

Evaluación de los efectos de la congelación criogénica en frutas

Evaluation of the effects of cryogenic freezing on fruits

 Lizeth N. Santiago-Castillo

 Miguel A. Grados-Poémape

 Cesar Moreno-Rojo

lizethnicol2003stephany@gmail.com 

Universidad Nacional del Santa. Ancash, Perú

Recibido: 12/02/2025

Revisado: 21/03/2025

Aceptado: 18/05/2025

Publicado: 10/07/2025

RESUMEN

La congelación criogénica se presenta como una de las técnicas más eficientes para la conservación de frutas, ya que permite prolongar su vida útil preservando así sus características sensoriales y nutricionales. Su efectividad radica en la formación de cristales de hielo pequeños y uniformes que mantienen la estructura celular, reduciendo daños físicos, limitando la actividad microbiana y enzimática. Su éxito depende de factores como la velocidad de congelación, el tipo de fruta, tiempo de almacenamiento y el proceso de descongelación. En el mango, los métodos de congelación rápida como el Individual Quick Freezing (IQF) han demostrado conservar mejor la textura, color y antioxidantes en comparación con técnicas convencionales, mientras que en los arándanos la aplicación de nitrógeno líquido permite mantener altos niveles de vitamina C y firmeza, aunque puede provocar fracturas superficiales si no se controla el proceso. En kiwis, los efectos varían de acuerdo con el contenido de sólidos solubles y la zona del fruto, influyendo en la resistencia al frío y el nivel de daño estructural; por su parte, en el durión la criogenia ha demostrado ser más eficaz que la congelación tradicional, preservando por mayor tiempo la calidad interna y externa del fruto. Tecnologías emergentes como el ultrasonido, la alta presión, los campos magnéticos y el uso de crioprotectores, especialmente nanopartículas de polisacáridos, potencian esta técnica al reducir la recristalización y optimizar la estabilidad de las frutas durante la congelación y descongelación, lo que convierte a la criogenización en una herramienta estratégica para la industria alimentaria moderna.

Palabras clave: Vida útil, actividad microbiana, estructura celular, calidad, velocidad de congelación, vitamina C.

ABSTRACT

Cryogenic freezing is considered one of the most efficient techniques for fruit preservation, as it extends shelf life while preserving sensory and nutritional characteristics. Its effectiveness lies in the formation of small, uniform ice crystals that maintain cell structure, reducing physical damage and limiting microbial and enzymatic activity. Success



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) International License

Rev. Investigaciones ULCB. Jul - Dic.12(2), 2025; ISSN: 2409 - 1537;41-51

depends on factors such as freezing rate, fruit type, storage time, and thawing process. In mangoes, rapid freezing methods like Individual Quick Freezing (IQF) have shown to better preserve texture, color, and antioxidants compared to conventional techniques. In blueberries, liquid nitrogen application maintains high levels of vitamin C and firmness, although it can cause surface cracking if the process is not carefully controlled. In kiwis, the effects vary according to soluble solids content and fruit region, influencing cold tolerance and structural damage. In durian, cryogenics has proven more effective than traditional freezing, preserving both internal and external quality for a longer period. Emerging technologies such as ultrasound, high pressure, magnetic fields, and the use of cryoprotectants, especially polysaccharide nanoparticles, enhance this technique by reducing recrystallization and optimizing fruit stability during freezing and thawing, making cryogenics a strategic tool for the modern food industry.

Keywords: Shelf life, microbial activity, cell structure, quality, freezing speed, Vitamin C.

