lulo debe realizarse en estado de maduración 3, cuando estos presentan un valor no muy alejado de los 10°Brix (Ramírez et al., 2018), en nuestro caso, los frutos presentaron un valor de 8,6% al momento de la cosecha, lo cual puede explicar la poca variación en la concentración de SST durante la refrigeración. Resultados similares se encontraron en frutos de lulo variedad INAP en donde la variación en la concentración de sólidos solubles fue mínima, alcanzando un máximo de 8,01 % (Andrade-Curvi, 2018).

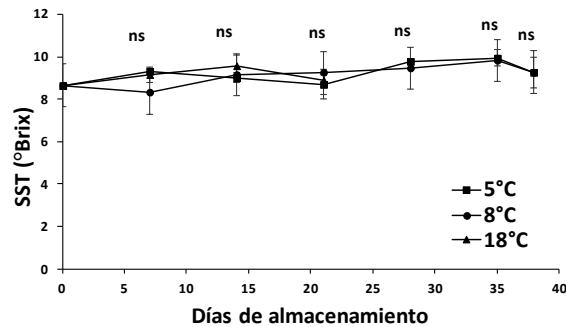


Figura 2-6 Sólidos solubles totales de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4)

Acidez total titulable: La acidez presentó un descenso continuo en los frutos almacenados a 18°C. Para los frutos almacenados a 5°C y 8°C se presentó un leve ascenso en la concentración de la acidez hacia el día 21 dda y, finalmente, alcanzaron valores de 3,36 % y 3,15 % respectivamente (Figura 2-7). De acuerdo con Kays (2004), la acidez disminuye a medida que los frutos aumentan su nivel de madurez. Al considerar que, la acidez de los frutos disminuyó pese a que la refrigeración redujo la tasa respiratoria en los frutos de lulo (Figura 3-1), dicha disminución de la acidez puede relacionarse con una reducida actividad de las deshidrogenasas, un uso limitado de los ácidos orgánicos como sustratos para la respiración en la síntesis de nuevos componentes durante la maduración y posible la disminución del proceso de gluconeogénesis (Al-Dairi et al., 2021; Wang et al., 2021). La producción, concentración y tipo de ácido orgánico varía dependiendo de la especie y la variedad dentro de la misma, así como el grado de maduración y condiciones de almacenamiento (Famiani et al., 2015). Los ácidos orgánicos son intermediarios en el ciclo del ácido tricarbóxico (TCA), donde algunas de las enzimas implicadas en el proceso son el fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC, EC 4.1.1.31), citrato sintasa (CS, EC 4.1.3.7), aconitasa (ACO, EC 4.2.1.3), isocitrato deshidrogenasa

(IDH, EC 4.1.1.41), malato deshidrogenasa (MDH, EC 1.1.1.37), y enzima málica (ME, EC 1.1.1.40) (Wu et al., 2020).

De acuerdo con Ferreira et al., (2020), durante el período de maduración y almacenamiento, la acidez de los frutos disminuye por el uso de los ácidos como sustrato para respiración o convirtiéndose en azúcares, el almacenamiento en frío puede no interferir del todo en la reducción de la acidez como insumo para la respiración, lo cual puede explicar porque los frutos de lulo almacenados a 5°C alcanzaron el mismo valor de porcentaje de acidez que aquellos almacenados a 18°C. En frutos de manzana, por ejemplo, la variación en los niveles de acidez está controlada principalmente por el gen *Ma* cuyo alelo *Ma* es responsable una alta concentración de acidez y el alelo *ma* reduce la concentración de ácido málico en el fruto (Xu et al., 2012), y en condiciones de almacenamiento, la concentración de ácido málico es más baja que en la cosecha (Róth et al., 2007). También se ha encontrado que en frutos de kiwi una ligera reducción del contenido de ácidos cítrico y málico durante el almacenamiento a 0-0,5°C y humedad relativa > 90 % (Famiani et al., 2015).

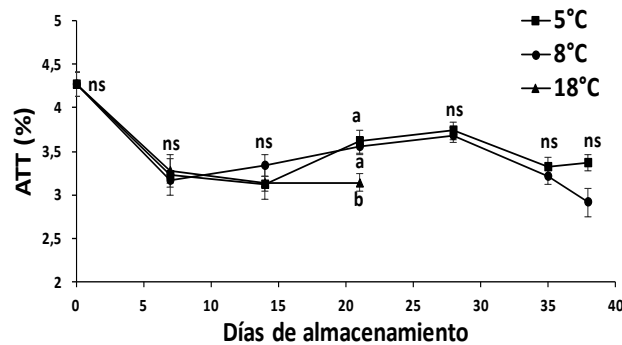


Figura 2-7 Acidez total titulable de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4)

Relación de madurez: En los frutos de lulo la relación de madurez ($RM = SST/ATT$) en comparación con los SST, los cuales se mantuvieron casi que constantes a lo largo de la refrigeración, con un valor final de 9,2°Brix (Figura 2-8). RM mostró valores finales (2,7 y 3,4) para los frutos almacenados a 5°C y 8°C, los cuales se asemejan a los obtenidos en la acidez (3,36% y 3,15%) (Figura 3-7), es decir, se percibió un incremento hacia los 14 dda, luego un descenso a los 21 dda y finalmente un incremento hacia el final del almacenamiento (Figura 3-8). La relación de madurez es un indicador de la calidad organoléptica de los frutos, por tanto, al ser un fruto climatérico, cuando se presenta un aumento de la RM se presume que se ha alcanzado la máxima tasa respiratoria y, en

consecuencia, los ácidos orgánicos han sido utilizados como sustrato como respuesta al incremento en el metabolismo y en consecuencia la RM aumenta, como se presentó en frutos de cuque (*Solanum vestissimum* Dunal) en donde la RM se incrementó a medida que el fruto maduró (Fonseca et al., 2012). Un nivel alto de SST y un ATT baja aumentan la RM se asocia con el buen sabor del producto. En frutos de tomate la RM se vio muy afectada por la temperatura de almacenamiento, en donde los frutos almacenados a 22°C tuvieron una RM de 13,67 frente a los almacenados a 10°C con 10,95 (Al-Dairi et al., 2021).

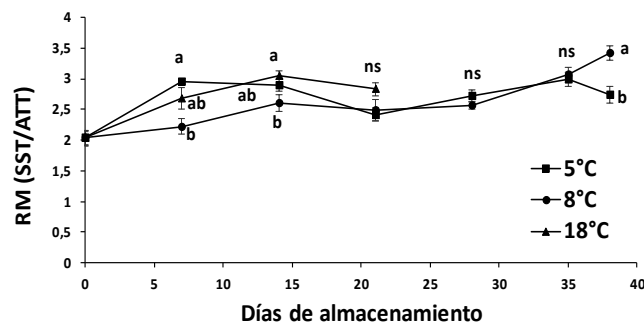


Figura 2-8 Relación de madurez de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Azúcares y ácidos orgánicos: Los tres azúcares solubles principales son sacarosa, glucosa y fructosa, de los cuales la sacarosa fue el azúcar predominante en los frutos de lulo. En cuanto a los ácidos orgánicos, el ácido ascórbico (vitamina C) es un metabolito de interés para los consumidores dado que, actúa como antioxidante en condiciones de estrés (Tsaniklidis et al., 2014). Durante el almacenamiento, se presentaron diferencias significativas en la concentración de ácido ascórbico, en los frutos almacenados a 5°C y 8°C en el día uno, presentaron el valor más alto correspondiente a 0,035 mg·100 g⁻¹ de fruto. De igual forma, se presentaron diferencias significativas para todos los azúcares en donde la mayor concentración de sacarosa: 25,09 mg·100 g⁻¹ de fruto, glucosa: 4,08 mg·100 g⁻¹ de fruto y fructosa: 15,03 mg·100 g⁻¹ de fruto se observó en los frutos almacenados a 8°C (Tabla 3-1). De acuerdo con (Zhou et al., 2022) durante el proceso de maduración se presenta la hidrólisis de sacarosa en glucosa y fructosa para luego dar paso a la ruta de la glucólisis, lo que genera una gran cantidad de energía y la producción de metabolitos intermedios requeridos para formación de ácidos grasos, sabores y pigmentos. (Zhou et al., 2021) describe que en condiciones de almacenamiento en frío la sacarosa actúa como un osmorregulador mitigando los daños causados

por el estrés térmico, en nuestro caso la mayor síntesis de sacarosa se presentó en los frutos almacenados a 8°C. En cuanto al ácido ascórbico, se presentó un descenso durante el almacenamiento para todos los tratamientos. Al respecto, Novoa et al. (2006), mencionan que la reducción del contenido del ácido puede deberse a la oxidación del mismo por enzimas oxidasas y como resultado luego de la cosecha la concentración de vitaminas puede presentar una reducción acelerada, lo cual puede explicar el comportamiento del ácido ascórbico en los frutos de lulo. Los resultados obtenidos están muy por debajo de lo reportado por González et al. (2013), en donde registraron un contenido de ácido ascórbico de 11.95 mg ácido ascórbico*100 g de pulpa almacenados a 18°C.

Tabla 2-1 Concentración de sacarosa, glucosa, fructosa y ácido ascórbico en frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas

Parámetro (mg·100 g ⁻¹ de fruto)	Fase	Día de medición	Tratamiento			
			5°C	8°C	18°C	
Ac. Ascórbico	Almacenamiento	1	0,035 a	0,035 a	0,029 b	
		7	0,016 a	0,017 a	0,018 a	
		14	0,015 a	0,016 a	0,012 a	
		21	0,012 a	0,016 a	0,010 a	
		28	0,017 a	0,013 a	-	
		35	0,018 a	0,015 a	-	
	Anaquel	1	0,014 a	0,012 a	-	
		8	0,016 a	0,014 a	-	
	Sacarosa	Almacenamiento	1	18,51 a	23,14 a	22,62 a
			7	18,90 a	20,24 a	13,47 b
14			15,37 b	25,09 a	12,60 b	
21			19,95 b	24,86 a	0,46 c	
28			18,95 a	18,00 a	-	
35			17,69 a	18,32 a	-	
Anaquel		1	17,21 a	22,20 a	-	
		8	17,33 a	22,9 a	-	
Glucosa		Almacenamiento	1	7,23 a	7,86 a	6,15 a
			7	1,91 b	4,08 a	1,89 b
	14		2,11 a	2,56 a	1,35 b	
	21		2,11 a	1,52 b	2,47 a	
	28		2,51 a	0,48 b	-	
	35		0,71 a	0,06 b	-	
	Anaquel	1	0,75 a	0,35 a	-	
		8	0,79 a	0,38 a	-	
	Fructosa	Almacenamiento	1	8,48 b	15,03 a	12,90 ab
			7	5,14 b	9,14 a	5,13 b
14			5,21 a	7,31 a	6,71 a	
21			7,62 a	5,96 a	0,98 b	
28			5,72 a	7,16 a	-	
35			5,93 a	4,83 a	-	

Anaquele	1	6,01 a	4,65 a	-
	8	6,12 a	4,71 a	-

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

pH: El pH tuvo un comportamiento descendente leve en los primeros días de evaluación, el cual presento un incremento notable a los 21 dda para los frutos almacenados a 18°C (pH:4,03) y a los 38 dda para los frutos de lulo almacenados a 8°C (pH: 4,24) (Figura 3-9). De acuerdo con Mejía et al. (2012), el pH en los frutos puede presentar un incremento durante la maduración organoléptica y la senescencia, como resultado del incremento en el contenido de aminoácidos libres, debido a la degradación enzimática de proteínas y otras estructuras poliméricas en el fruto. González et al. (2016), mencionan, que durante la refrigeración los frutos continúan su proceso de maduración y en consecuencia el pH aumenta debido a la disminución de los ácidos orgánicos, como resultado de los procesos metabólicos del fruto. Al observar nuevamente el comportamiento de la acidez (Figura 2-5), el pH es completamente inverso y, por lo tanto, es posible una menor concentración de ácidos durante el almacenamiento como sustratos respiratorios (Saltveit, 2019). De igual forma, es bien sabido que los iones de hidrógeno contribuyen a la degradación de las clorofilas por acción de las clorofilasas (Álvarez-Herrera et al., 2021), lo cual está correlacionado con el leve de color de la epidermis de los frutos de lulo (Figura 2-3). Los resultados son similares a los reportados por (Andrade-Curvi et al., 2018) en frutos de lulo, en donde no se encontraron diferencias significativas entre los muestreos.

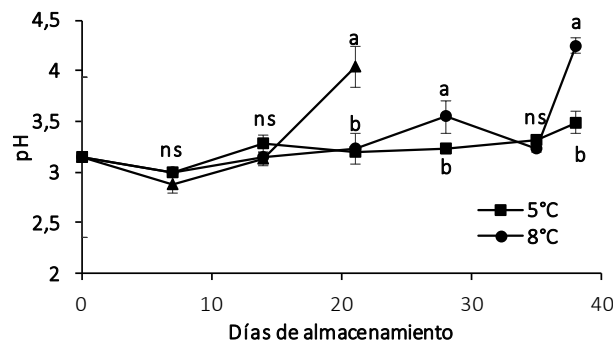


Figura 2-9 pH de frutos de lulo almacenados a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4)

Fase de anaquel

Tasa respiratoria: No se presentaron diferencias significativas entre las temperaturas en esta fase. Durante los primeros 6 días se observó un aumento de la tasa respiratoria en todos los tratamientos durante el periodo de anaquel. Además, la tasa respiratoria fue superior en el periodo previo al anaquel (30 dda) (Figura 2-10). Esto confirma el efecto de la refrigeración sobre el proceso respiratorio en el fruto de lulo, luego de la cosecha. Al final del periodo de refrigeración los frutos almacenados a 5°C alcanzaron una intensidad respiratoria de 20,4525 mg CO₂Kg⁻¹h⁻¹ y los frutos almacenados a 8°C lograron una intensidad respiratoria de 17,3832 mg CO₂Kg⁻¹h⁻¹, sin embargo, al final del tiempo de anaquel, tanto los frutos almacenados 5°C, como los almacenados a 8°C alcanzaron una intensidad respiratoria de 29,4786 mg CO₂Kg⁻¹h⁻¹. La tasa de respiración aumentó después de terminar la fase de almacenamiento de los frutos de lulo y, en consecuencia, se observó una mayor degradación de los compuestos de carbono, pérdida de masa, rápida senescencia, vulnerabilidad al ataque microbiano y pardeamiento enzimático, lo que resulta en un deterioro de la calidad y una capacidad de vida útil más corta debido a una fase climatérica más aguda (Farcuh et al., 2020; Jalali et al., 2020).

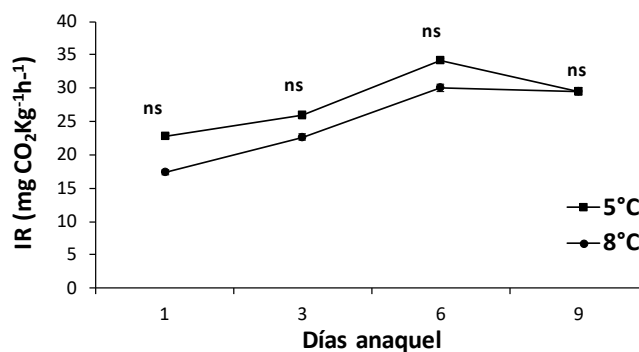


Figura 2-10 Tasa respiratoria de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba t-Student ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Pérdida de peso: Se presentó un aumento constante en la pérdida de peso. Los frutos almacenados a 5°C presentaron la mayor la mayor pérdida de peso debido al salto térmico del almacenamiento, lo que permite validar la importancia de mantener el almacenamiento en frío de los frutos de lulo

(Figura 2-11). La pérdida de peso es ocasionada por la pérdida de agua por transpiración y la pérdida de carbono oxidativo por la oxidación del sustrato respiratorio en forma de CO₂ (Jalali et al., 2020). Esta reducción de peso también está asociada un deterioro de la calidad del fruto, lo cual se traduce en pérdidas económicas (Bovi et al., 2018). En el presente estudio, los frutos de lulo presentaron una pérdida de peso de 7,2% en los frutos almacenados a 5°C y de 4,9 en aquellos almacenados a 8°C (Figura 3-11). Magaña et al. (2013), mencionan que indistintamente la especie vegetal que se evalúe, una pérdida de peso por encima del 8% conlleva a una alteración irreversible de la calidad del producto, dado que se superan los niveles críticos. Los resultados obtenidos concuerdan con lo obtenido en frutos de piña por Ulloa et al. (2015), en donde luego de almacenar los frutos a 7,5 °C por 21 días fueron llevados 12,5 °C por 4 días y presentaron una pérdida de peso de 5,7 %.

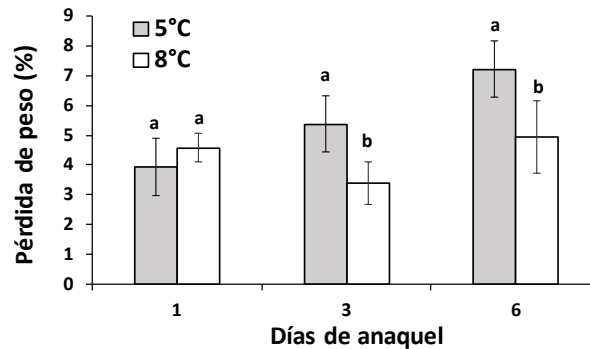


Figura 2-11 Pérdida de peso de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de T-Student ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Firmeza: Disminuyó para todos los tratamientos durante la etapa de anaquel. Los frutos almacenados a 5°C presentaron la mayor reducción alcanzando un valor de $13,32 \pm 0,99$ N y los frutos almacenados a 8°C presentaron un valor de $18,44 \pm 1,61$ N (Figura 2-12). Ésta marcada reducción en la firmeza puede atribuirse a la degradación de la pared celular por enzimas como pectinesterasa y poligalacturonasa, dado el incremento en el metabolismo del fruto como respuesta al aumento de la temperatura de almacenamiento luego de terminar la refrigeración, lo cual ocurre en la fase de anaquel (Baloch y Bibi, 2012). De igual forma, Pareek (2016), menciona que la exposición a bajas temperaturas en frutos tropicales (0°C-13°C), puede causar daños en la membrana lo que se percibe en el ablandamiento del fruto, esto podría explicar porque los frutos almacenados a 8°C mantuvieron una mayor firmeza durante la etapa de anaquel. En contraste, en frutos de

aguacate, por ejemplo, los frutos almacenados a 6°C presentaron características de textura aceptables durante cinco días de anaquel (Osuna et al., 2017).

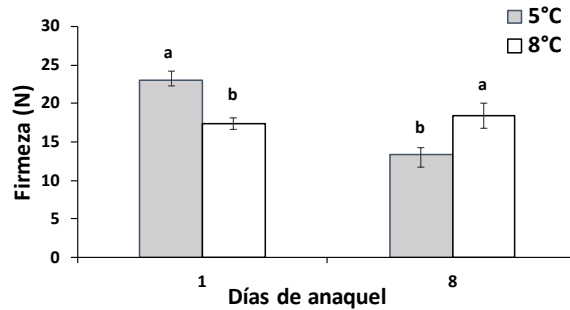


Figura 2-12 Firmeza de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican el error ($n=4$)

Color de epidermis: No se presentaron diferencias significativas en el cambio de color, sin embargo, presentó un aumento constante (Tabla 2-2). Al considerar que el paso de color amarillo a naranja es ocasionado por procesos metabólicos vinculados a la degradación de los pigmentos de clorofila y síntesis de β -caroteno en el fruto (Olivares-Tenorio et al., 2017), nuestros resultados muestran que la temperatura de almacenamiento por si sola puede no tener un impacto directo en la ralentización del proceso de cambio de color, y como resultado éste seguirá durante el periodo de vida útil de anaquel. Resultados similares se reportaron en frutos de piña, en donde los frutos estuvieron durante 4 días en condiciones de anaquel y se reportó un cambio de color de epidermis debido a la degradación de la clorofila, como una respuesta al incremento en la temperatura de almacenamiento (Ulloa et al., 2015). De igual forma, en frutos de maracuyá luego de la etapa de almacenamiento se evidenció un cambio de color tanto en la epidermis como en la pulpa (Araújo et al., 2017).

Tabla 2-2 Índice de color de la epidermis (IC), solidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH e índice de daño (ID) de frutos de lulo durante el tiempo de “anaquel” después de ser almacenados durante 30 días a diferentes temperaturas.

Parámetro	Día 1	Día 8
IC		
5°C	8,86 a	10,71 a
8°C	9,95 a	10,80 a
SST		
5°C	9,24 a	9,58 a
8°C	9,92 a	9,88 a
ATT		

5°C	3,36 a	2,60 b
8°C	3,16 a	3,36 a
RM		
5°C	2,50 b	2,69 b
8°C	3,18 a	3,08 a
pH		
5°C	3,49 a	3,51 a
8°C	4,28 a	3,54 a
ID		
5°C	2,0 b	2,0 b
8°C	3,0 a	5,0 a

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Sólidos solubles totales: Pese al cambio drástico de temperatura al que fueron sometidos los frutos de lulo durante el periodo anaquel, no se presentó un incremento en la concentración de SST como consecuencia de la aceleración en el proceso de maduración influenciado por la temperatura (Tabla 2-2) y, por lo tanto, es de considerar que los SST fueron utilizados como sustrato en la respiración, como se evidencia en el incremento de la tasa respiratoria observada en el periodo de anaquel (Tabla 2-2). Según Magaña et al. (2013), los SST están compuestos en su mayoría por azúcares, pero también presentan en menor concentración ácidos orgánicos, por lo tanto, al producirse una pérdida de agua significativa y consecuentemente una pérdida de peso en el fruto, como es nuestro caso, se puede dar una mayor concentración de SST, sin embargo, la reducción en los ácidos orgánicos durante el proceso respiratorio puede ocasionar que la concentración de SST no presente un incremento significativo, dado que se pierden algunos de sus compuestos. De igual forma, la estabilización en la concentración de SST considerado uno de uno de los mecanismos de mitigación de los daños por frío (Dueñas et al., 2009). Lo anterior, puede explicar porque a pesar de la diferencia en temperaturas no se presentaron cambios en la concentración de SST durante el anaquel. Resultados similares fueron encontrados en uchuva almacenados a 4°C, 8°C y 12°C, en donde al inicio se presentó un incremento en los SST y posteriormente sus valores se mantuvieron estables durante el final del periodo de anaquel (Olivares-Tenorio et al., 2017).

Acidez total titulable: La acidez total titulable presentó una disminución en los frutos que inicialmente fueron almacenados a 5°C (Tabla 2-2). Una disminución notable en el porcentaje de ATT, es el resultado del gasto de los ácidos orgánicos como fuentes de energía en las células para la respiración (Zhang et al., 2021). La temperatura de almacenamiento afectó la acidez y, por tanto, al

interrumpir el proceso de almacenamiento en frío y someter al fruto de lulo a temperaturas más altas, se observó una mayor reducción de la acidez titulable. El aumento en el porcentaje de acidez en los frutos almacenados a 8°C pueden ser un indicador del daño por frío, causado por la actividad microbiana dando como resultado una acumulación de ácidos orgánicos (Galvis et al., 2002; Yi et al., 2022). Resultados similares se han observado en frutos de uchuva (Olivares-Tenorio et al., 2017), melón (Farcuh et al., 2020) y Kiwi (Zhang et al., 2021).

Relación de madurez: La RM presentó un incremento durante todo el periodo de anaquel, siendo más marcado hacia el final de la misma fase (Tabla 2-2). Se ha documentado que una baja temperatura de almacenamiento puede retardar el aumento de la RM (Olivares-Tenorio et al., 2017). El incremento en el contenido de azúcares y la reducción de los ácidos orgánicos están ligados a diferentes reacciones enzimáticas, las cuales afectan la relación dulce/ácido y lo cual determina el sabor del producto, así como su aceptación por parte de los consumidores (García et al., 2010). Lo anterior, concuerda con nuestro estudio, en donde dada la mínima variación en el contenido de SST, el aumento de la RM está más relacionado con la disminución de la ATT en los frutos almacenados a 5°C, mientras que en los frutos almacenados a 8°C presentaron una RM estable durante toda la fase de anaquel.

