

<https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2024.04.02>

Versión en español

Almacenamiento de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) ‘Cuernavaqueña’ en atmósfera modificada pasiva

Adriana Herrero-Galindo^{1*}; María Teresa B. Colinas-León^{1*};
Irán Alia-Tejagal²; Nallely Rosas-Flores³

¹Universidad Autónoma Chapingo, carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56230.

²Universidad Autónoma del Estado de Morelos. avenida Universidad núm. 1001, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 66209.

³Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, División de Ingeniería en Gestión Empresarial. Camino al Monte s/n col. Loma de Guadalupe, C.P.56380.

Historial del artículo:

Recibido: 1 de julio, 2024.

Aceptado: 2 de septiembre, 2024

*Autores de correspondencia:

adris10ap00@gmail.com,
mcolinasl@chapingo.mx

Resumen

Los frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) son altamente perecederos, por lo que la modificación pasiva de la atmósfera circundante del producto y una temperatura baja de almacenamiento pueden ayudar a incrementar la vida de anaquel del fruto. El objetivo fue evaluar el efecto de la temperatura de almacenamiento sobre el comportamiento postcosecha de ciruela mexicana envasada en atmósfera modificada pasiva. Frutos de ciruela mexicana ‘Cuernavaqueña’ en madurez fisiológica, se colocaron en bolsas de polietileno de baja densidad (0.062 μm de grosor) almacenándose a 14 y 25 °C y 93 \pm 2 % de humedad relativa, durante ocho días. Los resultados en la producción de CO₂, etileno, pérdida de peso y firmeza, indican que el uso de un empaque de baja densidad, bolsa de polietileno, y el almacenamiento a una temperatura de 14 °C retrasa el proceso de maduración de los frutos. En cuanto a los compuestos bioactivos evaluados en pulpa y cáscara, en ambos tratamientos, el contenido resulta atractivo con fines de potencializar el consumo en fresco de estos frutos que resultan benéficos a la salud humana.

► **Palabras clave:** *Spondias purpurea* L., capacidad antioxidante, compuestos bioactivos, etileno, firmeza, respiración.

Introducción

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) es una especie nativa de México, algunos autores indican que puede ser clasificada dentro de tres tipos: 1) ciruelas de estación seca con fructificación de febrero a mayo; 2) ciruelas de estación húmeda con fructificación de septiembre a diciembre y, 3) ciruelas de temporada intermedia con fructificación en junio y julio (Álvarez-Vargas et al., 2019). La ciruela mexicana ‘Cuernavaqueña’ es de estación húmeda y goza de una gran aceptación en forma regional, debido a su sabor y color de epicarpio. Además, su consumo proporciona polifenoles, vitaminas A, B, C, E, y carotenoides, los cuales pueden otorgar protección frente a enfermedades crónico-degenerativas, lo que permite un

alto potencial de comercialización en el mercado de exportación (Maldonado-Astudillo et al., 2014; Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

No obstante, la concentración de estos compuestos bioactivos en los frutos se encuentra altamente asociada a la especie, cultivar, grado de madurez y condiciones de manejo pre y postcosecha, conduciendo a cambios importantes en la calidad nutracéutica del producto (Tomás-Barberán & Espín, 2001; Belitz et al., 2008; Li et al., 2014). Álvarez-Vargas et al. (2019) reportan en ciruela mexicana ‘Cuernavaqueña’ al momento de la cosecha (mes de octubre), un contenido de carotenoides totales de 50.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en peso fresco en el epicarpio y de 27 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en peso fresco en el mesocarpio, lo cual coincidió con la coloración amarilla en el exocarpio. Asimismo,

los autores indicaron valores medios para fenoles totales de $266.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ en peso fresco de pulpa.

La ciruela mexicana es un fruto climatérico altamente percedero y sensible a bajas temperaturas, debido a su origen tropical, por lo que es susceptible a presentar daños por frío y, en consecuencia, durante el manejo poscosecha disminuye la calidad del fruto rápidamente, haciendo necesario el uso de tecnologías para su conservación, tales como refrigeración y almacenamiento en atmósferas modificadas (Tomás-Barberán & Espín, 2001; Maldonado-Astudillo et al., 2014; Vargas-Simón, 2018). Por lo anterior, la combinación de diferentes técnicas de conservación, tales como las tecnologías de barrera, son una alternativa para evitar crecimiento microbiano y pérdidas de calidad del fruto. Una de estas técnicas es la modificación pasiva de la atmósfera circundante del producto, por efecto de su respiración y permeación de los gases a través del envase plástico, en combinación con una baja temperatura de almacenamiento para incrementar la vida de anaquel (Ospina-Meneses & Cartagena-Valenzuela, 2008; Barrios et al., 2014; Oliveira et al., 2015).

En el envasado en atmósfera modificada (MAP) pasiva se emplea material de barrera baja (baja densidad), como el polietileno, que una vez que el paquete está sellado permite establecer un equilibrio de los gases dentro del envase durante el almacenamiento (Priyadarshi et al., 2020). En frutas como la ciruela mexicana, cuyo comportamiento es de tipo climatérico, la vida de anaquel dependerá de la temperatura de almacenamiento, ya que uno de los objetivos del uso de MAP es minimizar la tasa respiratoria y producción de etileno y, con ello, retrasar el proceso de maduración, senescencia y evitar el deterioro del producto (García-González et al., 2016; Priyadarshi et al., 2020).

