

Evaluación del efecto de aceites esenciales naturales y nanoemulsionados de cítricos (*Citrus latifolia*) sobre la vida de anaquel del aguacate (*Persea americana*)

Evaluation of the effect of natural and nanoemulsified essential oils from citrus fruits (*Citrus latifolia*) on the shelf life of avocados (*Persea americana*)

Keren Eversly¹  Maira Díaz¹  Kimberly Castro¹  Jay Molino¹ 
Ana Luisa García¹  Lurys Martínez¹ 

¹Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá

Correo: keren.eversly@udelas.ac.pa / maira.diaz.852@udelas.ac.pa / kimberly.castro.2378@udelas.ac.pa / jay.molino@udelas.ac.pa / ana.garcia.4@udelas.ac.pa / lurys.martinez@udelas.ac.pa

DOI: <https://doi.org/10.57819/xwz3-0h32>



Fecha de Recepción: 27-08-2025 **Fecha de Aceptación:** 30-09-2025 **Fecha de publicación:** 01-01-2026

Conflictos de interés: Ninguno que declarar

RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto de aceites esenciales naturales y nanoemulsionados de cítricos (*Citrus latifolia*) sobre la vida de anaquel del aguacate (*Persea americana*). Se aplicaron tratamientos postcosecha utilizando aceite esencial puro y nanoemulsiones formuladas al 4% y 8% de concentración de aceite esencial. Los resultados mostraron que los tratamientos con nanoemulsión redujeron significativamente la pérdida de firmeza, manteniendo valores superiores a 1.8 kgf (kilogramo-fuerza) hasta el día 10 de almacenamiento, en comparación con el grupo control que descendió a menos de 1.0 kgf. Asimismo, la pérdida de peso fue menor en los grupos tratados, con pérdidas inferiores de hasta el 3% cuando se usó la nanoemulsión frente a un 8% en el grupo control. El crecimiento microbiano en la superficie se vio afectada negativamente en los frutos tratados con nanoemulsiones en comparación con los controles. La vida de anaquel de los aguacates tratados con nanoemulsiones se extendió de 8 días (control) a aproximadamente 10–12 días. Estos hallazgos sugieren que el recubrimiento con aceite esencial nanoemulsionado representa una alternativa natural y efectiva para prolongar la vida útil del aguacate, con potencial impacto en la reducción de pérdidas postcosecha y la sostenibilidad del sistema agroalimentario.

Palabras clave: arrastre de vapor, coliformes totales, firmeza del fruto, levaduras, nanoemulsión, vida útil.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of natural and nanoemulsified essential oils from citrus fruits (*Citrus latifolia*) on the shelf life of avocados (*Persea americana*). Post-harvest treatments were applied using pure essential oil and nanoemulsions formulated at 4% and 8% essential oil concentration. The results showed that the nanoemulsion treatments significantly reduced firmness loss, maintaining values above 1.8 kgf (kilogram-force) until day 10 of storage, compared to the control group, which fell below 1.0 kgf. Likewise, weight loss was lower in the treated groups, with losses of less than 3% when the nanoemulsion was used, compared to 8% in the control group. Microbial growth on the surface was negatively affected in fruits treated with nanoemulsions compared to the controls. The shelf life of avocados treated with nanoemulsions was extended from 8 days (control) to approximately 10–12 days. These findings suggest that coating with nanoemulsified essential oil represents a natural and effective alternative for extending the shelf life of avocados, with a potential impact on reducing post-harvest losses and the sustainability of the agri-food system.

Key words: steam dragging, total coliforms, fruit firmness, yeasts, nanoemulsion, shelf life.

Para citar este artículo: Eversly, K., Díaz, M., Castro, K., Molino, J., García, A.L., Martínez, L. (2026). Evaluación del efecto de aceites esenciales naturales y nanoemulsionados de cítricos (*Citrus latifolia*) sobre la vida de anaquel del aguacate (*Persea americana*). Revista Científica de la Universidad Especializada de las Américas, Núm.18, ene-dic. 2026, pp.211-227. DOI: <https://doi.org/10.57819/xwz3-0h32>

Introducción

El aguacate (*Persea americana*) es un fruto originario de Mesoamérica, cultivado en zonas tropicales y subtropicales y perteneciente a la familia Lauraceae (Zafar & Sidhu, 2011). En Panamá, el aguacate se comercializa principalmente como fruta fresca en mercados locales, supermercados y puntos de venta informales a lo largo del país. Además de su importancia nutricional, el aguacate ha cobrado relevancia gastronómica en áreas urbanas de Panamá (MIDA, 2022). Existen tres grupos ecológicos de aguacate (mexicana, guatemalteca y antillana), anteriormente consideradas especies separadas, pero hoy clasificadas dentro de *P. americana* (Baiza Avelar, 2003). Estas variedades presentan diferencias morfológicas (color de brotes, olor de las hojas, forma del fruto, etc.) y de comportamiento postcosecha.

