

Daños por frío en banano (*Musa sp.* grupo AAA, subgrupo Cavendish): respuestas fisicoquímicas integradas y desestabilización de la membrana bajo diferentes temperaturas de almacenamiento

Chilling injury in banana (*Musa sp.* AAA group, Cavendish sub-group): Integrated physicochemical responses and membrane destabilization under different storage temperatures on fruits

Hoyos Leyva J. D.^{1*}, Oviedo Pereira D. G.^{1,2}, Villamil Galindo J. E.³ y Caicedo Chacón W.³

¹Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

²Doctorado en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos, CeProBi, Instituto Politécnico Nacional, México.

³Grupo de Investigación en Ingeniería de Alimentos - INGALS, Facultad de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / **Fecha de aceptación:** julio de 2020

Resumen

La calidad postcosecha del banano está fuertemente influenciada por la temperatura y el tiempo de almacenamiento, factores que regulan cambios fisiológicos, bioquímicos y estructurales del fruto. En este estudio se evaluó el efecto del almacenamiento a 5, 10 y 20 °C, así como de las condiciones en transferencia a temperatura ambiente, sobre parámetros clave de calidad como color (L^* , a^* , b^*), pérdida de electrolitos, textura (dureza y penetración) y pérdida de peso durante 21 días.

Los resultados mostraron que el almacenamiento a 5 °C induce daño por frío, evidenciado por un incremento en la fuga de electrolitos, el oscurecimiento de la cáscara, la disminución de la luminosidad (L^*), alteraciones en el desarrollo del color amarillo (b^*) y ablandamiento anómalo,

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

asociado a daño celular más que a un proceso de maduración fisiológica. En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentaron una maduración acelerada y coordinada, con mayor pérdida de peso y cambios progresivos en textura.

El almacenamiento a 10 °C permitió mantener un equilibrio entre la reducción de la actividad metabólica y la conservación de la integridad celular. Los tratamientos de transferencia evidenciaron que la exposición previa a bajas temperaturas genera daños irreversibles que se manifiestan al restablecer las condiciones ambientales. En conjunto, los resultados resaltan la importancia de optimizar la temperatura de almacenamiento para preservar la calidad del fruto y reducir pérdidas en la cadena de suministro.

Palabras clave: daño por frío, postcosecha de banano, integridad de membranas, almacenamiento para exportación.

Abstract

The postharvest quality of banana is strongly influenced by storage temperature and time, which together regulate physiological, biochemical, and structural changes in the fruit. This study evaluated the effects of storage at 5, 10, and 20°C, as well as temperature transfer conditions, on key quality parameters including color (L^* , a^* , b^*), electrolyte leakage, texture (firmness and penetration), and weight loss over 21 days.

Results showed that storage at 5°C induced chilling injury, characterized by increased electrolyte leakage, peel browning, reduced luminosity (L^*), impaired yellow color development (b^*), and abnormal softening associated with cellular damage rather than normal ripening. In contrast, fruits stored at 20°C exhibited rapid and coordinated ripening, with increased respiration, greater weight loss, and progressive softening.

Storage at 10°C maintained a better balance, reducing metabolic activity while preserving membrane integrity, color development, and texture. Temperature transfers revealed that prior exposure to low temperatures triggers irreversible physiological damage that becomes evident under ambient conditions. Overall, the findings highlight the importance of optimizing storage temperature to maintain fruit quality and reduce postharvest losses in banana supply chains.

Keywords: Banana postharvest, weight loss, membrane integrity, exportation storage.

Introducción

La calidad postcosecha de frutas climatéricas tropicales está determinada por una interacción compleja entre el metabolismo respiratorio, la integridad de las membranas y la regulación hormonal, particularmente del etileno (Zhang *et al.*, 2017). En este contexto, el banano (*Musa sp.* grupo AAA, subgrupo Cavendish) representa un modelo de alta sensibilidad al almacenamiento en frío (Der Agopian *et al.*, 2011; He *et al.*, 2018), lo cual limita significativamente su manejo logístico para la exportación a mercados como Estados Unidos, Europa y países de Oriente.

Aunque la refrigeración es la estrategia más efectiva para reducir la tasa respiratoria y prolongar la vida útil de frutas y vegetales (Sousa-Gallagher *et al.*, 2016), en especies tropicales induce desórdenes fisiológicos conocidos como daño por frío (*chilling injury*) (Patel *et al.*, 2016). Este fenómeno ocurre a temperaturas superiores al punto de congelación y se manifiesta mediante disrupciones estructurales en membranas celulares, desequilibrio redox y alteraciones en rutas metabólicas clave, incluyendo la degradación de clorofilas, la síntesis de compuestos fenólicos y la actividad enzimática oxidativa.

En banano, temperaturas por debajo de 13 °C desencadenan respuestas fisiológicas irreversibles (Li *et al.*, 2016), incluyendo la pérdida de la compartimentalización celular (Zhang *et al.*, 2009), el incremento de la permeabilidad de la membrana y la acumulación de metabolitos asociados al

estrés anaeróbico (Pott *et al.*, 2020). Estos cambios se traducen en síntomas visibles como el pardeamiento epidérmico, la maduración irregular, la pérdida de firmeza y el desarrollo de sabores indeseables, los cuales frecuentemente se intensifican tras la transferencia a temperaturas ambientales (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2018).

Persiste una brecha en la integración cuantitativa entre indicadores fisicoquímicos (color, textura, pérdida de peso) y biomarcadores fisiológicos como la fuga de electrolitos. Este estudio tiene como objetivo abordar esta brecha mediante una evaluación sistemática del efecto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento sobre la calidad postcosecha del banano, con énfasis en los mecanismos asociados al daño por frío.

Materiales y métodos

Se adquirieron bananos comerciales en un mercado local en Santiago de Querétaro (México), de la variedad Cavendish, en estado de madurez comercial. Los bananos se almacenaron a tres temperaturas: 5, 10 y 20 °C durante tres semanas. Cada siete días se tomaron muestras de cada temperatura de almacenamiento para realizar las evaluaciones correspondientes de calidad. Además, para las condiciones de refrigeración, se transfirieron muestras de las temperaturas de refrigeración (5 y 10 °C) a 20 °C (transferencias), las cuales se evaluaron después de 7 días adicionales a esta temperatura. Se preparó un lote de 96 bananos de la misma variedad, con tamaño y estado de madurez homogéneos.

Tabla 1. Número de unidades utilizadas por cada muestreo de bananos almacenados a diferente temperatura

Semana	Días de almacenamiento	Temperatura (°C)				
		5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
1	7	6	6	6	-	-
2	14	6	6	6	6 (1era transferencia)	6 (1era transferencia)
3	21	12	6	3	6 (2da transferencia)	6 (2da transferencia)

Nota. La primera transferencia corresponde a 7 días a la temperatura original más 7 días a 20 °C; la segunda transferencia corresponde a 14 días a la temperatura original más 7 días a 20 °C.

Fuente. Elaboración propia.

En cada periodo de muestreo se evaluaron las siguientes variables:

Porcentaje de pérdida de peso

Se pesó cada fruto al inicio del experimento (peso inicial (Pi)) y después de cada periodo de almacenamiento (peso final (Pf)) y se calculó el porcentaje de pérdida de peso (% Pp) mediante la Ecuación (1):

$$\%Pp = ((Pi - Pf) / Pi) \times 100 \quad (1)$$

Color externo

En una zona media del fruto se midieron los parámetros de color L*a*b* mediante un espectrofotómetro Minolta CR 2000 (Konica Minolta, Inc., Tokio, Japón). El fruto se colocó sobre la boquilla del colorímetro de manera que no hubiera salida de la luz emitida por el instrumento.

Calidad visual externa

Mediante una cámara fotográfica se registraron las características visuales de los bananos.

Las imágenes se tomaron con la misma cámara y desde el mismo ángulo del fruto en todas las mediciones.

Textura interna

Se retiró la cáscara del banano y se expuso el fruto. La textura se midió en tres partes a lo largo de todo el banano utilizando un analizador de textura (Texture Analyzer). Se realizó la prueba de penetración de 5 mm con una velocidad de viaje de la sonda de 1 mm s⁻¹. Los datos se registraron como dureza (N) y deformación de la muestra (mm).

Liberación de electrolitos

Con un sacabocados de 1 cm de diámetro se tomaron muestras de la piel de banano; cada muestra se colocó en tubos Falcon de 50 mL y se añadieron 10 mL de agua destilada. Las muestras se dejaron reposar durante 10 min, agitando suavemente. Al final del tiempo de reposo, se midió la conductividad eléctrica de la solución mediante un electrodo de conductividad y se registró la lectura (Cf).

La pérdida de electrolitos se calculó como el porcentaje de conductividad respecto a la conductividad total Ecuación (2).

$$\%Pelect = (Cf/Ci) \times 100 \quad (2)$$

Donde % Pelect = pérdida de electrolitos; Cf = conductividad final; Ci = conductividad inicial.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se empleó el software JMP®, versión 10.1 (JMP Statistical Discovery LLC, Cary, NC, EE. UU.). Se realizó un análisis de varianza para determinar las diferencias entre medias, con un nivel de significancia estadística del 5 % ($\alpha = 0,05$).

Cuando se encontraron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

Resultados y discusión

Cambios físicos en los bananos por efecto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento

En la Figura 1 se observan los bananos al momento de la recepción de la muestra, con un color verde-amarillo, una forma alargada y ligeramente curvada, con estado de maduración incompleto y textura firme. En la figura 1b se muestra la parte interna del banano, caracterizada por una cáscara y textura firme. Después de una semana de almacenamiento (7 días), se tomaron

Figura 1. Bananos comerciales usados en el experimento en grado de madurez comercial (a) sin presencia de daños internos en la pulpa (b)



a



b

Fuente. Elaboración propia.

muestras de banano para la evaluación visual y la medición de las variables fisicoquímicas.