Considerando lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la temperatura de almacenamiento (14 y 25 °C) y envasado en atmósfera modificada pasiva en algunos parámetros fisiológicos, físicos y bioquímicos durante la poscosecha de frutos de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña'.

Materiales y métodos

Material vegetal y tratamientos

Se cosecharon frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) variante 'Cuernavaqueña' en el municipio de Atlatahuacan, Morelos, México. Para la cosecha se empleó el color de la epidermis del fruto como índice, con 75 % de coloración verde, frutos de tamaño homogéneo (30 g), así como libres de daños físicos y patógenos. Se cosecharon 180 frutos y se trasladaron en cajas de plástico vía terrestre al laboratorio de usos múltiples del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Los frutos se lavaron con una solución clorada (1 %) para desinfectarlos y se dejaron expuestos a condición ambiental durante 4 h para su secado.

Se evaluaron dos temperaturas de almacenamiento, 14 y 25 °C, así como una condición de almacenamiento en bolsa (Ziploc®)

de polietileno de baja densidad (16.5 x 14.9 cm) de 0.062 μm de grosor. Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con unidad experimental de seis frutos de ciruela mexicana y tres repeticiones. Después de iniciados los tratamientos se realizaron evaluaciones a los 1, 2, 4, 6 y 8 d, de algunas variables fisiológicas, físicas y bioquímicas.

Variables evaluadas

Se determinó la respiración y producción de etileno mediante un sistema estático, se colocaron seis frutos en un recipiente hermético de volumen conocido, después de una hora se tomó 1 mL del espacio de cabeza para ser inyectado a un cromatógrafo de gases Varian (3400CX®, USA) equipado con una columna capilar Chrompack® tipo poraPLOT Q, un detector de conductividad térmica (TCD, por sus siglas inglés) y un detector por ionización de flama (FID, por sus siglas en inglés) (Tovar et al., 2011). Se usaron temperaturas de 80, 150 y 170 °C en la columna, inyector y detectores, respectivamente, con N₂ como gas de arrastre y presión en la columna de 158.5 KPa. Los datos de respiración se reportaron como $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ de CO₂ y la concentración de etileno $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, mediante el uso de una curva de calibración.

Se registró el peso de los frutos con una balanza digital (Ohaus, USA) y los resultados se expresaron en porcentaje de pérdida de peso (%). La firmeza se midió en la parte ecuatorial de cada fruto con un texturómetro FDV-30 (Greenwich, CT 06836, USA) de puntal cónico (8 mm de diámetro) y los resultados se expresaron en newton (N).

Para la cuantificación de los sólidos solubles totales se usaron dos frutos, de los cuales se extrajo jugo de la pulpa y se colocó 1 mL en el lector de un refractómetro digital (ATAGO PAL-1, Japón) con resultados expresados en grados Brix (°Brix). La acidez titulable se determinó con la metodología de Marsh et al. (2011), para lo cual se homogeneizaron 5 g de pulpa con 10 mL de agua destilada, se filtraron y de la fase líquida recuperada se tomó una alícuota de 5 mL, a la cual se le agregaron dos gotas de fenoltaleína como indicador y se llevó a titulación con hidróxido de sodio (NaOH) al 0.1 N. Los resultados se expresaron en % de ácido cítrico.

Los carotenoides totales se cuantificaron en pulpa y epicarpio, empleando el método propuesto por Speek et al. (1988), en el cual a 2 g de muestra se le agregaron 10 mL de una solución n-hexano-acetona-etanol (50:25:25 v/v), manteniendo la solución en oscuridad a temperatura ambiente (20 °C) durante una hora. Posteriormente, se aplicó centrifugación (Thermo Scientific Sorvall RC 6, centrifugue) a 1000 x g por 5 min y la fase orgánica se aforó a 25 mL con hexano, a la cual se le midió la absorbancia a 450 nm en un espectrofotómetro 10s-vis (Thermo Scientific, Florida, USA). La concentración se calculó utilizando el coeficiente de extinción de β -caroteno, $\epsilon=2505$ como estándar y los resultados se reportaron en μg de β -caroteno $\cdot \text{g}^{-1}$ de peso fresco ($\mu\text{g} \beta\text{-caroteno} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pf}$).

El contenido de clorofilas totales se determinó en la epidermis del fruto de acuerdo con el método propuesto por Pompelli et al.

(2013). Para ello, se pesó 1 g de la epidermis y se homogeneizó con 10 mL de acetona-agua (8:2 v/v) durante 15 s y se filtró. Posteriormente, se midió la absorbancia a tres longitudes de onda (445, 663 y 645 nm) y los resultados se expresaron como μg de clorofila total $\cdot \text{g}^{-1}$ de peso fresco ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ pf).

La cuantificación del contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante se realizó a partir de un extracto metanólico de la pulpa para cada tratamiento, de acuerdo con el método descrito por Chang et al. (2002). A 1 g de pulpa se le añadieron 10 mL de una solución metanol-agua (80:20 v/v). La mezcla se homogeneizó con un vortex (Vortex Synergy, WVR International) durante 15 s, se colocó en sonicación (Branson 1510 Ultrasonic Cleaner) por 15 min y se dejó reposar por 24 h bajo refrigeración (8 °C); finalmente, se centrifugó en un equipo Thermo Scientific Sorvall (RC 6, USA) a 600 x g por 10 min.