INTRODUCCIÓN

La alimentación representa una de las necesidades fundamentales del ser humano y es satisfecha mediante fuentes tanto de origen animal como vegetal (Zhang *et al.*, 2024). Entre las técnicas de conservación más utilizadas para garantizar la disponibilidad y calidad de estos productos es la congelación que destaca por su amplia aplicación en frutas y verduras (Wu *et al.*, 2022). Sin embargo, la creciente demanda de productos congelados ha llevado a las empresas a ofrecer una variedad de alimentos que pueden tener dificultades para mantener la calidad (Pesce *et al.*, 2025). Debido a que el volumen de productos, en especial de alimentos, que se desperdician a nivel mundial continúa en aumento por un almacenamiento inadecuado (Salami *et al.*, 2025). Dado que muchos alimentos son altamente perecederos, resulta imprescindible aplicar métodos de conservación adecuados que aseguren su disponibilidad constante a lo largo del año y en distintas regiones (Muthukumarappan *et al.*, 2019). Por ello la criogenización se considera una de las tecnologías más eficaces para prolongar

la vida útil de frutas perecederas como el mango, ya que inhibe la actividad microbiana y enzimática (Grover, 2023). Sin embargo, este proceso también puede inducir alteraciones irreversibles a nivel celular, provocando una pérdida en la calidad final del producto. (Jha *et al.*, 2019). Dado que la congelación de tejido vegetal con alto contenido de agua causa daño celular por la formación de cristales de hielo. (Schudel *et al.*, 2021). Aun así, este reduce ligeramente el tamaño de los poros, preservando mejor la microestructura a diferencia de una congelación mecánica (Jha *et al.*, 2024).

El éxito de la congelación depende en gran medida del control preciso de las condiciones del proceso, especialmente de la velocidad de congelación y del tipo de tecnología empleada, ya que estos factores influyen directamente en la formación de cristales de hielo y, por ende, en la integridad estructural del tejido vegetal (Grover, 2023). Investigaciones han evidenciado que la pérdida de calidad, especialmente el daño tisular y los cambios en textura y color durante la congelación,

está influenciada por la velocidad de este proceso (Gales *et al.*, 2022). En este sentido, también la temperatura del alimento y el contenido de agua son elementos clave en el fenómeno de cristalización, que comprende las etapas de nucleación y crecimiento de los cristales (Zennoune *et al.*, 2022). La presencia de cristales grandes puede dañar la estructura celular y comprometer la calidad del alimento, por lo que resulta esencial comprender la interacción entre la microestructura del alimento y la morfología del hielo formado (Pérez-Bermúdez *et al.*, 2023).

Entre las tecnologías emergentes, destacan el ultrasonido, la alta presión y las microondas, ya que permiten obtener productos congelados de alta calidad al modificar la distribución del agua en la estructura del alimento, sin incorporar compuestos extraños en su composición (Loayza-Salazar *et al.*, 2023). No obstante, estas tecnologías suelen implicar altos costos y su aplicación aún se ve limitada por la escala operativa (Loayza-Salazar *et al.*, 2023 y Yu *et al.*, 2022). En contraposición, técnicas como la deshidratación osmótica o deshidrocongelación y la congelación asistida por campo magnético se presentan como alternativas más accesibles y económicas, al no requerir equipos sofisticados ni el uso de refrigerantes costosos (Loayza-Salazar *et al.*, 2023). De igual manera, se ha demostrado que los métodos físicos, como la aplicación de campos eléctricos alternos y pulsados en combinación con campos magnéticos oscilantes, resultan eficaces para conservar frutas recién cortadas en estado de superenfriamiento (Narayana *et al.*, 2023).

Además, los crioprotectores especialmente las nanopartículas de polisacáridos han cobrado relevancia

por su eficacia en inhibir la formación de cristales de hielo y minimizar el daño celular. Gracias a su elevada relación superficie-volumen y su eficiente capacidad de difusión, estas nanopartículas forman enlaces de hidrógeno con el agua, lo que contribuye a mejorar la estabilidad de las frutas durante los procesos de congelación y descongelación (Demirci *et al.*, 2025).