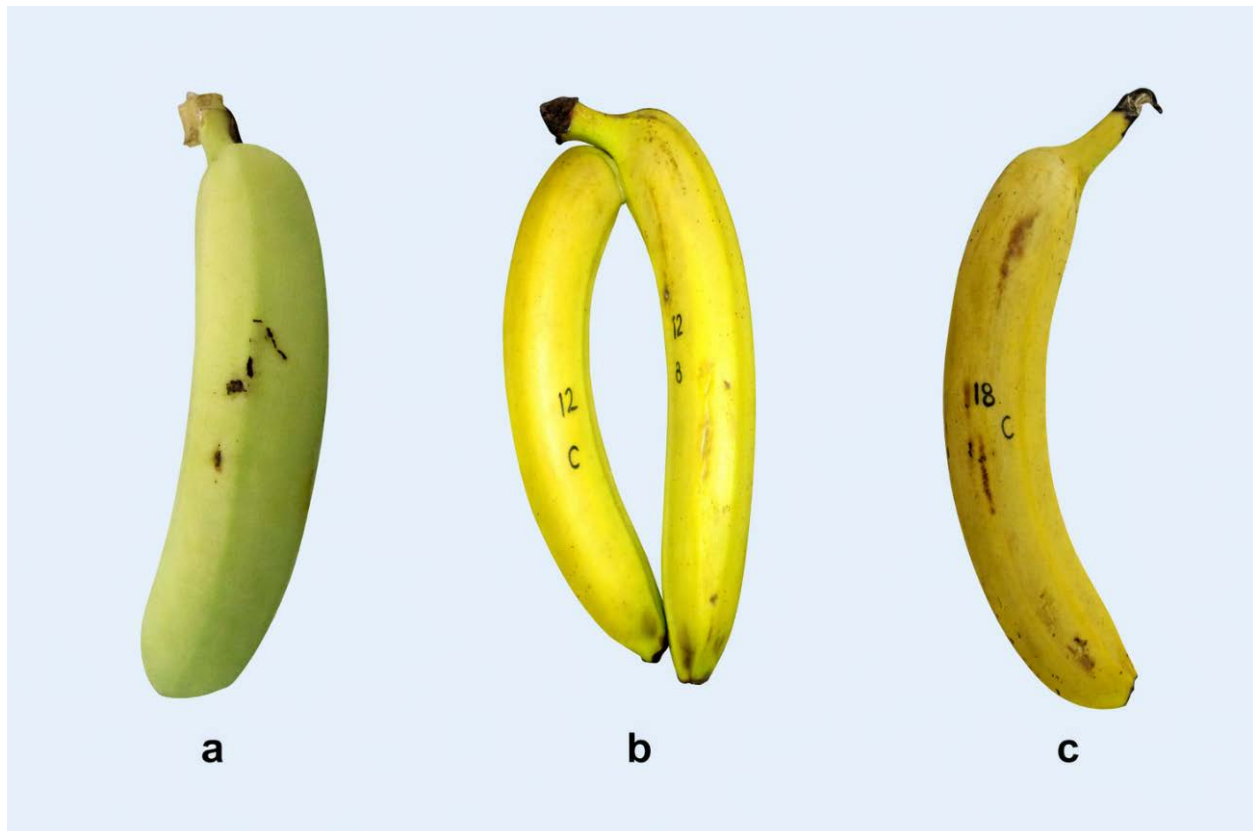
En la Figura 2 se evidencian diferencias claras en el color de la cáscara en función de la temperatura de almacenamiento.

A 5 °C, los frutos conservaron una coloración verde opaca, lo que indica una inhibición del proceso de maduración. Este comportamiento está asociado a la baja actividad metabólica a temperaturas reducidas, que limita la degradación de clorofila, pigmento responsable del color verde del fruto.

En el banano, este proceso es altamente sensible a la temperatura, y su ralentización impide la transición normal hacia estados de madurez más avanzados.

En contraste, los frutos almacenados a 10 °C presentaron una coloración amarillo brillante, acompañada de la aparición de manchas características de estados intermedios de maduración. Esto sugiere que, bajo estas condiciones, la degradación de clorofila y la síntesis de carotenoides ocurren de manera más equilibrada, permitiendo una evolución del color más cercana a la maduración fisiológica normal.

Figura 2. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 7 días a 5 °C (a), 10 °C (b) y 20 °C (c)



Fuente. Elaboración propia.

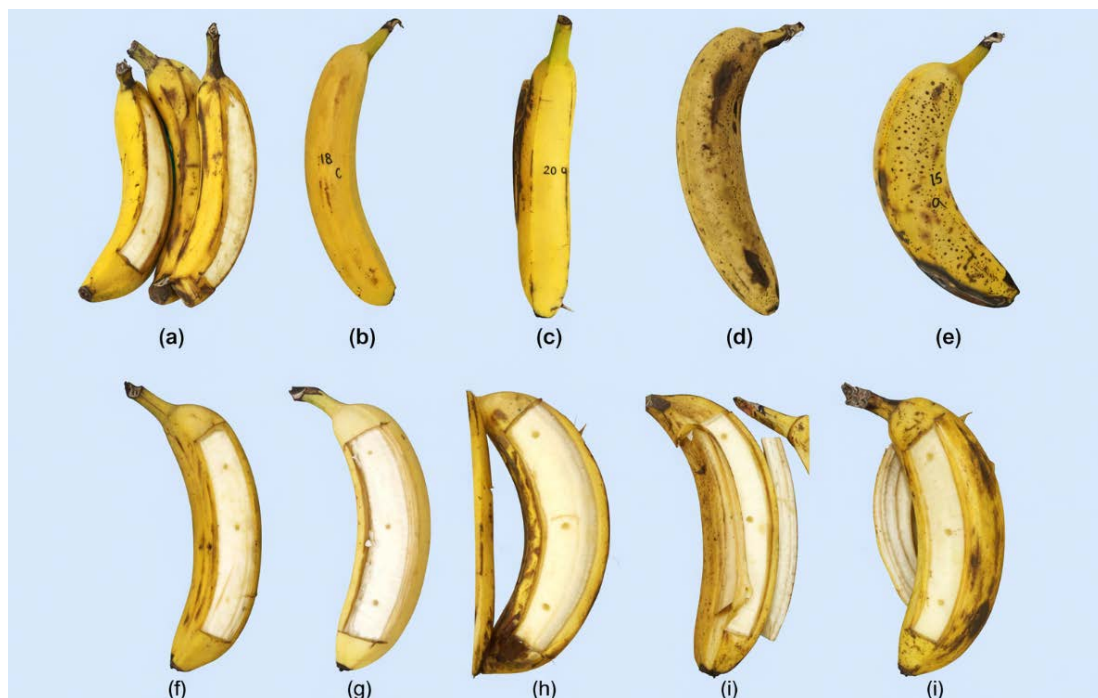
Por su parte, los bananos almacenados a 20 °C mostraron una coloración amarilla más uniforme con presencia de pequeñas manchas oscuras, lo cual es típico de frutos en un estado de madurez más avanzado. Este comportamiento se explica por una mayor actividad respiratoria y una aceleración del metabolismo climatérico, que favorece la degradación de clorofila y la acumulación de pigmentos amarillos, así como la aparición de compuestos fenólicos oxidados que generan las manchas oscuras.

En la Figura 3 (a-e) se presentan los frutos de banano enteros tras 14 días de almacenamiento a diferentes temperaturas. Se observa una coloración amarilla opaca, acompañada de la aparición de manchas en los frutos sometidos a transferencia de

temperatura de refrigeración (5 o 10 °C) a temperatura ambiente (20 °C). El daño más severo se presenta a 5 °C, donde se evidencia un color oscuro y un mayor ablandamiento. En la transferencia de 10 a 20 °C se observan hendiduras más profundas.

En la Figura 3 (f-j) se presenta la comparación de la parte interna de los bananos a diferentes temperaturas, donde se observan transformaciones estructurales y fisiológicas asociadas a la maduración, como cambios en el color de la pulpa, incremento en la translucidez, aparición de manchas internas y modificaciones en la firmeza del tejido. En estados más avanzados, la pulpa presenta mayor oscurecimiento y signos de degradación.

Figura 3. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 14 días a 5 °C (a, f), 10 °C (b, g), 20 °C (c, h) y las transferencias de 5 °C a 20 °C (d, i) y de 10 °C a 20 °C (e, j)



Fuente. Elaboración propia.