Azúcares y ácidos orgánicos: Durante la fase de anaquel no se presentaron diferencias significativas en azúcares como en el ácido ascórbico (Tabla 2-1). Para los frutos almacenados a 8°C se presentó una mayor concentración de sacarosa, 22,9 mg·100 g⁻¹ de fruto, frente a los 17,33 mg·100 g⁻¹ de fruto de frutos almacenados a 5°C. Por su parte la glucosa: 0,79 mg·100 g⁻¹ de fruto y fructosa: 6,12 mg·100 g⁻¹ de fruto presentaron una mayor concentración en los frutos almacenados a 5°C hacia el final de anaquel. La sacarosa se ha identificado como un osmorregulador en condiciones de estrés por baja temperatura, mitigando los síntomas de daño dada su capacidad antioxidante la cual es mayor a la de la glucosa y fructosa (Zhou et al., 2021), lo cual puede explicar el aumento en la concentración de azúcares en la fase de anaquel, para contrarrestar el daño que puede generar el choque térmico por el cambio de temperatura. Por su parte el ácido ascórbico, se presentó una concentración de 0,016 mg·100 g⁻¹ de fruto y 0,014 mg·100 g⁻¹ de fruto en los frutos almacenados a 5°C y 8°C, respectivamente. La reducción de ácido ascórbico durante la fase de anaquel puede deberse a su degradación por daño oxidativo como resultado del cambio del ambiente en el cual se está dando el proceso de maduración (Tagele et al., 2022).

pH: Se presentaron diferencias significativas únicamente al inicio de la fase de anaquel. Sin embargo, el valor de pH fue menor en los frutos almacenados a 5°C (Tabla 2-2). Esto es debido a que la concentración de los ácidos disminuye al ser utilizados como sustratos en la respiración, la cual está relacionada con la temperatura, y en consecuencia se incrementa el pH, siendo un indicador del proceso de maduración del fruto (García et al., 2010; Tagele et al., 2022). La producción de estos compuestos provoca un aumento en la concentración de iones OH, lo que se traduce en un aumento del pH como se presentó al inicio del tiempo en anaquel y conduce al deterioro del producto (Barraza-Rojas et al., 2018). Los valores de pH llegaron a 3,5 al final del anaquel para todos los frutos, lo que también se presenta en otros frutos como mora (Villegas y Albarracín, 2016), camu camu (*Myrciaria dubia*) (Carrillo et al., 2011) y pitahaya (Magaña et al., 2013).

Índice de deterioro (ID): Se presentaron daños visibles en todos los frutos desde el inicio hasta el final de la fase de anaquel. Los mayores daños se presentaron en los frutos almacenados a 8°C (Tabla 3-2). En nuestro estudio, el ID se manifestó de forma visual a través de la depresión y el pardeamiento de la epidermis, de acuerdo con Zhang et al. (2021), estos síntomas son la manera en la que se manifiestan los trastornos metabólicos internos, debido a que los polisacáridos encargados de dar rigidez o plasticidad a la cutícula pueden verse afectados por las condiciones de alta humedad relativa y/o alta temperatura (Fernández-Muñoz et al., 2022). Lo anterior indica que a menor temperatura estos daños en lulo se mitigan.

2.5 Conclusiones y recomendaciones

- Durante los 30 días de almacenamiento en general no se presentaron diferencias significativas en las características fisicoquímicas en los frutos de lulo refrigerados a 5°C y 8°C, sin embargo, al compararlos con los frutos conservados a 18°C es claro el efecto de la refrigeración en la ralentización del proceso de maduración durante el poscosecha y el retraso de la senescencia lo que implica un claro efecto positivo en la conservación de las características de calidad de los frutos.
- En la fase de anaquel se presentó un cambio considerable en el comportamiento metabólico en los frutos de lulo, representado en el incremento en la tasa respiratoria y aumento en la pérdida de peso. Por su parte los frutos almacenados a 8°C presentaron una relación de madurez más alta, menor pérdida de peso, concentración de sólidos solubles totales y los mayores grados de deterioro en el pardeamiento de la epidermis. Basados en los resultados obtenidos la temperatura seleccionada para el almacenamiento de los frutos es de 5°C.

2.6 Referencias

- Acosta, Ó., Pérez, A and Vaillant, F. (2009). Chemical characterization, antioxidant properties and volatile constituents of naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) cultivated in Costa Rica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 59(1): 88- 94
- Agronet, (2021). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo; [Consultado 2021 jul]- <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Al-Dairi, M., Pathare, P And Al-Yahyai, R. (2021). Chemical and nutritional quality changes of tomato during postharvest transportation and storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Artículo en impresión. Doi: 10.1016/j.jssas.2021.05.001
- Álvarez-Herrera, J., Deaquiz Y and Rozo-Romero, X. (2021). Effect of Storage Temperature and Maturity Stage on the Postharvest Period of ‘Horvin’ Plums (*Prunus domestica* L.). *Ingeniería e Investigacion*. 41(2): e82530. Doi:10.15446/ing.investig.v41n2.82530
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Guijarro-Fuentes, M and Concellón, A. (2015). Caracterización de la naranjilla (*solanum quitoense*) común en tres estados de madurez. *Rev. Iber. Tecnología Postcosecha*. 16(2):215-221
- Andrade-Cuvi, M.J. (2018). Calidad poscosecha de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam) y alternativas tecnológicas para retrasar el deterioro. Elaboración de un producto panificado enriquecido con naranjilla. [Tesis Doctoral] Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata, Argentina
- Araújo, L., Costa, E., Soares, T., Santos, I and Jesus, O. (2017). Effect of time and storage conditions on the physical and physico-chemical characteristics of the pulp of yellow and purple passion fruit. *Food Sci. Technol, Campinas*. 37(3): 500-506. Doi: 10.1590/1678-457X.20616
- Babellahi, F., Amodio, M., Marini, F., Chaudhry, M., Chiara, M., Mastrandrea, L and Colelli, G. (2020). Using chemometrics to characterise and unravel the near infra-red spectral changes induced in aubergine fruit by chilling injury as influenced by storage time and temperature. *Biosystems Engineering*. 198 :137-146. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.008

- Balaguera-López, H and Palacios, E. (2018). Comportamiento poscosecha de frutos de mandarina (*Citrus reticulata* Blanco) var. Arrayana: efecto de diferentes tratamientos térmicos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 12 (2): 369-378. Doi: <http://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7702>
- Baloch, M and Bibi, F. (2012). Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *South African Journal of Botany*. 83: 109–116. Doi: 10.1016/j.sajb.2012.08.001
- Barrazueta-Rojas, S., Falconí, J., Navarro-Ojeda, M., Oleas-López, J and Mendoza-Zurita, G. (2018). Physicochemical properties and application of edible coatings in strawberry *Fragaria x Ananassa*) preservation. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 71(3): 8631-8641. Doi: 10.15446/rfnam.v71n3.73548
- Barrera, J., Hernández, M and Melgarejo, L. (2011). Estudios ecofisiológicos en la Amazonia colombiana 2. Cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal). Bogotá Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – Sinchi.
- Bovi, G., Rux, G., Caleb, O., Herppich, W., Linke, M., Rauh, C and Mahajan, P. (2018). Measurement and modelling of transpiration losses in packaged and unpackaged strawberries. *Biosystems engineering* 174:1-9. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.012
- Carrillo, M., Hernández, M and Martínez, O. (2011). Prolonging Postharvest Quality of Camu Camu (*Myrciaria dubia* H.B.K.) as the First Step in the Commercial Chain. Proc. Intern. Conference on Postharvest and Quality Management of Horticultural Products of Interest for Tropical Regions. Universidad Politécnica de Cartagena Departamento de Ingeniería de Alimentos y Equip. Cartagena (Murcia) España.
- Casierra-Posada, F., García, E And Y Lüdders, P. (2004). Determinación del punto óptimo de cosecha en el lulo (*Solanum quitoense* Lam. var. *quitoense* y *septentrionale*). *Agronomía Colombiana*, 22 (1): 32-39.
- Chen, H., Cao, S., Fang, X., Mu, H., Yang, H., Wang, X., Xu, Q and Gao, H. (2015). Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage. *Scientia Horticulturae*. 188: 44-48. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.03.018

- Cheng, S., Ouyang., Guo, W., Guo, M., Chen, G And Tian, H. (2021). Proteomic and physiological analysis of ‘Korla’ fragrant pears (*Pyrus × brestschneideri* Rehd) during postharvest under cold storage. *Scientia Horticulturae*. 288. 110428. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110428
- Chiriboga, M., Saladié, M., Bordonaba, J., Recasens, I, Garcia-Mas, J and Larrigaudière, C. (2013). Effect of cold storage and 1-MCP treatment on ethylene perception, signalling and synthesis: Influence on the development of the evergreen behaviour in ‘Conference’ pears. *Postharvest Biology and Technology* 86. 212–220. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.07.003
- Chitarra, M and Chitarra, A. (2005). Póscolheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras: UFLA, 785p
- Concellon, A., Añon, M and Chaves, A. (2005). Effect of chilling on ethylene production in eggplant fruit. *Food Chemistry*. 92(1): 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.048>
- Concellón, A., Zaro, M., Chaves, A and Vicente, A. (2012). Changes in quality and phenolic antioxidants in dark purple American eggplant (*Solanum melongena* L. cv. Lucía) as affected by storage at 0 °C and 10 °C. / *Postharvest Biology and Technology*. 66: 35-41. doi:10.1016/j.postharvbio.2011.12.003
- Famiani, F., Battistelli, A., Moscatello, S., Cruz-Castillo, J and Walker, R. (2015). The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents – a review. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21(2), 97-128. doi: 10.5154/r.rchsh.2015.01.004
- Faruh, M., Copes, B., Le-Navenec, G., Marroquin, J., Cantu, D., Bradford, K., Guinard, J and Deynze, A. (2020). Sensory, physicochemical and volatile compound analysis of short and long shelf-life melon (*Cucumis melo* L.) genotypes at harvest and after postharvest storage. *Food Chemistry: X* 8: 100107. Doi: 10.1016/j.fochx.2020.100107
- Fernández-Muñoz, R., Heredia, A and Domínguez, E. The role of cuticle in fruit shelf-life. (2022). *Food Biotechnology. Current Opinion in Biotechnology*. 78:102802. Doi: 10.1016/j.copbio.2022.102802
- Ferreira, K., Ferreira, K, Ferreira, S., Aparecida, L., Santos and Arthur, V. (2020). Evaluation of physicochemical characteristics in cherry tomatoes irradiated with ⁶⁰Co gamma-rays on

- post-harvest conservation. *Radiation Physics and Chemistry* 177: 109139. Doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.109139
- Fonseca, M., Rodríguez, J., Herrera, A And Fischer, G. (2012). Caracterización fisicoquímica del fruto de cuque (*Solanum vestissimum* Dunal) durante la maduración. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 6(1): 31-40. Doi: 10.17584/rcch.2012v6i1.1276
- Forero, N., Gutierrez, S., Sandoval, R., Camacho, J And Meneses, M. (2014). Evaluación poscosecha de las características del lulo (*Solanum quitoense*) cubierto con hoja de plátano. *Temas Agrarios*, 19(1): 73-85.
- Gallo, Y., L.F. Toro, H. Jaramillo, P.A. Gutiérrez, and M. Marín. (2018). Identificación y caracterización molecular del genoma completo de tres virus en cultivos de lulo (*Solanum quitoense*) de Antioquia (Colombia). *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 12(2): 281-292. Doi: 10.17584/rcch.2018v12i2.7692.
- García, M and García, H. (2001). Manejo cosecha y poscosecha de mora, lulo y tomate de árbol. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA. Centro de Investigaciones Tíbaita. Bogotá-Colombia. Pp 31.
- Galvis, J., Arjona, H., Fischer, G., Landwehr, T and Martínez, R. (2002). Influencia de la temperatura y el tiempo de almacenamiento en la conservación del fruto de mango (*Manifera indica* L.) variedad Van Dyke. *Agronomía Colombiana*. 19 (1-2):23-35.
- García, C., Cury, K And Dussán, S. (2010). Evaluación poscosecha y estimación de vida útil de guayaba fresca utilizando el modelo de Weibull. *Acta Agronómica*. 59 (3): 347-355
- Gómez-Merino, F., Trejo-Téllez, L., García-Albarado, J and Cadeña-Íñiguez, J. (2014). Lulo (*Solanum quitoense* [Lamarck.]) como cultivo novedoso en el paisaje agroecosistémico mexicano. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(28):1741-1753.
- González, D., Ordóñez, L., Vanegas, P and Vásquez, H. (2013). Cambios en las propiedades fisicoquímicas de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) cosechados en tres grados de madurez. *Acta Agronómica*. 63 (1):11-17
- González, R., Cervantes, Y and Caraballo, L. (2016). Conservación de la guayaba (*Psidium guajava* L.) en poscosecha mediante un recubrimiento comestible binario. *Temas Agrarios*. (1):54-64

- Guevara, J. (2017). Mejora de la conservación postcosecha de la naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) mediante atmósferas modificadas. Tesis para optar al título de Título de Ingeniera en Alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ambato. Ecuador
- Herrera-González, J., Salazar-García, S., Martínez-Flores, H and Ruiz-García, J. (2017). Indicadores preliminares de madurez fisiológica y comportamiento postcosecha del fruto de aguacate Méndez. Rev. Fitotec. Mex. 40 (1): 55 - 63
- Inestroza-Lizardo, C., Voigt, V., Muniz, A and Gomez-Gomez, H. (2016). Métodos de enfriamiento aplicables a frutas y hortalizas enteras y mínimamente procesadas. Rev. Iber. Tecnología Postcosecha.17(2):149-161.
- Jalali A., Linke, M., Geyer, M and Mahajan, P. (2020). Shelf life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes. Food Packaging and Shelf Life 25: 100525. Doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100525
- Javanmardi, J and Kubota, C. (2006). Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. Postharvest Biology and Technology. 41:151–155. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.03.008
- Johnston, J., (2015). Lower cell wall pectin solubilisation and galactose loss during early fruit development in apple (*Malus domestica*) cultivar ‘Scifresh’ are associated with slower softening rate. J. Plant Physiol. 176, 129–137. Doi: 10.1093/fqsafe/fyx024
- Kader, A. (2013). Postharvest Technology of Horticultural Crops – An Overview from Farm to Fork. Ethiop.J. Appl. Sci. Technol. (Special Issue No.1): 1- 8
- Kays, S. (2004). Postharvest biology. Exon Press, Athens, GA
- Kohatsu, D., Lima, G and Vieites, R. (2009). Conservação pós-colheita de pêssego com o uso da refrigeração e da irradiação. Revista Brasileira de Fruticultura, 31:1184-1189.
- Lobo-Arias, M.; Medina-Cano, C. I.; Delgado-Paz, O. A. Y Bermeo-Giraldo, A. (2007). Variabilidad morfológica de la colección colombiana de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) y especies relacionadas de la sección Lasiocarpa. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 60:3939-3964.

- Lado, J., Gurrea, A., Zacarías, L and Rodrigo, M. (2019). Influence of the storage temperature on volatile emission, carotenoid content and chilling injury development in Star Ruby red grapefruit. *Food Chemistry*. 295: 72–81. Doi: 10.1016/j.foodchem.2019.05.108
- Magaña, W., Sauri, E., Corrales, J and Saucedo, C. (2013). Variaciones bioquímicas, fisiológicas y físicas de las frutas de pitahaya (*Hylocereus undatus*) almacenadas en ambiente natural. *Rev. Iber. Tecnología Postcosecha*. 14(1):21-30.
- Mata, C., Hertog, M., Raemdonck, G., Baggerman, G., Tranc, D and Nicolai, B. (2019). Omics analysis of the ethylene signal transduction in tomato as a function of storage temperature. *Postharvest Biology and Technology* 155. 1-10. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.04.016
- Martínez, C., Villacorta, V., Yepes, D., Ciro, H., and Cartagena, J. (2012). Physiological and Physico-Chemical Characterization of the Soursop Fruit (*Annona muricata* L. cv. Elita). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. 65(1):6477-6486.
- Mejía, C., Gaviria, D., Duque, A., Rengifo, L., Aguilar, E and Alegría, A. (2012). Physicochemical characterization of the lulo (*Solanum quitoense* Lam.) castilla variety in six ripening stages. *Vitae*. 19 (2): 157-16
- Nkolisa, N., Magwaza, L., Workneh, T and Chimphango, A. (2018). Evaluating evaporative cooling system as an energy- free and cost- effective method for postharvest storage of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) for smallholder farmers. *Scientia Horticulturae*. 241: 131–143. Doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.079
- Novoa, R., Bojacá, M., Galvis, J and Fischer, G. (2006). La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana* 24(1): 77-86.
- Ochoa-Vargas, L., Balaguera-López, H, Álvarez-Herrera, J and Pinzón, E. (2016). Crecimiento y desarrollo del fruto de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el municipio de San Antonio del Tequendama (Colombia). *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(3):347-359. DOI: 10.21930/rcta.vol17_num3_art:512
- Olivares-Tenorio, M., Dekker, M., Boekel, M and Verkerk, R. (2017). Evaluating the effect of storage conditions on the shelf life of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Food Science and Technology*. 80: 523-530. Doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.027

- Osuna, J., Nolasco, Y., Herrera, J Guzmán, S and Álvarez, A. (2017). Influencia del clima y rugosidad sobre la tolerancia a refrigeración del aguacate 'Hass'. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 19: 3911-3921
- Pareek, S. (2016). *Postharvest Ripening Physiology of Crops*. Boca Raton. Estados Unidos. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- Park, Y., Kim, J and Kim, S. (2017). Free Sugar and Organic Acid Contents of Pollens from *Quercus* spp. in Korea. *Journal of Apiculture* 32(4): 375~379. DOI: 10.17519/apiculture.2017.11.32.4.375
- Park, M., Sangwanangkul, P and Baek, D. (2018). Changes in carotenoid and chlorophyll content of black tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.) during storage at various temperatures. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25: 57–65. Doi: 10.1016/j.sjbs.2016.10.002
- Ramírez, H., Encina-Rodríguez, L., Benavides-Mendoza, A., Robledo, V Hernández-Dávila, J and Alonso-Corona, S. (2004). Influencia de la Temperatura sobre Procesos Fisiológicos en Postcosecha de Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Revista Agraria -Nueva Epoca*. 1(3): 31-37
- Rao, C. (2015). *Engineering for Storage of Fruits and Vegetables: Cold Storage, Controlled Atmosphere Storage, Modified Atmosphere Storage*. Academic Press, 859p.
- Riera, M and Gómez Y. (2019). Cinética de la degradación térmica del ácido ascórbico en el jugo de lulo (*Solanum Quitoense* Lam.). *Ciencia y Tecnología*. 35(1):1-7
- Róth, E., Berna, A., Beullens, K., Yarramraju, S., Lammertyna, J., Schenk, A., and Nicolai, B. (2007). Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 11-19. doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.01.006
- Saltveit, M. E. (2019). Respiratory metabolism. In: Yahia, E.M., and Carrillo-López, A. (Eds.) *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* (pp. 228-237). First edition. Kidlington, UK: Elsevier. 10.1016/B978-0-12- 813278-4.00004-XSouza A.,
- Strano, M., Di Silvestro, S., Allegra, M., Russo, G and Caruso, M. (2021). Effect of cold storage on the postharvest quality of different Tarocco sweet orange clonal selections. *Scientia Horticulturae*. 285:110167. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110167

- Tagele, A., Woldetsadik, K., Gedamu, F and Rafi, M.M. (2022). Effects of preharvest applications of chemicals and storage conditions on the physico-chemical characteristics and shelf life of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Heliyon* 8. e09494 Doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09494.
- Torres, P. (2020). Evaluación del comportamiento poscosecha de dos híbridos de naranjilla (*Solanum quitoense* L.) conservados a diferentes condiciones de almacenamiento. Tesis. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Ingeniería Agronómica. Quito-Ecuador.
- Tsaniklidis, G., Delis, C., Nikoloudakis, N., Katinakis, P and Aivalakis, G. (2014). Low temperature storage affects the ascorbic acid metabolism of cherry tomato fruits. *Plant Physiology and Biochemistry*. 84:49-157. Doi: /10.1016/j.plaphy.2014.09.009
- Tucker, G., Yin, X.R., Zhang, A.D., Wang, M.M., Zhu, Q.G., Liu, X.F., Xie, X.L., Chen, K.S and Grierson, D. (2017). Ethylene and fruit softening. *Food Qual. Safety* 1, 253–267. Doi: <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx024>
- Ulusik, S. (2016). Genetic improvement of tomato by targeted control of fruit softening. *Nat. Biotechnol.* 34, 950–952.
- Ulloa, L., Sáenz, M and Castro, J. (2015). Efecto del almacenamiento a diferentes temperaturas sobre el desarrollo de color externo y la calidad de frutos de piña cv. dorada extra dulce. *Agronomía Costarricense*. 39(3): 9-20.
- Ulloa-Gómez, L., Sáenz-Murillo, M, Castro-Chinchilla, J and Ramírez-Sánchez, M. (2021). Temperaturas de acondicionamiento, poscosecha sobre el desarrollo de color de la epidermis y calidad interna de frutos de piña. *Agronomía Costarricense*. 45(1): 103-114. ISSN:0377-9424
- Velásquez-Barreto, F., Rafael-Delgado, D and Ramírez-Tixe1, E. (2022). Efecto del tiempo y temperatura de almacenamiento en los parámetros físico-químicos y de color de frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana*). *Revista de Invest. Agropecuaria Science and Biotechnology*. 2(1): 29-38. Doi: 10.25127/riagrop.20221.782
- Villegas, C., Albarracín, W. (2016). Aplicación y efecto de un recubrimiento comestible sobre la vida útil de la mora de castilla (*Rubus glaucus benth*). *Vitae, Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*. 23(3): 202-209. Doi:10.17533/udea.vitae.v23n3a06

- Wang, H., Wang, J., Mujumdar, A., Jin, X., Liu, Z., Zhang, Y and Xiao, H. (2021). Effects of postharvest ripening on physicochemical properties, microstructure, cell wall polysaccharides contents (pectin, hemicellulose, cellulose) and nanostructure of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Food Hydrocolloids*. 118:106808. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106808
- Wu, Z., Tu, M., Yang, X., Xu, J and Yu, Z. (2020). Effect of cutting and storage temperature on sucrose and organic acids metabolism in postharvest melon fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 161:111081. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111081
- Xia, H., Wang, X., Su, Y., Jiang, L., Lin, L., Deng, Q., Wang, J., Deng, H., Hu, R., Liao, M., Lv, X and Liang, D. (2020). Changes in the carotenoids profile of two yellow-fleshed kiwifruit cultivars during storage. *Postharvest Biology and Technology*. 164. 111162. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2020.111162.
- Xu, K., Wang, A and Brown, S. (2012). Genetic characterization of the Ma locus with pH and titratable acidity in apple. *Mol Breeding*.30:899–912
- Yao, W., Xu, T., Farooq, S., Jin, P and Zheng, Y. (2018). Glycine betaine treatment alleviates chilling injury in zucchini fruit (*Cucurbita pepo* L.) by modulating antioxidant enzymes and membrane fatty acid metabolism. *Postharvest Biology and Technology*. 144: 20–28. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.05.007
- Yi, F Wang, J., Xiang, Y., Yun, Z., Pan, Y., Jiang, Y and Zhang, Z. (2022). Physiological and quality changes in fresh-cut mango fruit as influenced by cold plasma. *Postharvest Biology and Technology*. 194.112105. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112105
- Zhang, W., Luo, Z., Wang, A., Gu, X and Lv, Z. (2021). Kinetic models applied to quality change and shelf-life prediction of kiwifruits. *LWT*. 138:110610. Doi: 10.1016/j.lwt.2020.110610
- Zhang, W., Jiang, H., Cao, J And Jiang, W. (2021). Advances in biochemical mechanisms and control technologies to treat chilling injury in postharvest fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*. 113: 355–365. Doi: 10.1016/j.tifs.2021.05.009
- Zhao, H., Jiao, W., Cui, K., Fan, X., Shu, C., Zhanga, W., Cao, J and Jiang, W. (2019). Near-freezing temperature storage enhances chilling tolerance in nectarine fruit through its regulation of

- soluble sugars and energy metabolism. *Food Chemistry*. 289: 426–435. Doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.088
- Zhou, Q., Zhang, F., Ji, S., Dai, H., Zhou, X., Wei, B., Cheng, S and Wang, A. (2021). Abscisic acid accelerates postharvest blueberry fruit softening by promoting cell wall metabolism. *Scientia Horticulturae*. 288: 110325. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110325
- Zhou, D., Zhang, Q., Wu, C., Li, T and Tu, K. (2022). Change of soluble sugars, free and glycosidically bound volatile compounds in postharvest cantaloupe fruit response to cutting procedure and storage. *Scientia Horticulturae*. 295:110863. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110863
- Zhou, J., Min, D., Li, Z., Fu, X., Zhao, X., Wang, J., Zhang, X., Li, F and Li, X. (2021). Effects of chilling acclimation and methyl jasmonate on sugar metabolism in tomato fruits during cold storage. *Scientia Horticulturae*. 289:11049. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110495

3. Efecto del tiempo de exposición y de la concentración de 1-Metilciclopropeno en el almacenamiento refrigerado de frutos de lulo (*Solanum quitoense* Lam.)