MATERIALES Y METODOS

Se efectuó una revisión bibliográfica sistemática que abarcó el periodo 2016–2025, limitándose a fuentes cuya antigüedad no excediera los diez años. Para el proceso de búsqueda y recopilación de información, se emplearon términos clave como: tecnología de conservación, daño celular, calidad tras la congelación y congelación criogénica. La recopilación se realizó mediante el acceso a bases de datos académicas en línea disponibles a través del sistema de bibliotecas de la Universidad Nacional del Santa, así como en plataformas científicas de prestigio internacional, tales como Sciverse, Elsevier, Scopus, ScienceDirect y EBSCO. Asimismo, se consultaron revistas científicas especializadas y organismos internacionales relacionados con la conservación y el procesamiento de frutas, prestando especial atención a las técnicas de congelación criogénica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos de la congelación sobre los parámetros de calidad en frutas.

Mango

En un estudio desarrollado por Aldoradín-Puza *et al.* (2019), se analizó el efecto de la tecnología Cells Alive System (CAS), basada en la aplicación de campos magnéticos oscilantes (OMF) durante la congelación de mango variedad

‘Kent’. Esta tecnología se propuso como una alternativa para modular la nucleación del hielo y reducir los efectos negativos asociados a la cristalización, no obstante, los resultados no evidenciaron diferencias significativas frente a la congelación convencional. Las muestras tratadas con CAS presentaron una pérdida de firmeza estadísticamente significativa, así como una separación intercelular visible en cortes histológicos, atribuida al colapso de la estructura celular por la acción del hielo (Aldoradin-Puza *et al.*, 2019). Asimismo, se registró una pérdida por goteo entre 2,45 % y 4,15 %, indicador que refleja una fuga importante de jugos celulares durante la descongelación y que afecta directamente la jugosidad y aceptabilidad del fruto, estos hallazgos refuerzan la evidencia de que la formación de cristales de gran tamaño, producto de congelación lenta o tratamientos ineficaces, impacta negativamente en la calidad estructural y sensorial del mango congelado (Aldoradin-Puza *et al.*, 2019 y Grover, 2023).

En un estudio desarrollado por Charoenrein y Owcharoen (2016), se evidenció que la congelación criogénica a -80°C (fast freezing) permitió preservar la firmeza del mango cv. Nam Dok Mai al formar pequeños cristales de hielo distribuidos homogéneamente, lo cual minimizó el daño a las paredes celulares. En contraste, la congelación lenta (-20°C) generó cristales de mayor tamaño que provocaron colapso celular, aumento de la pérdida por goteo (hasta 60,70 %) y una marcada solubilización de sustancias pécticas, asociada a la degradación de la lamela media, estos efectos fueron más pronunciados a medida que se incrementaban los ciclos de congelación-descongelación. De manera

complementaria, Noriega-Juárez *et al.* (2024) evaluaron el efecto del método IQF frente a la congelación tradicional en distintas variedades de mango, encontrando que el primero permitió una mejor conservación de la textura, color, firmeza y compuestos antioxidantes, la congelación rápida redujo significativamente los daños mecánicos en los tejidos, así como la degradación de vitamina C y fenoles, elementos clave para el valor nutricional y la estabilidad oxidativa del fruto.

Arándanos

Zielińska *et al.* (2018) evaluaron el efecto de la congelación criogénica con nitrógeno líquido (-196°C) sobre arándanos, comparándola con la congelación convencional (-20°C), y reportaron que el tratamiento criogénico redujo significativamente el tiempo de secado posterior, debido a una mayor permeabilidad estructural. Sin embargo, también observaron que la congelación ultra rápida provocó fracturas en la superficie del fruto y un mayor encogimiento volumétrico (15,02 %), resultado del estrés térmico y la contracción del tejido durante la sublimación posterior. Estos efectos comprometen la apariencia externa del fruto, aunque favorecen la eficiencia del secado y la difusión de humedad. Por su parte, Cheng *et al.* (2020), en una revisión especializada sobre tecnologías de congelación, subrayaron que la criogenia permite formar cristales de hielo más pequeños y uniformes, localizados predominantemente en el espacio extracelular, lo que reduce el colapso celular y preserva mejor la estructura interna del fruto. No obstante, también advirtieron que, si el proceso no se acompaña de un descongelamiento gradual, puede haber recristalización secundaria, generando rupturas celulares que afectan la firmeza y aumentan las pérdidas por goteo.