La concentración de compuestos fenólicos totales se determinó por el método Folin-Ciocalteu (Jiménez-Arellanes et al., 2011), donde a 0.5 mL del extracto metanólico se le adicionaron 0.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (0.2 N), 4 mL de una solución de Na_2CO_3 a 0.7 M y se mantuvo en reposo por 2 h en oscuridad a temperatura ambiente. Finalmente, se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro Genesys 10s-vis (Thermoscientific, Florida, USA). La concentración se calculó a partir de una curva estándar ($y = 0.0074x + 0.0118$; $R^2 = 0.999$) preparada a base de ácido gálico (20-200 mg) y el contenido de compuestos fenólicos se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso fresco ($\text{mg EAG } 100 \cdot \text{g}^{-1}$ pf).

Los flavonoides totales se cuantificaron de acuerdo con el método propuesto por Chang et al. (2002) donde a 0.5 mL del extracto metanólico preparado anteriormente, se le agregaron 1.5 mL de etanol:agua (90:10 v/v), 0.1 mL de solución de AlCl_3 -agua (1:9 p/v), 0.1 mL de solución 1 M de acetato de potasio (CH_3COOK) y 2.8 mL de agua destilada. La mezcla se incubó durante 30 min a temperatura ambiente (25 ± 1 °C). Se cuantificó la absorbancia a 415 nm. Los resultados se reportaron en mg equivalentes de quercetina por 100 g de peso fresco ($\text{mg EQ } 100 \cdot \text{g}^{-1}$ peso fresco). Para determinar la concentración de flavonoides se construyó una curva estándar ($y = 0.0365x - 0.0047$; $R^2 = 0.999$) de quercetina (3-30 mg).

La capacidad antioxidante se determinó de acuerdo con el método descrito por (Re et al., 1999). El radical libre ABTS^{•+} (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico) se generó mezclando 10 mL de una solución 7 mM de ABTS^{•+} con 6.61 mg de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$. La mezcla se incubó durante 12-16 h en oscuridad para generar el radical ABTS^{•+}. La solución del radical ABTS^{•+} se diluyó con etanol anhidro hasta lograr obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.1 (máxima concentración de radical ABTS^{•+} formado) medida en un espectrofotómetro Genesys 10s-vis (Thermoscientific, Florida, USA) a una longitud de onda de 734 nm. Para determinar la actividad antioxidante, a 1 mL de la solución del radical libre de ABTS^{•+} se le adicionaron 10 μL del extracto metanólico de la muestra, la mezcla se incubó en baño maría a 30 °C en oscuridad por 7 min. Posteriormente, se midió la absorbancia

a una longitud de onda de 734 nm. Para la cuantificación de la actividad antioxidante se realizó una curva estándar ($y = -0.0393x + 0.6931$; $R^2 = 0.999$) a base de trolox (ácido 6-hidroxi-2, 5, 7, 8-tetrametilcroman-2-carboxílico), para lo cual se preparó una solución de trolox a una concentración de 17.5 mg y, a partir de esta solución, se obtuvieron diferentes concentraciones. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de trolox por cada 100 g de peso fresco ($\text{mg ET } 100 \cdot \text{g}^{-1}$ pf).

Análisis estadístico

Los datos se presentan como la media \pm desviación estándar (DE). Se realizó una comparación de medias empleando la prueba estadística *t*, a una $P=0.05$. La media se obtuvo a través del tiempo de cada tratamiento y para cada variable. El análisis estadístico se llevó a cabo usando el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1999).

Resultados y discusión

La máxima producción de CO_2 y de etileno, en frutos almacenados a 25 °C, se obtuvo al cuarto día, con $78.77 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ y $78.15 \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente (Figuras 1 A y B). En los frutos almacenados a 14 °C, la respiración y producción de etileno fue significativamente menor, entre 40 y 60 % con respecto a los frutos almacenados a 25 °C (Figura 1 A y B). Maldonado-Astudillo et al. (2014) reportaron que la ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' es climatérica al presentar un incremento en la respiración y producción de etileno, luego de siete días de la cosecha. Los frutos almacenados a temperatura baja y con una barrera de baja densidad (polietileno) permitieron ralentizar significativamente la respiración del fruto. La disminución de la tasa de respiración y producción de etileno se debe a que el envasado en atmósfera modificada ralentiza los procesos fisiológicos, bioquímicos y retarda la senescencia (Caleb et al., 2012).

En ciruela mexicana 'Cuernavaqueña', una vez transcurridos los ocho días de evaluación, la pérdida de peso de los frutos almacenados a 14 °C fue menor a 1.0 %, mientras que en los expuestos a 25 °C la pérdida de peso resultó mayor a 2.5 % (Figura 1 C). Maldonado-Astudillo et al. (2014) mencionaron que en frutos del ecotipo de *Spondias purpurea* 'Cuernavaqueña' almacenados a 25 °C pierden 11.46, 11.09 y 12.38 % de peso de los frutos cosechados en etapa inmadura, medio madura y madura a los seis días de almacenamiento, respectivamente. Pérez-López et al. (2004) reportaron pérdidas de peso de hasta 17.6 % en frutos de ciruela mexicana 'Amarilla' almacenados a 20 °C por cuatro días. El uso de un material de barrera de baja densidad (polietileno) impidió la pérdida excesiva de agua por transpiración minimizando la pérdida de peso. La pérdida de peso fue influenciada por la temperatura de almacenamiento y la humedad relativa. Además, se asocia con la transpiración y deterioro del fruto (Maldonado-Astudillo et al., 2014).