3.1 Resumen

El etileno es uno de los principales reguladores de los procesos fisiológicos y bioquímicos durante el proceso de maduración. Su actividad se presenta durante la maduración hasta la senescencia dada su propiedad de síntesis autocatalítica y su acumulación en el fruto puede desencadenar un rápido deterioro del producto. La aplicación de retardantes de madurez es una alternativa eficaz y eficiente si se conoce el efecto que el producto puede tener en el fruto. El 1-Metilciclopropeno es un retardante de madurez que afecta directamente la acción del etileno en el fruto al unirse a los receptores de este. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del tiempo de exposición y de la concentración de 1-Metilciclopropeno en el almacenamiento refrigerado de frutos de lulo. Se evaluaron tres dosis de 1-MCP (0; 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$; 0,70 $\mu\text{g L}^{-1}$ y 1 $\mu\text{g L}^{-1}$) y dos tiempos de exposición (10 y 15 minutos) para un total de 7 tratamientos. Durante la fase de almacenamiento, la exposición de los frutos de lulo a 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ + 10 min de inmersión mostró una menor producción de CO_2 , mayor retención de la firmeza, pH y ácido ascórbico. Por su parte los frutos tratados con 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión mostraron un porcentaje de pérdida de peso y ATT menor frente a los demás tratamientos y los frutos sometidos a 0,70 $\mu\text{g L}^{-1}$ + 15 min de inmersión mostraron los cambios más notorios durante el almacenamiento. Durante la fase de anaquel, la concentración de 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ + 10 min de inmersión generó un contenido de sacarosa, tasa respiratoria y producción de etileno, mientras que los frutos de lulo tratados con 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión, presentaron la menor pérdida de peso, cambios en el color y concentración de ácido ascórbico. Los resultados sugieren que la aplicación de 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ + 10 min en los frutos de lulo es una alternativa viable para la conservación de las características de calidad del lulo.

Palabras clave: Tiempo de inmersión, calidad, anaquel, dosis

3.2 Introducción

El etileno es una fitohormona gaseosa que actúa como regulador de múltiples procesos fisiológicos, dentro de los cuales se encuentra la maduración de los frutos (Mata et al., 2021). La biosíntesis de etileno se da a partir del paso de la metionina a S-adenosilmetionina (SAM), luego a 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) a través de ACC sintasa (ACS) y finalmente el ACC llega a ser etileno a través de catálisis de ACC oxidasa (ACO) (Netlak, et al., 2021). Dicho proceso de producción de etileno se da a través de dos sistemas. El sistema 1 se encuentra presente durante todo el proceso de maduración de frutos no climatéricos y en los frutos climatéricos la producción de etileno es más bajo durante el preclimaterio, y el sistema 2 corresponde a la producción autocatalítica del etileno y se refiere a una producción autoestimulada de etileno, denominada 'síntesis autocatalítica' y exclusiva para los frutos climatéricos (Bapat et al., 2010).

La producción de etileno se da de forma natural a medida que los frutos continúan su proceso de maduración durante la poscosecha, sin embargo, si se presenta una acumulación de esta fitohormona como resultado de la producción autocatalítica, se tiene como resultado una rápida maduración del producto, lo que lleva a su deterioro y un corto tiempo para el proceso de transporte, comercialización y consumo (Li et al., 2022). En los frutos climatéricos, la regulación del proceso de maduración está dirigida principalmente por el incremento en la tasa respiratoria y la producción de etileno, esta última, está coordinada por una serie de transducciones de señales de etileno identificadas por el receptor ETR para ser trasladadas al núcleo por CTR1, EIN2, EIN3, ERF1 y otros elementos de transducción que permiten la expresión de proteínas relacionadas con el proceso (Verde et al., 2023; Kou et al., 2020).

El 1-metilciclopropeno (1-MCP) es un retardante de la acción del etileno, el cual interrumpe la unión de los receptores de etileno al ocupar su lugar y, por tanto, impide la activación de los genes relacionados con la maduración y la senescencia del fruto (Chai et al., 2021). El efecto del 1-MCP en la fisiología poscosecha se ha reportado en la disminución de la producción de etileno, la degradación de la pared celular, actividad antioxidante y retraso de la senescencia entre otros (Zhang et al., 2022). Andrade-Curvi (2018), encontró que en frutos de lulo la aplicación de 1-MCP $0,5 \mu\text{L L}^{-1}$ durante por 8 h mejoró la apariencia visual de los frutos y redujo la pérdida de peso. En frutos de tomate se ha reportado que la aplicación de $1 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP retrasó la producción de etileno y la tasa de respiración de los tomates verdes maduros (Jong-Seok., 2018). En banano "Fenjiao" la aplicación de $450 \text{nl} \cdot \text{L}^{-1}$ 1-MCP retrasó la maduración y afectó la producción de volátiles (Zhu., 2020). Lv et al. (2020), reportaron un pico climatérico de respiración tardío en frutos de manzana tratadas con $0,5 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP. En frutos de uchuva, tratados diferentes dosis y tiempos de inmersión

de 1-MCP (0,3; 1 y 3 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ y 2, 12 y 24 h), la combinación de 3 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ de 1-MCP durante 24h redujo la producción de etileno y la concentración interna de etileno, también retardó el cambio en las características físicas y químicas en el fruto (Balaguera et al., 2016).

Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del tiempo de exposición y de la concentración de 1-Metilciclopropeno en el almacenamiento refrigerado de frutos de lulo (*Solanum quitoense* L.) cv. Castilla.

3.3 Materiales y métodos

Los frutos de lulo cv. Castilla fueron cosechados en el municipio de Ramiriquí Boyacá, vereda Potreros, finca la Loma, cuya temperatura oscila entre los 8°C (mínima) y 20 °C (máxima) y humedad relativa media de 85%. Los frutos fueron cosechados en un grado de madurez 3, sin de daños mecánicos y sin afectaciones fitosanitarias. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Calidad y Poscosecha de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se utilizó un diseño completo al azar con 7 tratamientos conformados de la siguiente manera: 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión; 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión; 0,70 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión; 0,70 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión; 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión; 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos de inmersión y un control (sin 1-MCP). Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones, para un total de 28 UE cada una conformada por 6 frutos. Todos los tratamientos estuvieron bajo condiciones de almacenamiento a 5°C y 18°C con una humedad relativa de 90%. Para la aplicación del 1-MCP se tomaron las cantidades establecidas por tratamiento y se diluyeron en 2L de agua. Los frutos fueron sumergidos durante el tiempo correspondiente 10 o 15 minutos según fuera el caso, luego fueron dejados a 23°C para asegurar la absorción del producto. Los frutos se dividieron en dos grupos, grupo 1 correspondió a los frutos que se almacenaron a 5°C y un segundo grupo, frutos conservados a 23°C, cada grupo contuvo los 7 tratamientos. El ensayo a 23°C se destinó únicamente a la evaluación de la tasa respiratoria y producción de etileno.

Se hicieron mediciones destructivas cada 8 días y no destructivas cada 3 días. Para la medición de la tasa respiratoria se tomaron entre 3 a 4 frutos por tratamiento, se colocaron en una cámara hermética de 2L durante 3 horas y luego se determinó el flujo de CO_2 y O_2 con un analizador

electrónico de gases PAC CHECK® Model 325 de MOCON. El índice de color (IC ecuación 1) se calculó a partir de parámetros del sistema CIELab L^* , a^* y b^* , con colorímetro digital marca Minolta. Para la determinación de la firmeza del fruto (N) se utilizó un Texturómetro digital marca Lloyd LS1 con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus. EL porcentaje de pérdida de peso fue calculado a través de la ecuación 2.

$$IC = ((1000 \times a^*) / (L^* \times b^*)) \quad (1)$$

$$Pérdida de peso (\%) = \left(\frac{(P1 - P2)}{P1} \times 100 \right) \quad (2)$$

Los sólidos solubles totales (SST) fueron obtenidos con un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix. La acidez total titulable (ATT) se determinó con un titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza); la relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT. Para la concentración de etileno se tomaron muestras de 450 ± 50 g de frutos de, se colocó en una cama hermética de 2L durante y se tomó la muestra de gas con una jeringa de 1cm³ de capacidad a través de la septa en la parte superior del recipiente y se inyectó en un cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA), equipado con un detector de ionización de llama (FID, por sus siglas en inglés) y una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm). La extracción de sacarosa, glucosa, fructosa y ácido ascórbico se realizó mediante un sistema de HPLC Ultimate 3000 Thermo Scientific equipado con un sistema de procesamiento de datos Chromeleon 7.2, inyector automático con loop de 20 µL, una bomba cuaternaria, un detector UV de onda variable (Thermo scientific DAD) y un detector de IR (Thermo Scientific, RefractoMax 521).

Los datos obtenidos fueron sometidos pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, a análisis de varianza y a la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P \leq 0,05$). El análisis se hizo mediante el software estadístico SPSS V. 21.

3.4 Resultados y discusión

Fase de almacenamiento

Tasa respiratoria: El contenido de dióxido de carbono (CO₂) aumentó para todos los tratamientos durante el tiempo de almacenamiento en los frutos conservados a 23°C. El menor contenido de CO₂ se presentó en los frutos sumergidos en 0,35 µg L⁻¹ 1-MCP + 10 minutos de inmersión con un valor

de $221,39 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ al finalizar el almacenamiento, en comparación con el control, el cual alcanzó un valor de $240,09 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$. En cuanto a la concentración de O_2 el menor valor se presentó en los frutos con $1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión logrando un valor de $246,73 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Figura 3.1). Por su parte, para los frutos almacenados a 5°C , el tratamiento de $0,35 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión obtuvo un valor en la concentración de CO_2 de $88,98 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en el día 21 cuando se terminó el periodo de almacenamiento. El consumo más bajo de O_2 cuyo valor fue de $86,85 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ fue para el tratamiento de $0,35 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos para el mismo periodo de tiempo (Figura 3.2)

Ding et al. (2020), mencionan que el 1-MCP reduce las respuestas dependientes del etileno al inhibir su producción y tiene el mismo efecto sobre la tasa de respiración del fruto. Diferentes investigaciones han reportado resultados similares a los encontrados en el estudio sobre el efecto del 1-MCP combinado con bajas temperaturas de almacenamiento sobre la tasa respiratoria durante la poscosecha de frutos. La supresión de la tasa respiratoria se ha observado en frutos de tomate, sumergidos en 200, 400 o $600 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ de 1-MCP durante 1 minuto (Choi y Huber, 2008). Los mismos resultados se observaron en frutos de aguacate con la inmersión de 1-MCP a $150 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ por 1 minuto (Pereira et al., 2013). La respiración en los productos hortofrutícolas es el proceso fisiológico implicado en la pérdida de masa, así como en el consumo de azúcares y ácidos orgánicos (Lufu et al., 2019), por lo tanto, la reducción de la tasa respiratoria con el uso de bajas temperaturas y 1-MCP puede ser considerada como una alternativa que permita conservar los frutos de lulo por más tiempo.

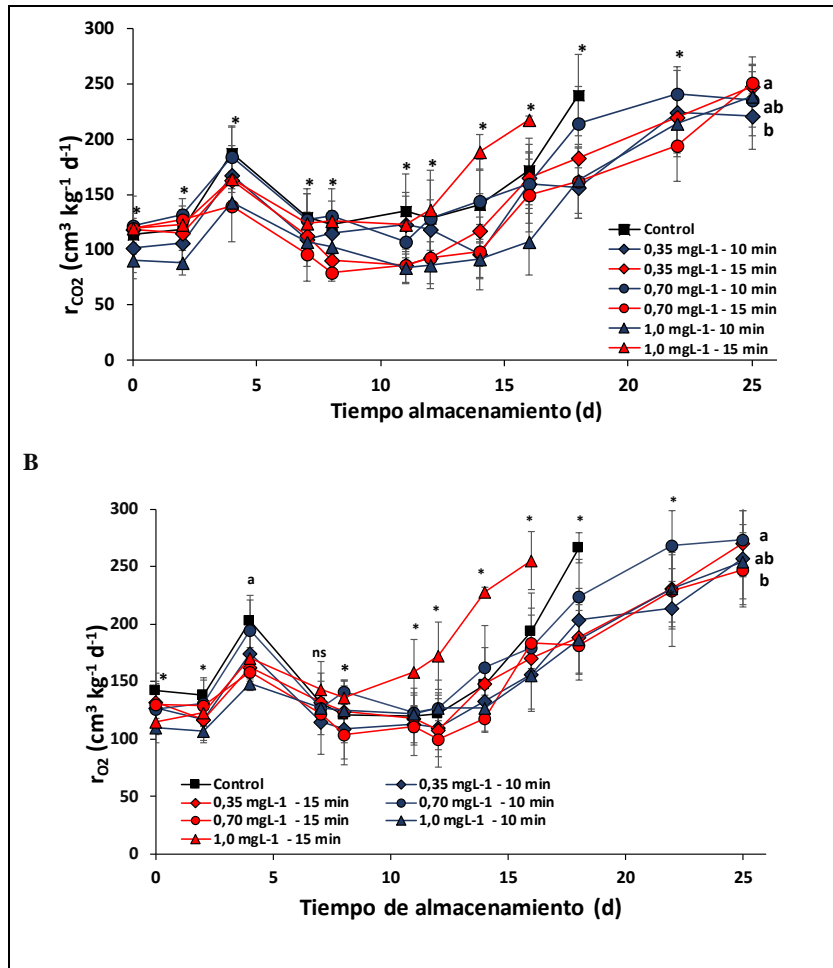


Figura 3-1: Efecto del 1-MCP sobre la intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a temperatura ambiente (23°C). A) Variación del contenido de CO₂. B) Variación del contenido de O₂. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4)

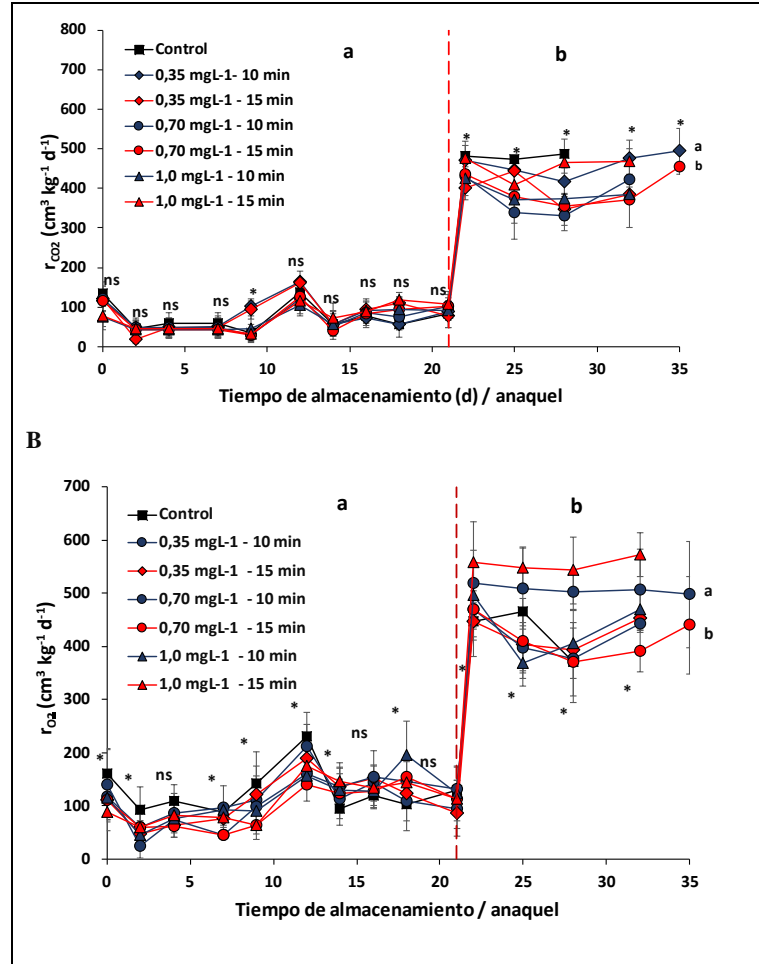


Figura 3-2: Efecto del 1-MCP sobre la intensidad respiratoria de frutos de lulo almacenados a 5°C. La línea punteada vertical señala el paso del periodo de almacenamiento y anaquel. A. Variación del contenido de CO₂. B. Variación del contenido de O₂. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error ($n=4$)

Etileno: No se presentaron diferencias significativas para los frutos a 5°C durante la fase de refrigeración (Figura 3.3 A (a)). Por el contrario, si se presentaron diferencias significativas en los frutos almacenados a 23°C a partir los 6 días de almacenamiento (Figura 3.3 B). El valor máximo de producción de etileno se presentó en los frutos en condiciones de 0,35 $\mu g L^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos de inmersión cuyo valor fue de 0,20 $cm^3 kg^{-1} d^{-1}$ al día 24 de almacenamiento, comparado con el tratamiento control cuyo valor fue de 0,15 $cm^3 kg^{-1} d^{-1}$ en el día 21 de almacenamiento. Se puede observar un claro efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento sobre la producción de etileno y su correlación con la intensidad respiratoria en los frutos de lulo. Dada la afinidad del 1-

MCP sobre los receptores del etileno, la cual es 10 veces superior al mismo etileno (Blankenship y Dole, 2003), se puede comprender el porqué de la inhibición en la producción de etileno durante la fase de almacenamiento y como al combinar el 1-MCP con una baja temperatura se intensifica su efectividad. En frutos de uchuva, por ejemplo, Balaguera-López et al. (2021), encontraron que el 1-MCP disminuyó la actividad de las enzimas histidina quinasa (HK) y ACC oxidasa (ACO). HK está relacionada con la respuesta la unión de etileno al receptor ETR1 y al inhibir su actividad no se genera una respuesta al etileno. Por su parte, la actividad de ACO fue completamente restringida por 1-MCP.

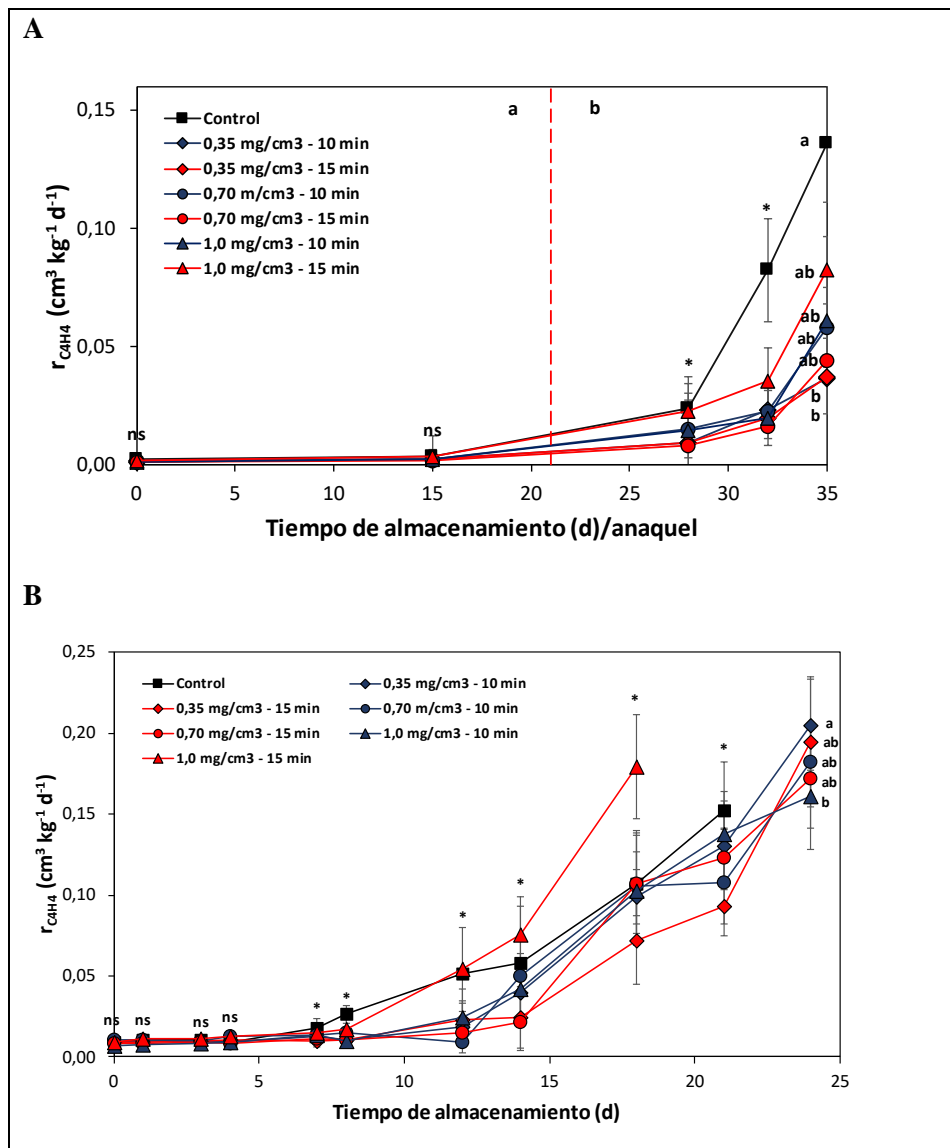


Figura 3-3 Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento sobre concentración de etileno de frutos de lulo. La línea vertical muestra el inicio de la fase del anaquel. A) Frutos refrigerados a 5°C (a) fase de refrigeración. b) fase de anaquel). B) Frutos conservados a 23°C. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la

prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4)

Pérdida de peso (%): Se presentaron diferencias significativas para todos los tratamientos desde el tercer día de evaluación. La menor pérdida de peso se registró en los frutos tratados con $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos con un porcentaje de 4,84% al final del periodo de almacenamiento (Figura 3.4). La reducción en el peso del fruto se debe a la pérdida de agua como resultado del proceso de transpiración y respiración (Du et al., 2021). El mecanismo de unión del 1-MCP al receptor de etileno es lo que impide que el etileno se una a su receptor y puede suprimir la actividad enzimática encargada de maduración intracelular, el proceso de respiración y transpiración el fruto (Xiong et al., 2019). De acuerdo con Osuna et al. (2017), la efectividad del 1-MCP depende de la forma y tiempo de aplicación, la concentración e incluso el fruto sobre el cual se va a evaluar. De igual forma, el almacenamiento a baja temperatura también contribuye con una disminución en la pérdida de peso dado que también reducen la pérdida del contenido de agua por la transpiración (Zhao et al., 2022). Los resultados obtenidos difieren con lo reportado con Molano-Díaz (2022), en donde evaluaron dosis de 1-MCP y temperaturas de almacenamiento por separado en frutos de lulo y no encontraron diferencias en los frutos tratados únicamente con 1-MCP, pero si en los almacenados a 2°C y 4°C , lo que permite inferir que la combinación de ambas tecnologías de conservación puede tener un efecto directo en la respiración del fruto y en consecuencia reducir el porcentaje de pérdida de peso.