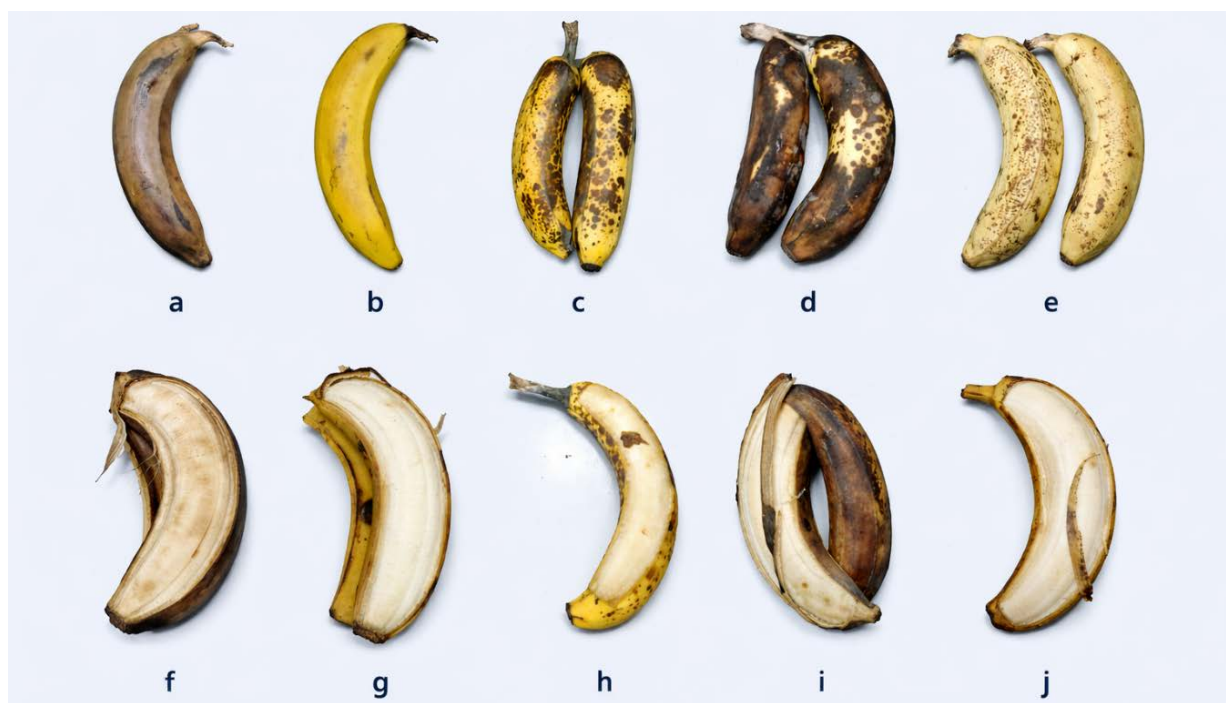
En la Figura 4 (a-e) se presenta la comparación de frutos de banano tras 21 días de almacenamiento bajo diferentes condiciones térmicas. Los resultados evidencian que la temperatura ejerce un efecto determinante sobre la estabilidad estructural y metabólica del fruto. A 5 °C, los bananos exhiben un oscurecimiento epidérmico generalizado, asociado con daño por frío severo, el cual se manifiesta a través de la ruptura de tejidos, la pérdida de agua y el colapso celular (Liu *et al.*, 2020).

Este comportamiento es consistente con la desestabilización de membranas y la subsecuente oxidación de compuestos fenólicos. En este tratamiento se observan desórdenes marcados en la maduración, incluyendo alteraciones en la textura,

el sabor y el aroma, lo cual sugiere una disrupción en la regulación del metabolismo climatérico. En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentan una maduración más homogénea, aunque con evidencia de senescencia avanzada y desarrollo de microorganismos. De manera similar, las condiciones de transferencia (5 20 °C y 10 20 °C) favorecieron la aparición de crecimiento fúngico, lo cual puede atribuirse a la reactivación metabólica en tejidos previamente debilitados.

Los cambios más severos a nivel estructural se registraron en los frutos almacenados a 5 °C y en la transferencia de 5 a 10 °C, donde el oscurecimiento total y la pérdida de integridad estructural evidencian daño irreversible.

Figura 4. Comparación visual de los frutos de banano almacenados durante 21 días a 5 °C (a, f), 10 °C (b, g), 20 °C (c, h) y las transferencias de 5 °C a 20 °C (d, i) y de 10 °C a 20 °C (e, j)



Fuente. Elaboración propia.

Por su parte, la Figura 4 (f-j) muestra la evaluación del tejido interno, permitiendo establecer una correlación directa entre el daño externo y la degradación interna. Los frutos sometidos a 5 °C presentan hundimientos en la superficie, pulpa blanda y pérdida de firmeza, acompañados de olores desagradables, indicativos de procesos avanzados de deterioro y posible actividad microbiana. Este deterioro estructural está estrechamente relacionado con la pérdida de turgencia celular y la degradación de los componentes de la pared celular.

En contraste, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a transferencia de 10 a 20 °C muestran una mejor conservación del tejido interno, con menor grado de oscurecimiento y mayor integridad estructural. Este comportamiento confirma que los 10 °C representan un umbral fisiológico más adecuado para el almacenamiento de banano, al minimizar el daño por frío sin comprometer significativamente el proceso de maduración.

Desde una perspectiva bioquímica, los resultados sugieren que la exposición a bajas temperaturas induce un incremento en la actividad de enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa, junto con una disminución en el contenido de compuestos fenólicos, lo que favorece el pardeamiento epidérmico observado. Paralelamente, se evidencia una mayor degradación de clorofilas y proteínas, contribuyendo a la pérdida de calidad visual y nutricional del fruto.

En términos fisiológicos, el estrés por frío genera una reducción en la tasa respiratoria inicial, seguida de una desregulación en la producción de etileno, lo cual puede

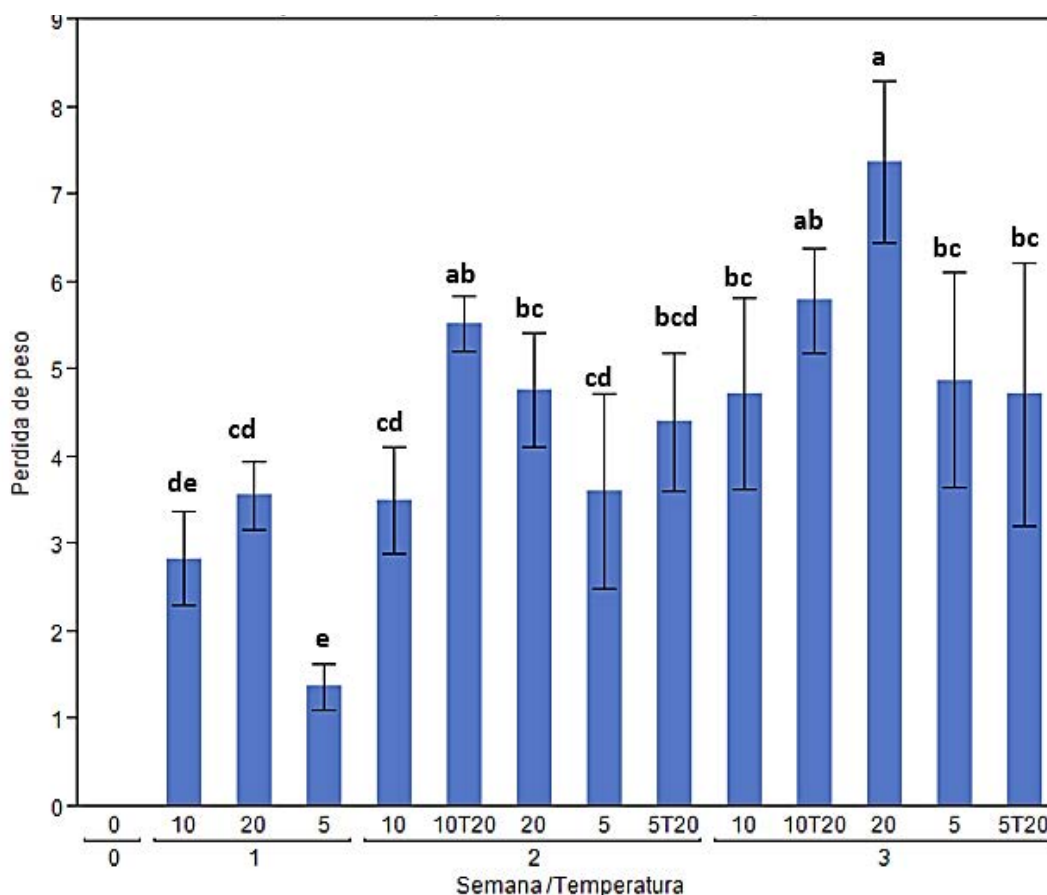
inducir procesos de maduración prematura o desorganizada. Asimismo, el incremento en la fuga de electrolitos confirma la pérdida de integridad de las membranas celulares, constituyendo un indicador clave del daño por frío. Este fenómeno explica la progresión del deterioro observada tanto en la superficie como en la pulpa del fruto.

Cambio en el peso del fruto

El peso inicial de los bananos presentó una media de 172,18 g (pérdida de peso 0, Gráfica 1), con un coeficiente de variación de 17,89, lo que evidencia la heterogeneidad propia del producto comercial incluso dentro de un mismo lote. Esta variabilidad inicial es relevante, ya que puede influir en la dinámica de pérdida de peso durante el almacenamiento, particularmente en relación con la superficie específica y el contenido de agua del fruto.

El análisis estadístico mostró un efecto significativo de los factores tiempo de almacenamiento y temperatura sobre la pérdida de peso ($p < 0,05$). En términos generales, las menores pérdidas se registraron durante los primeros 7 días y en los frutos almacenados a 5 °C. Este comportamiento está asociado a la reducción de la actividad metabólica bajo condiciones de baja temperatura, lo que disminuye tanto la tasa respiratoria como la transpiración (Lufu *et al.*, 2019). Sin embargo, esta aparente ventaja no necesariamente refleja una mejor conservación del fruto. El almacenamiento a 5 °C induce alteraciones fisiológicas importantes, por lo que la menor pérdida de peso responde más a una inhibición metabólica que a la preservación de la calidad del fruto (Zhu *et al.*, 2018).

Gráfica 1. Pérdida de peso (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

En contraste, los frutos almacenados a 20 °C presentaron las mayores pérdidas de peso, especialmente hacia los 14 días de almacenamiento. Bajo estas condiciones, el metabolismo del banano se mantiene activo, favoreciendo una mayor tasa respiratoria y una mayor pérdida de agua por transpiración.

Este comportamiento es característico de frutos climatéricos en proceso de maduración, donde el incremento en la respiración conlleva una mayor liberación de CO² y vapor de agua.

A los 21 días de almacenamiento, esta tendencia se acentúa, observándose las mayores pérdidas de peso tanto en los frutos mantenidos a 20 °C como en aquellos sometidos a transferencia desde 10 °C hacia 20 °C.

En este último caso, el incremento en la pérdida de peso puede explicarse por la reactivación metabólica tras el cambio de temperatura, lo que induce un aumento en la respiración y en la transpiración en tejidos que ya han iniciado su proceso de maduración.