A pesar de su valor comercial, la vida de anaquel del aguacate es limitada debido a su naturaleza climática: continúa madurando y sufriendo cambios bioquímicos después de la cosecha, lo que acelera su deterioro. Bajo condiciones controladas de refrigeración (4–12 °C, alta humedad relativa), el aguacate Hass puede conservar calidad por 2 a 4 semanas (González Cuello, Pérez Mendoza & Gélvez Ordóñez, 2017). No obstante, la exposición prolongada al frío puede provocar daños por enfriamiento en la pulpa y reducir la calidad del fruto (Martínez Marín & Macías, 2021). Estudios previos señalan que a 4 °C ocurren lesiones en los tejidos que alteran las características organolépticas del aguacate (Martínez Marín & Macías, 2021). Si bien la refrigeración retrasa la maduración, no es una solución óptima a largo plazo debido a estos daños. Por ello, se necesitan métodos postcosecha alternativos para prolongar la vida útil del aguacate sin comprometer su calidad.

En la búsqueda de alternativas naturales para la conservación de alimentos frescos, los aceites esenciales (AEs) han emergido como agentes bioconservantes prometedores. Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos volátiles (principalmente terpenos, fenoles y otros aromáticos) extraídos de plantas, y poseen reconocidas propiedades antimicrobianas y antioxidantes (Deyno et al., 2019; Masqui et al., 2022). Se han documentado efectos antifúngicos de diversos AEs contra patógenos postcosecha en frutas. En particular, los aceites esenciales cítricos (como el de limón persa, *Citrus latifolia*) contienen altos niveles de limoneno y otros

monoterpenos con actividad inhibitoria frente a hongos y bacterias (Regnier et al., 2010). Sin embargo, el uso directo de AEs en frutas presenta retos, ya que su alta volatilidad y baja solubilidad en agua dificultan su aplicación homogénea y pueden afectar el sabor/aroma del fruto en concentraciones elevadas.

Para potenciar la eficacia de los aceites esenciales y mitigar sus limitaciones, se ha recurrido a la nanotecnología en forma de nanoemulsiones. Las nanoemulsiones son emulsiones con tamaño de gota en el rango de nanómetros, que mejoran la dispersión de compuestos hidrofóbicos en medios acuosos. La encapsulación de aceites esenciales en nanoemulsiones puede incrementar su estabilidad química, reducir su volatilidad y controlar su liberación, así como mejorar su biodisponibilidad sobre la superficie del alimento (Ansarian, 2022; McClements & Rao, 2011). Estudios han demostrado que encapsular AEs en nanoemulsiones disminuye el impacto sensorial (sabor/olor) en los alimentos sin mermar su actividad biológica (McClements & Rao, 2011). Esto permite usar concentraciones eficaces de AEs para inhibir microorganismos y retrasar la oxidación, sin afectar negativamente la aceptabilidad del fruto por parte del consumidor. Las nanoemulsiones de AEs se han explorado como recubrimientos comestibles en múltiples productos agrícolas, logrando prolongar su vida postcosecha (Oliveira Filho et al., 2021). Por ejemplo, recubrimientos con aceite esencial de tomillo nanoemulsionado han extendido la vida útil de fresas al reducir su tasa respiratoria y carga microbiana (Oliveira et al., 2023). Igualmente, emulsiones y películas comestibles incorporando aceites esenciales cítricos han mostrado retardar la senescencia en frutos tropicales como papaya y mango (Heredia Chávez & Montenegro Aya, 2015; Miranda et al., 2022). Estas tecnologías de recubrimiento actúan creando una barrera semipermeable en la superficie del fruto, modificando el intercambio de gases y reduciendo la pérdida de agua, lo cual desacelera la respiración y maduración (de Oliveira Filho et al., 2021). Adicionalmente, los compuestos activos en los AEs ejercen control sobre microorganismos que causan pudriciones, contribuyendo a conservar la calidad sanitaria de los frutos (Deyno et al., 2019).

A pesar de los avances, existe escasa información publicada específicamente sobre el uso de aceite esencial de limón persa, ya sea íntegro o nanoemulsionado, para prolongar la vida de anaquel de aguacates enteros. Gran parte de la investigación en aguacate se ha centrado en

controlar enfermedades postcosecha (ej. antracnosis) con extractos naturales (Regnier et al., 2010) o en recubrimientos comestibles convencionales (González Cuello et al., 2017), pero la combinación de aceites esenciales cítricos y nanotecnología en este fruto no ha sido ampliamente explorada.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el efecto del aceite esencial de limón persa en dos presentaciones –natural (sin formulación) y nanoemulsionado– sobre la vida de anaquel y calidad postcosecha del aguacate Hass. Se plantea que la aplicación postcosecha de este aceite esencial, en especial en forma de nanoemulsión, podría prolongar la vida útil del aguacate al mantener por más tiempo sus atributos físicos (firmeza, peso, color), químicos (pH, componentes nutricionales) y microbiológicos dentro de parámetros aceptables.

Esta investigación responde a la necesidad de desarrollar métodos de conservación más sostenibles y naturales para frutas de alto valor. El uso de aceites esenciales de origen vegetal, como el de limón persa, ofrece una alternativa inocua y ambientalmente amigable frente a fungicidas sintéticos o recubrimientos convencionales. De demostrar eficacia, esta tecnología de recubrimiento podría incrementar el valor económico del aguacate al reducir pérdidas postcosecha, a la vez que satisface la demanda de los consumidores por alimentos más seguros, con menos aditivos químicos (Heredia Chávez & Montenegro Aya, 2015). En suma, el estudio busca generar conocimiento aplicable que beneficie a la agroindustria local, contribuyendo a alargar el período de comercialización del aguacate mediante soluciones basadas en compuestos naturales.