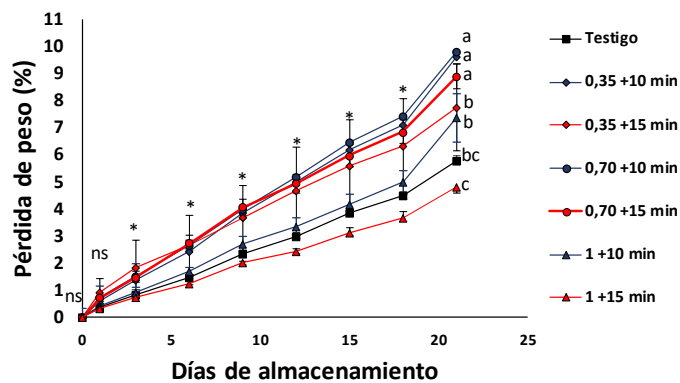


Figura 3-4 Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre la pérdida de peso de frutos de lulo. * y letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4)

Índice de color (IC): Se presentaron diferencias significativas a lo largo del tiempo de refrigeración para todos los parámetros de color. Para el final del almacenamiento el valor más alto registrado para L^* : 46,84, a^* : 14,09 y b^* 47,62 se observó en los frutos tratados con $0,70 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos. El IC fue incrementando de forma muy leve tanto en los frutos tratados con 1-MCP como el control. Los frutos tratados con $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos con un valor de 8,08 presentó el mayor cambio de IC frente al control cuyo valor final fue de 6,00 (Figura 3.5). El aumento en el valor L^* muestra un fruto con la epidermis más brillante. Por su parte, el incremento en el valor de a^* es un indicador de la conservación de la coloración rojiza en fruto, mientras que el incremento de b^* muestra un pardeamiento de los frutos, posiblemente causado por la actividad microbiana (Gao et al., 2019; Du et al., 2020). El efecto del 1-MCP sobre los procesos de maduración incluidos los cambios metabólicos en los pigmentos se han evaluado en diversos frutos como tomate (Choi et al., 2008), Kiwi (Chai et al., 2021), Uchuva (Balaguera-López et al., 2021), melocotón (Zhang et al., 2022), entre otros. Sin embargo, los cambios en el metabolismo de pigmentos por el efecto del 1-MCP es más notorio cuando el producto es aplicado en condiciones específicas para el tipo de fruto, estas condiciones incluyen que el fruto no haya pasado de la madurez fisiológica a la madurez comercial, el día de aplicación después de la cosecha, la concentración del 1-MCP, al igual que la temperatura de conservación (Chiribog et al., 2014; Cuaspud et al., 2019). En frutos de pera, por ejemplo, se ha reportado que el efecto del 1-MCP sobre el color depende del momento de la aplicación y la temperatura de almacenamiento, dado que frutos tratados justo después de la cosecha presentaron una mayor retención del color verde frente a frutos tratados entre los 7 días siguientes a la cosecha y los no tratados con 1-MCP; de igual forma, los frutos conservados a 0°C y tratados con 1-MCP presentaron un mayor cambio de color que aquellos frutos conservados a 20°C y tratados con 1-MCP (Villalobos-Acuña et al., 2011). La dosis aplicada también tiene efecto en el cambio de color. En peras “Bartlett”, una concentración de 300 nL L^{-1} de 1-MCP no inhibió el cambio de color, mientras que la aplicación de 600 nL L^{-1} de 1-MCP, se mantuvo la tonalidad verde hasta 120 días de almacenamiento en frío y 7 días a 20°C (Calvo y Sozzi, 2009). Lo anterior puede explicar el comportamiento de los frutos de lulo, en donde aquellos tratados con $1 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos presentaron el mayor cambio de color frente a los frutos tratados con dosis intermedias y bajas y el control.

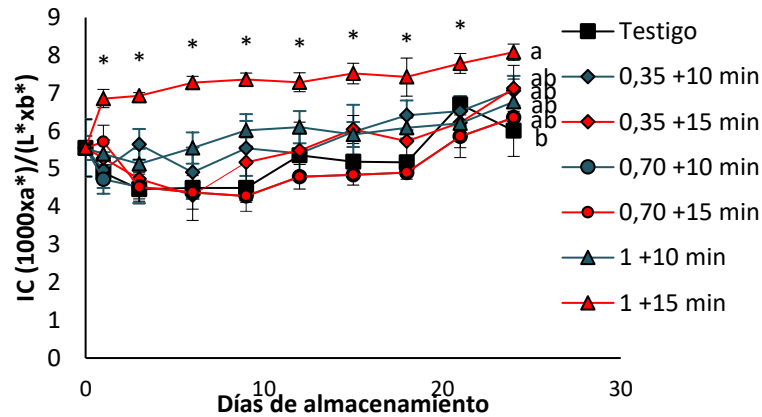


Figura 3-5: Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre el índice de color de frutos de lulo. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4)

Firmeza: La firmeza presentó una reducción constante durante todo el periodo de almacenamiento tanto frutos tratados con 1-MCP, como en los frutos control. La mayor retención de firmeza se observó en los frutos de lulo tratados con $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos con un valor de $41,97 \pm 3,59 \text{ N}$, frente al tratamiento control cuyo valor fue de $23,93 \pm 0,77 \text{ N}$ (Figura 3.6). Los cambios en la pared celular y la lámina media dados por la degradación de la pectina por acción de las enzimas poligalacturonasa, pectinmetilesterasa, durante la maduración generan en parte la pérdida de la firmeza de los frutos (Wei et al., 2010). Se sabe que del conjunto de genes relacionados con la degradación de la pectina, el gen *MdPG1* es regulado por el etileno y está implicado directamente en los cambios de textura y firmeza de los frutos, por lo que su acción es drásticamente restringida por el 1-MCP, como se ha observado en frutos de manzana (Win et al., 2021). También se ha reportado la reducción de la pérdida de firmeza en frutos de uchuva tratados con $0.2 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP (Valdenegro et al., 2012) y frutos de tomate tratada con $50 \mu\text{g L}^{-1}$ (Choi et al., 2008). Dados los resultados obtenidos y los reportes del comportamiento de la firmeza en frutos tratados con 1-MCP durante su almacenamiento en frío, es pertinente concluir que la combinación de ambas tecnologías puede tener un efecto favorecedor en la conservación de la firmeza del fruto de lulo.

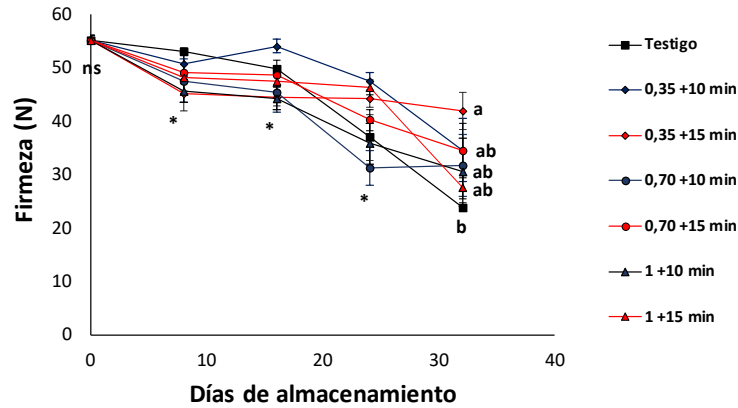


Figura 3-6 Efecto del 1-MCP y la temperatura de almacenamiento (5°C) sobre la firmeza de frutos de lulo. * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican el error (n=4)

Solidos solubles totales (SST): Los SST aumentaron paulatinamente durante el tiempo de almacenamiento. La mayor concentración de SST se presentó al día 32 de almacenamiento para el tratamiento de $0,70 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos con una concentración de 9,18% (Tabla 3-1). En general los frutos tratados con 1-MCP obtuvieron valores similares al control durante el almacenamiento. La hidrólisis del almidón a azúcares solubles es el proceso por el cual se incrementa la concentración de SST en los frutos (Chai et al., 2021). El incremento en la concentración de azúcares durante la maduración es uno de los procesos que se presume está regulado por el etileno por lo que su concentración puede ser mitigada en presencia de 1-MCP (Nordey et al., 2016). Los resultados muestran un leve aumento en la concentración de SST en los frutos de lulo, lo cual también se ha observado en frutos de uchuva con $0,2 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP (Valdenegro et al., 2012), frutos de durian tratadas con $500 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP (Thongkum et al., 2021) y frutos de kiwi tratados con $1 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP (Huang et al., 2019).

Tabla 3-1. Solidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH de frutos de lulo tratados con 1-MCP y almacenados a 5°C.

Parámetro	ddc	Dosis de 1-MCP (mg L^{-1}) y tiempos de inmersión						
		0	0,35 +10 min	0,35 +15 min	0,70 +10 min	0,70 +15 min	1 +10 min	1 +15 min
SST	0	8,40 a	8,30 a	7,2 a	7,3 a	7,8 a	7,6 a	8,1 a
	8	7,94 a	8,00 a	7,76 a	7,8 a	7,56 a	8,14 a	7,66 a
	16	7,36 a	8,06 a	8,18 a	7,66 a	8,26 a	8,56 a	7,22 a
	24	8,86 a	8,78 a	7,82 a	8,44 a	8,68 a	9,22 a	8,24 a
	32	8,36 a	9,14 a	8,00 a	9,18 a	8,00 a	8,14 a	8,96 a

	0	2,8 a	2,79 a	2,71 a	2,8 a	2,82 a	2,8 a	2,82 a
	8	3,29 a	3,26 a	3,13 a	3,24 a	3,33 a	3,37 a	3,09 a
ATT	16	3,40 a	3,12 a	3,11 a	3,04 a	3,04 a	3,22 a	3,12 a
	24	3,33 a	3,26 a	3,12 a	3,39 a	3,30 a	3,23 a	3,51 a
	32	2,94 a	3,46 a	2,76 a	3,24 a	3,33 a	3,12 a	3,37 a
	0	3,00 a	2,97 a	2,65 a	2,60 a	2,76 a	2,71 a	2,87 a
	8	2,51 a	2,26 a	2,48 a	2,39 a	2,26 a	2,26 a	2,49 a
RM	16	2,17 a	2,60 a	2,61 a	2,53 a	2,71 a	2,65 a	2,30 a
	24	2,67 a	2,69 a	2,50 a	2,49 a	2,62 a	2,85 a	2,36 a
	32	2,74 a	2,64 a	2,95 a	2,83 a	2,39 a	2,60 a	2,66 a
	0	3,16 a	3,26 a	3,49 a	3,82 a	3,48 a	3,32 a	3,31 a
	8	3,28 a	3,57 a	3,23 a	3,46 a	3,32 a	3,20 a	3,20 a
pH	16	3,34 a	3,34 a	3,79 a	3,51 a	3,47 a	3,43 a	3,42 a
	24	3,32 a	3,41 a	3,32 a	3,33 a	3,27 a	3,41 a	3,31 a
	32	3,31 a	3,33 a	3,41 a	3,34 a	3,28 a	3,36 a	3,27 a

Letras iguales no presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Acidez total titulable: No se presentaron diferencias durante el almacenamiento. Los frutos de lulo tratados con $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos presentaron el mayor porcentaje en la concentración de ácidos con un porcentaje de 3,37% a los 32 días de almacenamiento, frente a los frutos control los cuales registraron un 2,94% hacia el final del tiempo de almacenamiento (Tabla 3-1). Los ácidos orgánicos son utilizados como sustratos los procesos de respiración y transpiración del fruto (Wang et al., 2021), al observar los resultados de la tasa respiratoria en los frutos de lulo almacenados a 5°C , estos se mantuvieron con valores inferiores a los almacenados a 18°C lo que evidencia el efecto del 1-MCP en los frutos al ser afectados por el tratamiento con 1-MCP, lo que puede explicar el por qué no se presentó una reducción en la concentración de ácidos. Resultados similares se reportaron en frutos de kiwi en donde la aplicación de $0,5 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP retrasó la disminución de la acidez titulable (Chai et al., 2021) y melocotón en donde la aplicación de $1,5 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP mantuvo los niveles de acidez (Zhang et al., 2022).

Relación de madurez: Los resultados no presentaron diferencias significativas (Tabla 3-1). La relación SST/ATT es un indicador del equilibrio entre el contenido de azúcares y ácidos titulables, los cuales están involucrados con la producción del sabor y el aroma del fruto (You et al., 2022). Dados los resultados es posible que las dosis y/o tiempos de inmersión no tengan un efecto en la RM, lo que permite almacenar los frutos por un tiempo más prolongado, como se observó en frutos de uchuva tratados con $1,0 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP por 12 horas (Cuaspud et al., 2019).

pH: El pH no presentó cambios significativos. En general los valores de pH se mantuvieron constantes durante el tiempo de almacenamiento. Los valores oscilaron entre 2,28 y 2,95 para el tratamiento de $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos, siendo el valor más alto para los frutos tratados con 1-MCP (Tabla 3-1). Por lo general los valores de pH de los frutos poscosecha tienden a aumentar y la acidez titulable tienden a disminuir, sin embargo, el comportamiento encontrado en los frutos de lulo puede ser atribuido al efecto del 1-MCP sobre la actividad metabólica natural del proceso de maduración del fruto (Rangel et al., 2009).

Azúcares reductores y ácidos orgánicos: Durante la fase de almacenamiento se presentaron diferencias significativas en la concentración de azúcares y ácido ascórbico. La sacarosa registró el mayor contenido en el tratamiento $0,70 \mu\text{g L}^{-1} + 15 \text{ min}$ con un valor de $20,45 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ de fruto a los 8 ddc. La glucosa con un valor de $4,25 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ de fruto en los frutos almacenados a $1,0 \text{ mg L}^{-1} + 10 \text{ min}$ y la fructosa con $12,63 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ de fruto en los frutos control, registraron las mayores concentraciones (Table 3-2). En general la aplicación de 1-MCP incrementó el contenido de la sacarosa, pero redujo la glucosa y fructosa. De acuerdo con Lwin y Lee, (2021), la aplicación de 1-MCP durante la poscosecha retrasa la degradación de la sacarosa al incrementar la actividad de las invertasas ácidas y neutras y la reducción de la síntesis de SS y la sacarosa fosfato sintasa.

Para el ácido ascórbico la mayor concentración se observó en los lulos tratados con $0,35 \mu\text{g L}^{-1} + 15 \text{ min}$. La reducción típica del ácido ascórbico durante el almacenamiento se vio ralentizada por el 1-MCP, lo que sugiere de acuerdo a Chiriboga et al. (2014) que la aplicación del 1-MCP indistintamente el tiempo de inmersión, genera un aumento de la capacidad antioxidante, del fruto, lo cual podría disminuir la senescencia.

Tabla 3-2 Cambios en los azúcares reductores (sacarosa, glucosa, fructosa) y ácido ascórbico de frutos de lulo tratados con 1-MCP y almacenados a 5°C .

Parámetro ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de fruto)	Fase	Día de medición	Dosis de 1-MCP (mg L^{-1}) y tiempos de inmersión							
			Control	0,35 +10 min	0,35 +15 min	0,70+10 min	0,70 +15 min	1,0 + 10 min	1,0 + 15 min	
Ac. Ascórbico	Almacena miento	1	0,015 a	0,015 a	0,015 a	0,015 a	0,015 a	0,015 a	0,015 a	
		8	0,015 a	0,012 a	0,016 a	0,012 a	0,017 a	0,015 a	0,014 a	
		16	0,011 a	0,011 a	0,011 a	0,010 a	0,015 a	0,013 a	0,010 a	
		24	0,010 a	0,011 a	0,011 a	0,012 a	0,012 a	0,009 a	0,012 a	
		32	0,023 a	0,011 b	0,028 a	0,013 b	0,017 b	0,009 b	0,019 b	
	Anaquel	1	0,024 ab	0,015 b	0,03 a	0,015 b	0,017 b	0,011 b	0,022 ab	
		8	0,025 ab	0,017 b	0,032 a	0,016 b	0,019 b	0,011 b	0,022 ab	
	Sacarosa		1	12,04 a	2,64 b	11,02 a	3,11 b	3,57 b	4,21 b	3,9 b

Glucosa	Almacena miento	8	2,06 c	10,19 b	5,5 c	11,82 b	20,45 a	5,34 c	3,64 c	
		16	17,79 a	15,89 a	18,47 a	6,9 b	7,09 b	6,39 b	3,37 c	
		24	14,44 a	12,81 ab	16,7 a	6,73 b	8,01 b	17,29 a	16,11 a	
		32	15,02 a	9,85 b	12,79 ab	11,94 ab	16,7 a	13,43 ab	17,16 a	
	Anaquel	1	18,69 ab	22,12 a	17,55 ab	7,01 b	16,9 ab	15,2 ab	3,25 c	
		8	13,51 b	11,57 b	15,87 ab	9,25 b	20,3 a	16,01 ab	3,33 c	
	Almacena miento	1	0,63 b	0,86 b	0,65 b	0,57 b	2,98 a	2,85 a	1,03 ab	
		8	0,71 b	0,74 b	0,83 b	0,64 b	3,03 a	4,27 a	0,9 b	
		16	1,91 a	0,79 b	1,48 a	0,68 b	0,95 b	0,74 b	0,81 b	
		24	1,34 ab	2,21 a	0,91 b	0,64 b	0,71 b	1,04 ab	0,67 b	
		32	1,26 ab	0,85 b	2,61 a	1,37 ab	2,94 a	1,85 ab	2,71 a	
	Anaquel	1	1,74 a	0,35 b	1,99 a	0,65 b	0,59 b	0,36 b	0,71 b	
		8	0,98 a	0,66 b	0,94 a	0,65 b	0,45 b	1,04 a	0,82 ab	
	Fructosa	Almacena miento	1	6,30 a	6,12 a	6,41 a	1,94 b	6,55 a	4,10 ab	4,36 ab
			8	9,55 a	2,59 b	5,79 ab	2,33 b	6,49 ab	3,55 b	3,33 b
			16	4,22 a	2,61 b	3,81 ab	3,00 ab	2,53 b	2,92 ab	2,25 b
24			11,1 a	5,00 ab	2,08 b	2,94 ab	3,99 ab	3,18 ab	3,51 ab	
32			12,63 a	6,42 ab	8,37 ab	7,64 ab	10,77 a	5,4 b	6,57 ab	
Anaquel		1	4,65 ab	6,79 a	3,58 ab	2,99 ab	3,02 ab	2,16 b	2,24 b	
		8	6,11 ab	2,44 b	2,1 b	3,01 b	7,99 a	3,2 b	3,32 b	

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Fase de anaquel

Intensidad respiratoria: La producción de CO₂ presentó diferencias significativas durante toda la fase de anaquel. Los frutos de lulo almacenados inicialmente a 5°C con las dosis de 0,35 µg L⁻¹ 1-MCP + 10 minutos de inmersión y 0,70 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión con un valor de 493,86cm³kg⁻¹d⁻¹ y 454,62cm³kg⁻¹d⁻¹, respectivamente, fueron los tratamientos con mayor producción de CO₂ (Figura 3.1). El mismo comportamiento se presentó en el flujo de O₂ en donde los frutos con 0,35 µg L⁻¹ 1-MCP + 10 minutos de inmersión alcanzo un valor de 497,72 cm³kg⁻¹d⁻¹ y 0,70 mg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos presento un flujo de 440,03 cm³kg⁻¹d⁻¹ (Figura 3.2).

Dado el comportamiento de los frutos de lulo durante la fase de anaquel, es evidente que el almacenamiento en frío durante la poscosecha combinado con 1-MCP reducen la tasa respiratoria y prolongan la vida útil del fruto, sin embargo, el rápido aumento en la temperatura generó un incremento abrupto en la velocidad de respiración como respuesta al aumento en la actividad metabólica del fruto (Ortiz-Franco et al., 2016). Resultados similares se han reportado en frutos de

melón (Le Nguyen et al., 2019) y kiwi (Chai et al., 2021). En cuanto a las dosis de 1-MCP, según se ha demostrado que, dependiendo de la especie, el 1-MCP puede disminuir, incrementar o no tener efecto sobre la tasa respiratoria del fruto (Watkins, 2008). En el caso de los frutos de lulo tratados con 1-MCP se pudo observar un incremento de la tasa respiratoria durante el anaquel, lo mismo se ha reportado Molano-Díaz et al., (2022), en donde los frutos de lulo tratados con $560 \mu\text{g L}^{-1}$ de 1-MCP presentaron una mayor tasa de respiración que los frutos tratados con $280 \mu\text{g L}^{-1}$ de 1-MCP y el testigo, lo cual puede atribuirse a que el efecto del 1-MCP depende de la especie del producto en el cual puede reducir, aumentar o no afectar la tasa (Watkins, 2008).

Etileno: La tasa de producción de etileno presentó diferencias significativas durante toda la fase de anaquel. La mayor tasa de producción de etileno se observó en los frutos control con $0,024 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ frente al tratamiento de $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 10 minutos que reportó $0,001 \text{ cm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, siendo la concentración de producción de etileno más baja (Figura 3.3 A (b)). La producción de etileno se mantuvo cerca al límite cero durante el almacenamiento, sin embargo, se presentó un aumento en la producción de etileno durante la fase de anaquel, este comportamiento se ha observado en frutos climatéricos como ciruela (Pan et al., 2016), en donde, durante el almacenamiento en frío la producción de etileno fue suprimida casi por completo, pero se incrementó de forma drástica al ser almacenada a temperatura ambiente en especial en frutos sin aplicaciones de 1-MCP. Este comportamiento puede explicarse, dado que el modo de acción del 1-MCP es la intercepción de los receptores del etileno lo cual inhibe el proceso natural de maduración del fruto, sin embargo, dada la propiedad de síntesis autocatalítica del etileno los receptores que no han sido expuestos al 1-MCP, pueden ser ocupados por las moléculas de etileno, lo cual permite continuar con el proceso de maduración hasta llegar a la senescencia (Chiriboga et al., 2014).

Pérdida de peso (%): Durante el tiempo de anaquel todos los tratamientos presentaron un porcentaje de pérdida de peso similar a la presentada durante el almacenamiento, la menor pérdida de peso de presentó en los frutos tratados con $1 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos (Figura 3.7). Frente a este parámetro, son pocos los reportes que describen el efecto del 1-MCP en los frutos durante la fase de anaquel. Sin embargo, en frutos de tomate (Ortiz et al., 2013) y ciruelas (Velardo-Micharet et al., 2017) se ha observado un incremento en la pérdida de peso por efecto del 1-MCP al incrementar el período de poscosecha. Si bien la pérdida de peso no está relacionada directamente con la producción de etileno (Valero et al., 2016), si está estrechamente relacionada con la actividad respiratoria, la

cual contribuye a la degradación del tejido y se genera una mayor pérdida de agua del fruto (Kader, 2002).

Dado que, en condiciones de alta humedad y temperatura, los procesos de respiración y transpiración intervienen en gran medida en la pérdida de peso del fruto (Lufu et al., 2019), el control de la temperatura es fundamental para evitar una reducción que afecte la calidad del producto. La susceptibilidad a los cambios de temperatura y humedad durante el almacenamiento varío dependiendo del producto. De acuerdo con Valero et al. (2016), frutos como kiwis y manzanas presentan una baja pérdida de agua durante el almacenamiento, contrario a lo que ocurre en frutos como mangos, guayabas, ciruela entre otros. Dados los resultados obtenidos, es probable que los frutos de lulo hagan parte del grupo de mayor susceptibilidad a los cambios drásticos de temperatura y humedad durante el almacenamiento, por lo tanto, el mantener las condiciones de almacenamiento durante todo el periodo poscosecha para garantizar su calidad el mayor tiempo posible.