En un estudio experimental posterior, Cheng *et al.* (2020) analizaron el efecto de la congelación criogénica por aspersión con nitrógeno líquido a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, combinada con un descongelamiento en tres etapas (de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y luego a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta combinación permitió conservar más del 95 % del contenido inicial de vitamina C, polifenoles y azúcares solubles, además de mantener la firmeza del arándano y reducir significativamente el goteo. Este resultado fue atribuido a la minimización de recristalización y a la preservación de la integridad de la pared celular.

De manera complementaria, Huang *et al.* (2024) exploraron el uso de congelación criogénica aplicada a distintas temperaturas con nitrógeno líquido (-80 , -100 y $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$), ajustadas de acuerdo con la temperatura de transición vítrea del arándano ($T_g \approx -52,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), y comprobaron que los tratamientos cercanos a $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ preservaron de forma más efectiva la firmeza, el contenido de antocianinas, vitamina C y sólidos solubles. Además, se reportó una pérdida mínima de jugo durante la descongelación y una menor degradación de las membranas celulares, lo que favoreció una estructura interna más compacta y estable.

Kiwi

El aumento de presión durante la liofilización del kiwi reduce su luminosidad y capacidad de rehidratación, mientras incrementa la resistencia a la penetración y el tamaño de partícula, estos cambios afectan su textura y dificultan el procesamiento posterior (Domin *et al.*, 2020). Teniendo en cuenta ello, observamos que Xu *et al.* (2023) evaluaron el efecto de diferentes regímenes de fluctuación térmica ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, cada 12 horas) sobre el cultivar ‘Xuxiang’.

Sus resultados evidenciaron que estas variaciones incrementan la translucidez de la pulpa, reducen la firmeza y elevan la conductividad relativa, indicando daño en la membrana celular. Además, se observó mayor incidencia de podredumbre y pérdida de peso. A nivel molecular, la expresión génica de polygalacturonase, β -galactosidase y pectin methyl esterase enzimas clave en la degradación de la pared celular fue significativamente mayor en los tratamientos con oscilaciones térmicas amplias, especialmente en 2 ° a $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos efectos aceleraron el proceso de senescencia del fruto, comprometiendo su estabilidad postcosecha.

Por otro lado, Huang *et al.* (2024) determinaron los puntos de congelación de 45 genotipos de kiwi, hallando que estos oscilan entre $-1,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-2,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo del contenido de sólidos solubles (SSC). Una mayor concentración de SSC se correlacionó con un menor punto de congelación, lo cual indica que los frutos con alto contenido de azúcares son más resistentes al daño por frío. Asimismo, se identificó variabilidad térmica dentro de un mismo fruto: el extremo floral mostró menores puntos de congelación que el peduncular, lo cual tiene implicancias relevantes en la distribución del daño interno en condiciones de congelación parcial.

Adicionalmente, Zhao *et al.* (2021) analizaron la calidad del cultivar ‘Xuxiang’ tras su almacenamiento congelado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ por hasta 90 días. Se reportaron pérdidas significativas en firmeza, contenido fenólico total, capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) y compuestos aromáticos clave como el hexanal y el (E)-2-hexenal. El análisis sensorial indicó deterioro en aroma y sabor tras 60 días de congelación,

atribuido al colapso estructural y a la degradación de compuestos volátiles. Estos resultados sugieren que el almacenamiento prolongado a bajas temperaturas, aunque evita el crecimiento microbiano, puede comprometer la calidad organoléptica y nutricional del kiwi.