Materiales y Métodos

Extracción del aceite esencial

Se emplearon frutos de limón persa (*Citrus latifolia*) obtenidos de un mercado local de Panamá. La extracción del aceite esencial (AE) se realizó mediante destilación por arrastre de vapor. Previamente, los limones fueron lavados con agua potable para eliminar suciedad superficial.

Se retiró la cáscara externa (flavedo y albedo) procurando evitar la inclusión excesiva de partes blancas. Aproximadamente 300 gramos de cáscara fresca se colocaron en el aparato de destilación por vapor de agua. El vapor atravesó el material vegetal, arrastrando los compuestos volátiles. El destilado obtenido se enfrió y decantó, separando la fase oleosa (aceite esencial) de la fase acuosa. El aceite esencial crudo se pasó por una columna con sulfato de sodio anhidro para eliminar trazas de agua y luego se almacenó en viales de vidrio ámbar a 4 °C hasta su uso. El rendimiento promedio de extracción fue de ~1,4% p/p.

Caracterización del aceite esencial

Al AE de *Citrus latifolia* obtenido se le determinaron algunas propiedades físico-químicas básicas siguiendo protocolos estándar. El índice de refracción se midió según la norma ISO 592:1998 para aceites esenciales. Se utilizó un refractómetro digital calibrado a 20 °C, obteniendo un valor de ~1.4740 (indicativo de pureza y composición terpenoide elevada, dominada por limoneno). El pH del aceite se midió con potenciómetro digital, encontrando un pH cercano a neutro (~7,0) dado que se trata de un extracto oleoso prácticamente anhidro. La densidad relativa a 20 °C se midió con un densímetro de vidrio, obteniendo ~0,85 g/mL, coherente con la literatura para aceites esenciales cítricos ricos en limoneno. Además, se evaluó la solubilidad del AE en distintos disolventes: en agua destilada mostró inmiscibilidad formando gotículas separadas (propio de su carácter hidrofóbico), mientras que en aceite mineral se mezcló completamente y en etanol al 70% mostró miscibilidad parcial. Finalmente, se determinó el residuo por evaporación calentando una alícuota del aceite a 150 °C; se observó un residuo no volátil menor al 1%, reflejando la baja proporción de compuestos de alto peso molecular no volátiles en el AE.

Preparación de la nanoemulsión

Se formuló una nanoemulsión de aceite esencial de limón persa mediante un método de emulsificación a alta energía, adaptado de Solís-Silva et al. (2018). Para la fase oleosa, se mezclaron 0,42 g del aceite esencial (*Citrus latifolia*) con 3,81 g de polisorbato 80 (Tween 80) como tensioactivo no iónico.

La fase acuosa se preparó con 7,0 g de agua destilada y 0,20 g de lecitina de soya (emulsionante natural). Ambas fases se homogeneizaron inicialmente usando un homogeneizador de rotor-estator a 9.000 rpm durante 5 minutos, con pulsos de 10 segundos de agitación seguidos de 10 segundos de reposo, para pre-emulsificar la mezcla. A continuación, la emulsión cruda se sometió a una segunda etapa de homogeneización más intensa: se aumentó la velocidad gradualmente hasta 15.000 rpm durante un tiempo total de 20 minutos (con intervalos cortos para evitar calentamiento excesivo). Este proceso de alta cizalla redujo el tamaño de gota del aceite esencial a escala nanométrica, obteniendo una nanoemulsión de aspecto lechoso translúcido y estable. La nanoemulsión final (denominada tratamiento & Nano) contenía aproximadamente un 4% p/p de aceite esencial. Adicionalmente, se preparó una segunda nanoemulsión con mayor concentración de aceite (denominada & Nano) incrementando la proporción de AE a ~8% p/p, manteniendo constantes los demás componentes y condiciones de homogeneización.

Ambas formulaciones se almacenaron en frascos esterilizados a 4 °C hasta su aplicación en los frutos, y mostraron estabilidad física (sin separación de fases) durante al menos 2 semanas posteriores a su preparación.

Obtención y preparación de los frutos

Se seleccionaron aguacates cv. Hass en estado de madurez fisiológica intermedia (frutos firmes, de piel verde oscura uniforme). Los frutos, de tamaño y peso uniforme (~380–400 g), se obtuvieron de un productor local y se trasladaron cuidadosamente al laboratorio el mismo día de cosecha. En el laboratorio de Biotecnología de Alimentos (UDELAS), los aguacates se sometieron a un proceso de desinfección superficial sumergiéndolos durante 2 minutos en una solución de hipoclorito de sodio a 500 ppm, siguiendo recomendaciones para eliminar patógenos superficiales (DIGESA, 2007). Luego, se enjuagaron con agua estéril y se secaron con toallas de papel estériles.

Cada fruto se inspeccionó para descartar aquellos con daños visibles o defectos. Los aguacates seleccionados (108 unidades en total) se dividieron aleatoriamente en grupos de tratamiento para los distintos análisis.