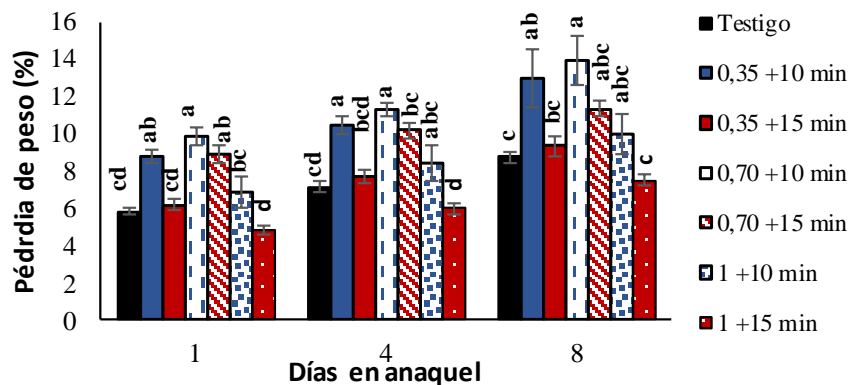


Figura 3-7: Cambios en la pérdida de peso de frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar (n=4)

Firmeza: Se observó una reducción continua de la firmeza durante toda la fase de anaquel. La mayor pérdida de firmeza se presentó en los frutos sometidos a 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos (Figura 3.8). La principal causa de la disminución de la firmeza del fruto es el metabolismo de los polisacáridos de la pared celular y la lámina media, el cual puede ser causado por la actividad de las enzimas poligalacturonasa, pectinmetilesterasa, CMCasa, β -Glu, β -Gal, α -Gal, α -Af, α -Man (Ji et al., 2021). Frente a la conservación de la firmeza durante la poscosecha, existen reportes en frutos de ciruelas (Lin et al., 2018), peras (Chen et al., 2017) y aguacates (Defilippi et al., 2018),

donde el 1-MCP impide el desmontaje de los polisacáridos de la pared celular al regular la biosíntesis y la acción del etileno. Se ha observado en frutos de albaricoque en donde 1-MCP retrasó efectivamente la reducción de la pérdida de firmeza de los frutos durante la etapa de shelf life al inhibir drásticamente la expresión del gen *PaPGI* (Hou et al., 2019). El mismo comportamiento se presentó en frutos de ciruela luego de 50 días de almacenamiento y 5 días de anaquel, en donde los frutos tratados con 1-MCP presento una mayor firmeza que los frutos almacenados a temperatura ambiente (Velardo-Micharet et al., 2017). A partir de los diferentes estudios y los resultados obtenidos es notoria la importancia de la refrigeración y la aplicación de 1-MCP para mantener la firmeza de los frutos de los frutos de lulo.

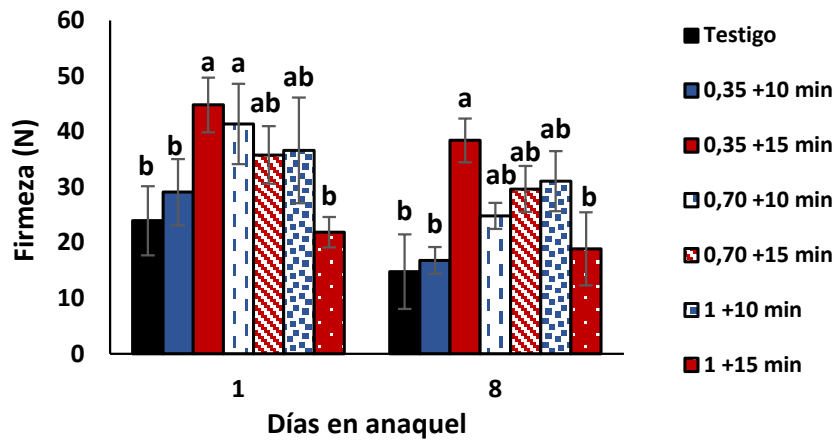


Figura 3-8: Cambios en la firmeza de frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Índice de color (IC): Se presentó un cambio del color verde a amarillo durante toda la fase anaquel, pasando de 6,0 a 7,5 en frutos control y en promedio en frutos tratados con 1-MCP de 6,9 a 8,1 (figura 3.9). El desarrollo del color en el fruto de lulo se debe principalmente a la síntesis de β -caroteno, como respuesta a la degradación de la clorofila debido a un aumento en la concentración de etileno (Andrade-Cuvi et al., 2015). Blankenship y Dole (2003) mencionan que el 1-MCP inhibe la estimulación del etileno sobre la degradación de la clorofila, lo cual puede intensificarse al almacenar los frutos a bajas temperaturas. Durante la fase de anaquel, la aplicación de 1-MCP ralentizó el cambio de color de verde a naranja en los frutos de lulo, conservando la calidad visual del fruto. En frutos de melón la aplicación de 1mgL^{-1} de 1-MCP retrasó el amarillamiento del fruto

durante el anaquel (Agehara et al., 2018) y frutos de albaricoque el cambio de color fue suprimido por la aplicación de $1 \mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP (Fan et al., 2018).

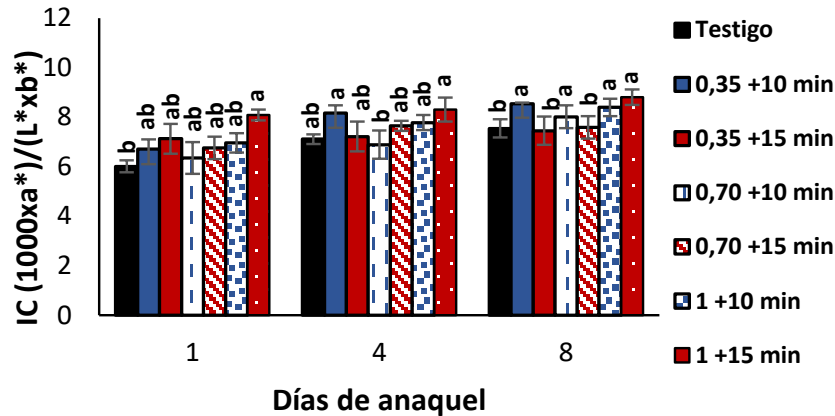


Figura 3-9: Cambios en el índice de color en frutos de lulo durante el tiempo de anaquel después de ser almacenados durante 30 días a 5°C y diferentes dosis de 1-MCP. Letras diferentes: presentan diferencias estadísticas significativas. Letras iguales no presentan diferencias significativas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=4$)

Sólidos solubles totales: Se observó un leve incremento hacia el final de la fase de anaquel para todos los frutos. Hacia el final de la etapa de anaquel, la mayor concentración de grados Brix se presentó en los frutos de lulo tratados con $0,70 \mu\text{g L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos y la menor concentración se observó en los frutos de lulo testigo con valores de 9,40% y 7,88 % (Tabla 3-3). De acuerdo con Serradilla et al., (2019) un leve incremento de los SST es el resultado de la deshidratación del fruto. Los resultados obtenidos son similares a los reportados en pera en donde el incremento de los SST fue mínimo en los frutos tratados con $1 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP (Lwin et al., 2021). De igual forma en frutos de albaricoque, donde los SST de los frutos tratados con 1-MCP aumentaron levemente y en los frutos control disminuyeron al final de la fase de anaquel (Hou et al., 2019). Los resultados indican que los tratamientos de 1-MCP conservó la concentración de SST, al retrasar la maduración del fruto de lulo durante la fase de almacenamiento y mantuvo la calidad de los frutos en la etapa de anaquel.

Tabla 3-3 Sólidos solubles totales (SST), acidez total titulable (ATT), relación de madurez (RM), pH de frutos de lulo tratados con 1-MCP en diferentes tipos de inmersión durante la fase de anaquel.

	Días de Anaquel	Dosis de 1-MCP ($\mu\text{g L}^{-1}$) y tiempos de inmersión						
		0	0,35 +10 min	0,35 +15 min	0,70 +10 min	0,70 +15 min	1 +10 min	1 +15 min
SST	1	8,17 b	9,75 a	8,45 ab	9,18 ab	8,32 ab	8,47 ab	8,96 ab
	8	7,86 b	9,05 ab	8,62 ab	9,22 ab	9,4 a	8,46 ab	8,75 ab

ATT	1	2,94 a	3,46 a	3,02 a	3,24 a	3,33 a	3,12 a	3,37 a
	8	3,14 a	3,01 a	3,10 a	3,25 a	3,22 a	3,01 a	3,04 a
RM	1	2,85 ab	2,64 ab	2,95 a	2,83 ab	2,39 b	2,60 ab	2,66 ab
	8	2,36 b	2,98 a	2,73 ab	2,71 ab	2,75 ab	2,95 ab	2,74 ab
pH	1	3,31 a	3,33 a	3,41 a	3,34 a	3,28 a	3,36 a	3,27 a
	8	3,29 a	3,38 a	3,28 a	3,41 a	3,29 a	3,35 a	3,43 a

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Acidez total titulable: Se presentó una disminución leve de la acidez en todos los tratamientos sin diferencias estadísticas. El porcentaje promedio de ATT fue de 3,11% hacia el final del anaquel (Tabla 3-3.). Este comportamiento puede ser causado a la disminución en la actividad metabólica relacionada con velocidad de maduración de los frutos por efecto del 1-MCP (Wang et al., 2020). Resultados similares se han reportado en frutos de kiwi en donde los frutos tratados con 1-MCP presentaron un mayor porcentaje de acidez que los frutos testigo (Chai et al., 2021). En peras asiática 'Wonhwang' (Lwin et al., 2021b) la aplicación de $1\mu\text{L L}^{-1}$ presentó una concentración de acidez similar a los frutos no tratados.

Relación de madurez: La RM incrementó hacia el final de la fase de anaquel en los frutos tratados con 1-MCP. Los frutos tratados con $0,35\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 15 minutos registraron un valor de 2,98 el cual fue la mayor RM (Tabla 3-3.). El incremento de la RM está relacionado con el aumento en la tasa respiratoria del fruto, una reducción de los ácidos orgánicos y representa la calidad del fruto (You et al., 2022). Nuestros resultados pueden ser atribuidos al leve aumento en los sólidos solubles, dado que la reducción de los ácidos orgánicos no fue significativa hacia el final de la etapa de anaquel. Resultados similares se presentaron en frutos de uchuva en donde los frutos tratados con $0,2\mu\text{L L}^{-1}$ de 1-MCP presentaron un leve aumento en la relación de madurez (Valdenegro et al. (2012). En frutos de ciruela, Velardo-Micharet et al. (2017) mencionan un mayor grado de aceptación del fruto como resultado de una mayor RM obtenida por una concentración de SST más alta respecto a la acidez. Es posible deducir, dados los resultados, que el efecto del 1-MCP sobre la RM en los frutos de lulo, podría garantizar la calidad de consumo aceptable por parte del consumidor, al conservar el sabor dulce sin perder la acidez característica del fruto de lulo.

pH: Los valores de pH oscilaron entre 3,2 y 3,4 (Tabla 3-3.). Los resultados indican que el 1-MCP y el cambio de temperatura de almacenamiento no tienen un efecto sobre el cambio de pH durante la fase de anaquel. En general, la mayor variación del pH se presenta durante la maduración del fruto, sin embargo, durante la poscosecha tiende a ser más estable (Cuaspud et al., 2019). Resultados similares se reportaron en frutos de mango, en donde el pH no presentó cambios significativos por efecto del 1-MCP (García-Robles et al., 2018).

Azúcares reductores y ácidos orgánicos: En general, los contenidos de sacarosa fueron más altos frente a los contenidos de fructosa y glucosa en los frutos tratados con 1-MCP. El mayor contenido de sacarosa se registró en los frutos tratados con $0,35 \mu\text{g L}^{-1}$ +10 min con un valor de $22,12 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de fruto. En cuanto a la glucosa la mayor concentración se presentó en los frutos testigo con $1,74 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de fruto y la fructosa con $6,79 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de fruto en los frutos tratados con $0,35 \text{ mg L}^{-1}$ +10 min registro la mayor concentración. El ácido ascórbico disminuyó levemente durante el tiempo de anaquel, independientemente del tratamiento con 1-MCP (Tabla 3-2). De acuerdo con (Lwin et al., 2021), el 1-MCP reduce la tasa respiratoria lo cual afecta la respuesta de los carbohidratos como la sacarosa, glucosa y fructosa de los frutos durante el anaquel. De igual forma, la disminución del ácido ascórbico contribuye a la inhibición del pardeamiento del fruto durante el anaquel, manteniendo su calidad visual.

3.5 Conclusiones y recomendaciones

- Durante la fase de almacenamiento la menor tasa de producción de CO₂ y producción de etileno, fue registrada en los frutos tratados con 35 µg L⁻¹ 1-MCP + 10 minutos de inmersión. El menor consumo de O₂, la reducción pérdida de firmeza, pH y ácido ascórbico, se presentó en los frutos tratados con 35 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión. El porcentaje de pérdida de peso y ATT fue menor en los frutos de lulo tratados con 1 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión. Los azúcares reductores e índice de color presentaron los cambios más representativos en los frutos tratados con 0,70 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión.
- Durante la fase de anaquel, la menor tasa respiratoria, producción de etileno y contenido de sacarosa se presentó en los frutos tratados con 35 µg L⁻¹ 1-MCP + 10 minutos de inmersión. El menor porcentaje de pérdida de peso, así como la menor variación en el índice de color y el ácido ascórbico se registró en los frutos tratados con 1 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión.
- Dados los resultados obtenidos, los frutos de lulo tratados con 0,35 µg L⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión afectaron de forma significativas las principales características de calidad en ambas fases, lo que permite determinar que es la dosis adecuada para la conservación de la calidad durante la fase poscosecha y de anaquel del fruto.

3.6 Referencias

- Agehara, S., Crosby, K., Holcroft, D and Leskovar, D. (2018). Optimizing 1-methylcyclopropene concentration and immersion time to extend shelf life of muskmelon (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus*) fruit. *Scientia Horticulturae*. 230:117–125. Doi: 10.1016/j.scienta.2017.09.021
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Guijarro-Fuentes, M And Concellón, A. (2015). Caracterización de la naranjilla (*solanum quitoense*) común en tres estados de madurez. *Rev. Iber. Tecnología Postcosecha*. 16(2):215-221
- Andrade-Cuvi, M.J. (2018). Calidad poscosecha de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam) y alternativas tecnológicas para retrasar el deterioro. Elaboración de un producto panificado enriquecido con naranjilla. [Tesis Doctoral] Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata, Argentina
- Balaguera-López, H., Martínez-Cárdenas, C and Herrera-Arévalo, A. (2016). Comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.): efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno. *Bioagro* 28(1): 21-28
- Balaguera-López, H., Espinal-Ruiz, M., Rodríguez-Nieto, Y., Herrera-Arévalo, A and Zacarías, L. (2021). 1-Methylcyclopropene inhibits ethylene perception and biosynthesis: A theoretical and experimental study on cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Postharvest Biology and Technology*. 174:111467. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111467
- Bapat, V., Trivedi, P., Ghosh, A., Sane, V., Ganapathi, T and Nath, P. (2010). Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. *Biotechnology Advances*. 28: 94–107. Doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.10.002
- Blankenship, S and Dole, J. (2003). 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biology and Technology*. 28:1-25. Doi: 10.1016/S0925-5214(02)00246-6
- Brumos, J. (2021). Gene regulation in climacteric fruit ripening. *Current Opinion in Plant Biology*. 63:102042. Doi: 10.1016/j.pbi.2021.102042 1
- Calvo, G and Sozzi G. (2009). Effectiveness of 1-MCP treatments on “Bartlett” pears as influenced by the cooling method and the bin material. *Postharvest Biology and Technology* 51: 49-55.

- Chai, J., Wang, Y., Liu, Y., Yong, K and Liu, Z. (2021). 1-MCP extends the shelf life of ready-to-eat 'Hayward' and 'Qihong' kiwifruit stored at room temperature. *Scientia Horticulturae*. 289:110437. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110437
- Chen, Y., Sun, J., Lin, H., Hung, Y., Zhang, S., Lin, Y and Lin, T. (2017). Paperbased 1-MCP treatment suppresses cell wall metabolism and delays softening of Huanghua pears during storage. *J. Sci. Food Agric.* 97, 2547–2552. Doi: 10.1002/jsfa.8072
- Chiriboga, M., Schotsmans, W., Larrigaudière, C and Recasens I. (2014). Últimos avances en la aplicación del 1-metilciclopropeno (1-MCP) en peras. *ITEA.110* (1): 34-48. Doi: 10.12706/itea.2014.003
- Choi, S and Huber, D. (2008). Influence of aqueous 1-methylcyclopropene concentration, immersion duration, and solution longevity on the postharvest ripening of breaker-turning tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 49:147–154. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.01.003
- Cuaspad, S., Moreno, C., Andrade-Cuvi, M., Alcívar, C and Guerrero, M. (2019). Efecto de la aplicación de 1-metilciclopropeno (1-MCP) sobre la calidad poscosecha de uvilla orgánica (*Physalis peruviana*). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 20 (1): 13-21
- Defilippi, B., Ejsmentewicz, T., Covarrubias, M., Gudenschwager, O and Campos-Vargas, R. (2018). Changes in cell wall pectins and their relation to postharvest mesocarp softening of 'Hass' avocados (*Persea americana* Mill.). *Plant Physiol. Biochem.* 128, 142–151. Doi: 10.1016/j.plaphy.2018.05.018.
- Ding, R., Che, X., Liu, H., Du, B., Dong, K and Zhang, Y. (2020). Effects of 1-MCP and storage temperature on transcription of mevalonate (MVA) enzyme genes of α -farnesene in 'White Winter Pearmain' apples fruit. *Scientia Horticulturae*. 259:108841. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108841
- Fan, X., Shu, C., Zhao, K., Wang, X., Cao, J and Jiang, W. (2018). Regulation of apricot ripening and softening process during shelf life by post-storage treatments of exogenous ethylene and 1-methylcyclopropene. *Scientia Horticulturae*. 232: 63-70. Doi: 10.1016/j.scienta.2017.12.061
- García-Robles, J., Mercado-Ruiz, J and Báez-Sañudo, B. (2018). Calidad y vida de anaquel de mango (*Mangifera indica* L.) tratado con 1-MCP y recubrimiento comestible. *Revista*

- Iberoamericana de Tecnología Postcosecha.19 (2). En: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81357541006>
- Huang, H., Guo, L., Wang, L., Wang, H., Ma, S., Jiang, Y and Qu, X. (2019). 1-Methylcyclopropene (1-MCP) slows ripening of kiwifruit and affects energy status, membrane fatty acid contents and cell membrane integrity. *Postharvest Biology and Technology*. 156: 110941. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.110941
- Hou, Y., Wu, F., Zhao, Y., Shi, L and Zhu, X. (2019). Cloning and expression analysis of polygalacturonase and pectin methylesterase genes during softening in apricot (*Prunus armeniaca* L.) fruit. *Scientia Horticulturae*. 256: 108607. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108607
- Ji, Y., Hu, W., Li, J., Xiu, Z., Jiang, A., Guan, Y., Yang, X and Feng, K. (2021). Ethanol vapor delays softening of postharvest blueberry by retarding cell wall degradation during cold storage and shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. 177:111538. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111538
- Jong-Seok, S., Sang-Ku, Y and Do-Soon, K. (2018). The effect of 1-(3-phenyl-propyl) cyclopropene versus 1-MCP on the quality and storage life of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 145: 20–26. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.05.021
- Kader, A.A., Arpaia, M.L., (2002). Postharvest handling systems: subtropical fruits. In: Kader, A.A. (Ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*; Third edition, publication number 3311. Regents of the University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, Oakland, CA, pp. 375–384
- Kou, J., Wei, C., Zhao, Z., Guan, J and Wang, W. (2020). Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene treatments on physiological changes and ripening-related gene expression of ‘Mopan’ persimmon fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*.166:111185. Doi: /10.1016/j.postharvbio.2020.111185
- Le Nguyena, L., Zsom, T., Dam, M., Baranyai, L and Hitka, G. (2019). Evaluation of the 1-MCP microbubbles treatment for shelf-life extension for melons. *Postharvest Biology and Technology*. 150: 89–94. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.12.017

- Li, S., Hu, X., Chen, S., Wang, X., Shang, H., Zhou, Y., Dai, J., Xiao, L., Qin, W and Liu, Y. (2022). Synthesis of γ -cyclodextrin metal-organic framework as ethylene absorber for improving postharvest quality of kiwi fruit. *Food Hydrocolloids*. Disponible en línea el 7 de noviembre de 2022. 108294. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.108294
- Lin, Y., Lin, H., Lin, M., Li, H., Yuan, F., Chen, Y and Xiao, J., (2018). Effects of paper containing 1-MCP postharvest treatment on the disassembly of cell wall polysaccharides and softening in Younai plum fruit during storage. *Food Chem.* 264:1-8. Doi: 10.1016/j.foodchem.2018.05.031.
- Lufu, R., Ambaw, A and Opara, U. (2019). The contribution of transpiration and respiration processes in the mass loss of pomegranate fruit (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*. 157:110982. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.110982
- Lv, J., Zhang, M., Bai, L., Han, X., Ge, Y., Wang, W and Li, J. (2020). Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the expression of genes involved in the chlorophyll degradation pathway of apple fruit during storage. *Food Chemistry*. 308: 125707. Doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125707
- Lwin, H., Choi, J., Chun, J., Watkins, C and Lee, J. (2021). 1-Methylcyclopropene treatment alters fruit quality attributes and targeted metabolites in ‘Wonhwang’ pears during shelf life. *Scientia Horticulturae*. 284:110125. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110125
- Lwin, H and Lee, J. (2021) Preharvest 1-methylcyclopropene treatment effects on fruit quality attributes and targeted metabolites in ‘Wonhwang’ pears stored at room temperature after cold storage. *Scientia Horticulturae*. 289:110480. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110480
- Mata, C., Magpantay, J., Hertog, M., Van de Poel, B and Nicolai, B. (2021). Expression and protein levels of ethylene receptors, CTRs and EIN2 during tomato fruit ripening as affected by 1-MCP. *Postharvest Biology and Technology*. 179. 111573. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111573
- Molano-Díaz, J., Reyes-Medina, A and Álvarez-Herrera, J. (2022). El 1-metilciclopropeno y la temperatura de almacenamiento en la poscosecha de lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 20 (2):60-75. Doi: 10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1815

- Netlak, P., Buensanteai, N., Allan, A and Imsabai, W. (2021). Rate of banana fruit ripening depends on genome composition and gene expression of ethylene signaling and ethylene biosynthesis. *Scientia Horticulturae*. 290.110552. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110552
- Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M., Joas, J. (2016). Factors affecting ethylene and carbon dioxide concentrations during ripening: Incidence on final dry matter, total soluble solids content and acidity of mango fruit. *Journal of Plant Physiology*. 196–197: 70–78. Doi: 10.1016/j.jplph.2016.03.008
- Ortiz-Franco, L., Ramírez-Villa, A., Cervantes-Mojica, L., Muy-Rangel, M., Gómez-Lim, M., García-Galindo, H., Sáyago-Ayerdi, S and Montalvo-González, E. (2016). Efecto del 1-Metilciclopropeno en la maduración de mango ataulfo en condición simulada para exportación a Europa. *Rev. Fitotec. Mex.* 39 (3): 305-316.
- Ortiz, C., Mauri, A and Vicente, A. (2013). Use of soy protein based 1-methylcyclopropene-releasing pads to extend the shelf life of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 20: 281–287. Doi: 10.1016/j.ifset.2013.07.004
- Osuna, J., Nolasco, Y., Herrera, J Guzmán, S and Álvarez, A. (2017). Influencia del clima y rugosidad sobre la tolerancia a refrigeración del aguacate ‘Hass’. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 19: 3911-3921. Doi: 10.35196/rfm.2017.2.199-209
- Pan, H., Wang, R., Li, L., Wang, J., Cao, J and Jiang, W. (2016). Manipulation of ripening progress of different plum cultivars during shelf life by post-storage treatments with ethylene and 1-methylcyclopropene. *Scientia Horticulturae*. 198:176–182. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.11.007
- Pereira, M., Sargent, S., Sims, C., Huber, D., Moretti, C and Crane, J. (2013). Aqueous 1-Methylcyclopropene Extends Longevity and Does Not Affect Sensory Acceptability of Guatemalan-West Indian Hybrid Avocado. *HortTechnology*.23(4):468-473. Doi: 10.21273/HORTTECH.23.4.468
- Serradilla, M., Falagána, N., Bohmer, B Terry, L and Alamar, M. (2019). The role of ethylene and 1-MCP in early-season sweet cherry ‘Burlat’ storage life. *Scientia Horticulturae*. 258: 108787. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108787

- Thongkum, M., Imsabai, W., Burns, P., McAtee, P., Schaffer, R., Allan, A and Ketsa, S. (2018). The effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on expression of ethylene receptor genes in durian pulp during ripening. *Plant Physiology and Biochemistry*. 125: 232–238. Doi: 10.1016/j.plaphy.2018.02.004
- Valdenegro, M., Fuentes, L., Herrera, R and Moya-León, M. (2012) Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. *Postharvest Biology and Technology*. 67:110–117. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.12.021
- Valero, D., Guillén, F., Valverde, J., Castillo, S and Serrano, M. (2016). Eco-friendly Technology for postharvest produce quality. Chapter 5. Recent developments of 1-methylcyclopropene (1-mcp) treatments on fruit quality attributes. (Ed) Mohammed Wasim Siddiqui. 194-195p. Doi: 10.1016/B978-0-12-804313-4.00005-0
- Velardo-Micharet, B., Pintado, C., Dupille, C., Ayuso-Yustec, M., Lozano, M. and Bernalte-García, M. (2017). Effect of ripening stage, 1-MCP treatment and different temperature regimes on long term storage of ‘Songold’ Japanese plum. *Scientia Horticulturae*. 214: 233–241. Doi: 10.1016/j.scienta.2016.11.043
- Verde, A., Míguez, J and Gallardo, M. (2023). Melatonin stimulates postharvest ripening of apples by up-regulating gene expression of ethylene synthesis enzymes. *Postharvest Biology and Technology*. 195:112133. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112133
- Wang, H., Wang, J., Mujumdar, A, Jin, X., Liu, Z., Zhang, Y and Xiao, H. (2021). Effects of postharvest ripening on physicochemical properties, microstructure, cell wall polysaccharides contents (pectin, hemicellulose, cellulose) and nanostructure of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Food Hydrocolloids*. 118:106808. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106808
- Wang, Q., Wei, W., Jiang, S., Wang, X., Xu, F., Wang, H and Shao, X. (2020). Flavor development in peach fruit treated with 1-methylcyclopropene during shelf storage. *Food Research International*. 137: 109653. Doi: 10.1016/j.foodres.2020.109653
- Wei, J., Ma, F., Shi, S., Qi, X., Zhu, X., Yuan, J., 2010. Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. *Postharv. Biol. Technol.* 56, 147–154. Doi:10.1016/j.postharvbio.2009.12.003.