Tabla 2. Pérdida de peso (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)

Días de almacenamiento	Tratamientos y temperaturas de almacenamiento				
	5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
7	1,38±0,2	2,85±0,5	4,2±0,4	-	-
14	3,63±1,1	3,51±0,6	6,91±0,6	4,41±0,8	5,52±0,3
21	4,89±1,2	4,74±2,3	6,06±2,1	4,71±0,5	5,79±0,6

*Los valores en la tabla son el promedio de tres repeticiones ± la desviación estándar.

Fuente. Elaboración propia.

Estos resultados muestran que la pérdida de peso está estrechamente relacionada con la actividad fisiológica del fruto, particularmente con la respiración y el balance hídrico. No obstante, su interpretación debe realizarse en conjunto con otros parámetros de calidad. Mientras que a 20 °C la pérdida de peso refleja un proceso de maduración activo, a bajas temperaturas como 5 °C puede coexistir con daño estructural, lo que limita su uso como indicador único de calidad (Prasad *et al.*, 2018).

Pérdida de electrolitos de la cáscara

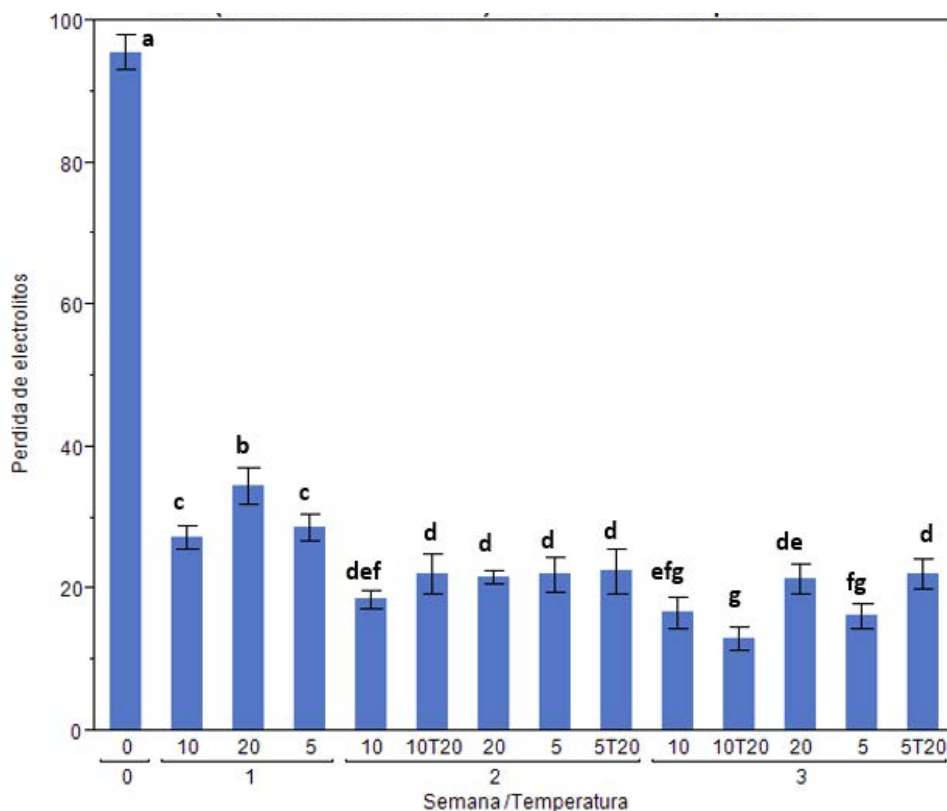
La pérdida de electrolitos mostró una marcada dependencia tanto de la temperatura como del tiempo de almacenamiento, evidenciando su sensibilidad como indicador de daño celular (Gráfica 2). Durante la primera semana, los valores más altos se registraron a 5 °C (28,84%), seguidos por 10 °C (27,28%) y 20 °C (22,53%), lo que indica que las bajas temperaturas inducen una alteración temprana en la integridad de las membranas celulares.

Este comportamiento puede atribuirse a la desorganización de los lípidos de membrana, particularmente a la transición de fase de los fosfolípidos, lo que incrementa la permeabilidad y facilita la fuga de iones.

En la segunda semana, se observó una disminución en la pérdida de electrolitos (22,09 %, 18,62 % y 17,17 % para 5, 10 y 20 °C, respectivamente). Este descenso no sugiere una recuperación del tejido, sino una progresión hacia estados avanzados de deterioro fisiológico, donde la funcionalidad metabólica se encuentra comprometida y la capacidad de respuesta celular al estrés es limitada. Este comportamiento es consistente con tejidos sometidos a daño irreversible por frío.

En los tratamientos de transferencia, los valores de pérdida de electrolitos fueron elevados (22,61 % en 5 → 20 °C y 22,14 % en 10 → 20 °C), lo que confirma que el daño inducido durante el almacenamiento en frío se manifiesta con mayor intensidad al reactivar el metabolismo a temperaturas más altas.

Gráfica 2. Pérdida de electrolitos (%) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5T20 transferencia de 5 a 20 °C; 10T20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

Este fenómeno está estrechamente relacionado con el incremento en la tasa respiratoria, dado que el aumento de temperatura acelera las reacciones metabólicas y la producción de calor, exacerbando el deterioro celular en tejidos previamente afectados.

Durante la tercera semana, los frutos almacenados a 5 °C y 10 °C presentaron valores de 16,26 % y 16,72 %, respectivamente, manteniendo la tendencia decreciente. En contraste, a 20 °C se evidenció un incremento en la pérdida de electrolitos, asociado al avance del proceso de senescencia y sobremaduración.

En condiciones de transferencia, se observó un comportamiento diferencial, donde el tratamiento 5 a 20 °C mantuvo valores elevados (22,7%) de pérdida de electrolitos, mientras que 10 a 20 °C presentó una disminución significativa (13,04%), sugiriendo que el almacenamiento previo a 10 °C preserva en mayor medida la integridad de membranas y reduce el impacto del estrés térmico posterior.

Estos resultados evidencian que la estabilidad de las membranas celulares está fuertemente condicionada por las condiciones de almacenamiento, incluyendo la temperatura,

la humedad relativa, la velocidad del aire y la composición atmosférica. La uniformidad térmica es crítica para evitar fluctuaciones que puedan inducir estrés fisiológico adicional. En este sentido, aunque la refrigeración reduce la tasa respiratoria y prolonga la vida útil, temperaturas inadecuadamente bajas pueden inducir daño por frío (Zhu *et al.*, 2018).

En frutas tropicales como el banano, este tipo de daño ocurre típicamente en el rango de 5 a 14°C, manifestándose en desórdenes fisiológicos como el oscurecimiento, la pérdida de textura y el desarrollo de sabores indeseables (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2018). A nivel celular, estos efectos están asociados con la ruptura de membranas, la pérdida de compartimentalización y el incremento

en la transpiración, lo cual contribuye adicionalmente a la pérdida de agua y al deterioro de la calidad del fruto (El-Hadidy *et al.*, 2016).

Considerando que la conductividad inicial de los bananos fue de $95,61 \pm 2,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 3), los cambios observados durante el almacenamiento reflejan una alteración progresiva en la integridad estructural del tejido.

En conjunto, la pérdida de electrolitos se consolida como un indicador robusto del daño por frío y permite establecer que temperaturas cercanas a 10 °C representan un compromiso óptimo entre la reducción de la actividad metabólica y la preservación de la integridad celular (Minor & von Horn, 2019).

Tabla 3. Pérdida de electrolitos (%) de banano almacenado a 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C)

Días de almacenamiento	Tratamientos y temperaturas de almacenamiento				
	5 °C	10 °C	20 °C	De 5 °C a 20 °C	De 10 °C a 20 °C
7	28,84±1,9	27,28±1,6	22,53±2,5		
14	22,09±2,4	18,62±1,3	17,17±1,02	22,61±3,2	22,14±2,8
21	16,26±1,8	16,72±2,3	21,6±1,5	22,72±3	13,07±1,7

*Los valores en la tabla son el promedio de tres repeticiones $\pm$ la desviación estándar.

Fuente. Elaboración propia.

Cambios en el color del fruto

La interacción entre los factores tiempo de almacenamiento y temperatura presentó un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) sobre los parámetros de color L^* , a^* y b^* , lo que evidencia la alta sensibilidad del sistema cromático del banano frente a las condiciones de almacenamiento.

El valor inicial del parámetro L^* (65,47) fue significativamente superior al registrado en los tratamientos posteriores (gráfica 3), indicando una mayor luminosidad asociada a un tejido epidérmico íntegro. Durante el almacenamiento, los frutos conservados a 5 °C durante 21 días presentaron los valores más bajos de L^* , reflejando un oscurecimiento pronunciado de la cáscara.

Este comportamiento es consistente con la activación de procesos de pardeamiento enzimático, particularmente la oxidación de compuestos fenólicos catalizada por la polifenol oxidasa, como consecuencia de la pérdida de integridad de las membranas celulares (Selvarajan *et al.*, 2018).

Un patrón similar se observó en los frutos sometidos a transferencia de 5 a 20 °C, a pesar de haber permanecido solo 7 días en condiciones de refrigeración, presentaron reducciones significativas en L^* . Este resultado confirma que la exposición inicial a temperaturas críticas induce desórdenes metabólicos irreversibles que continúan su progresión incluso después del cambio a condiciones más favorables. En este sentido, el oscurecimiento observado no solo responde al tiempo de almacenamiento, sino también a la historia térmica del fruto.

En contraste, los bananos almacenados a 10 °C mostraron una disminución moderada en el parámetro L^* , manteniendo valores significativamente superiores a los observados a 5 °C. Este comportamiento sugiere que, aunque existen alteraciones fisiológicas a 10 °C, estas son menos severas y no comprometen de manera crítica la integridad estructural del tejido. Por su parte, los frutos almacenados a 20 °C conservaron valores de L^* más cercanos a la condición inicial durante las primeras etapas, aunque posteriormente pueden verse afectados por procesos de senescencia.

El análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey confirmó que los tratamientos a 5 °C durante 21 días difieren significativamente de los demás, consolidando esta condición como la más crítica en términos de deterioro visual

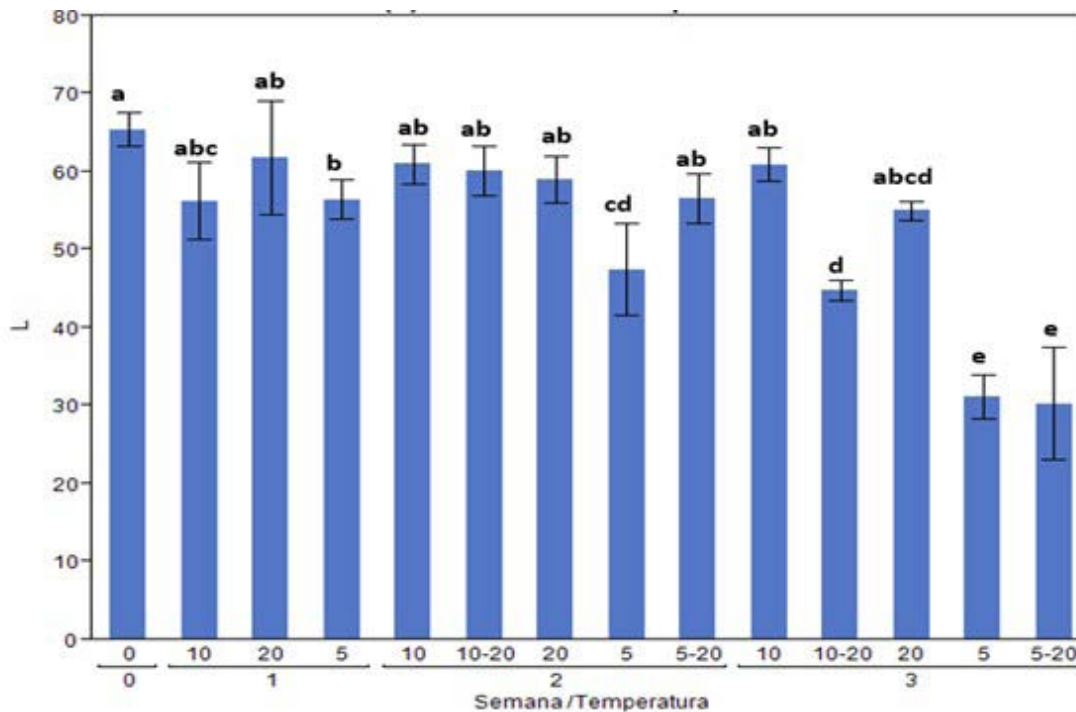
(Gráfica 3). No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos a 10 °C y 20 °C respecto a la medición inicial, lo que refuerza la idea de que estas condiciones permiten preservar en mayor medida la luminosidad del fruto.

El valor inicial del parámetro a^* fue de -5,50 (Gráfica 4), lo que corresponde a la tonalidad verde característica de los frutos en estados tempranos de madurez. A lo largo del almacenamiento, este parámetro aumentó de manera significativa ($p < 0,0001$), indicando una progresiva pérdida del color verde y la transición hacia tonalidades asociadas con la maduración.

Este cambio está directamente relacionado con la degradación de la clorofila, proceso que ocurre de manera más acelerada a temperaturas más altas. En este sentido, los frutos almacenados a 20 °C presentaron los valores más elevados de a^* (8,22), lo cual es consistente con un estado de maduración más avanzado y una mayor actividad metabólica. Bajo estas condiciones, la degradación de clorofila ocurre de forma relativamente ordenada, en concordancia con el comportamiento climatérico del banano (Lobo & Rojas, 2020).

Por su parte, los frutos sometidos a transferencia desde 10 °C a 20 °C no mostraron diferencias significativas respecto a aquellos mantenidos continuamente a 20 °C. Este resultado sugiere que el almacenamiento previo a 10 °C no genera alteraciones irreversibles en los mecanismos asociados a la degradación de la clorofila, permitiendo que el proceso de maduración continúe de manera relativamente normal una vez restablecida la temperatura ambiente.

Gráfica 3. Variación parámetro L^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5T20 transferencia de 5 a 20 °C; 10T20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

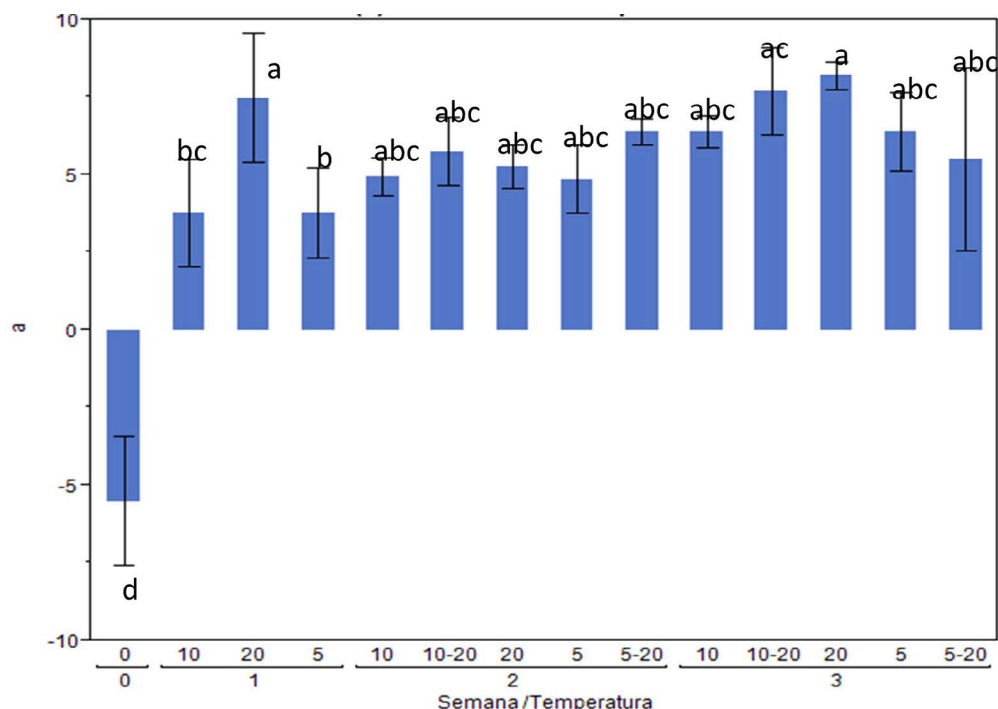
Al analizar el conjunto de tratamientos, no se observa una tendencia completamente definida en la evolución del parámetro a^* en función del tiempo y la temperatura. Este comportamiento puede explicarse porque la pérdida del color verde no depende exclusivamente del proceso de maduración, sino también de alteraciones fisiológicas inducidas por condiciones de estrés (Maduwanthi & Marapana, 2019).

En frutos expuestos a bajas temperaturas, la degradación de clorofila puede ocurrir de forma desorganizada, desacoplada de otros procesos metabólicos, lo que genera variabilidad en los valores de a^* . El parámetro b^* , asociado a la escala cromática azul-amarillo, presentó un valor

inicial de 41,22 (Gráfica 5), coherente con la tonalidad amarilla incipiente de los frutos en estado de madurez temprana. Durante el almacenamiento, este parámetro mostró comportamientos diferenciados en función de la temperatura, reflejando tanto la evolución normal de la maduración como los efectos del estrés térmico.

En los frutos almacenados a 20 °C durante 7 días, los valores de b^* (43,7) se mantuvieron cercanos al inicial, lo que sugiere una progresión adecuada en la síntesis de carotenoides y en el desarrollo del color amarillo característico del banano en maduración. Este comportamiento es consistente con una actividad metabólica activa y coordinada.

Gráfica 4. Variación parámetro a^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

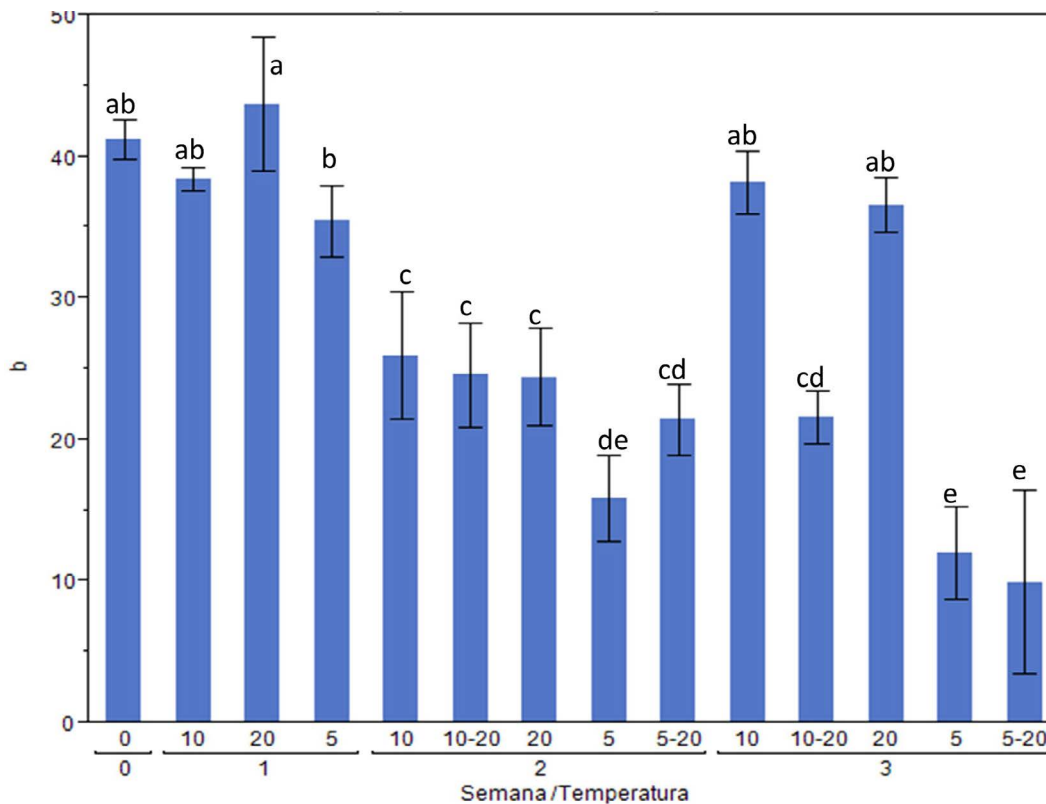
En contraste, los tratamientos a 5 °C mostraron una disminución significativa del parámetro b^* a partir de los 14 días de almacenamiento, tendencia que se acentuó hacia los 21 días, especialmente en los frutos transferidos de 5 °C a 20 °C.