Diseño experimental y tratamientos

Se definieron cuatro grupos de tratamiento postcosecha, cada uno con 27 aguacates: (C) Control sin tratamiento (frutos sin recubrimiento, almacenados en condiciones ambientales de laboratorio); (B) Blanco o control de formulación (frutos recubiertos con la formulación base sin aceite esencial, es decir, solo con la matriz emulsificante de Tween 80 y lecitina en agua, para aislar el efecto del aceite); (1N) Nanoemulsión #1 (frutos tratados con el recubrimiento conteniendo la nanoemulsión al 4% de AE); y (2N) Nanoemulsión #2 (frutos tratados con la nanoemulsión al 8% de AE). Cada fruto tratado se codificó con un código único que indica el tratamiento y el día de evaluación (por ejemplo, "1N3D6" denota fruto del grupo Nano#1, réplica 3, evaluado el día 6).

La aplicación de los tratamientos se realizó por inmersión: cada aguacate se sumergió completamente durante 1 minuto en la solución correspondiente (agua destilada para el control, solución emulsificante sin AE para Blanco, nanoemulsiones para 1N y 2N). Luego se dejaron escurrir y secar al aire en ambiente estéril durante 30 minutos, formando una película delgada sobre la superficie del fruto. Los frutos se almacenaron a temperatura ambiente controlada (~25 °C, 60% HR) imitando condiciones típicas de comercialización local.

Ensayos fisicoquímicos

Se llevaron a cabo mediciones periódicas de parámetros de calidad físico-química en los aguacates durante el almacenamiento, con una frecuencia de cada 2 días, hasta observar signos claros de sobre maduración o deterioro. En total se consideraron los días 0 (inicial, postratamiento), 2, 4, 6, 8 y 10 para evaluaciones fisicoquímicas. En cada punto temporal, se tomaron 3 frutos por tratamiento (réplicas) para análisis destructivos en laboratorio. Los parámetros medidos fueron:

- **Firmeza de la pulpa:** Se evaluó la resistencia del fruto a la compresión utilizando un penetrómetro de puntas intercambiables (tipo Effegi) con escala de 0–20 kg. Antes de la medición, se retiró un círculo pequeño de epicarpio en dos lados opuestos del fruto. La dureza se midió penetrando la pulpa a 1 cm de profundidad; el valor (en kilogramos-fuerza, kgf) se registró como indicador de textura. Una mayor firmeza indica menor grado de madurez. Esta prueba se hizo a 25 °C (temperatura ambiente) y se tomaron dos mediciones por fruto (promediadas luego).

- **Pérdida de peso (deshidratación):** Se monitoreó la pérdida fisiológica de peso pesando individualmente cada fruto marcado a lo largo del almacenamiento. El peso inicial (día 0, tras secado) de cada aguacate se comparó con el peso en días posteriores. La pérdida de peso se expresó en porcentaje respecto al peso inicial. Las mediciones se hicieron con una balanza analítica ($\pm 0,01$ g). Este parámetro refleja la tasa de transpiración y respiración; pérdidas elevadas implican marchitamiento y acortamiento de vida útil.

- **pH de la pulpa:** Se prepararon muestras de pulpa para medir pH como indicativo de cambios químicos durante la maduración (generalmente el pH aumenta ligeramente con la madurez en aguacate). Para cada fruto, se homogenizaron 10 g de pulpa comestible (parte central sin cáscara ni semilla) con 90 mL de agua destilada. La mezcla se dejó reposar 1 hora para extraer bien los solutos en el líquido, luego se filtró y midió el pH de la solución con un potenciómetro calibrado (Marca Hanna Instruments). Se realizaron triplicados por muestra.

- **Color de la cáscara y la pulpa: (En caso de cambios apreciables).** Se observó visualmente la evolución de color de la piel (de verde a negro) y se categorizó cualitativamente el estado de madurez externa. No se empleó colorímetro en este estudio, pero las observaciones sirvieron de apoyo para correlacionar con otros parámetros.

Ensayos microbiológicos

Paralelamente, se evaluó la carga microbiana superficial en los frutos de cada tratamiento, enfocándonos en contaminantes comunes: coliformes totales (indicadores de contaminación bacteriana general, incluyendo posibles *E. coli*) y levaduras/mohos (hongos). Las evaluaciones microbiológicas se realizaron en el día 0 (inmediatamente después del tratamiento), día 3 y día

9 del almacenamiento, de acuerdo con el diseño experimental (12 frutos en total por tratamiento para microbios: 4 frutos x 3 tiempos, distribuidos independientemente de los usados en fisicoquímica).

Para evaluar la carga microbiológica en la superficie de los aguacates (*Persea americana*), se utilizó la técnica de hisopado adaptada a frutas de superficies irregulares (Pérez, 2007), seguida del análisis mediante placas Compact Dry específicas. La preparación y toma de muestra se realizó frotando la superficie del aguacate utilizando un hisopo inclinado a 30°, aplicando el hisopado en cuatro direcciones (horizontal, vertical y diagonal) dentro del área delimitada por una plantilla estéril, asegurando así la cobertura completa; el hisopo se introduce en un tubo estéril con 10 mL de solución diluyente, y luego se humedece un nuevo hisopo estéril en esta solución (agua de peptona al 0.1% o solución salina al 0.85–0.90%), escurriendo el exceso de líquido contra la pared del tubo y descartando la parte manipulada del hisopo. La siembra se hizo en una placa Compact Dry® EC para la detección de coliformes totales y *E. coli*, pipeteando 1 mL de la muestra homogeneizada sobre la placa y permitiendo que el líquido se distribuya de forma uniforme.