- Win, N., Yoo, J., Naing, A., Kwon, J and Kang, I. (2021). 1-Methylcyclopropene (1-MCP) treatment delays modification of cell wall pectin and fruit softening in “Hwangok” and “Picnic” apples during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*. 180: 111599. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111599
- Xiong, Z., Li, H., Liu, Z., Li, X and Gui, D. (2019). Effect of 1-MCP on postharvest quality of French prune during storage at low temperatura. *J Food Process Preserv.* 43:14011. Doi: 10.1111/jfpp.14011
- You, M., Duan, X., Li, X., Luo, L., Zhao, Y., Pan, H., Gong, W., Yang, L., Xiang, Z and Li, G. (2022). Effect of 1-Methylcyclopropene combined with chitosan-coated film on storage quality of passion fruit. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 27:100679. Doi: 10.1016/j.scp.2022.100679
- Zhao, K., Song, H., Wang, Z., Xing, Z., Tian, X., Wang, Q., Meng, L And Xu, X. (2022). Knockdown of Sly-miR164a by short tandem target mimic (STTM) enhanced postharvest chilling tolerance of tomato fruit under low temperature storage. *Postharvest Biology and Technology* 187.111872. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.111872
- Zhang, Y., Ling, J., Zhou, H., Tian, M., Huang, W., Luo, S., Hu, H and Li, P. (2022). 1-Methylcyclopropene counteracts ethylene inhibition of anthocyanin accumulation in peach skin after harvest. *Postharvest Biology and Technology*. 183:111737. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111737
- Zhu, X., Song, Z., Li, Q., Li, J., Chen, W and Li, X. (2020). Physiological and transcriptomic analysis reveals the roles of 1-MCP in the ripening and fruit aroma quality of banana fruit (Fenjiao). *Food Research International*. 130:108968. Doi: 10.1016/j.foodres.2019.108968

4. Evaluación del efecto de 1-Metilciclopropeno (1-MCP) y atmósferas modificadas (AM) en la conservación en poscosecha de frutos de lulo (*Solanum quitoense* L.)

4.1 Resumen

Dentro de los grandes desafíos en la comercialización y conservación de productos hortofrutícolas, se encuentra el mantenimiento de los factores que garantizan la calidad requerida por el consumidor. El fruto de lulo es apetecido por el mercado internacional por los beneficios que aporta a la salud, el cual no está exento de las pérdidas durante la poscosecha. Dentro de las tecnologías de conservación implementadas y cuyos resultados son favorables son las atmósferas modificadas, las cuales establecen un equilibrio entre la concentración de CO₂ y O₂ dentro del empaque. De igual forma, la aplicación de 1-MCP ha dado resultados satisfactorios en la prolongación de la vida útil de frutos y hortalizas. Sin embargo, no existen reportes sobre la conservación de la calidad de frutos de lulo almacenados en atmosfera modificada combinados con 1-MCP son escasos, por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar los cambios fisicoquímicos del fruto de lulo durante la poscosecha, conservados en empaques con atmósfera modificada, tratados con 1-MCP y almacenados a condiciones de refrigeración y a temperatura ambiente. Se seleccionaron frutos de lulo con un grado de madurez 3 sin afectaciones por patógenos o lesiones. Se establecieron 8 tratamientos configurados con y sin presencia de 1-MCP, así como, empaques sellados y abiertos más el control. El análisis del comportamiento de los frutos, mostró que durante el almacenamiento la tasa respiratoria, la producción de etileno, la pérdida de peso, la variación del color y la acidez fueron menores con 5°C/AM/1-MCP, así como, los cambios más significativos en el contenido de azúcares y ácido ascórbico se evidenciaron en estos mismos frutos y los almacenados en 5°C/abierto/1-MCP. Durante el anaquel, los frutos tratados con 5°C/AM/1-MCP y 5°C/abierto/1-MCP presentaron mostraron una menor SST, pH y RM, una tasa respiratoria reducida, mayor retención de la firmeza e índice de color. Lo anterior permite concluir que la aplicación de 1-MCP y atmósferas modificadas permite extender el tiempo de vida útil de los frutos de lulo.

Palabras clave: Empaques; Concentraciones de O₂ y CO₂; producción de etileno; tiempo de vida útil

4.2 Introducción

La tendencia mundial en el consumo de productos tropicales y subtropicales ha venido en aumento dados los beneficios para la salud, lo cual se ha atribuido a su contenido de carotenoides, vitaminas, fibra y polifenoles (Mohan et al., 2020). Se estima que cerca de 1.300 millones de toneladas de alimentos son descartados y el 40% corresponde a frutas y verduras (Jiang et al., 2020). El lulo como fruto tropical presenta múltiples características que lo hacen un producto de gran interés para exportación, como un alto contenido en fibra y ácidos orgánicos, minerales y vitaminas (Forero et al., 2015). Sin embargo, es un gran desafío garantizar una calidad aceptable para el consumidor debido a su condición de fruto altamente perecedero (Forero et al., 2014). Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías de conservación poscosecha que permitan incrementar el uso y/o consumo de productos con altos beneficios en la salud aunados a los beneficios sociales y económicos, son indispensables para un desarrollo agrícola sostenible.

Dentro de las tecnologías de conservación de frutos, la tecnología de envasado en atmósfera modificada (AM) se ha utilizado de forma novedosa con el fin de conservar la calidad de frutas y verduras durante la poscosecha (Perumal et al., 2021). La finalidad de las AM es extender los períodos de almacenamiento del producto al reducir la tasa de respiración, la producción de etileno del producto empacado, así como, minimizar el daño por patógenos (Jiang et al., 2022). Estos cambios en el metabolismo del producto empaquetado se dan al establecer un equilibrio entre la concentración interna de CO₂ y O₂ y el flujo de gases a través de las paredes del empaque (Castellanos et al., 20216). Dentro de los factores que afectan la estabilidad de la atmósfera dentro del empaque se encuentran el área de la superficie, el grado de maduración del fruto, el material del empaque, el grosor del empaque y las condiciones de almacenamiento (Zhao et al., 2020). Se han mostrado los efectos de la tecnología AM en frutos de tomate cherry (Tilahun et al., 2021), uchuva (Garavito et al., 2022) y mango (Perumal et al., 2021).

De igual forma se ha informado sobre los beneficios del 1-metilciclopropeno (1-MCP) para prolongar la vida útil durante el almacenamiento de productos hortofrutícolas. El 1-MCP inhibe la acción y producción autocatalítica del etileno, lo cual retarda la maduración durante la poscosecha y la senescencia del fruto (Zhao et al., 2020). Se ha mencionado el 1-MCP mantiene la firmeza del fruto, reduce la tasa respiratoria, afecta el cambio de color y el contenido de acidez y azúcares y retrasa algunos trastornos fisiológicos (Lwin et al., 2021). Los efectos del 1-MCP se han evaluado

en frutos de uchuva (Balaguera et al., 2021), tomate (Song., et al., 2018), manzanas (Li et al., 2022) y kiwi (Huang et al., 2019).

Sin embargo, los efectos combinados de las AM y el 1-MCP no ha sido evaluado en frutos de lulo, por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar los cambios fisicoquímicos del fruto de lulo durante la poscosecha, conservados en empaques con atmósfera modificada, tratados con 1-MCP y almacenados a condiciones de refrigeración y a temperatura ambiente.

4.3 Materiales y métodos

Material vegetal

Los frutos de lulo fueron recolectados en la finca la Loma ubicada en el municipio de Ramiriquí Boyacá. Los frutos se recolectaron en estado 3 de maduración sin daños mecánicos ni afectaciones por insectos o plagas. El almacenamiento se realizó en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos–ICTA y el procesamiento y toma de datos se realizaron en el laboratorio de Calidad y Poscosecha de productos agrícolas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completo al azar con 8 tratamientos configurados de la siguiente manera: 1) Frutos almacenados a 5°C – AM - 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ +15 minutos de inmersión; 2) 5°C – empaque abierto - 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ +15 minutos de inmersión; 3) 5°C – AM – no aplicación; 4) 5°C – empaque abierto – no aplicación; 5) 23°C –AM- 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ +15 minutos de inmersión; 6) 23°C – empaque abierto - 0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ +15 minutos de inmersión; 7) 23°C – AM – no aplicación; 8) 23°C – empaque abierto – no aplicación. Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones, para un total de 24 UE cada una conformada por 2 frutos. Todos los tratamientos estuvieron bajo condiciones de almacenamiento a 5°C y 23°C.

Evaluación de propiedades de los frutos

Luego de ser seleccionados los frutos de lulo, fueron sumergidos durante 10 minutos en 1-MCP previamente diluido en 2L de agua para obtener la concentración de 0,35mg L^{-1} . Posteriormente, los frutos se colocaron en su respectivo empaque. Se utilizaron bolsas de polietileno PLA 30 * 25cm de largo*ancho, calibre 2mm. Para los tratamientos que requirieron empaques cerrados, las bolsas fueron selladas herméticamente con una empacadora de atmósfera modificada COMEK de 44*42*100 cm de largo*ancho*alto, con una presión de espacio de vacío de 1Mpa. Los frutos de lulo se

almacenaron a 5°C y 80% HR en una cámara de estabilidad climática y vida útil (DIEs) y, los frutos conservados a 23°C se almacenaron en una cámara de humedad memmert HCP50. La extracción de azúcares reductores y ácidos orgánicos se realizó mediante un sistema de HPLC Ultimate 3000 Thermo Scientific equipado con un sistema de procesamiento de datos Chromeleon 7.2, inyector automático con loop de 20 µL, una bomba cuaternaria, un detector UV de onda variable (Thermo scientific DAD) y un detector de IR (Thermo Scientific, RefractoMax 521).

Las evaluaciones se realizaron cada 8 días para las variables no destructivas y destructivas. El porcentaje de O₂ y CO₂ se midió en el espacio entre los frutos de cada bolsa de PLA tanto sellada como abierta, tomando una muestra de gas de 5 cm³ y se determinó con el analizador electrónico de gases PAC CHECK® Model 325 de MOCON. La concentración de etileno se determinó a través cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA), equipado con un detector de ionización de llama (FID, por sus siglas en inglés) y una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm) para lo cual se tomaron se tomó la muestra de gas con una jeringa de 1cm³ de capacidad a través de la superficie del empaque y se inyectó en el cromatógrafo. La acidez total titulable (ATT) se determinó con un titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza). El refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix se utilizó para determinar los sólidos solubles totales (SST). La relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT. El colorímetro digital marca Minolta se utilizó para la determinación del índice de color (IC ecuación 1) a través del sistema de parámetros CIELab L*, a* y b*. La firmeza del fruto (N) se determinó por medio de un Texturómetro digital marca Lloyd LS1 con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus. EL porcentaje de pérdida de peso fue calculado a través de la ecuación 2.

$$IC = ((1000 \times a^*) / (L^* \times b^*)) \quad (1)$$

$$Pérdida de peso (\%) = \left(\frac{(P1 - P2)}{P1} \times 100 \right) \quad (2)$$

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada variable fueron sometidos pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, análisis de varianza y a prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P≤0,05).

4.3.1 Resultados y discusión

Fase de almacenamiento

Tasa respiratoria: se presentaron diferencias significativas en la tasa respiratoria durante todo el almacenamiento. Los frutos de lulo almacenados a 5°C/AM/1-MCP presentaron la mayor concentración molar de CO₂ con un valor de 2,66% en el día 24 de almacenamiento. En cuanto a los frutos almacenados a 23°C/AM/1-MCP registraron un valor de 5,46% en el mismo periodo de tiempo (Figura 5-1 A(a)). Por otra parte, la concentración de O₂ el tratamiento de 5°C/abierto/1-MCP presentó un valor de 20,40% y los frutos almacenados a 23°C/abierto/1-MCP y 23°C/abierto/ presentaron un valor de 20,23%, siendo el porcentaje más alto (Figura 4-1A(a)).

De acuerdo con Castellanos y Herrera (2017), luego de empacar un producto las concentraciones de O₂ y CO₂ se reducen y aumentan, respectivamente, logrando el equilibrio, lo cual disminuye la tasa de respiración y la síntesis de etileno (Islam et al., 2022). Este comportamiento se puede observar en los resultados obtenidos, en donde, en general, en los frutos los tratados con AM las concentraciones de O₂ y CO₂ entre los 16 y 24 dda se estabilizaron antes de iniciar la fase de anaquel. De igual forma, el 1-MCP ha permitido una reducción de la tasa respiratoria durante el almacenamiento en frío (Lwin et al., 2021). En nuestro estudio, la combinación de AM/1-MCP retardó de forma más eficiente la tasa respiratoria que los frutos tratados únicamente con 1-MCP en ambas temperaturas. El mismo efecto se ha reportado en frutos de tomate cherry tratados con 1ppm de 1-MCP + AM (Tilahun et al., 2021) y ciruela en empaque de polietileno 1m³ y 1 μL L⁻¹ de 1-MCP.

A

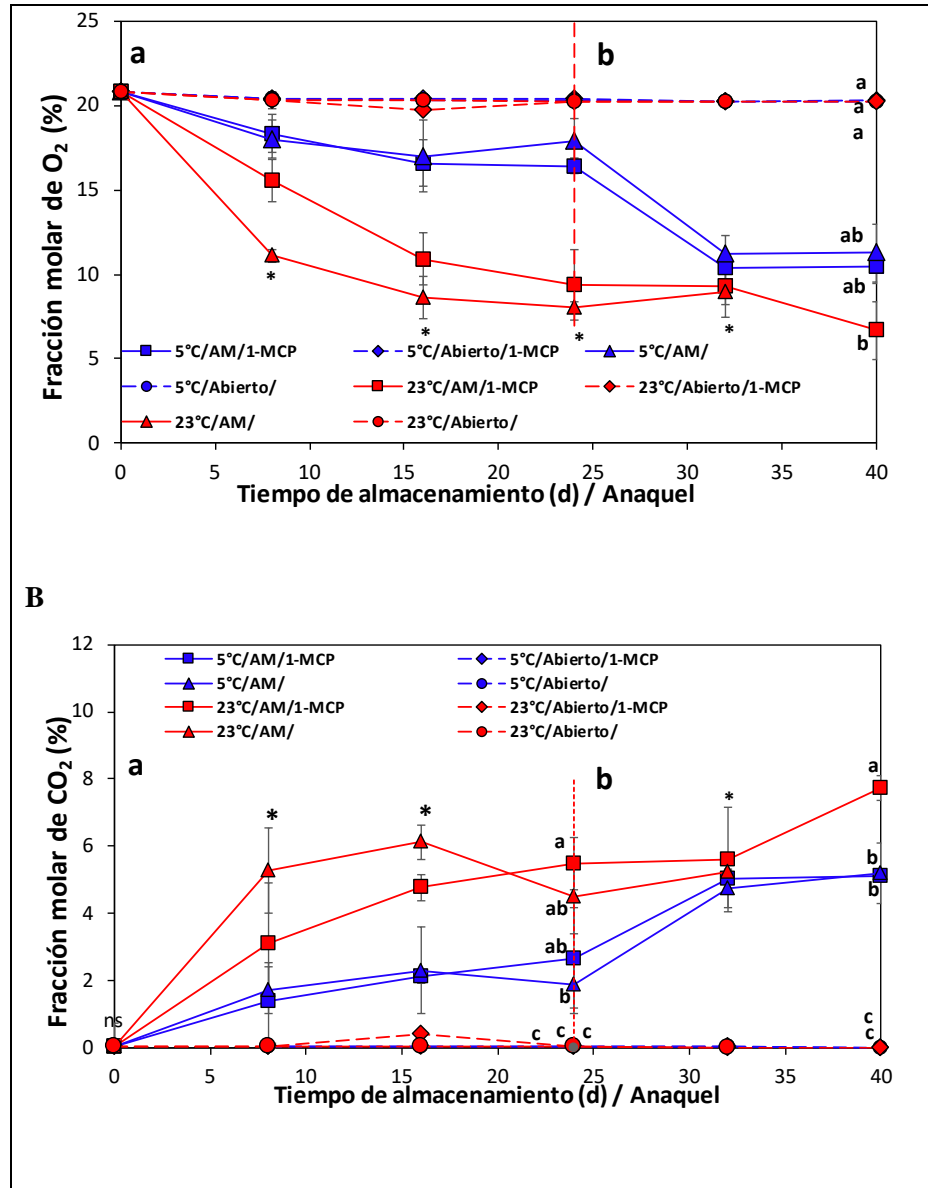


Figura 4-1 Efecto del 1-MCP y AM sobre la tasa respiratoria de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento (a) y fase de anaquel (b). A) Variación del contenido de CO₂. B) Variación del contenido de O₂. La línea punteada vertical representa el paso de almacenamiento a anaquel. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$).

Etileno: Se observaron diferencias significativas desde el día 8 hasta el final de la fase de almacenamiento. Para los tratamientos a 23°C + AM se observó un marcado incremento de etileno hacia el día 24 (Figura 4.2). Este incremento en la concentración de etileno puede ser el resultado de la producción autocatalítica de receptores del compuesto, dentro del proceso natural de maduración

del fruto, el cual puede darse a pesar de la presencia de 1-MCP, cuando se presentan condiciones de almacenamiento con bajas concentraciones de O₂, como ocurre en la AM (Patiño et al., 2018). De igual forma, las temperaturas de almacenamiento tuvieron un efecto en la producción de etileno, dado que los frutos de lulo almacenados a 5 °C presentaron una concentración de etileno más baja frente a los frutos a 23 °C. La refrigeración a bajas temperaturas inhibe la actividad enzimática, lo cual mitiga la biosíntesis de etileno (Hu et al., 2019), lo que explica el comportamiento presentado por los frutos de lulo durante la fase de almacenamiento.

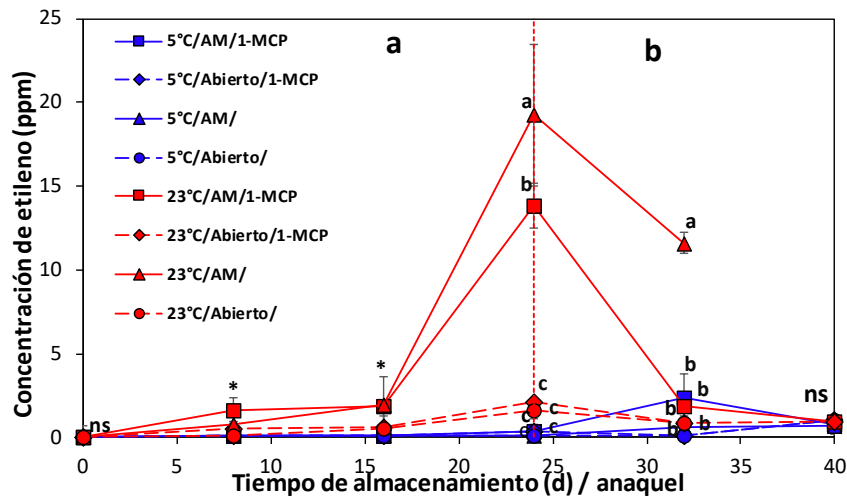


Figura 4-2 Efecto del 1-MCP y AM sobre la producción de etileno de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento (a) y fase de anaquel (b). La línea vertical indica el cambio de almacenamiento a anaquel. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Firmeza: Los frutos almacenados a 5°C presentaron una mayor conservación de la firmeza que los frutos almacenados a 23°C (Figura 4-3). La combinación 5°C/Abierto/1-MCP presentó un valor de $58,47 \pm 4,3$ N, mientras que los frutos almacenados a 23°C/AM/1-MCP presentaron un valor de $14,30 \pm 0,5$ N, siendo los mayores valores de firmeza hacia el final del almacenamiento. La solubilización de la pectina de la pared celular causada por enzimas como poligalacturonasa, celulasa y pectatoliasa, cuya actividad puede estar regulada por el etileno al influir directamente en el proceso de maduración, desencadena el ablandamiento del fruto (Baswal et al., 2020). El almacenamiento con AM limita el proceso respiratorio, así como la producción de etileno, lo cual afecta directamente la actividad enzimática, dando como resultado una conservación de la firmeza del fruto durante el almacenamiento (Islam et al., 2022). Lo mismo ocurre con el 1-MCP, para el cual se ha reportado su efecto en la supresión de la actividad de pectinesterasa y poligalacturonasa retrasando la pérdida

de firmeza del fruto y conservando su calidad (Bi et al., 2022). Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de ambas tecnologías, sumadas a una baja temperatura de almacenamiento, permiten retardar el ablandamiento del fruto de lulo durante el almacenamiento.

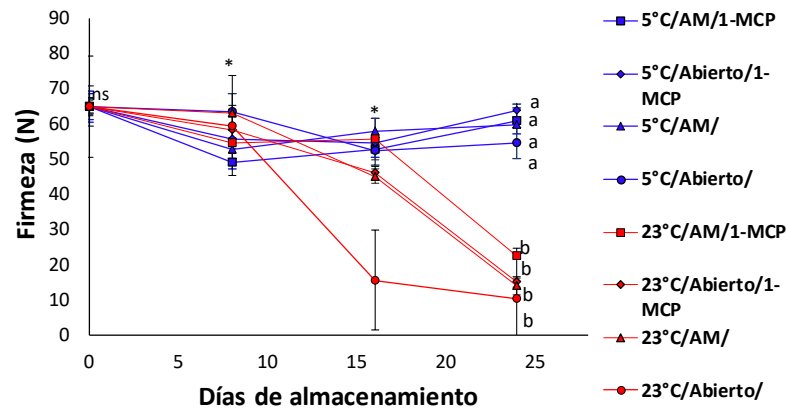


Figura 4-3: Efecto del 1-MCP y AM sobre la firmeza de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Pérdida de peso: Los frutos de lulo presentaron una pérdida de peso significativa en los 24 días de almacenamiento en todos los tratamientos. Los frutos almacenados 5°C/Abierto/ mostraron una pérdida del 24,49%, mientras que los frutos almacenados a 23°C/Abierto/ perdieron el 21,20% de su peso original, siendo la reducción de peso más alta al final del almacenamiento. Por su parte, los tratamientos de 5°C/AM/ y 23°C/AM/1-MCP presentaron las reducciones de peso más bajas 12,74% y 8,73% respectivamente (Figura 4-4). Los resultados obtenidos sugieren que la implementación de AM con o sin 1-MCP, es el método más adecuado para retrasar la pérdida de peso durante el almacenamiento en frío en frutos de lulo, dado que la creación de la atmósfera adecuada, puede limitar la tasa respiratoria, controlar la humedad que rodea el fruto y en consecuencia ralentizar la actividad metabólica del mismo (Islam et al., 2022).