Esta reducción indica una alteración en la expresión del color amarillo, que puede asociarse tanto a la inhibición de la biosíntesis de carotenoides como a procesos de pardeamiento que enmascaran la coloración natural del fruto (Fu *et al.*, 2018). En este contexto, el daño por frío no solo retrasa la maduración, sino que también interfiere con la calidad visual final del producto. Por su parte, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a

transferencia de 10 a 20 °C no presentaron diferencias significativas respecto a los almacenados a 20 °C. Este comportamiento sugiere que, bajo estas condiciones, la ruta metabólica responsable de la acumulación de pigmentos amarillos se mantiene funcional, permitiendo una evolución del color comparable a la de frutos no sometidos a estrés térmico severo.

El análisis integral de los tres parámetros revela que los cambios en el color del banano no pueden interpretarse de manera aislada. Mientras la disminución de L^* refleja procesos de oxidación y daño celular, el incremento de a^* indica pérdida de clorofila, y la variación de b^* está asociada a la síntesis o degradación de carotenoides.

Gráfica 5. Variación parámetro b^* de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

En condiciones de almacenamiento óptimas (20 °C y en menor medida 10 °C), estos procesos ocurren de manera coordinada, dando lugar a una maduración uniforme. En contraste, a 5 °C se produce una desregulación metabólica, donde la degradación de pigmentos y el pardeamiento ocurren de forma desorganizada, afectando negativamente la calidad visual del fruto (Valenzuela *et al.*, 2017).

Estos resultados están en concordancia con los hallazgos de pérdida de electrolitos, que evidencian daño en las membranas celulares. La desestabilización de estas estructuras facilita el contacto entre enzimas

oxidativas y sus sustratos, promoviendo el pardeamiento y alterando la expresión normal del color (Sun *et al.*, 2020).

Así, el color no solo actúa como un atributo de calidad visual, sino también como un indicador indirecto del estado fisiológico del tejido. Los resultados confirman que temperaturas inferiores a 10 °C inducen alteraciones significativas en la dinámica del color del banano, mientras que el almacenamiento a 10 °C permite mantener un balance entre la reducción de la actividad metabólica y la preservación de la calidad visual, constituyéndose como una condición más adecuada para la conservación poscosecha.

Cambios en la deformación del fruto

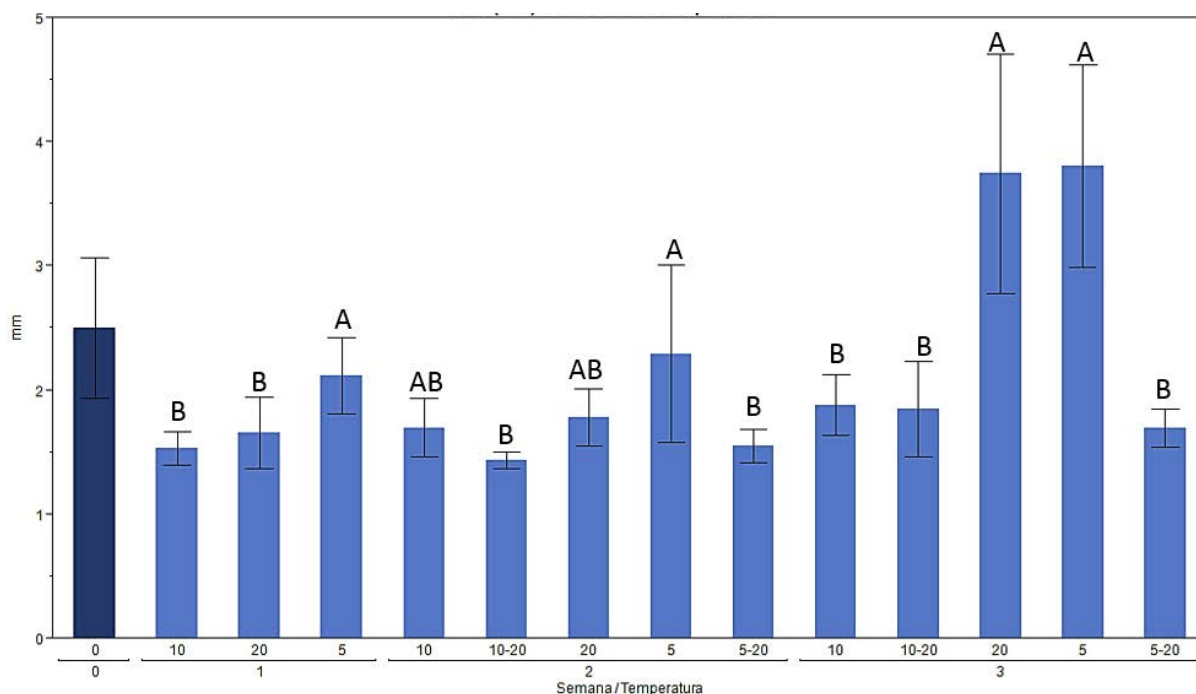
El análisis de varianza evidenció un efecto significativo de la temperatura de almacenamiento sobre la penetración del fruto ($p < 0,001$), confirmando que esta variable es altamente sensible a las condiciones térmicas. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) permitió diferenciar claramente el comportamiento de los tratamientos a lo largo del tiempo.

Durante la primera semana, los frutos almacenados a 5°C presentaron los valores más altos de penetración ($2,12 \pm 0,31$ mm) (Gráfica 6), lo que indica una mayor pérdida de firmeza en comparación con las demás condiciones.

Esta tendencia se mantuvo en la segunda semana, donde nuevamente el tratamiento a 5°C registró la mayor deformación ($2,29 \pm 0,71$ mm). Los frutos sometidos a transferencia de 10 a 20°C mostraron los valores más bajos ($1,42 \pm 0,06$ mm), lo que sugiere una mejor conservación de la estructura del tejido bajo estas condiciones.

Para la tercera semana, tanto los frutos almacenados a 5°C como a 20°C presentaron los valores más altos de penetración ($3,80 \pm 0,81$ mm y $3,74 \pm 0,96$ mm, respectivamente), acompañados de una mayor variabilidad. Este comportamiento refleja dos mecanismos distintos de ablandamiento: en el caso de 20°C , asociado a la maduración avanzada del fruto, y en 5°C , relacionado con el deterioro estructural inducido por daño por frío.

Gráfica 6. Cambio en la deformación (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5 , 10 y 20°C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20°C): 5T20 transferencia de 5 a 20°C ; 10T20 transferencia de 10 a 20°C



Fuente. Elaboración propia.

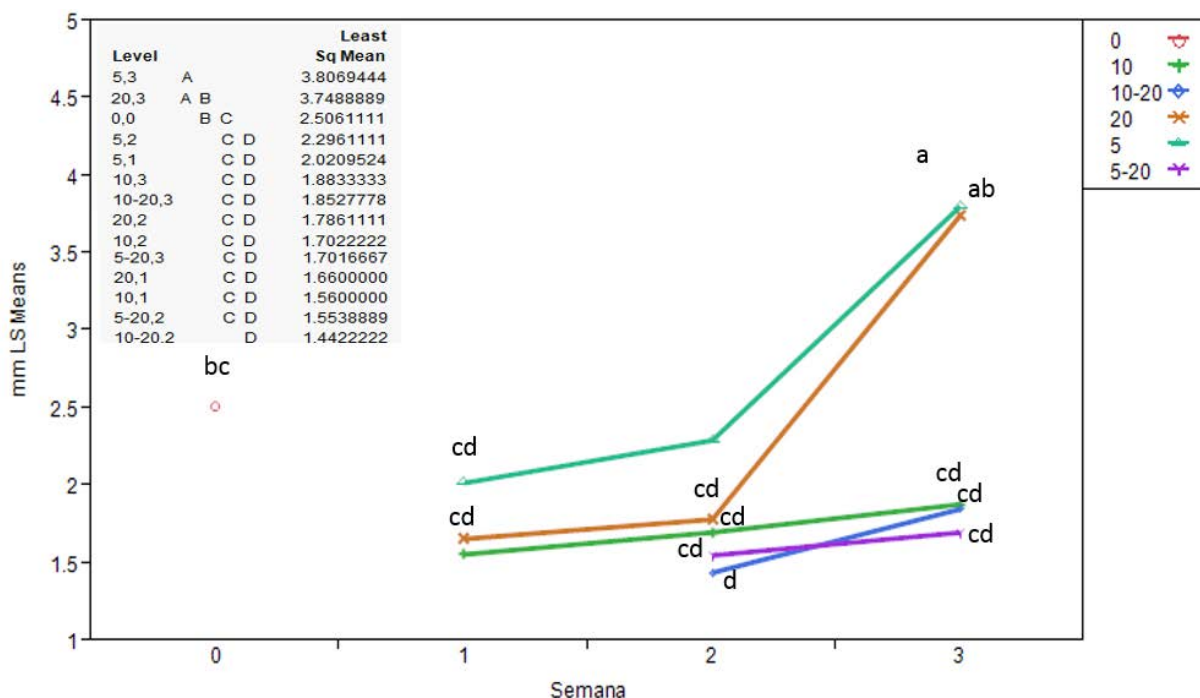
El análisis de la interacción entre tiempo y temperatura confirma esta diferenciación (Gráfico 7). Entre la segunda y tercera semana, los tratamientos a 5 °C y 20 °C mostraron incrementos marcados en la penetración, evidenciando una pérdida acelerada de firmeza. Sin embargo, mientras que a 20 °C este proceso responde a la degradación natural de almidón y polisacáridos de la pared celular durante la maduración (Cordenunsi-Lysenko *et al.*, 2019), en los frutos almacenados a 5 °C está asociado a la desorganización celular causada por el estrés térmico.