La firmeza en los frutos almacenados a 25 °C disminuyó 57.37 % después de ocho días, mientras que en los almacenados a 14 °C disminuyó 23.94 % con respecto a la firmeza inicial (6.0 N; Figura

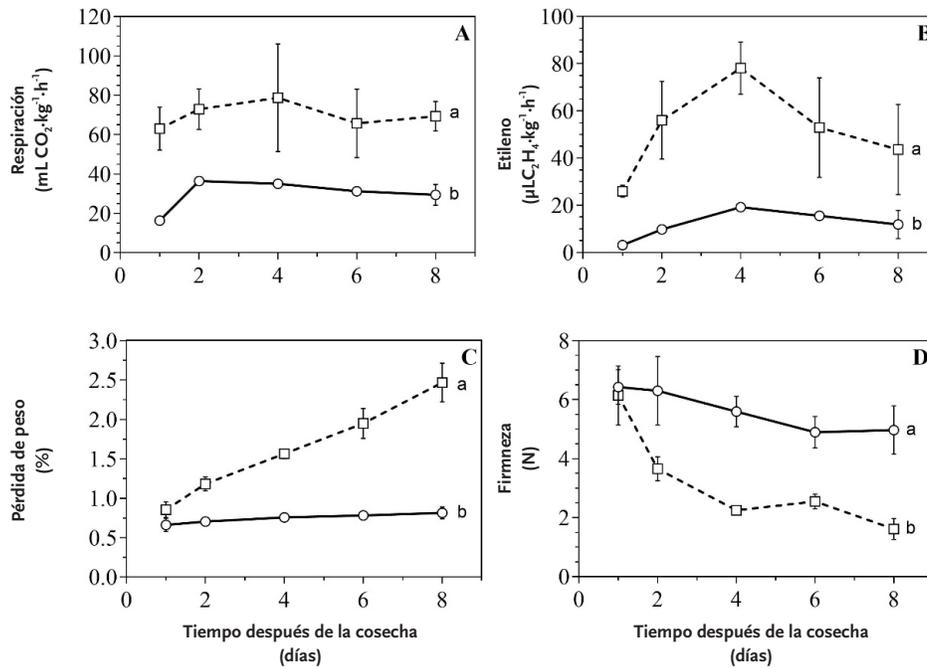


Figura 1. Tasa de respiración (A), producción de etileno (B), pérdida de peso (C) y firmeza (D) de frutos de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' almacenada a 14 °C (—○—) o 25 °C (---□---) en bolsas de polietileno. Medias ± DE, n=3. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas para la prueba de t-student ($P < 0.05$).

1 D). Los resultados sugieren que la temperatura menor permitió conservar la calidad de los frutos y retrasar el ablandamiento. Durante el proceso de maduración, la protopectina, sustancia adherente de las células, se degrada junto con las sustancias pécticas, lo que modifica la textura y consistencia del fruto. El uso de temperaturas que favorecen la maduración incrementa la pérdida de firmeza asociada con la pérdida de agua, síntesis de carbohidratos libres a partir de carbohidratos de reserva y aumento de la actividad de enzimas que actúan sobre la pared celular, causando ablandamiento (Arenas-Ocampo et al., 2007; Prasanna, et al., 2007).

Los sólidos solubles totales se incrementaron en ambos tratamientos y estuvieron entre 11 y 14 °Brix al inicio del experimento, en tanto que al final del almacenamiento alcanzaron entre 14.15 y 17.90 °Brix (Figura 2 A). El análisis estadístico determinó diferencias significativas entre ambos tratamientos, donde los frutos almacenados a 25 °C alcanzaron mayor acumulación de sólidos solubles totales. Pérez-Arias et al. (2008) reportaron entre 12.47 hasta 17.43 °Brix en diversos ecotipos de ciruela mexicana en estado de madurez de consumo. García-González et al. (2016) evaluaron frutos de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' en tres estados de madurez, verde, cambiante y maduro, reportando que, luego de nueve días almacenados a 20 °C los SST se incrementaron entre 23.4 y 25.8 °Brix. Los SST son frecuentemente empleados para evaluar la calidad de los frutos. Además, esta variable es influenciada por la etapa de madurez, condiciones de almacenamiento y tratamientos postcosecha (Maldonado-Astudillo et al., 2014), por lo que las diferencias encontradas para esta variable entre los tratamientos pueden explicarse por efecto del uso de bolsas de

polietileno de baja densidad y temperatura de almacenamiento, sugiriendo un proceso de maduración más acelerado en los frutos almacenados a 25 °C.

La acidez titulable disminuyó durante el periodo de evaluación en ambos tratamientos. Al inicio presentaban 1.2 %, después de ocho días el valor fue alrededor de 0.09 % (Figura 2 B). Aunque en los días 2 y 4 los frutos almacenados a 14 °C mantuvieron valores mayores, no hubo efecto de la temperatura de almacenamiento en el proceso de maduración (Figura 2 B). Como parte del proceso de maduración de un fruto climatérico el contenido de ácidos orgánicos, en este caso el ácido cítrico, se reduce (Parra & Fischer, 2013); tal como ocurrió en los frutos de ciruela mexicana donde el contenido de ácido cítrico disminuyó de forma significativa a través del proceso de maduración (Figura 2 B). De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de bolsas de plástico permitió modificar la atmósfera del fruto, lo cual contribuyó a reducir la incidencia y mantener la calidad de los frutos de ciruela mexicana durante el tiempo de almacenamiento.