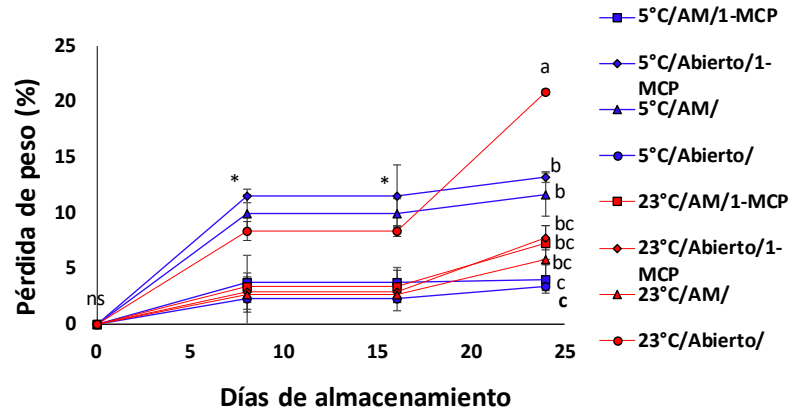


Figura 4-4: Efecto del 1-MCP y AM sobre la pérdida de peso de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Índice de color de epidermis (IC): se presentaron diferencias significativas entre tratamientos durante el periodo de almacenamiento. Los mayores cambios se observaron en los frutos almacenados a 23°C/Abierto/1-MCP con un valor de 9,27 y 5°C/ AM/1-MCP con un valor de 8,52, luego de un valor inicial de 6 en ambos casos (Figura 4.5).

Una descripción más detallada del cambio de color puede darse a través del comportamiento de los parámetros de la evaluación CIELab. El parámetro a^* asociado a las coloraciones rojizas de los frutos de lulo presentaron un valor ascendente durante todo el periodo de almacenamiento, pasando de un promedio general de 21,75 a 26,97. Similar a lo reportado por Escobar (2022), quien almacenó los frutos de lulo en condiciones de AM a 12°C y cuyos valores de a^* se incrementaron durante los 30 días de evaluación, independientemente de tratamiento aplicado. De igual forma, Molano-Díaz et al. (2022), registraron en frutos de lulo tratados con 1-MCP almacenados a 14°C, un cambio en el valor inicial de a^* de 7,2 a un valor máximo de 27 hacia el final del almacenamiento. Estos cambios en los frutos de lulo están relacionados con la degradación de la clorofila y síntesis de carotenoides (Andrade et al., 2016). No obstante, los frutos almacenados a 5°C presentaron valores inferiores en parámetro a^* frente a los frutos almacenados a 23°C. Reche et al. (2019), atribuyen estos cambios a la limitada degradación de carotenoides como respuesta al almacenamiento en frío y el almacenamiento en AM.

En cuanto a la luminosidad L^* y la coordenada b^* relacionada la degradación de los pigmentos α y β carotenos los cuales dan origen a las tonalidades amarillas (Andrade-Cuvi et al., 2018), se observaron cambios muy leves en todos los tratamientos a lo largo de todo el periodo de

almacenamiento. El valor inicial promedio para L^* fue de 55,91 y el valor final promedio fue de 57,83 y los valores de b^* cambiaron de 55,16 a 57,83 desde el inicio hasta el final del periodo de almacenamiento. Sin embargo, los frutos tratados con y sin AM/1-MCP almacenados a 5°C presentaron valores más bajos de L^* y b^* frente a los frutos almacenados a 23°C. Los resultados obtenidos nuevamente se asemejan a lo reportado por Mejía et al. (2012), Molano-Díaz et al. (2022) y Escobar (2022), en donde los valores oscilaron entre los 47,1 - 61,3 para L^* y 34,3 - 63,1 para b^* en frutos de lulo tratados con 1-MCP y AM en cada caso.

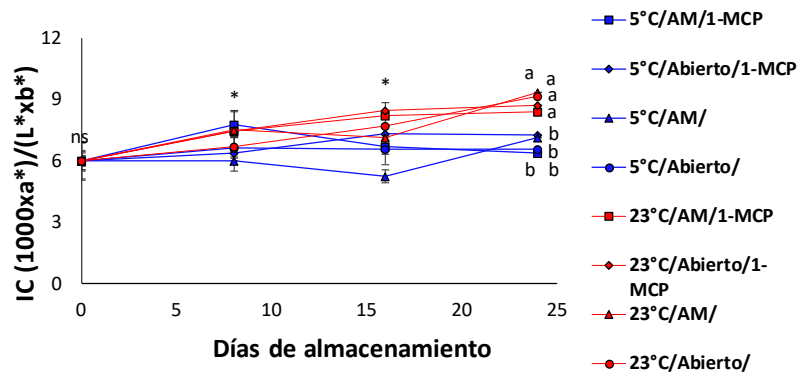


Figura 4-5 Efecto del 1-MCP y AM sobre el IC de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento. Letras distintas y * presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Sólidos solubles totales: Se presentaron diferencias significativas durante los 24 días de almacenamiento. La menor concentración de °Brix se presentó en los frutos almacenados a 5°C/AM/ y la mayor concentración 23°C/Abierto/, con un valor de 6,9% y 8,3%, respectivamente, (Tabla 4-1), lo cual se encuentra dentro del rango reportado por (González et al., 2014) y en el límite inferior de lo encontrado por Molano-Díaz et al., (2022). En los frutos de lulo, la concentración de SST suele aumentar durante el periodo de maduración incluida la poscosecha, para luego disminuir durante la senescencia como resultado del proceso respiratorio (Ochoa et al., 2016). Los resultados mostraron que los frutos de lulo la aplicación de AM y 1-MCP combinados presentaron una concentración de °Brix levemente menor a los frutos control, similar a lo encontrado en nectarinas (Özkaya et al., 2016). En frutos de lulo, Guevara (2017), menciona que los °Brix oscilan entre 7,8% y 9,3% en los primeros siete días luego de la cosecha, por lo cual se podría atribuir los resultados obtenidos al grado de madurez

Tabla 4-1 Efecto del 1-MCP y AM sobre los SST, ATT RM y pH de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento.

1-MCP (0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ +15 min de inmersión) con y sin AM									
Parámetro	ddc	5°C/AM/1-MCP	5°C/Abierto/1-MCP	5°C/AM/	5°C/Abierto/	23°C/AM/1-MCP	23°C/Abierto/1-MCP	23°C/AM/	23°C/Abierto/
SST	0	7,6 a	7,6 a	7,6 a	7,6 a	7,6 a	7,6 a	7,6 a	7,6 a
	8	8,3 a	7,3 a	7,23ab	6,9b	7,83 ab	8,1 a	7,56 ab	7,4 ab
	16	8,0 a	7,96 a	7,03 b	7,56 ab	7,73 ab	7,63 ab	8,33 a	7,93 a
	24	7,8 ab	7,76 ab	7,36 b	8,2 a	7,33b	7,93ab	8,33 a	8,26 a
ATT	0	3,00 a	3,00 a	3,00 a	3,00 a	3,00 a	3,00 a	3,00 a	3,00 a
	8	2,94 a	2,92 a	2,80 a	2,99 a	2,51 a	2,94 a	2,53 a	2,47 a
	16	2,38 b	2,57 ab	2,41 b	2,55 ab	2,61ab	3,00 a	2,57ab	2,95 ab
	24	2,80 ab	3,07 a	2,89 a	2,60 ab	2,70 ab	2,68 ab	2,58 b	2,50 b
RM	0	2,50 a	2,50 a	2,50 a	2,50 a	2,50 a	2,50 a	2,50 a	2,50 a
	8	2,81 ab	2,49 ab	2,57 ab	2,33 b	3,13 a	2,75 ab	3,01 a	3,02 a
	16	3,39 a	3,12 ab	2,96 ab	3,11 ab	2,95 ab	2,52 b	3,22 ab	2,70 ab
	24	2,78 ab	2,53 b	2,98 ab	2,91 ab	3,11 ab	2,99 ab	3,22 ab	3,29 a
pH	0	3,4 a	3,4 a	3,4 a	3,4 a	3,4 a	3,4 a	3,4 a	3,4 a
	8	3,34 a	3,36 a	3,43 a	3,42 a	3,51 a	3,41 a	3,44 a	3,41 a
	16	3,41 a	3,53 a	3,42 a	3,48 a	3,45 a	3,36 a	3,4 a	3,39 a
	24	3,33 a	3,35 a	3,42 a	3,44 a	3,40 a	3,43 a	3,38 a	3,4 a

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Acidez total titulable: Se presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Los valores oscilaron entre 3% y 2,7% en general para todos los tratamientos. Los tratamientos testigo, es decir, 5°C/Abierto/ y 23°C/Abierto/ presentaron los porcentajes más bajos de ATT con valores promedio de 2,6% y 2,5%, respectivamente. Para los demás tratamientos los porcentajes más bajos se registraron en los frutos almacenados a 5°C/AM/1-MCP y 23°C/AM/ cuyos porcentajes promedios fueron 2,8% y 2,58% hacia el final del almacenamiento (Tabla 4-1). Los resultados presentaron una variación similar en comparación con lo reportado por Escobar (2022) en frutos de lulo en condiciones de AM, en donde la reducción fue 1,1% respectivamente. En frutos de tomate Cherry la tendencia decreciente en la concentración de acidez también se presentó luego de los 11 días de almacenamiento a 10°C en condiciones de MAP + 1-MCP (Tilahun et al., 2021).

Relación de madurez (RM): Las diferencias significativas mostraron que la mayor relación de madurez más alta se presentó en los frutos almacenados a 23°C/Abierto/ y la menor en los frutos a 5°C/Abierto/1-MCP (Tabla 4-1). Los resultados se encuentran por debajo de los rangos encontrados por Molano-Díaz (2022), quienes cosecharon los frutos de lulo en el mismo grado de madurez (3) y fueron tratados con 1-MCP y cuyos valores de RM estuvieron entre 6,94 y 10,71 y lo observado por Andrade-Cuvi (2018) donde la RM estuvo entre 2,5 y 4,3 en lulos almacenados en AM. Por el

contrario, los datos son similares a los reportados por Escobar (2022) quien menciona una RM entre 1-2 en condiciones de AM.

pH: El comportamiento del pH no mostro diferencias a lo largo del periodo de almacenamiento, donde el valor promedio fue de 3,4 (Tabla 4-1). Los valores de pH obtenidos en los resultados se relacionan con reportado en diversos estudios realizados en frutos de lulo en donde los valores de pH oscilaron entre 2,6 y 3,9 (Mejía et al., 2012; Andrade-Cuvi, 2018; Molano-Díaz et al., 2022 y Escobar, 2022). De acuerdo con Forero et al. (2016), el valor de pH no presenta mayores cambios, durante el almacenamiento y sus variaciones se presentan dentro de los primeros siete días después de la cosecha.

Azúcares reductores y ácidos orgánicos: Durante la fase de almacenamiento se presentaron diferencias significativas en la concentración de azúcares. La sacarosa registró el mayor contenido en el tratamiento 5°C/Abierto/1-MCP con un valor de 18,98 mg·100g⁻¹ de fruto a los 16 ddc. La glucosa con un valor de 4,95 mg·100 g⁻¹ de fruto en los frutos almacenados a 5°C/Abierto/ y la fructosa con 12,40mg·100g⁻¹ de fruto 23°C/Abierto/1-MCP, registraron las mayores concentraciones (Tabla 4-2). El uso de AM y 1-MCP de forma conjunta o por separado, puede inhibir la actividad de la sacarosa sintasa, lo cual aumenta el contenido de la sacarosa (Zhu et al., 2013; Xu et al., 2016). Para el caso de los frutos de lulo evaluados, los resultados muestran un mayor efecto en el comportamiento de los azúcares en los frutos tratados con 1-MCP, dado que los frutos tratados con MAP mostraron un menor contenido de sacarosa, lo cual puede desencadenar una aceleración de la senescencia.

Por su parte, el ácido ascórbico no presentó diferencias significativas. Este mismo comportamiento se observó en frutos de tomate en donde el contenido de ácido ascórbico se mantuvo estable durante todo el almacenamiento en condiciones de AM y 1-MCP, lo cual puede atribuirse al efecto combinado de AM+1-MCP en la tasa de respiratoria y la producción de etileno (Tilahun et al., 2021).

Tabla 4-1 Efecto del 1-MCP y AM sobre los azúcares reductores (sacarosa, glucosa, fructosa) y ácido ascórbico de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento

Parámetro (mg·100 g ⁻¹ de fruto)	Fase	Día de medición	Tratamiento								
			5°C/ AM/1- MCP	5°C/ Abierto/1- MCP	5°C/ AM/	5°C/ Abierto/	23°C/ AM/1- MCP	23°C/ Abierto/1- MCP	23°C/ AM/	23°C/ Abierto/	
Ac. Ascórbico	Almacenamiento	1	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a
		8	0,013 b	0,011 b	0,011 b	0,013 b	0,013 b	0,027 a	0,011 b	0,011 b	0,011 b
		16	0,010 a	0,001 b	0,011 a	0,012 a	0,012 a	0,013 a	0,010 a	0,010 a	0,099 a
		24	0,011 a	0,012 a	0,011 a	0,013 a	0,012 a	0,013 a	0,097 a	0,097 a	0,097 a
	Anaquel	1	0,012 a	0,015 a	0,011 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,095 a	-	-
		8	0,012 a	0,015 a	0,011 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,093 a	-	-
		16	0,012 a	0,015 a	0,011 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,093 a	-	-
		24	0,012 a	0,015 a	0,011 a	0,013 a	0,013 a	0,013 a	0,093 a	-	-
Sacarosa	Almacenamiento	1	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,66 a	10,28 a
		8	16,04 ab	12,42 ab	12,44 ab	13,49 ab	14,11 ab	19,92 a	10,8 b	10,65 b	10,65 b
		16	14,19 a	18,98 a	12,56 a	14,19 a	16,6 a	13,81 a	13,77 a	13,22 a	13,22 a
		24	13,04 a	17,28 a	15,7 a	17,06 a	15,57 a	14,38 a	15,9 a	15,23 a	15,23 a
	Anaquel	1	15,18 ab	12,6 ab	12,25 ab	13,22 ab	16,16 ab	18,95 a	10,69 b	-	-
		8	15,23 a	15,68 a	12,56 a	14,01 a	16,31 a	19,00 a	-	-	-
		16	15,23 a	15,68 a	12,56 a	14,01 a	16,31 a	19,00 a	-	-	-
		24	15,23 a	15,68 a	12,56 a	14,01 a	16,31 a	19,00 a	-	-	-
Glucosa	Almacenamiento	1	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,87 a	4,12 a
		8	4,26 b	4,11 b	4,22 b	4,95 b	4,30 b	8,20 a	3,36 b	3,67 b	3,67 b
		16	1,49 ab	1,34 ab	2,95 a	0,98 b	1,16 ab	2,77 a	0,70 b	0,78 b	0,78 b
		24	1,70 ab	1,36 ab	2,87 a	2,58 a	1,25 ab	1,45 ab	0,79 b	0,79 b	0,79 b
	Anaquel	1	1,45 b	4,59 ab	4,36 ab	4,26 ab	3,54 ab	7,21 a	3,12 ab	-	-
		8	1,69 b	4,55 ab	4,63 ab	4,91 ab	4,71 ab	8,11 a	-	-	-
		16	1,69 b	4,55 ab	4,63 ab	4,91 ab	4,71 ab	8,11 a	-	-	-
		24	1,69 b	4,55 ab	4,63 ab	4,91 ab	4,71 ab	8,11 a	-	-	-
Fructosa	Almacenamiento	1	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,95 a
		8	7,65 b	6,97 b	7,01 b	7,79 b	7,80 b	12,40 a	7,03 b	7,03 b	7,03 b
		16	5,63 a	4,81 a	6,84 a	4,60 a	5,30 a	6,70 a	4,23 a	4,47 a	4,47 a
		24	5,27 ab	6,45 ab	5,94 ab	5,73 ab	1,81 b	8,41 a	4,87 ab	4,87 ab	4,87 ab
	Anaquel	1	5,58 a	6,51 a	7,51 a	7,33 a	6,47 a	7,48 a	7,05 a	-	-
		8	6,09 a	6,99 a	7,61 a	7,75 a	7,65 a	8,13 a	-	-	-
		16	6,09 a	6,99 a	7,61 a	7,75 a	7,65 a	8,13 a	-	-	-
		24	6,09 a	6,99 a	7,61 a	7,75 a	7,65 a	8,13 a	-	-	-

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Fase de anaquel

Intensidad respiratoria: Se presentaron diferencias en la tasa respiratoria en la fase de anaquel, en donde los frutos almacenados a 23°C/AM/1-MCP mostraron la mayor concentración molar de CO₂ con un valor de 7,73%, seguida de los frutos almacenados a 5°C/AM/ y 5°C/AM/1-MCP con 5,10%

y 5,20%, respectivamente, los demás tratamientos presentaron porcentajes cercanos a cero (Figura 4-1(A(b))). Frente a la concentración de O₂, el porcentaje más alto se observó en los frutos de lulo almacenados a 5°C/abierto/1-MCP con un valor de 20,30%, seguido por los frutos almacenados a 5°C/abierto/ y 23°C/abierto/1-MCP con un valor de 20,23% en ambos casos y la menor concentración molar de O₂ con un 6,66% se registró en los frutos conservados a 23°C/AM/1-MCP (Figura 4-1(B(b))).

De acuerdo con Taye et al. (2017), la tasa de respiración a menudo está estrictamente asociada con la producción de etileno y, en este caso, los frutos de lulo tratados con 1-MCP + AM presentaron una menor actividad respiratoria frente a los frutos control, lo cual puede atribuirse al efecto inhibitorio en la producción de CO₂ del 1-MCP (Patiño et al., 2018). Sin embargo, el incremento en la tasa respiratoria puede ser el resultado del choque térmico durante los primeros 7 días de anaquel, dado que, tanto los frutos tratados con AM+ 1-MCP, así como los no tratados, presentaron cambios significativos en la tasa respiratoria. En la figura (Figura 4-1(A-B(b))), se observa la reducción de O₂ y el aumento de CO₂ para los tratamientos almacenados a 5°C cuando son llevados a anaquel pero se mantuvieron por debajo de lo registrado en los frutos almacenados a 23°C, lo cual es un claro indicador del efecto que temperatura ejerce en los frutos de lulo, lo cual, de acuerdo con lo reportado por Bi et al., (2022), en donde los frutos de ciruela tratados con natamicina (NT) y 1-metilciclopropano (1-MCP) con envasado en atmósfera modificada (MAP) (NT+1-MCP+MAP) presentaron un incremento de la tasa respiratoria más bajo que los frutos almacenados MAP solo a 25 °C de almacenamiento, lo cual puede deberse a la inhibición en la producción de etileno cuando el fruto es tratado con 1-MCP.

Etileno: Se observaron diferencias significativas durante los primeros 7 días de la fase de anaquel. En los frutos almacenados a 23°C/AM/ la concentración de etileno se redujo luego de un incremento notorio durante los últimos días de almacenamiento (Figura 4-2 (b)). Sandhya (2010), menciona que un bajo nivel en la concentración del etileno puede deberse a en primer lugar que niveles de O₂ por debajo del 3% pueden llegar a reducir la producción y la acción de etileno y, que el movimiento de los gases incluido el etileno, se da a través del proceso de difusión. Los resultados muestran que la reducción en la concentración de etileno se da una vez es transferido hacia afuera de las bolsas, como resultado del establecimiento del equilibrio entre la producción de etileno de los frutos y la transferencia de etileno fuera de la bolsa.

Firmeza: Durante toda la fase de anaquel se presentaron diferencias significativas. Se evidenció una gran pérdida de la firmeza en todos los casos hacia el final de la etapa de anaquel excepto los frutos tratados con 5°C/Abierto/1-MCP, los cuales registraron un valor de $58,15 \pm 3,4$ N. La mayor pérdida de firmeza se presentó en los frutos almacenados a 23°C (Figura 4-6). La reducción en la firmeza del fruto es el resultado del cambio en los polisacáridos de la pared celular lo que altera su estructura y rigidez (Lin et al., 2018). Los resultados muestran una mayor retención de la firmeza en los frutos tratados con 1-MCP y sin AM hacia el día 15 de anaquel, lo que podría deberse a la generación de vapor de agua dentro del empaque y, en consecuencia, ocasionar el ablandamiento de los frutos (Oliveira-Bouzas et al., 2021). Por su parte, el efecto del 1-MCP sobre la conservación de la firmeza también se ha reportado en frutos de tomate (Steelheart et al., 2019) y peras (Lwin et al., 20121), lo que confirma la efectividad de producto en la fase de anaquel.

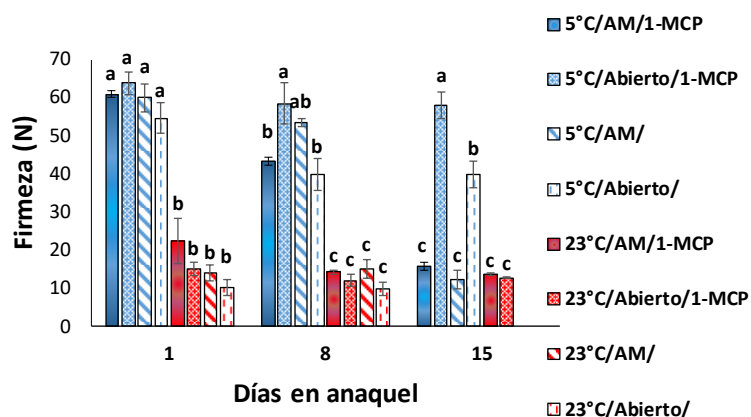


Figura 4-6 Efecto del 1-MCP y AM sobre la firmeza de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Pérdida de peso: Los frutos de lulo presentaron una notoria pérdida de peso durante toda la fase de anaquel, mostrando diferencias significativas en todos los tratamientos (Figura 4-7). Las mayores pérdidas se evidenciaron en los frutos almacenados inicialmente a 5°C/Abierto/ con porcentajes de 24,49%. Los frutos con menores pérdidas de peso fueron los tratados con 5°C/AM/ y 23°C/AM/1-MCP con valores de 12,74% y 8,73% al finalizar la etapa de anaquel. El comportamiento observado en la pérdida de peso está directamente relacionado con el incremento en la tasa respiratoria y la variación en la humedad en la atmosfera circundante al fruto, lo cual genera alteraciones en el tejido incluyendo la pérdida de agua dando como resultado una reducción en el peso del fruto (Jiang et al., 2020). El estudio mostró que los frutos tratados con AM y 1-MCP presentaron una pérdida de peso

inferior a los frutos de lulo testigo, lo cual podría deberse a la retención de humedad por la AM y la ralentización de la actividad metabólica del 1-MCP al inhibir la producción de etileno, sin embargo, los efectos pueden variar según la especie y/o variedad del producto tratado (Baswal et al., 2020; Tilahun et al., 2021).