En este último caso, el daño por frío induce la pérdida de integridad de las membranas y la activación de enzimas hidrolíticas, incluyendo las amilasas, que favorecen

la degradación del almidón en azúcares simples como glucosa y fructosa (Lo'ay *et al.*, 2020). Este proceso, sumado a la pérdida de turgencia celular, conduce a una textura blanda que no corresponde a un estado de madurez adecuado, sino a un deterioro fisiológico del tejido.

Por el contrario, los frutos almacenados a 10 °C y aquellos sometidos a transferencia hacia 20 °C mostraron menores valores de penetración a lo largo del almacenamiento, lo que indica una mayor conservación de la firmeza. Este comportamiento puede atribuirse a una menor intensidad de los procesos metabólicos y a la ausencia de daño estructural severo, permitiendo que el tejido mantenga su integridad por más tiempo.

Gráfica 7. Efecto de la interacción tiempo y temperatura en la penetración (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

Efecto de la temperatura y el tiempo en la dureza

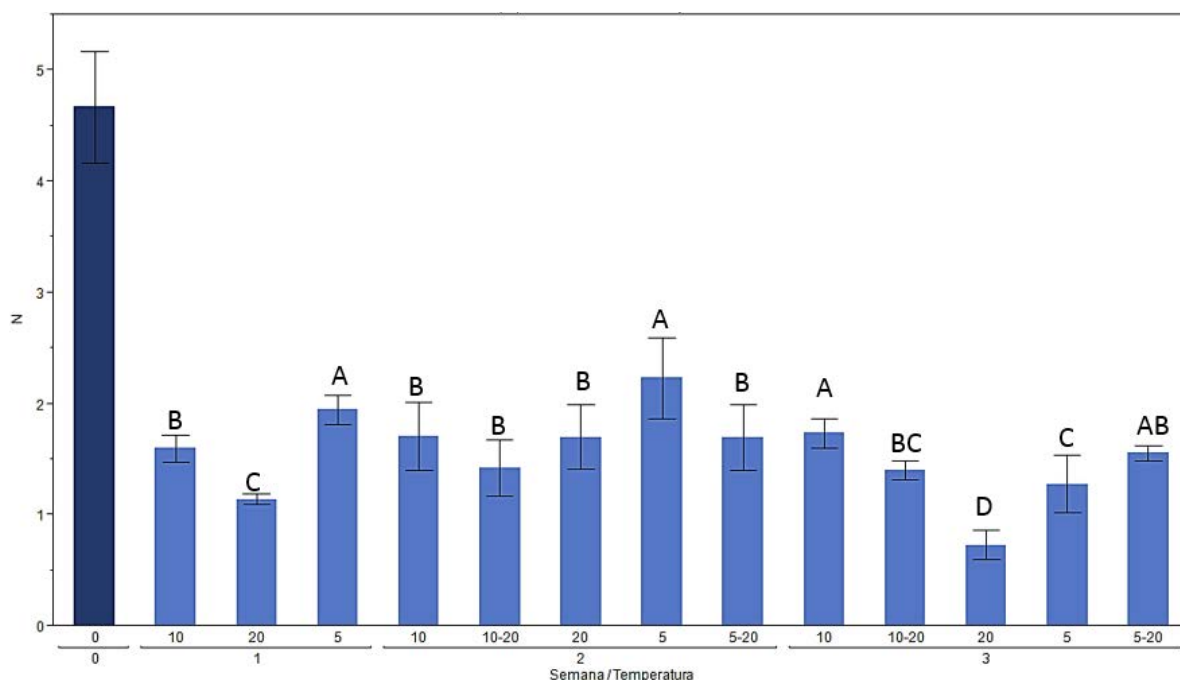
El análisis de varianza evidenció un efecto significativo de la temperatura de almacenamiento sobre la dureza del fruto ($p < 0,001$), confirmando que esta variable responde de manera directa a las condiciones térmicas. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) permitió establecer diferencias claras entre tratamientos desde las primeras etapas de almacenamiento.

Durante la primera semana, los frutos almacenados a 20 °C presentaron la menor dureza ($1,14 \pm 0,05$ N), con diferencias significativas respecto a los tratamientos a 10 °C ($1,60$ N) y 5 °C ($1,95$ N).

Este comportamiento es consistente con la activación del proceso de maduración climática, en el cual la firmeza disminuye debido a la degradación de componentes estructurales de la pared celular, como pectinas y hemicelulosas, mediada por enzimas hidrolíticas. Este proceso está estrechamente asociado a la conversión de almidón en azúcares solubles, característica fundamental del ablandamiento del banano (Kaur *et al.*, 2020).

En el Gráfico 8 se presenta el cambio de dureza en los frutos de banano. Hacia la tercera semana, la dureza disminuyó de manera marcada en los frutos almacenados tanto a 20 °C ($0,73 \pm 0,13$ N) como a 5 °C ($1,28 \pm 0,25$ N), aunque por mecanismos distintos. En el caso de 20 °C, la pérdida

Gráfica 8. Cambio de la dureza (N) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C) y tratamientos de transferencia de temperatura de refrigeración a temperatura ambiente (20 °C): 5-20 transferencia de 5 a 20 °C; 10-20 transferencia de 10 a 20 °C



Fuente. Elaboración propia.

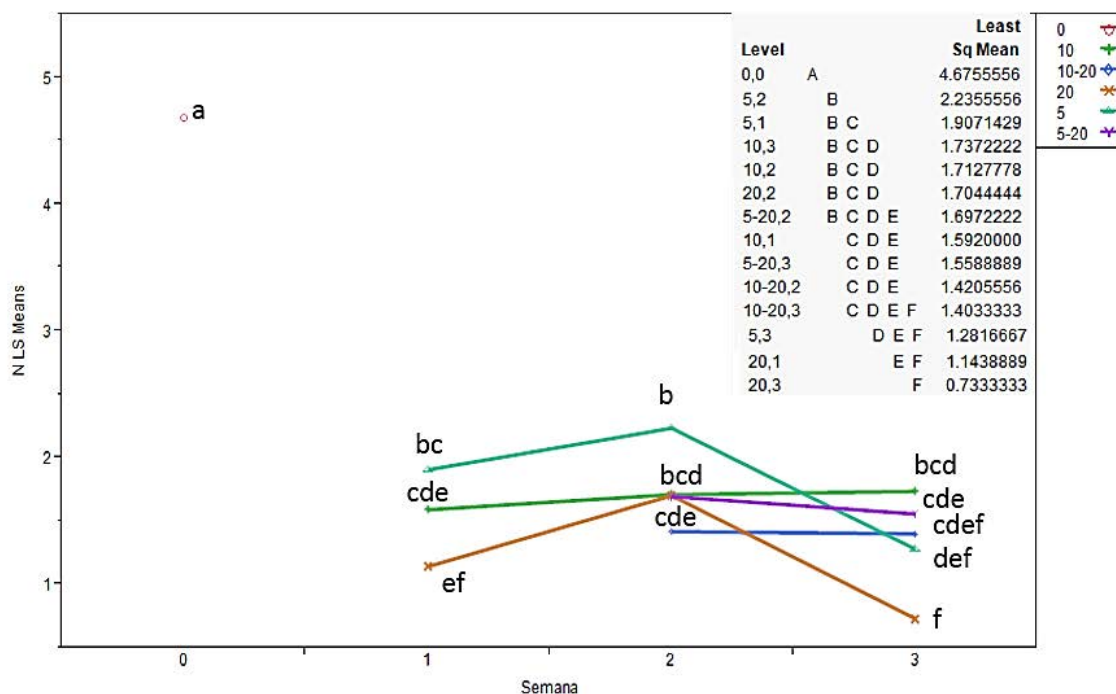
de firmeza responde a una maduración avanzada y a la degradación progresiva de la matriz celular. Por el contrario, en los frutos almacenados a 5 °C, la disminución de la dureza está asociada al daño por frío, el cual compromete la integridad de las membranas y altera el metabolismo de la pared celular, generando una textura blanda pero estructuralmente deteriorada.

El análisis de la interacción entre tiempo y temperatura confirma esta dualidad (Gráfica 9). Los frutos almacenados a 20 °C mostraron una reducción continua de la dureza a lo largo del tiempo, coherente con un proceso de maduración normal. En contraste, los frutos a 5 °C, aunque inicialmente mantuvieron mayor firmeza, presentaron una caída significativa en etapas posteriores, lo que sugiere una

pérdida progresiva de integridad celular más que un proceso de maduración controlado. Estudios recientes han mostrado que el almacenamiento a bajas temperaturas puede alterar el metabolismo de la pared celular e incluso inducir procesos como la lignificación o la inhibición de la degradación de polisacáridos, afectando de manera anómala la textura del fruto (Murmú & Mishra, 2018).

En comparación, los frutos almacenados a 10 °C presentaron un comportamiento intermedio, conservando mayores valores de dureza durante el almacenamiento. Esto sugiere que a 10 °C la degradación estructural ocurre de manera más lenta y sin la interferencia severa del daño por frío, permitiendo una mejor conservación de la firmeza.

Gráfica 9. Efecto de la interacción tiempo y temperatura en la penetración (mm) de bananos almacenados durante 1, 2 y 3 semanas bajo diferentes temperaturas (5, 10 y 20 °C)



Fuente. Elaboración propia.