Posteriormente, las placas se incuban invertidas a 37 ± 1 °C durante 24 ± 2 horas. En la lectura e interpretación de resultados, las colonias de *E. coli* se identifican por su color azul o azul-púrpura, debido a la detección de β -glucuronidasa, mientras que las colonias de coliformes presentan un color rojo o rosado, asociado a la β -galactosidasa.

Para la detección de levaduras y mohos se utilizó la placa Compact Dry® YM, sobre la cual se pipetea 1 mL de la muestra, permitiendo que el líquido se distribuya uniformemente antes de incubar las placas a 25 ± 2 °C durante un periodo de 3 a 7 días. En la lectura e interpretación de resultados, las levaduras se identifican como colonias azuladas o incoloras, de aspecto puntual y elevadas, debido a la acción del sustrato cromogénico X-Phos, mientras que los mohos se observan como colonias algodonosas, con crecimiento tridimensional y colores variados.

Determinación de la vida útil

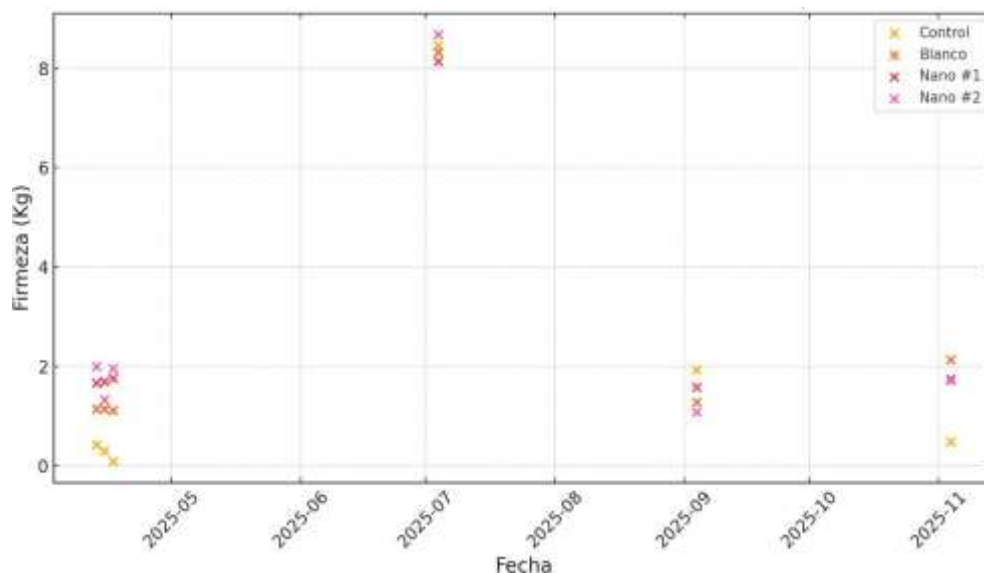
Para fines de este estudio, se definió operativamente la vida útil del aguacate como el tiempo

de almacenamiento (días) hasta que el fruto pierde su aptitud de consumo o comercialización debido a ablandamiento excesivo, pudrición o descomposición visible. Se consideró que un aguacate alcanzó el final de su vida de anaquel cuando su firmeza cayó por debajo de ~ 1 kilogramo-fuerza (kgf): pulpa muy blanda o cuando presentó signos evidentes de deterioro (pudriciones profundas, moho abundante en cáscara, olor fermentado). Este criterio combina tanto el parámetro instrumental (firmeza mínima aceptable para manejo) como la observación del color del fruto. Cada tratamiento se monitoreó periódicamente a partir del día cero para detectar cuándo la mayoría de los frutos cruzaban ese umbral. Adicionalmente, se apoyó la determinación con la información microbiológica: la detección de cargas microbianas muy altas o presencia de patógenos indicaría fin de vida útil por razones sanitarias. La vida útil (en días) se comparó entre tratamientos para evaluar el efecto de los aceites esenciales.

Resultados

Figura 1

Evolución de la firmeza de los aguacates durante el almacenamiento a temperatura ambiente bajo los diferentes tratamientos: Control, Blanco, Nano 1 y Nano 2



La Figura 1 muestra la evolución de la firmeza de la pulpa de aguacate (en kgf) a lo largo del almacenamiento, bajo los distintos tratamientos postcosecha. Cada punto representa la dureza promedio de la pulpa en una fecha de evaluación (día 0, 3, 6, 9, etc.), para los grupos: Control (sin recubrimiento), Blanco (recubrimiento sin AE), Nano #1 (nanoemulsión 4% AE) y Nano #2 (nanoemulsión 8% AE).

Se observa que todos los frutos iniciaron con una firmeza alta (~ 2 kgf o superior). En el caso del grupo control, la firmeza disminuyó rápidamente con el tiempo, cayendo por debajo de 1 kgf antes del día 10 (indicando pulpa muy blanda).