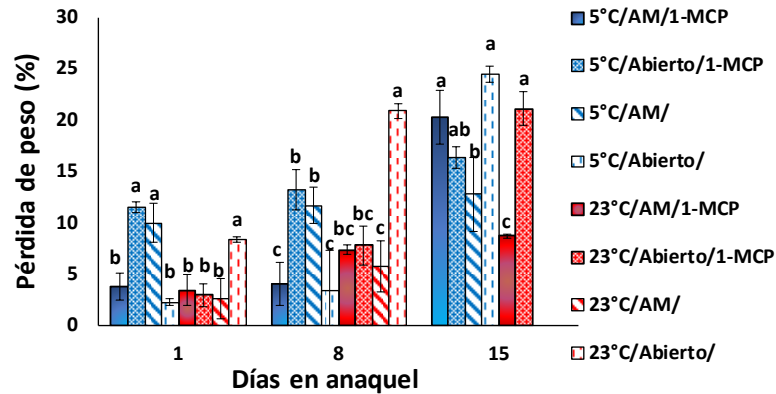


Figura 4-7 Efecto del 1-MCP y AM sobre la pérdida de peso de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Índice de color de epidermis (IC): Se presentaron diferencias significativas en toda la fase de anaquel. El menor IC se presentó en los frutos en condiciones iniciales de 5°C/AM/1-MCP con un valor de 7,99 y el mayor IC se presentó en los frutos del tratamiento 23°C/Abierto/1-MCP con un valor de 9,26 hacia el final del anaquel (Figura 4-8). En cuanto al sistema CIELab, los valores hacia el final del anaquel fueron de $a^*= 34,28$; $L^*= 62,31$ y $b^*= 63,7$. De acuerdo con (Castellanos et al., 2016), la exposición de frutos a una mayor temperatura de almacenamiento, en este caso la temperatura de anaquel, genera una rápida acción de las enzimas clorofilasa, feoforbida *a* oxigenasa y catabolito reductasa de Chl rojo, responsables de la degradación de las clorofilas, lo cual explica el incremento de los valores de a^* y b^* , así como una mayor síntesis de carotenos que se ve reflejado un valor de L^* más bajo, en nuestro caso el valor de L^* se incrementó lo que puede entrever el efecto del 1-MCP y MAP en el mantenimiento del color y tonalidad de los frutos, similar a lo encontrado en lulo por Molano-Díaz (2022) y durazno por Du et al. (2020).

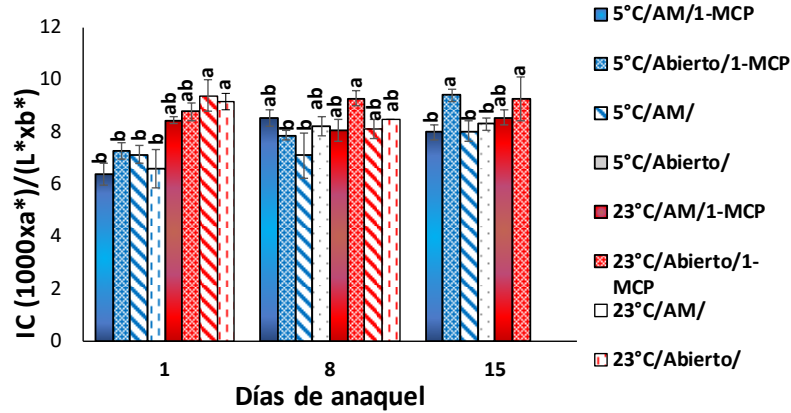


Figura 4-8 Efecto del 1-MCP y AM sobre el IC de frutos de lulo durante el anaquel. Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$). Barras verticales en cada promedio indican la desviación estándar ($n=3$)

Sólidos solubles totales: Se presentaron diferencias significativas a lo largo del periodo de anaquel. En general, los cambios en °Brix estuvieron en un rango de 7,3% a 8,8% al final de la fase de anaquel (Tabla 4-3). En general los tratamientos AM con o sin 1-MCP presentaron valores más bajos en la concentración de °Brix durante los 16 días de anaquel, lo cual se ha observado en frutos de nectarina luego de ser almacenados a 0°C y llevados a anaquel por 40 días (Özkaya et al., 2016). Cabe mencionar, que los valores de SST obtenidos durante la fase de anaquel no presentaron cambios significativos comparados con los datos registrados durante la fase de almacenamiento, lo que podría indicar que los frutos alcanzaron su máxima concentración de °Brix dado el grado de madurez en la cosecha o por el manejo agronómico dado al cultivo.

Tabla 4-2 Efecto del 1-MCP y AM sobre los SST, ATT RM y pH de frutos de lulo durante 24 días de almacenamiento.

Parámetro	Días de Anaquel	1-MCP (0,35 $\mu\text{g L}^{-1}$ + 15 min de inmersión) con y sin AM							
		5°C/A M /1-MCP	5°C/Abiert o /1-MCP	5°C/AM /	5°C/Abierto /	23°C/A M /1-MCP	23°C/Abiert o /1-MCP	23°C/AM /	23°C/Abiert o/
SST	1	7,8 b	7,76b	7,36 b	8,2 a	7,33b	7,93 b	8,33 a	8,26 a
	8	7,93 ab	7,3 ab	6,9 b	7,76 ab	7,66 ab	7,33 ab	7,2 ab	8,3 a
	16	8,8 a	7,33 b	7,43 b	7,8 ab	8,2 a	7,3 b	-	-
ATT	1	2,80 ab	3,07 a	2,47 b	2,82 ab	2,45 b	2,64 ab	2,58 ab	2,50 b
	8	2,42 ab	2,50 ab	2,44 ab	2,05 b	2,42 ab	2,63 a	2,26 ab	2,29 ab
	16	1,87 b	2,28 a	1,92 b	2,21 a	2,25 a	2,38 a	-	-
RM	1	2,78 ab	2,53b	2,98 ab	2,91 ab	3,11 ab	2,99 ab	3,22 a	3,29 a

	8	3,28 ab	2,92 b	2,81 b	3,77 a	3,16 ab	3,10 ab	3,17 ab	3,63 ab
	16	4,78 ab	3,49 ab	3,88 ab	3,54 ab	3,63 ab	3,06 b	-	-
pH	1	3,33 a	3,35 a	3,42 a	3,44 a	3,406 a	3,43 a	3,38 a	3,4 a
	8	3,48 ab	3,43ab	3,43ab	3,62 a	3,35 b	3,42 ab	3,45 ab	3,39 b
	16	3,63 a	3,42 b	3,65 a	3,53 b	3,48 b	3,49b	-	-

Letras diferentes presentan diferencias estadísticas en cada punto de muestreo de acuerdo con la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

Acidez total titulable: Los porcentajes de acidez de los frutos de lulo mostraron diferencias significativas al descender durante toda la fase de anaquel. Los porcentajes más bajos se observaron en los frutos de lulo en condiciones de 5°C/ AM/1-MCP al pasar de 2,8% a 1,8% en el día 16 de anaquel (Tabla 5-3), similar a lo encontrado por Andrade-Cuvi (2018). La reducción en el porcentaje de ATT puede ser relacionada con la transformación de ácidos en azúcares y sus derivados a medida que el fruto completa su proceso de maduración o son requeridos como sustratos para el proceso respiratorio (Tilahun et al., 2017).

Relación de madurez (RM): Se observaron diferencias significativas a lo largo de la fase de anaquel. La mayor RM la registraron los frutos a 5°C/ AM/1-MCP con un valor de 4,7 en comparación de los demás tratamientos los cuales presentaron un valor general promedio de 3,5 (Tabla 5-3). Un alto rango de RM puede significar una mayor aceptación por parte del consumidor como ocurre en tomate (Tilahun et al., 2021). Lo anterior es consecuencia del incremento en la concentración de SST y una reducción en el porcentaje de acidez en el fruto lo cual es un indicador de la calidad organoléptica del fruto (Andrade-Cuvi, 2018).

pH: Se presentaron diferencias significativas a los 8 y 16 días de anaquel (Tabla 4-3). Los resultados encontrados son similares a lo reportado en tomate en donde la aplicación de AM permitió registrar valores de pH más altos cuando se presentó un descenso en la acidez (Oliveira-Bouzas et al., 2021). De acuerdo con (Andrade-Cuvi, 2018) dado que el pH es una característica química del fruto no solo se debe tener en cuenta el tipo de almacenamiento al cual sea sometido el fruto de lulo, sino también el lugar de procedencia y el manejo que se da al fruto.

Azúcares reductores y ácidos orgánicos: Durante la fase de anaquel no se presentaron diferencias significativas en la concentración de azúcares y el ácido ascórbico (Tabla 4-2). El aumento típico del contenido de azúcares durante la poscosecha, seguida de una disminución hacia el final de esta etapa

debido a su consumo como sustrato para el proceso respiratorio, así como el incremento en la producción de etileno y es un indicador de la senescencia del fruto (Fagundes et al., 2015). En este estudio, todos los tratamientos presentaron un incremento en la tasa respiratoria y la producción de etileno, así como aumento de las concentraciones de fructosa y glucosa, lo cual puede interpretarse como el inicio de la senescencia de los frutos.

4.4 Conclusiones y recomendaciones

- Los frutos de lulo tratados con 5°C/AM/1-MCP durante el almacenamiento mostraron una menor intensidad respiratoria, producción de etileno, porcentaje de pérdida de peso, menor cambio en el color y ATT. En la misma etapa, la mayor conservación de la firmeza se presentó en los frutos tratados con 5°C/abierto/1-MCP, así como una RM más alta. El contenido de los azúcares y ácido ascórbico evidenciaron cambios significativos en los frutos tratados con 5°C/AM/1-MCP y 5°C/abierto/1-MCP.
- Durante la fase de anaquel la menor intensidad respiratoria, SST, pH y la RM más alta se presentaron en los frutos de lulo con 5°C/AM/1-MCP y 5°C/abierto/1-MCP. El menor porcentaje de la pérdida de firmeza y el mejor IC se observó en los frutos tratados 5°C/abierto/1-MCP. Por su parte, una de las principales variables a considerar es el etileno, la cual presentó su menor concentración en los 5°C/AM/. Finalmente, los azúcares reductores y el ácido ascórbico no presentaron diferencias en esta fase.
- Los resultados obtenidos en ambas fases muestran los múltiples cambios que pueden presentar los frutos de lulo durante la poscosecha y el tiempo en anaquel con las tecnologías implementadas. Dentro de los principales procesos fisiológicos que afectan la calidad del fruto se encuentran la tasa respiratoria y la producción de etileno, las cuales, debido a su impacto directo sobre las demás características de calidad de importancia para el consumidor, tienen una mayor prioridad al considerar el manejo poscosecha que se debe dar al fruto, dados los resultados obtenidos la conservación de los frutos de lulo en condiciones de 5°C/AM/1-MCP y 5°C/abierto/1-MCP pueden dar un tiempo de vida útil más extenso conservando la calidad del fruto.
- Se recomienda hacer nuevas evaluaciones que involucren otro tipo de empaques, distintas combinaciones de gases en la atmósfera aplicada, diferentes formas y tiempos de aplicación del 1-MCP a las implementadas en este estudio, así como incluir evaluaciones de la actividad microbiana durante la poscosecha y anaquel con el fin de obtener diferentes alternativas de conservación que incluyan todos aspectos relevantes en la calidad del fruto.

4.5 Referencias

- Andrade, M., Moreno, C., Bravo, J., Guijarro, M., Monar, V., Cevallos, C., Concellón, A., (2016). Efecto del estado de madurez sobre la calidad de tres variedades de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 17(2): 217-230.
- Andrade-Cuvi, M.J. 2018. Calidad poscosecha de naranjilla (*Solanum quitoense* Lam) y alternativas tecnológicas para retrasar el deterioro. Elaboración de un producto panificado enriquecido con naranjilla. [Tesis Doctoral] Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata, Argentina
- Balaguera-López, H., Espinal-Ruiz, M., Rodríguez-Nieto, Y., Herrera-Arévalo, A and Zacarías, L. (2021). 1-Methylcyclopropene inhibits ethylene perception and biosynthesis: A theoretical and experimental study on cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. Postharvest Biology and Technology. 174:111467. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111467
- Baswal, A., Dhaliwal, H., Singh, Z., Mahajan, B and Gill, K. (2020). Postharvest application of methyl jasmonate, 1-methylcyclopropene and salicylic acid extends the cold storage life and maintain the quality of 'Kinnow' mandarin (*Citrus nobilis* L. X *C. deliciosa* L.) fruit. Postharvest Biology and Technology. 161:111064. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111064
- Bi, X., Dai, Y., Zhou, Z., Xing, Y and Che, Z. (2022). Combining natamycin and 1-methylcyclopropene with modified atmosphere packaging to evaluate plum (*Prunus salicina* cv. 'Cuihongli') quality. Postharvest Biology and Technology. 183:111749. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2021.111749
- Castellanos, C., Herrera, D and Herrera, A. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. Biosystems Engineering. 218-230. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.015
- Castellanos, D and Herrera, A. (2017). Postharvest Handling. Modified Atmosphere Packaging: Design and Optimization Strategies for Fresh Produce. Chapter 5. Ed. INTECH. 86-106p. Doi: 10.5772/intechopen.68498
- Du, M., Ji, X., Li, J., Li, X., J, J., Li, H., Zheng, Y; Liu, Z; Zhang, X; Fan, J. (2020). Regulation effects of 1-MCP combined with flow microcirculation of sterilizing medium on peach shelf quality. Scientia Horticulturae.260:108867.

- Escobar, J. (2022). Evaluación de un removedor de oxígeno y un adsorbente de humedad en el desarrollo de un empaque activo para la preservación de lulo (*Solanum quitoense*) en fresco. Tesis: Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá Colombia.
- Fagundes, C., Moraes, K., Pérez-Gago, M., Palou, L., Maraschin, M and Monteiro, A. (2015). Effect of active modified atmosphere and cold storage on the postharvest quality of cherry tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*. 109: 73–81. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.05.017
- Forero, N., Gutiérrez, S., Sandoval, R., Camacho, J And Meneses, M. (2014). Evaluación poscosecha de las características del lulo (*Solanum quitoense*) cubierto con hoja de plátano. *Temas Agrarios*, 19(1): 73-85
- Forero, D., Orrego, C., Grant, D and Osorio, C. (2015). Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. *Food Chemistry*. 169: 85–91. Doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.111
- Forero, N., Gutiérrez, S., Sandoval, R., Camacho, J and Meneses, M. (2016). Evaluación poscosecha de las características del lulo (*solanum quitoense*) cubierto con hoja de plátano. *Temas Agrarios*, 19(1), 73-85.
- Garavito, J., Mendoza, S and Castellanos, D. (2022). Configuration of biodegradable equilibrium modified atmosphere packages, including a moisture absorber for fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*. 314: 110761. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110761
- Gaviria, J. (2017). Mejora de la conservación poscosecha de la naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) mediante atmósferas modificadas. Tesis. a Universidad Técnica de Ambato. La Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ecuador
- Hu, B., Sun, D., Pu, H and Wei, Q. (2019). Recent advances in detecting and regulating ethylene concentrations for shelf-life extension and maturity control of fruit: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 91:66–82. Doi: 10.1016/j.tifs.2019.06.010

- Huang, H., Guo, L., Wang, L., Wang, H., Ma, S., Jiang, Y and Qu, X. (2019). 1-Methylcyclopropene (1-MCP) slows ripening of kiwifruit and affects energy status, membrane fatty acid contents and cell membrane integrity. *Postharvest Biology and Technology*. 156: 110941. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.110941
- Islam, A., Acikalin, R., Ozturk, B., Aglar, E and Kaiser, C. (2022). Combined effects of Aloe vera gel and modified atmosphere packaging treatments on fruit quality traits and bioactive compounds of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit during cold storage and shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. Doi: 187:111855. 10.1016/j.postharvbio.2022.111855
- Jiang, Q., Zhang, M and Xu, B. (2020). Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review. *Ultrasonics – Sonochemistry*. 69: 105261. Doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105261
- Jiang, Y., Yu, Li., Hu, Y., Zhu, Z., Zhuang, C., Zhao, Y and Zhong, Y. (2020). The preservation performance of chitosan coating with different molecular weight on strawberry using electrostatic spraying technique. / *International Journal of Biological Macromolecules*. 151: 278–285. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.169
- Jiang, F., Zhou, L., Zhou, W., Zhong, Z., Yu, K., Xu, J., Zou, L., and Liu. (2022). Effect of modified atmosphere packaging combined with plant essential oils on preservation of fresh-cut lily bulbs. *LWT Food Science and Technology*. 162: 113513. Doi: 10.1016/j.lwt.2022.113513
- Li, F., Zhang, X., Wang, J., Jiang, Y., Zhang, X and Li, X. (2022). Preharvest application of 1-methylcyclopropene and Ethephon altered cuticular wax biosynthesis and fruit quality of apples at harvest and during cold storage. *Horticultural Plant Journal*. 8(2):143-152. Doi: 10.1016/j.hpj.2021.11.008
- Lin, Y., Lin, Y., Lin, H., Lin, M., Li, H., Yuan, F., Chen, Y and Xiao, J. (2018). Effects of paper containing 1-MCP postharvest treatment on the disassembly of cell wall polysaccharides and softening in Younai plum fruit during storage. *Food Chem*. 264, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.031>.
- Lwin, H., Choi, J., Chun, J., Watkins, C and Lee, J. (2021). 1-Methylcyclopropene treatment alters fruit quality attributes and targeted metabolites in ‘Wonhwang’ pears during shelf life. *Scientia Horticulturae*. 284:110125. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110125

- Mohana, K., Muralisankar, T., Uthayakumar, V., Chandirasekar, R., Revathia, N., Ganesan, A., Velmurugan, K., Sathishkumar, P., Jayakumar, R and Seedeve, P. (2020). Trends in the extraction, purification, characterisation and biological activities of polysaccharides from tropical and sub-tropical fruits –A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*. 238: 116185 Doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116185
- Molano-Díaz, J., Reyes-Medina, A and Álvarez-Herrera, J. (2022). El 1-metilciclopropeno y la temperatura de almacenamiento en la poscosecha de lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. 20 (2): in press.
- Olveira-Bouzas, V., Pita-Calvo, C., Vázquez-Odériz, M., and Romero-Rodríguez, M. (2021). Evaluation of a modified atmosphere packaging system in pallets to extend the shelf-life of the stored tomato at cooling temperature. *Food Chemistry*. 364:130309. Doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130309
- Özkaya, O., Yildirim, D., Dündar, Ö and Tükel, S. (2016). Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and modified atmosphere packaging on postharvest storage quality of nectarine fruit. *Scientia Horticulturae*. 198: 454-461. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.12.016
- Patiño, L., Castellanos, D and Herrera, A. (2018). Influence of 1-MCP and modified atmosphere packaging in the quality and preservation of fresh basil. *Postharvest Biology and Technology*. 136: 57–65. Doi:1016/j.postharvbio.2017.10.010
- Perumal, A., Nambiar, R., Sellamuthu, P and Emmanuel, P. (2021). Use of modified atmosphere packaging combined with essential oils for prolonging post-harvest shelf life of mango (cv. Banganapalli and cv. Totapuri). *LWT Food Science and Technology*. 148:111662. Doi: 10.1016/j.lwt.2021.111662
- Reche, J., García-Pastor, M., Valero, D., Hernández, F., Almansa, M., Legua, P and Amorós, A. (2019). Effect of modified atmosphere packaging on the physiological and functional characteristics of Spanish jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) cv 'Phoenix' during cold storage. *Scientia Horticulturae*. 258:108743. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.108743
- Sandhya (2010). Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. *Sandhya / LWT - Food Science and Technology*. 43: 381–392.

- Steelheart, C., Alegrea, M., Bahima, J., Senn, M., Simontacchi, M., Bartoli, C and Gergoff, G. (2019). Nitric oxide improves the effect of 1-methylcyclopropene extending the tomato (*Lycopersicum esculentum* L.) fruit postharvest life. *Scientia Horticulturae*. 255:193–201. Doi: 10.1016/j.scienta.2019.04.035
- Song, J., Yoo, S and Kim, D. (2018). The effect of 1-(3-phenyl-propyl)cyclopropene versus 1-MCP on the quality and storage life of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 145:20–26. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.05.021
- Taye, A., Tilahun, S., Park, D., Seo, M and Jeong, C. (2017). Effects of continuous application of CO₂ on fruit quality attributes and shelf life during cold storage in cherry tomato. *Horticultural Science and Technology*. 35(3): 300-313. Doi:10.12972/kjhst.20170033
- Tilahun, S., Park, D., Taye, A and Jeong, C. (2017). Effects of storage duration on physicochemical and antioxidant properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Hortic. Sci. Technol.* 35(1):88-97. Doi: 10.12972/kjhst.20170010
- Tilahun, S., Lee, Y., Choi, H., Baek, M Lee, J., Park, D., Kang, H and Jeong, C. (2021). Modified atmosphere packaging combined with CO₂ and 1-methylcyclopropene prolong the storability and maintain antioxidant properties of cherry tomato. *Scientia Horticulturae*. 288: 110401. Doi: 10.1016/j.scienta.2021.110401
- Zhao, Q., Jin, M., Guo, L., Pei, H., Nan, Y and Rao, J. (2020). Modified atmosphere packaging and 1-methylcyclopropene alleviate chilling injury of ‘Youhou’ sweet persimmon during cold storage. *Food Packaging and Shelf Life*. 24:100479. Doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100479
- Zhu, Z., Liu, R., Li, B and Tian, S. (2013). Characterisation of genes encoding key enzymes involved in sugar metabolism of apple fruit in controlled atmosphere storage. *Food Chemistry*. 141:3323–3328. Doi: 10.1016/j.foodchem.2013.06.025

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El uso de bajas temperaturas de almacenamiento tuvo un efecto retardante del proceso de maduración. En el estudio no se presentaron cambios significativos en las temperaturas seleccionadas (5°C y 8°C), sin embargo, durante la fase de anaquel se observaron cambios relevantes en las características de calidad en especial en los frutos almacenados a 8°C, lo que llevó a un mayor deterioro de los frutos, dando como mejor opción de almacenamiento la temperatura de 5°C.
- El efecto de diferentes dosis de 1-MCP y tiempos de inmersión fue evaluado con el fin de identificar la mejor combinación en la conservación de la calidad de frutos de lulo. Se encontró que la aplicación de 35mgLg⁻¹ 1-MCP + 15 minutos de inmersión afectó de forma significativa las principales características de calidad tanto en el almacenamiento como en anaquel. Por tanto, esta dosis, forma y tiempo de aplicación del producto fue seleccionada al generar una menor intensidad respiratoria, porcentaje de pérdida peso, reducción de la firmeza, cambios en la ATT y SST.
- Los frutos de lulo tratados con 5°C/AM/1-MCP y 5°C/abierto/1-MCP lograron reducir la actividad respiratoria, producción de etileno, los cambios en la concentración de azúcares y cambios en los ácidos orgánicos. De igual forma estos tratamientos evidenció la menor pérdida de firmeza, porcentaje de pérdida de peso, una mejor conservación del color y relación de madurez. Por último, se concluye que la combinación de 1-MCP y MAP fue una alternativa tecnológica de conservación que permitió incrementar el tiempo de vida útil de 15 días más que los frutos control, por lo cual puede ser considerada como una estrategia de manejo poscosecha para otros frutos percederos.

5.2 Recomendaciones

- Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación se pueden conducir líneas de investigación que permitan ampliar la comprensión de los eventos ocurridos.

- En primer lugar, se sugiere evaluar las diferentes fisiopatías que pueden presentarse durante la poscosecha de los frutos de lulo para identificar cuáles son generadas por las bajas temperaturas y cuales corresponden a la senescencia natural del fruto.
- En cuanto a la aplicación de 1-MCP y uso de AM se debe considerar la evaluación de otros tipos de aplicación de 1-MCP como la aspersion e incrementar los tiempos de aplicación, o realizar su aplicación precosecha y poscosecha. En cuanto a las AM es pertinente evaluar el uso de otro tipo materiales de empaques, así como el tamaño y número de las perforaciones, la combinación de gases dentro de la atmosfera, empaques activos y atmosferas antifúngicas.
- La aplicación de las tecnologías implementadas durante la investigación, puede ser adaptada por productores y comercializadores, dado que no requieren de equipos, instalaciones o procedimientos complejos, lo cual les permitiría darle un valor agregado a producto cosechado y garantizar un mayor tiempo de vida útil del fruto al consumidor.
- Finalmente, es necesario realizar estudios que permitan una comprensión holística de la aplicación de cada tecnología y la posible combinación entre ellas y los efectos en todos los aspectos que abarcan la calidad del producto, es decir, las características químicas, físicas, bioquímicas y la actividad microbiana en frutos de lulo, para de esta manera determinar cuál o cuáles de estas u otras tecnologías pueden ser las ideales para la conservación y almacenamiento del fruto de lulo durante la poscosecha y el anaquel.