Durian

Razali *et al.* (2022). Evaluaron el efecto de los métodos de congelación en las cualidades físicas y sensoriales del durian entero. El método de congelación incluyó congelación convencional (a -18°C) y criogénica (-110°C). El durian congelado se descongeló y se evaluó después de 12, 24 y 36 horas para determinar su calidad externa e interna, la incidencia de dehiscencia y los parámetros fisicoquímicos. Los resultados mostraron que la congelación convencional a -18°C afectó negativamente la calidad del durian. En comparación, durante la congelación criogénica, el durian se congeló rápidamente sin presentar dehiscencia.

Por otro lado, Hendra *et al.* (2023) evaluaron el impacto del proceso de congelación y del tiempo de almacenamiento en la degradación de las propiedades del durian. Se trabajó con cien frutos que fueron sometidos a dos niveles de congelación: el primero consistió en someterlos a -15°C durante 10 minutos (tratamiento A) y 20 minutos (tratamiento B), seguido de un almacenamiento a -10°C por periodos de 0, 10, 20 y 30 días. Las muestras se descongelaron a 4°C durante 24 horas en distintos intervalos de tiempo. Los resultados indicaron que el tratamiento B ofreció un desempeño significativamente superior al tratamiento A, evidenciado en una menor pérdida de peso, una coloración más brillante y clara de la pulpa, una textura más suave, menor contenido de humedad y un perfil de ácido succinático estable.

Asimismo, en la evaluación sensorial de preferencia, las frutas tratadas fueron bien aceptadas por los encuestados.

Tan *et al.* (2020) evaluaron el impacto del almacenamiento en congelación sobre las propiedades fisicoquímicas y la carga microbiana en la pulpa y la pasta de durian de las variedades “Musang King” (MK) y “D24” a lo largo de un año. Durante este periodo, ambas matrices presentaron una pérdida de peso del 1 % al 2 %, junto con un incremento en la suavidad de la pulpa. En cuanto al color, se registraron alteraciones en la tonalidad: la variedad “MK” cambió de un tono amarillo dorado a uno más claro, asociado a un aumento en el valor de h° , lo que coincidió con una disminución de carotenoides totales y β -caroteno. En paralelo, “D24” mostró una tonalidad más pálida y reducciones en los parámetros L^* y C^* después del almacenamiento. El estudio también reveló una disminución en los contenidos de sólidos solubles y ácido ascórbico en ambas variedades tras la congelación prolongada, aunque el pH y la acidez titulable permanecieron estables. A nivel microbiológico, la pulpa presentó menores niveles de contaminación en comparación con la pasta, siendo la variedad “D24” la más afectada. Estos resultados sugirieron que la congelación puede ser una alternativa viable para conservar la calidad del durian, siempre que el periodo de almacenamiento no exceda los doce meses.

Dátil Barhi

Así mismo Alhamdan *et al.* (2016) evaluaron el impacto de tres métodos de congelación criogénica, rápida y lenta sobre la calidad de dátiles Barhi frescos almacenados a -18°C durante nueve meses. La congelación criogénica se realizó con nitrógeno líquido a -196°C