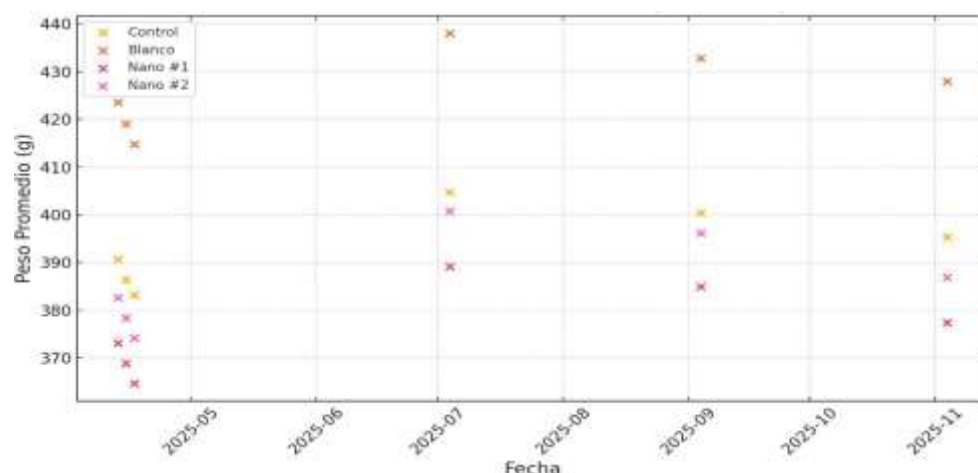
Los tratamientos con aceites esenciales retrasaron significativamente la pérdida de firmeza: tanto los frutos tratados con la nanoemulsión #1 como #2 mantuvieron valores de dureza por encima de 1.5 kgf hasta el final del período de evaluación. Incluso el tratamiento Blanco (sin AE, solo emulsificante) mostró una ligera mejoría en firmeza respecto al control, posiblemente por el efecto barrera físico del recubrimiento. No obstante, la conservación de la firmeza fue más pronunciada en los tratamientos con AE nanoemulsionado. Al día 10, los aguacates Nano #2 presentaban la pulpa más firme (≈ 2.0 kgf), seguidos de Nano #1 (~ 1.8 kgf), mientras que los controles estaban casi completamente blandos (~ 1.0 kgf).

Estas diferencias sugieren que la aplicación del aceite esencial, especialmente en forma de nanoemulsión concentrada, retardó el ablandamiento propio de la maduración del aguacate, prolongando su textura firme por más tiempo.

Las comparaciones estadísticas indicaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en firmeza entre los grupos con AE (Nano #1, #2) y el control desde el día 4 en adelante.

Figura 2

Evolución de la pérdida de peso (%) de los aguacates durante el almacenamiento, bajo los tratamientos Control, Blanco, Nano 1 y Nano 2

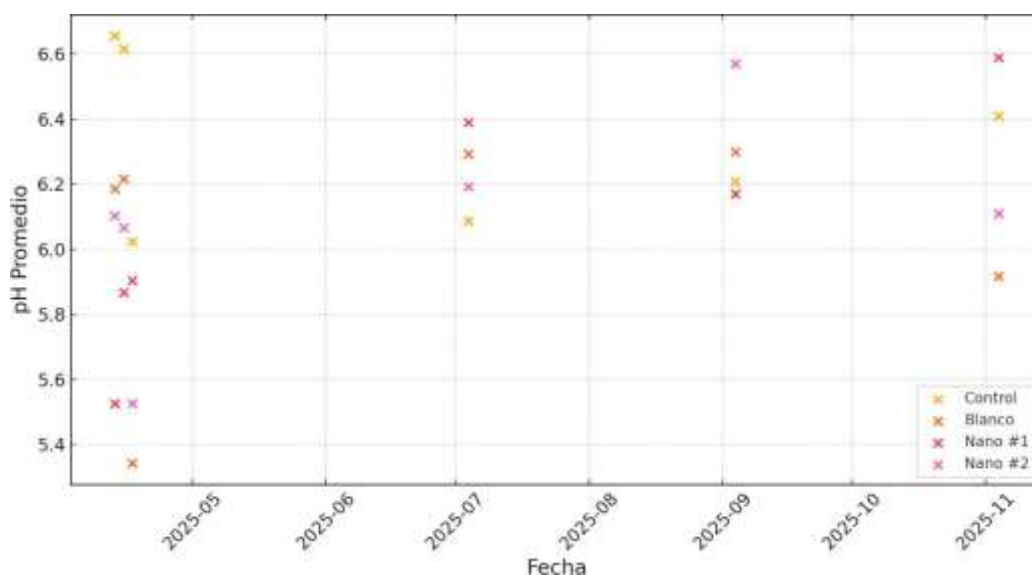


La figura 2 muestra la evolución del peso promedio de los aguacates (gramos) durante el almacenamiento en cada tratamiento. El peso promedio inicial de los frutos fue alrededor de 380–390 g. A medida que transcurrieron los días, los frutos de todos los grupos experimentaron pérdida de peso por transpiración y respiración, aunque con distinta magnitud. Los aguacates del grupo Control mostraron la mayor pérdida de peso relativa, disminuyendo aproximadamente un 8% de su peso inicial tras 10 días (descendiendo a ~360 g en promedio). En cambio, los frutos recubiertos con nanoemulsiones de AE perdieron menos peso: el grupo Nano #2 terminó con ~400 g promedio (pérdida <3%), prácticamente manteniendo su peso inicial dentro del margen de error, mientras que Nano #1 y Blanco rondaron ~390–395 g (pérdida ~2–4%). Esto indica que los recubrimientos comestibles actuaron como una barrera semipermeable que redujo la tasa de deshidratación de los aguacates. Especialmente la nanoemulsión de mayor concentración (Nano #2) fue efectiva para minimizar la pérdida de agua, probablemente debido a una película más compacta o de mejores propiedades de barrera en la superficie del fruto. Al final del período, la diferencia de peso entre Control y Nano #2 fue notable (unos 40 g, equivalente a ~8% del peso), lo cual se reflejó en el aspecto: los aguacates control lucían más arrugados y con síntomas de deshidratación, mientras que los tratados con AE estaban menos marchitos. Desde el punto de vista estadístico, a partir del día 6 las pérdidas de peso acumuladas fueron significativamente

menores en los grupos con recubrimiento nanoemulsionado frente al control ($p<0,05$). Este resultado confirma que el tratamiento contribuyó a mantener la frescura de los frutos al disminuir la transpiración y consecuente merma de masa.