En el epicarpio, el contenido de clorofilas totales en los frutos almacenados a 25 °C disminuyó de 16.0 a 5.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ pf en ocho días y los carotenoides totales se incrementaron de 9.9 a 19.7 $\mu\text{g}\beta\text{-caroteno}\cdot\text{g}^{-1}$ pf en el mismo periodo (Figura 3 A y B). En contraparte, en los frutos de ciruela almacenados a 14 °C, el contenido de clorofilas se mantuvo en 16.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ pf y los carotenoides totales se mantuvieron en aproximadamente 9.5 $\mu\text{g}\beta\text{-caroteno}\cdot\text{g}^{-1}$ pf, lo que sugiere que los frutos de este último tratamiento no cambiaron en el color de la epidermis (Figura 3). En los frutos de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' se inicia una

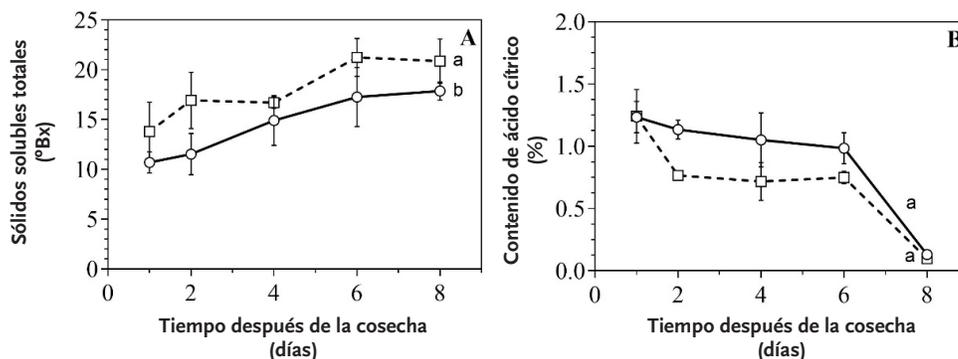


Figura 2. Sólidos solubles totales (A) y acidez titulable en frutos de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' almacenada a 14 °C (—○—) o 25 °C (---□---) en bolsas de polietileno. Medias ± DE, n=3. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas para la prueba de t-student (P < 0.05).

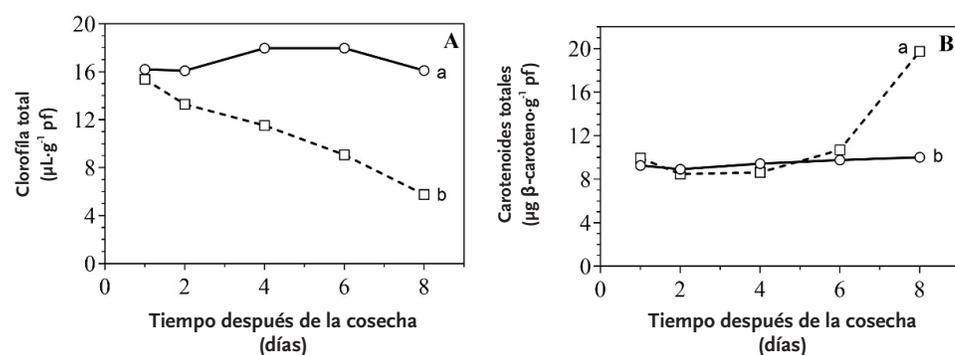


Figura 3. Comportamiento de clorofila total (A) y carotenoides totales (B) en el epicarpio de ciruela mexicana almacenada a 14 °C (—○—) o 25 °C (---□---) en bolsas de polietileno. Medias ± DE, n=3. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas para la prueba de t-student (P < 0.05).

disminución de las clorofilas presentes en la cáscara durante la etapa preclimática y el contenido de carotenoides totales se incrementa dando lugar a coloraciones amarillas y rojizas una vez alcanzada la etapa climática (Maldonado-Astudillo et al., 2014; Álvarez-Vargas et al., 2019). Álvarez-Vargas et al. (2017) reportaron para *Spondias purpurea* L. colectadas en los estados de Guerrero, Morelos y Chiapas, México y evaluadas en estado de madurez de consumo una concentración de 148.21 a 1993.12 µg β-caroteno·g⁻¹ pf, valores superiores a lo encontrado en esta investigación. Los resultados concuerdan con lo reportado por Zuo et al. (2024) quienes almacenaron frutos de la familia *Rhamnaceae* en bolsas de polietileno de baja densidad, donde el contenido de clorofila disminuyó gradualmente durante el tiempo de almacenamiento, mientras que el contenido de carotenoides mostró una tendencia creciente.

Los frutos de *Spondias purpurea* L. poseen elevado potencial comercial debido a sus cualidades sensoriales y nutricionales. Además, son una fuente de compuestos bioactivos tales como fenólicos, vitaminas, carotenoides y minerales, que hacen que sean alimentos funcionales y nutraceuticos, por sus propiedades antioxidantes (Beserra-Almeida et al., 2011; Villa-Hernández et al., 2017). Durante el almacenamiento, la concentración de

compuestos fenólicos en los frutos almacenados a 14 y 25 °C no mostraron diferencias significativas (Figura 4 A) presentando, al octavo día, ambos tratamientos, una concentración de 73.53 mg EAG 100·g⁻¹ pf. Los valores de compuestos fenólicos en este trabajo son menores a los reportados por Suárez-Vargas et al. (2017), quienes obtuvieron valores de 89.21 mg EAG 100·g⁻¹ pf en pulpa de ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' en cuatro estados de madurez. Estos resultados pueden deberse a los diferentes métodos de extracción utilizados en ambas investigaciones.