Tabla 1.
Efecto de la congelación en el cambio de calidad de las frutas

Fruta	Nombre científico	Temperatura de congelación criogénica (°C)	Temperatura de almacenamiento (°C)	Tiempo de almacenamiento	Efecto de la textura	Fuente
Mango	Mangifera indica	-80, -40, -20	-18	7 días por ciclo (3 ciclos)	Congelación rápida conserva textura; congelación lenta genera colapso celular, pérdida de firmeza y mayor goteo.	Charoenrein y Owcharoen (2016)
		-30		35 minutos	Pérdida de firmeza y ruptura de paredes celulares tras congelación-descongelación.	Aldoradin-Puza <i>et al.</i> (2019)
Kiwi	Actinidia deliciosa	Liofilización (12-103 Pa)	-	-	Mayor presión disminuye rehidratación y aumenta resistencia a penetración	Domin <i>et al.</i> (2020)
		-	2-5 °C y 2-7 °C fluctuante	21 días	Fluctuaciones aceleran ablandamiento, aumentan translucidez 29 %	Xu <i>et al.</i> (2023)
Durian	Durio	-40	-20	12 meses	Ácido ascórbico: disminución inicial, aumento 151 % a 9 meses. Carotenoides variables	Tan <i>et al.</i> (2020)
	zibethinus	-110	-	36 h post-descongelación	Preserva parámetros fisicoquímicos sin afectar color, sólidos solubles, acidez	Razali <i>et al.</i> (2022)
		-120	-40	9 meses	Mejor preservación de enzimas y azúcares vs. congelación convencional	Alhandan <i>et al.</i> (2016)
Dátil Barhi	Phoenix dactylifera	-43	-40	9 meses	Mejor conservación de dureza, elasticidad y resiliencia; menor deterioro comparado con otros métodos	Alhandan <i>et al.</i> (2016)
		Entre -18 y -24	-20	9 meses	Mayor pérdida de firmeza, elasticidad y resiliencia, deteriorando significativamente su textura durante el almacenamiento	Alhandan <i>et al.</i> (2016)
Arandano	Vaccinium, Hippophae, Vitis	-196	-	-	Mejor conservación de volumen, forma y color. Reduce grosor epidermis 20-50 %	Dalmau <i>et al.</i> (2024)
	Vaccinium macrocarpon	-196	-	-	Congelación acelera secado en 69-97 %, pero altera estructura del fruto	Zielinska <i>et al.</i> (2018)
	Vaccinium	-100, -80, -60, -40 y -20	Variable	-	Temperaturas bajas (-80 °C) mantienen calidad, -20 °C produce deterioro	Cheng <i>et al.</i> (2020)

por 10 minutos. En el método rápido, se utilizó un túnel de congelación con aire a 5 m/s y una temperatura de -120°C , hasta que la temperatura interna del fruto alcanzó -18°C (≈ 2 horas). Por otro lado, la congelación lenta se llevó a cabo en una cámara a -20°C , alcanzando la temperatura deseada en aproximadamente 8 horas. Los resultados indicaron que la congelación criogénica y rápida conservaron mejor la textura, color y redujeron el exudado durante la descongelación, la congelación lenta, en cambio, generó mayor daño estructural por la formación de cristales grandes.

CONCLUSIONES

La congelación ejerció un efecto determinante sobre la calidad de distintas frutas, dependiendo de la tecnología empleada, la temperatura y el tiempo de almacenamiento.

En el caso del mango, se evidenció que tanto la congelación convencional como la asistida con Cells Alive System (CAS) no evitaron la pérdida de firmeza ni la separación celular, mientras que la congelación criogénica preservó mejor la textura y redujo el goteo durante la descongelación.

En los arándanos, se observó que el uso de nitrógeno líquido conservó de

manera eficaz los compuestos antioxidantes, la firmeza y la forma del fruto, aunque se advirtió que una descongelación inadecuada generó recristalización secundaria.

Para el kiwi, se encontró que las oscilaciones térmicas y los tratamientos prolongados a -18°C provocaron alteraciones en textura, color, actividad antioxidante y perfil aromático, afectando la aceptabilidad sensorial.

En cuanto al durián, se verificó que la congelación criogénica evitó la dehiscencia y conservó las propiedades fisicoquímicas durante las primeras 36 horas tras la descongelación; además, un mayor tiempo de congelación (20 minutos) y el almacenamiento a -10°C durante 30 días permitieron una mejor retención de color, humedad y estabilidad de ácidos, siendo la variedad “Musang King” más resistente que “D24”.