Figura 3

Variación del pH de la pulpa de los aguacates durante el almacenamiento, comparando los tratamientos Control, Blanco, Nano 1 y Nano 2



La figura 3 muestra la evolución del pH promedio de la pulpa de aguacate durante el almacenamiento en cada grupo de tratamiento. Inicialmente, la pulpa de los frutos presentaba un pH alrededor de 5.5–5.8 (ligeramente ácido, común en aguacates recién cosechados). Con el avance de la maduración, el pH de la pulpa tendió a incrementarse gradualmente en todos los casos, acercándose a condiciones más neutras. En el grupo Control, el pH subió de ~5.4 inicial a ~6.0 al final, reflejando cambios químicos asociados a la maduración (posiblemente una reducción de ácidos orgánicos consumidos en respiración, liberación de compuestos amínicos, etc.). Por su parte, los frutos tratados con aceites esenciales mostraron un aumento de pH algo mayor: por ejemplo, el grupo Nano #2 alcanzó un pH ~6.5 hacia el día 10, ligeramente superior al control. El tratamiento Blanco y Nano #1 presentaron valores intermedios (~6.2–6.3 al final).

Estas diferencias sugieren que los aceites esenciales podrían haber influido en el metabolismo del fruto, quizás retardando procesos fermentativos que producen ácidos, o bien afectando la actividad microbiana que podría acidificar la pulpa. En cualquier caso, las variaciones de pH entre tratamientos no fueron tan drásticas como las observadas en firmeza o peso. Todos los aguacates permanecieron en un rango de pH aceptable para pulpa fresca (5.5–6.5). Sin embargo, cabe destacar que hacia el día 9–10, algunos frutos control presentaban áreas de pulpa sobre- madura con pH localmente más alto y comenzaban a desarrollar sabores anómalos, mientras que los tratados con AE mantenían un perfil organoléptico más parecido al fruto fresco. Estadísticamente, al final del almacenamiento el pH de Nano #2 resultó significativamente mayor que el del control ($p < 0,05$), aunque las diferencias absolutas fueron pequeñas (~ 0.4 unidades). En conjunto, el comportamiento del pH sugiere que los tratamientos prolongaron ligeramente la etapa de pre climatérico, manteniendo condiciones internas estables por más tiempo.

Resultados microbiológicos

En el análisis de coliformes totales y *E. coli* al día 9, el control presentó valores de MNPC (Más Numeroso Para Contar), lo que indica una alta carga microbiana que excede el límite de cuantificación de las placas. El tratamiento con Twin 80 mostró un crecimiento moderado (44, 9 y 15 UFC), lo que sugiere que no posee un efecto antimicrobiano significativo. Las nanoemulsiones arrojaron resultados similares (2, 475 y 65 UFC), indicando una posible actividad antimicrobiana, aunque con baja reproducibilidad entre réplicas.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que la aplicación de nanoemulsiones de aceite esencial de limón persa (*Citrus latifolia*) tuvo un efecto positivo en la conservación postcosecha de aguacates (*Persea americana*). En términos de firmeza, los frutos tratados con las nanoemulsiones (Nano 1 y Nano 2) mostraron una disminución más lenta en comparación con el grupo control, manteniendo valores superiores a 1.8 kgf al día 10 de almacenamiento. Esto sugiere que el recubrimiento aplicado retardó los procesos de ablandamiento asociados a la maduración.

Respecto a la pérdida de peso, los tratamientos con recubrimientos mostraron menores pérdidas relativas, siendo más marcada la diferencia en el grupo Nano 2, que presentó una pérdida inferior al 3% frente a un 8% registrado en el grupo control. Esto indica que los recubrimientos sirvieron como barrera semipermeable, reduciendo la transpiración del fruto.

En cuanto al pH de la pulpa, se observó un incremento progresivo a lo largo del almacenamiento en todos los tratamientos, con valores ligeramente más controlados en los frutos recubiertos. Aunque las diferencias en pH fueron menos pronunciadas, los resultados sugieren que los tratamientos contribuyeron a mantener condiciones internas más estables.

Finalmente, los tratamientos con nanoemulsión y aceite esencial mostraron cierto grado de actividad antimicrobiana, especialmente frente a coliformes/*E. coli*, pero con resultados inconsistentes y variable eficacia entre réplicas. Twin 80, por sí solo, tuvo efecto limitado. Ninguno de los tratamientos fue completamente eficaz para prevenir el crecimiento de levaduras y mohos.

En conjunto, el tratamiento con nanoemulsiones, y en particular con la formulación Nano 2, permitió extender la vida de anaquel de los aguacates en aproximadamente 2 a 4 días, ofreciendo una alternativa prometedora para la conservación de este fruto de alta importancia comercial.