En cuanto al contenido de flavonoides totales, en ambos tratamientos se incrementó durante los primeros cuatro días, alcanzando 8.0 mg EQ 100·g⁻¹ pf; no obstante, aunque posteriormente disminuyó su contenido, estadísticamente la mayor concentración se presentó en los frutos almacenados a 14 °C (5.49 mg EQ 100·g⁻¹) con respecto a los expuestos a 25 °C (5.22 mg EQ 100·g⁻¹) (Figura 4 B). Suárez-Vargas et al. (2017) reportaron valores del contenido de flavonoides totales entre 17.11 y 23.26 mg EQ 100·g⁻¹ en pulpa para ciruela mexicana 'Cuernavaqueña' en diferentes estados de madurez. Estos valores son mayores a los reportados en la presente investigación, posiblemente derivado de los distintos métodos de cuantificación.

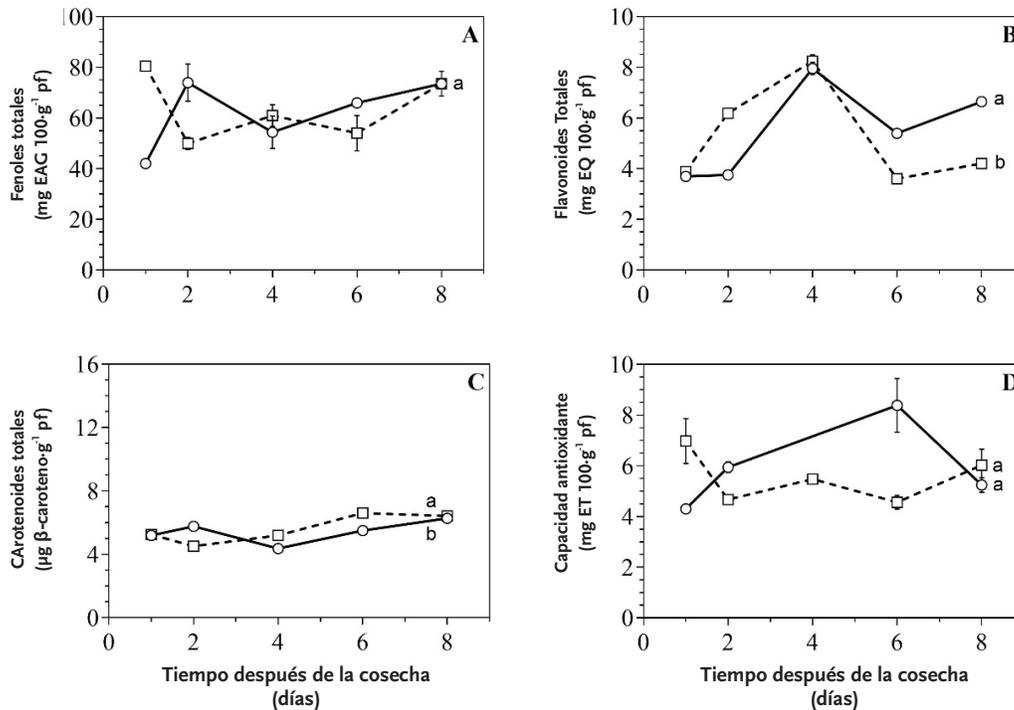


Figura 4. Compuestos antioxidantes y su actividad en la pulpa de ciruela mexicana almacenada a 14 °C (—○—) o 25 °C (—□—) en bolsas de polietileno. Medias ± DE, n=3. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas para la prueba de t-student ($P < 0.05$).

El contenido de carotenoides totales en frutos de *S. purpurea* ecotipo 'Cuernavaqueña' se incrementa durante el proceso de maduración, con mayor concentración en el epicarpio y menor concentración en la pulpa (Maldonado-Astudillo et al., 2014), lo cual coincide con lo encontrado en esta investigación, donde el contenido de carotenoides totales presentes en la pulpa, en ambos tratamientos, resultó menor en comparación con los encontrados en el epicarpio (Figura 3 B y 4 C). En pulpa, el día uno se cuantificó 5.2 µg β-caroteno·g⁻¹ pf y en el octavo día 6.4 µg β-caroteno·g⁻¹ pf, para ambos tratamientos (Figura 4 C), en tanto que en el epicarpio se observó un incremento significativo del contenido de carotenoides totales en los frutos almacenados a 25 °C (Figura 4C). Solorzano-Morán et al. (2015) determinaron que el contenido de carotenoides totales en pulpa de 11 ecotipos evaluados de ciruela mexicana, osciló entre 0.5 y 3.4 mg 100·g⁻¹ pf. Por otro lado, Suárez-Vargas et al. (2017) reportaron valores entre 37 y 150.2 µg β-caroteno·g⁻¹, cuyos valores son mayores a los encontrados en los frutos evaluados en este trabajo.

La calidad nutracéutica de un alimento y su contenido de antioxidantes se estima a través de la capacidad antioxidante total, la cual está dada por una mezcla de diversos antioxidantes que pueden prevenir o retrasar los procesos de oxidación causado por los radicales libres y las especies reactivas de oxígeno (Heo et al., 2007; Beserra-Almeida et al., 2011; Solorzano-Morán et al., 2015). En ciruela mexicana se han realizado diversos estudios con fines de obtener materiales genéticos con características sobresalientes

en cuanto a calidad y aporte de compuestos bioactivos, y así potenciar su comercialización (Álvarez-Vargas et al. 2017).