En los dátiles Barhi, se evidenció que las técnicas de congelación rápida a -120°C y criogénica con nitrógeno líquido a -196°C mantuvieron de forma óptima la estructura interna, textura y aceptación sensorial tras nueve meses de almacenamiento, a diferencia de la congelación lenta que provocó mayor deterioro físico y pérdida de calidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhamdan, A., Hassan, B., Alkahtani, H., Abdelkarim, D., y Younis, M. (2018). Freezing of fresh Barhi dates for quality preservation during frozen storage. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(8), 1552–1561. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.02.003>
- Aldoradin-Puza, E., Cuba-Mayo, F., Alemán-Polo, J., Perea-De la Matta, A., Sánchez-Espinoza, J., y Castillo-Alva, J. (2019). Efecto de la congelación con campos magnéticos oscilantes sobre las características físicas y sensoriales del mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Kent’). *Revista Brasileña de Tecnología de Alimentos*, 22, e2018169. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16918>

- Cheng, L., Wu, W., An, K., Xu, Y., Yu, Y., Wen, J., Wu, J., Zou, Y., Liu, H., Zhu, J., y Xiao, G. (2020). Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry. *Crystals*, 10(5), 368. <https://doi.org/10.3390/cryst10050368>
- Charoenrein, S., y Owcharoen, K. (2016). Effect of freezing rates and freeze-thaw cycles on the texture, microstructure and pectic substances of mango. *International Food Research Journal*, 23(2), 613–620. <http://www.ifrj.upm.edu.my>
- Demirci, K., Bayraktar, B., Özdemir, E., Görgüç, A., y Yilmaz, F. (2025). The potential of nanoscale polysaccharides for cryoprotection in frozen foods. *Trends in Food Science & Technology*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106381>
- Domin, M., Dzik, D., Kłapsia, S., Blicharz-Kania, A., Biernacka, B., y Krzykowski, A. (2020). Influence of the Freeze-drying Conditions on the Physicochemical Properties and Grinding Characteristics of Kiwi. *International Journal of Food Engineering*, 16(1-2), 20180315. <http://dx.doi.org/10.1515/ijfe-2018-0315>
- Grover, Y., y Negi P. (2023). Recent developments in freezing of fruits and vegetables: Striving for controlled ice nucleation and crystallization with enhanced freezing rates. *Journal of Food Science*, 88(1), 4799–4826. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16810>
- Hendra Adi Prasetya, Slamet Budiawan, Ade Syahputra, Retno Umiarsih, Rifena Pangastuwani, Mutia Riefka Fauzidanty, Idham Sakti Harahap, Dondy Anggono Setyabudi, Affandi, Mazdani Ulfah Daulay and Wawan Sutian (2023). Effects of freezing time on degradation of durian (*Durio zibethinus* Murr.) fruit's attributes during the frozen storage. *Tropical Life Sciences Research* 34(1): 19–39. <https://doi.org/10.21315/tlsr2023.34.1.2>
- Huang, B., Li, Y., y Hu, Z. (2024). Effect of Glassy State and Liquid Nitrogen Quick Freezing on the Quality Characteristics of Blueberries. *Food Science*, 45(6), 225–232. <https://www.spkx.net.cn/EN/10.7506/spkx1002-6630-20230629-236>
- Huang, W., Shen, S., Wang, Z., Yang, J., Lv, H., Tian, H., Burdon, J., y Zhong, C. (2024). Freezing points of fruit from different kiwifruit genotypes at harvest and during cold storage. *Horticulturae*, 10(6), 624. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060624>
- Gales, O., Jones, J., y Swarts, N. (2022). An analysis on the impacts of cryogenic freezing on raspberry quality. *Advances in Horticultural Science*, 36(4), 293–301. <https://doi.org/10.36253/ahsc-13824>
- Jha, P. K., Xanthakis, E., Chevallier, S., Jury, V., & Le-Bail, A. (2019). Assessment of freeze damage in fruits and vegetables. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 121, 479–496. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.002>
- Jha, P. K., Chapleau, N., Meyers, P.-E., Pathier, D., y Le-Bail, A. (2024). Can cryogenic freezing preserve the quality of fruit matrices during long-term storage compared to the mechanical method? *Applied Food Research*, 4(1), 100374. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100374>