Conclusiones

El uso de aceites esenciales de limón persa (*Citrus latifolia*) como recubrimientos poscosecha demostró ser una alternativa eficaz para prolongar la vida de anaquel del aguacate Hass (*Persea americana*). La formulación en nanoemulsiones permitió retrasar la pérdida de firmeza, reducir la deshidratación, limitar el crecimiento microbiano y extender la vida útil del fruto en aproximadamente 2 a 4 días, sin afectar sus características organolépticas.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad de integrar compuestos naturales y nanotecnología en la conservación de frutas, ofreciendo una solución sostenible y segura. Se recomienda evaluar esta tecnología en condiciones de almacenamiento semi comercial y explorar su aplicación en otros productos agrícolas de interés económico.

La incorporación de aceites esenciales nanoemulsionados se proyecta como una estrategia prometedora para disminuir pérdidas postcosecha, mejorar la disponibilidad de aguacates en el mercado y fortalecer prácticas de producción alineadas con la sostenibilidad y la salud pública.

Referencias bibliográficas

- Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 207–225.
- Acevedo-Fani, A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2017). Nanostructured emulsions and nanolaminates for delivery of active ingredients: Improving food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2542–2553.
- Ansarian, A. (2022). Recent advances in nanoemulsion technology for food preservation: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(5), 1600–1608.
- Baiza Avelar, I. (2003). *Guía Técnica del Cultivo del Aguacate*. Ministerio de Agricultura y Ganadería – IICA, San Salvador, El Salvador.
- Barreto, A., García, M., & Heredia, L. (2021). Revestimientos comestibles y recubrimientos biodegradables en frutas frescas: una alternativa sustentable. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 22(1), 12–23.
- Deyno, S., Mtewa, A. G., Abebe, A., Hymete, A., Makonnen, E., Bazira, J., & Alele, P. E. (2019). Essential oils as topical anti-infective agents: A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 47, 102224.
- DIGESA. (2007). *Manual de procedimientos de análisis microbiológico de alimentos*. Dirección General de Salud Ambiental, Ministerio de Salud, Perú.
- Frazão, J., de Brito, E. S., de Moraes, S. M., Ângelo, A. M., Nunes, J. C., & Maia, A. (2020). Composition and antioxidant activity of citrus essential oils and evaluation of their antifungal efficacy in postharvest control of papaya anthracnose. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2125–2136.
- González Cuello, R., Pérez Mendoza, J., & Gélvez Ordóñez, V. (2017). Incremento en la vida útil postcosecha del aguacate (*Persea americana*) utilizando recubrimientos a base de goma gelana. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1), 229–237.
- Heredia Chávez, L. & Montenegro Aya, M. (2015). Conservación de alimentos frescos con recubrimientos naturales: impacto en la salud pública y el ambiente. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 37(3), 202–208.
- Martínez Marín, M., & Macías, S. (2021). Efecto del almacenamiento en frío prolongado sobre la calidad del aguacate (*Persea americana*). *Revista Científica Agroalimentaria*, 3(2), 45–53.
- Masqui, Y., Pérez, A., & Martínez, L. (2022). Actividad antioxidante y antimicrobiana de aceites esenciales cítricos en la calidad postcosecha del aguacate. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 56(4), 589–598.

- McClements, D. J., & Rao, J. (2011). Food-grade nanoemulsions: formulation, fabrication, properties, and potential applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(4), 285–330.
- Miranda, M., Barreira, B., & Sepúlveda, E. (2022). Coatings incorporating lemongrass essential oil nanoemulsions to prolong plum (*Prunus salicina*) shelf life. *Coatings*, 12(11), 1700.
- MIDA – Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá. (2022). *Boletín Estadístico Agropecuario: Producción y Consumo de Aguacate en Panamá*. Panamá: Departamento de Estadísticas, MIDA.
- Oliveira Filho, J. G., Silva, G. C., Aguiar, A. C., et al. (2021). Nanoemulsions as edible coatings: A potential strategy for fresh fruits and vegetables preservation. *Foods*, 10(10), 2438.
- Oliveira, T. S., Costa, A. M. M., Cabral, L. M. C., Freitas-Silva, O., Rosenthal, A., & Tonon, R. V. (2023). Anthracnose controlled by essential oils: Are nanoemulsion-based films and coatings a viable and efficient technology for tropical fruit preservation? *Foods*, 12(2), 279.
- Regnier, T., Combrinck, S., Du Plooy, W., & Botha, B. (2010). Evaluation of Lippia scaberrima essential oil and some pure terpenoid constituents as postharvest mycobiocides for avocado fruit. *Crop Protection*, 29(6), 481–488.
- Singh, P., Wani, A. A., & Karim, A. (2021). Chitosan-based nanoemulsion coating incorporating clove essential oil for active preservation of fresh-cut papaya. *Food and Bioprocess Technology*, 14(7), 1305–1315.
- Solís-Silva, A., Rodríguez, J., & Villanueva, M. E. (2018). Preparación de nanoemulsiones de aceites esenciales por alta homogenización y ultrasonido. *Revista Mexicana de Ingeniería Q* Pérez, A. G. (2007).
- Guía técnica para el análisis microbiológico de superficies en contacto con alimentos y bebidas. química*, 17(3), 927–940.
- Zafar, T., & Sidhu, J. S. (2011). Avocado: Production, quality, and major processed products. En N. K. Sinha (Ed.), *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* (pp. 525–543). John Wiley & Sons.