La relación entre dureza y penetración refuerza esta interpretación. Ambos parámetros describen la resistencia del tejido, pero desde perspectivas complementarias: mientras la penetración refleja la deformabilidad local, la dureza integra la resistencia global del fruto. Valores bajos de dureza pueden corresponder tanto a frutos en estado óptimo de maduración como a tejidos deteriorados por estrés térmico (Maduwanthi & Marapana, 2019), por lo que su interpretación debe realizarse en conjunto con otros indicadores fisiológicos. Las modificaciones en la textura, evaluadas mediante penetración y dureza, mostraron una estrecha relación con los resultados de las demás variables analizadas. En condiciones de 20 °C, la pérdida de firmeza estuvo asociada al proceso normal de maduración, caracterizado por la degradación de almidón y polisacáridos de la pared celular. Sin embargo, en los frutos almacenados a 5 °C, el incremento en la penetración y la disminución de la dureza no correspondieron a una maduración fisiológica, sino a un deterioro estructural derivado del daño por frío. La pérdida de integridad de membranas y la desorganización celular contribuyeron a una textura blanda, de baja calidad, lo cual coincide con los mayores niveles de fuga de electrolitos observados en estos tratamientos (Sañudo-Barajas *et al.*, 2019).

Conclusiones

Los resultados confirman que la temperatura de almacenamiento es un factor crítico en la conservación postcosecha del banano, con implicaciones directas para el

diseño y la gestión de la cadena de frío. El almacenamiento a 5 °C induce daño por frío irreversible, evidenciado por la pérdida de integridad de membranas, alteraciones en el color y la textura, y un deterioro acelerado tras la transferencia a temperaturas de comercialización. Esto implica que exposiciones, incluso cortas, a temperaturas por debajo del umbral fisiológico pueden comprometer la calidad final del fruto, generando pérdidas económicas significativas en mercados de exportación. Por otro lado, el almacenamiento a 20 °C favorece una maduración rápida, lo que limita la vida útil y reduce la ventana logística para la distribución y comercialización. En contraste, el almacenamiento a 10 °C emerge como una condición más adecuada, al permitir un control efectivo de la tasa metabólica sin inducir desórdenes fisiológicos severos, preservando así atributos clave de calidad.

Desde una perspectiva operativa, estos hallazgos resaltan la necesidad de mantener una temperatura uniforme y controlada a lo largo de toda la cadena de suministro, evitando fluctuaciones térmicas y rupturas en la cadena de frío. Asimismo, subrayan la importancia de ajustar protocolos de almacenamiento, transporte y distribución en función de los umbrales de tolerancia del banano, con el fin de maximizar su vida útil, reducir pérdidas poscosecha y garantizar la calidad en mercados internacionales.

Agradecimiento

JDHL agradece al Dr. Edmundo Mercado Silva y al PROPAC (UAQ) por facilitar las muestras, espacios de laboratorio y el equipo para realizar las mediciones, así como a los compañeros de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la UAQ, promoción 2015, con quienes se realizaron las mediciones en laboratorio. DGOP y JDHL agradecen a CONACYT México por la beca otorgada para los estudios de posgrado durante el tiempo en que se escribió este artículo.

Referencias

- Cordenunsi-Lysenko, B. R., Nascimento, J. R. O., Castro-Alves, V. C., Purgatto, E., Fabi, J. P., y Peroni-Okita, F. H. G. (2019). The starch is (not) just another brick in the wall: The primary metabolism of sugars during banana ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10, 452915. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00391>
- Der Agopian, R. G., Peroni-Okita, F. H. G., Soares, C. A., Mainardi, J. A., Do Nascimento, J. R. O., Cordenunsi, B. R., Lajolo, F. M., y Purgatto, E. (2011). Low temperature induced changes in activity and protein levels of the enzymes associated to conversion of starch to sucrose in banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.008>
- El-Hadidy, G. A., Mshraky, A. M., y Ali, E. Z. (2016). An Attempt to Prolong the Cold Storage of Green Banana Fruits using some Safe Treatments to Reduce the Chilling injury. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 6(4), 833–841.
- Fu, X., Cheng, S., Liao, Y., Huang, B., Du, B., Zeng, W., Jiang, Y., Duan, X., y Yang, Z. (2018). Comparative analysis of pigments in red and yellow banana fruit. *Food Chemistry*, 239, 1009–1018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.046>
- He, W. Di, Gao, J., Dou, T. X., Shao, X. H., Bi, F. C., Sheng, O., Deng, G. M., Li, C. Y., Hu, C. H., Liu, J. H., Zhang, S., Yang, Q. S., y Yi, G. J. (2018). Early cold-induced peroxidases and aquaporins are associated with high cold tolerance in Dajiao (Musa spp. 'Dajiao'). *Frontiers in Plant Science*, 9, 323137. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00282>
- Kaur, L., Dhull, S. B., Kumar, P., y Singh, A. (2020). Banana starch: Properties, description, and modified variations - A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165 (PB), 2096–2102. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.058>
- Li, D., Limwachiranon, J., Li, L., Du, R., y Luo, Z. (2016). Involvement of energy metabolism to chilling tolerance induced by hydrogen sulfide in cold-stored banana fruit. *Food Chemistry*, 208, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.113>

- Liu, J., Li, Q., Chen, J., y Jiang, Y. (2020). Revealing further insights on chilling injury of postharvest bananas by untargeted lipidomics. *Foods*, 9 (7). <https://doi.org/10.3390/foods9070894>
- Lo'ay, A. A., Hamed, S. E., EL-Khateeb, A. Y., y Mohamed, A. H. (2020). Implementation exogenous ATP on the starch degradation enzyme activities of 'Grand Nain' banana fruit during shelf life. *Scientia Horticulturae*, 262, 109021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109021>
- Lobo, M. G., y Rojas, F. J. F. (2020). Biology and postharvest physiology of banana. En Siddiq, M., Ahmed, J., Lobo, M. G. (Eds.), *Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition* (pp. 19–44). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119528265.ch2>
- Lufu, R., Ambaw, A., y Opara, U. L. (2019). The contribution of transpiration and respiration processes in the mass loss of pomegranate fruit (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*, 157, 110982. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110982>
- Maduwanthi, S. D. T., y Marapana, R. A. U. J. (2019). Induced Ripening Agents and Their Effect on Fruit Quality of Banana. *International Journal of Food Science*, 2019(1), 2520179. <https://doi.org/10.1155/2019/2520179>
- Minor, T., y von Horn, C. (2019). Rewarming Injury after Cold Preservation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2059. <https://doi.org/10.3390/ijms20092059>
- Murmu, S. B., y Mishra, H. N. (2018). Post-harvest shelf-life of banana and guava: Mechanisms of common degradation problems and emerging counteracting strategies. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.011>
- Patel, B., Tandel, Y. N., Patel, A. H., y Patel, B. L. (2016). Chilling injury in tropical and subtropical fruits: a cold storage problem and its remedies: a review. *International Journal of Science, Environment*, 5 (4), 1882–1887.
- Pott, D. M., Vallarino, J. G., y Osorio, S. (2020). Metabolite Changes during Postharvest Storage: Effects on Fruit Quality Traits. *Metabolites*, 10(5), 187. <https://doi.org/10.3390/metabo10050187>
- Prasad, K., Jacob, S., y Siddiqui, M. W. (2018). Fruit Maturity, Harvesting, and Quality Standards. *Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality*, 41–69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809807-3.00002-0>
- Ramírez-Sánchez, M., Huber, D. J., y Vallejos, C. E. (2018). Comparison of tissue deterioration of ripening banana fruit (*Musa* spp., AAA group, Cavendish subgroup) under chilling and non-chilling temperatures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(12), 4644–4652. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8994>

- Sañudo-Barajas, A. A., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Vélez de la Rocha, R., Noguera-Artiaga, L., Sánchez-Rodríguez, L., Carbonell-Barrachina, Á. A., y Hernández, F. (2019). Texture. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 293–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00014-2>
- Selvarajan, E., Veena, R., y Manoj Kumar, N. (2018). Polyphenol oxidase, beyond enzyme browning. En Singh, J., Sharma, D., Kumare, G., Sharma, N. R. (Ed.), *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development* (pp 203–222). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0_10
- Sousa-Gallagher, M. J., Tank, A., y Sousa, R. (2016). Emerging Technologies to Extend the Shelf Life and Stability of Fruits and Vegetables. En Subramaniam, P. (Ed.), *The Stability and Shelf Life of Food* (pp. 399–430). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100435-7.00014-9>
- Sun, H., Jun, Luo, M., Li, Zhou, X., Zhou, Q., y Ji, S. Juan. (2020). Influence of Melatonin Treatment on Peel Browning of Cold-Stored “Nanguo” Pears. *Food and Bioprocess Technology*, 13 (8), 1478–1490. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02489-8>
- Valenzuela, J. L., Manzano, S., Palma, F., Carvajal, F., Garrido, D., y Jamilena, M. (2017). Oxidative Stress Associated with Chilling Injury in Immature Fruit: Postharvest Technological and Biotechnological Solutions. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(7), 1467. <https://doi.org/10.3390/ijms18071467>
- Zhang, C., Ding, Z., Xu, X., Wang, Q., Qin, G., y Tian, S. (2009). Crucial roles of membrane stability and its related proteins in the tolerance of peach fruit to chilling injury. *Amino Acids*, 39(1), 181–194. <https://doi.org/10.1007/s00726-009-0397-6>
- Zhang, J., Cheng, D., Wang, B., Khan, I., y Ni, Y. (2017). Ethylene Control Technologies in Extending Postharvest Shelf Life of Climacteric Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (34), 7308–7319. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02616>
- Zhu, X., Luo, J., Li, Q., Li, J., Liu, T., Wang, R., Chen, W., y Li, X. (2018). Low temperature storage reduces aroma-related volatiles production during shelf-life of banana fruit mainly by regulating key genes involved in volatile biosynthetic pathways. *Postharvest Biology and Technology*, 146, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.015>