Con respecto a la capacidad antioxidante determinada por el método ABTS en los frutos de estudio, se observó aumento de 4.3 a 8.3 mg ET 100·g⁻¹ pf durante los primeros seis días de evaluación en los frutos almacenados a 14 °C, pero al octavo día disminuyó a 5.2 mg ET 100·g⁻¹ pf. Por otro lado, en los frutos almacenados a 25 °C la capacidad antioxidante disminuye de 6.9 a 6.0 mg ET 100·g⁻¹ pf (Figura 4 D). Al respecto, Suárez-Vargas et al. (2017) reportaron un comportamiento similar en la capacidad antioxidante medida por el método ABTS, donde se incrementó de 43.4 a 73.7 mg equivalente de ácido ascórbico (EAA) 100·g⁻¹ pf, de estado de madurez fisiológica. Sin embargo, una vez alcanzada la madurez de consumo disminuyó a 57.3 mg EAA 100·g⁻¹ pf. Villarreal-Fuentes et al. (2019) evaluaron la capacidad antioxidante en frutos de diversos genotipos de ciruela mexicana en estado de madurez de consumo, donde encontraron un mínimo 21.4 mg EAA 100·g⁻¹ pf y un máximo de 377.8 mg EAA 100·g⁻¹ pf. para la capacidad antioxidante evaluada con el método ABTS.

Conclusiones

El uso de un empaque de baja densidad, en combinación con almacenamiento a 14 °C, retrasó el proceso de maduración de frutos de *Spondias purpurea* L. ecotipo 'Cuernavaqueña',

dado por una disminución en la intensidad de respiración, producción de etileno y pérdida de peso, así como un menor desarrollo de sabor, indicado por un contenido mayor de SST y menor contenido de ácido cítrico. En el epicarpio se encontró un mínimo desarrollo de color dado por un contenido mayor de clorofila y menor concentración de carotenoides, comparado con los frutos almacenados en bolsas de polietileno a 25 °C, luego de ocho días de almacenamiento. En cuanto a los compuestos bioactivos presentes en pulpa, su contenido resulta atractivo con fines de potencializar el consumo fresco de estos frutos tropicales exóticos. Finalmente, con la modificación de la atmósfera, los frutos extienden la vida útil y mantienen la calidad.

Referencias

- Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Chávez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Rivera-Cabrera, F., Nieto-Ángel, D., Cruz L., Aguilar-Pérez, L. A., & Pelayo Z. C. (2019). Phenological stages and fruit development in the Mexican plum ecotype 'Cuernavaqueña' (*Spondias purpurea* L.). *Fruits*, 74 (4), 194-200. doi: 10.17660/th2019/74.4.6
- Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejacal, I., Chávez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Nieto-Ángel, D., Rivera-Cabrera, F., & Aguilar-Pérez, L. A. (2017). Ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea* L.) de clima húmedo y seco: calidad, metabolitos funcionales y actividad antioxidante. *Interciencia*, 42 (10), 653-660. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/33953313005>
- Arenas-Ocampo, M. L., Evangelista-Lozan, S., Arana-Erassquin, A., Jiménez-Aparicio, A., & Dávila-Ortiz, G. (2007). Softening and biochemical changes of sapote mamey fruit (*Pouteria sapota*) at different development and ripening stages. *Journal of Food Biochemistry*, 27(2), 91-107. doi:10.1111/j.1745-4514.2003.tb00269.x
- Barrios, S., De Acedo, A., Chao, G., De Armas, V., Ares, G., Martín, A., & Lema, P. (2014). Passive modified atmosphere packaging extends shelf life of enzymatically and vacuum-peeled ready-to-eat Valencia orange segments. *Journal of Food Quality*, 37, 135-147. doi:10.1111/jfq.12074
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2008). Aroma Compounds. In H.-D. Belitz, W. Grosch, & P. Schieberle, *Food Chemistry* (pp. 340-402). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-69934-7_6
- Beserra-Almeida, M. M., Machado de Sousa, P. H., Campos-Arriaga, Á. M., Matias do Prado, G., Carvalho-Magalhães, C. E., Arraes-Maia, G., & Gomes de Lemos, T. L. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh exotic fruits from northeastern Brazil. *Food Research International*, 44, 2155-2159. doi:10.1016/j.foodres.2011.03.051
- Caleb, O. J., Opara, U. L., & Witthuhn, C. R. (2012). Modified atmosphere packaging of pomegranate fruit and arils: a review. *Food and bioprocess technology*, 5, 15-30. doi.org/10.1007/s11947-011-0525-7
- Chang, C.-C., Yang, M.-H., Wen, H.-M., & Chern, J.-C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182. doi:10.38212/2224-6614.2748
- García-González, M., Alia-Tejacal, I., Rivera-Cabrera, F., Díaz de León-Sánchez, F., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., & Pelayo-Zaldivar, C. (2016). Refrigeración de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) 'Cuernavaqueña'. *Acta Agrícola y Pecuaría*, 2(2), 27-33.
- Heo, H. J., Kim, Y. J., Chung, D., & Kim, D. O. (2007). Antioxidant capacities of individual and combined phenolics in a model system. *Food Chemistry*, 104, 87-92. doi:10.1016/j.foodchem.2006.11.002
- Jiménez-Arellanes, M. A., Román-Cortés, N. R., & García, I. (2011). Actividad antioxidante y antimicrobiana del extracto hexánico y compuestos puros del rizoma de *Aristolochia taliscana*. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 41(2), 35-41.
- Li, L., Wang, S., Chen, J., Xie, J., Wu, H., Zhan, R., & Li, W. (2014). Major antioxidants and *in vitro* antioxidant capacity of eleven mango (*Mangifera Indica* L.) cultivars. *International Journal of Food Properties*, 17(8), 1872-1887. doi:10.1080/10942912.2012.687798
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejacal, I., Nuñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Pelayo-Zaldivar, C., López-Martínez, V., Andrade Rodríguez, M., Bautista Baños, S., & Valle-Guadarrama, S. (2014). Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. *Scientia Horticulturae*, 174, 193-206. doi:10.1016/j.scienta.2014.05.016
- Marsh, K., Sullivan, M., & Thorp, G. (2011). Titratable acidity in kiwifruit, a comparison of different methods of analysis. *Acta Horticulturae*, 913, 657-660. doi:10.17660/ActaHortic.2011.913.91
- Oliveira, M., Usall, J., Torres, R., Teixidó, N., & Viñas, I. (2015). Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 13-26. doi:10.1016/j.tifs.2015.07.017
- Ospina-Meneses, S. M., & Cartagena-Valenzuela, J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(2), 112-123.
- Parra C, A., & Fischer, G. (2013). Maduración y comportamiento poscosecha de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1), 98–110. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i1.2039>
- Pérez-Arias, G. A., Alia-Tejacal, I., Andrade-Rodríguez, M., López-Martínez, V., Pérez-López, A., Ariza-Flores, R., & Villarreal-Fuentes, J. M. (2008). Características físicas y químicas de ciruelas mexicana (*Spondias purpurea* L.) en Guerrero. *Investigación Agropecuaria*, 5(2), 141-149.
- Pérez-López, A., Saucedo-Veloz, C., Arévalo-Galarza, M. L., & Muratalla-Lúa, A. (2004). Effect of the maturity stage on postharvest quality and shelf life in Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) fruits. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(2), 133-139.
- Pompelli, M. F., Franca, S. C., Tigre, R. C., Oliveira, M. T., Sacilot, M., & Pereira, E. C. (2013). Spectrophotometric determinations of chloroplastidic pigments in acetone, ethanol and dimethylsulphoxide. *Revista Brasileira de Biología*, 11(1), 52-58.
- Prasanna, V., Prabha, T. N., & Tharanathan, R. N. (2007). Fruit Ripening Phenomena—An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(1), 1-19. doi:10.1080/10408390600976841
- Priyadarshi, R., Deeba, F., Sauraj, & Negi, Y. S. (2020). Modified atmosphere packaging development. In Y. Zhang, Processing and Development of Polysaccharide-Based Biopolymers for Packaging Applications (pp. 261-280). doi:10.1016/B978-0-12-818795-1.00011-3
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved

- ABTS radical cation decoloration assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(9/10), 1231-1237.
- SAS Institute Inc. (1999). SAS/STAT® User's Guide, Version 8. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects - A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820-897. doi:10.1016/j.jff.2015.06.018
- Solorzano-Morán, S., Alía-Tejagal, I., Rivera-Cabrera, F., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Pelayo-Zaldívar, C., & Maldonado-Astudillo, Y. I. (2015). Quality attributes and functional compounds of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) fruit ecotypes. *Fruits*, 70(5), 261-270. doi:10.1051/fruits/2015027
- Speek, A. J., Speek-Saichua, S., & Schreurs, W. H. (1988). Total carotenoid and β -carotene contents of Thai vegetables and the effect of processing. *Food Chemistry*, 27, 245-257. doi:10.1016/0308-8146(88)90010-6
- Suárez-Vargas, A., Juárez-López, P., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Guillén-Sánchez, D., & Alía-Tejagal, I. (2017). Botany and physiology antioxidant activity and physicochemical parameters in 'Cuernavaqueña' Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) at different ripening stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(4), 1-10. doi:10.1590/0100-29452017787
- Tomás-Barberán, F. A., & Espín, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 853-876. doi:10.1002/jsfa.885
- Tovar, B., Montalvo, E., Demián, B. M., García, H. S., & Mata, M. (2011). Application of vacuum and exogenous ethylene on Ataulfo mango ripening. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 2040-2046. doi:10.1016/j.lwt.2011.06.005
- Vargas-Simón, G. (2018). Ciruela/Mexican Plum—*Spondias purpurea* L. In S. Rodrigues, E. de Oliveira Silva, & E. Sousa de Brito, *Exotic Fruits* (pp. 141-152). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-803138-4.00052-6
- Villa-Hernández, J. M., Mendoza-Cardoso, G., Mendoza-Espinoza, J. A., Vela-Hinojosa, C., Díaz de León-Sánchez, F., Rivera-Cabrera, F., Alía-Tejagal, I., & Pérez-Flores, L. J. (2017). Antioxidant capacity *in vitro* and *in vivo* of various ecotypes of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food Science*, 1-7. doi:10.1111/1750-3841.13862
- Villarreal-Fuentes, J. M., Alía-Tejagal, I., Pérez-Pérez, X. D., Espinosa-Zaragoza, S., Marroquín-Agreda, F. J., & Núñez-Colín, C. A. (2019). Caracterización fisicoquímica de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en el Soconusco, Chiapas. *Ecistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 219-229. doi:10.19136/era.a6n17.1949
- Zuo, Z., Jiang, P., Chen, D., Zhang, C., Guo, F., Nie, X., Di Wu., Xinguang Fan., & Zhao, H. (2024). Improving the storage quality and antioxidant capacity of postharvest winter jujube by laser microporous modified atmosphere packaging. *Scientia Horticulturae*, 337, 113477. doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113477