- Loayza-Salazar, S., Siche, R., Vegas, C., Chávez-Llerena, R., Encina-Zelada, C., Calla-Florez, M., y Comettant-Rabanal, R. (2024). Novel Technologies in the Freezing Process and Their Impact on the Quality of Fruits and Vegetables. *Food Engineering Reviews*, 16, 371-395. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09371-9>
- Muthukumarappan, K., Marella, C., y Sunkesula, V. (2019). Food Freezing Technology. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, 389–415. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814803-7.00015-4>
- Narayana, G. P., Jha, P. K., Rawson, A., y Le-Bail, A. (2023). Changes in the quality of apple tissue subjected to different freezing rates during long-term frozen storage at different temperatures. *International Journal of Refrigeration*, 151, 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.03.022>
- Noriega-Juárez, A., Rubio-Carrillo, J., García-Magaña, M., González-Aguilar, G., Meza-Espinosa, L., Chacón-López, M., Aguilera-Aguirre, S., Osuna-García, J., y Montalvo-González, E. (2024). Comparison of individual quick freezing and traditional slow freezing on physicochemical, nutritional and antioxidant changes of four mango varieties harvested in two ripening stages. *Food Chemistry Advances*, 4, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100590>
- Pérez-Bermúdez, I., Castillo-Suero, A., Cortés-Inostroza, A., Jeldrez, C., Dantas, A., Hernández, E., Orellana-Palma, P., y Petzold, G. (2023). Observation and Measurement of Ice Morphology in Foods: A Review. *Foods*, 12(21), 3987. <https://doi.org/10.3390/foods12213987>
- Pesce, F., Parafati, L., Fallico, B., y Palmeri, R. (2025). Use of Liquid Nitrogen in Food Products: A Review. *Food Frontiers*, 6, 1617-1644. <https://doi.org/10.1002/fft2.70035>
- Razali, N. A., Wan Ibrahim, W. M., Safari, S., Rosly, N. K., Hamzah, F. A., y Wan Husin, W. M. R. I. (2022). Cryogenic freezing preserves the quality of whole durian fruit for the export market. *Food Research*, 6(3), 360–364. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(3\).428](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(3).428)
- Salami, T. M., Sun, D.-W., y Tian, Y. (2025). Advancing future food preservation with green cryoprotective agents (GCAs) to mitigate ice damage in freezing. *Food Engineering Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09411-y>
- Schudel, S., Prawiranto, K., y Defraeye, T. (2021). Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage. *Journal of Food Engineering*, 293, 110376. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110376>
- Tan, X. Y., Misran, A., Jeffery Daim, L. D., Ding, P., y Pak Dek, M. S. (2020). Effect of freezing on minimally processed durian for long term storage. *Scientia Horticulturae*, 264, 109170. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109170>

- Xu, R., Chen, Q., Zhang, Y., Li, J., Zhou, J., Wang, Y., Chang, H., Meng, F., y Wang, B. (2023). Research on flesh texture and quality traits upon kiwifruit (cv. Xuxiang) at fluctuating temperatures during cold storage. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.1590.v1>
- Yu, H., Mei, J., y Xie, J. (2022). New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106185>
- Zennoune, A., Benkhefifa, H., Flin, F., Ndoeye, F., Perrin, J., Weitkamp, T., Scheel, M., Latil, P., y Geindreau, C. (2022). Investigating the influence of freezing rate and frozen storage conditions on a model sponge cake using synchrotron X-rays micro-computed tomography. *Food Research International*, 162 (Part B). [10.1016/j.foodres.2022.112116](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112116)
- Zhang, X., Nian, R., Li, Q., Wang, Y., You, K., Zhu, D., y Cao, X. (2024). Impact of ultrasonic pretreatment on the color and antioxidant capacity of vacuum freeze-dried strawberries. *Drying Technology*, 42(13), 2032–2043. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2405858>
- Zielińska, M., Zieliński, D., Markowski, M., & Mieszczakowska-Frąć, M. (2018). Effects of freezing and hot air drying on the physical, morphological and thermal properties of cranberries. *Food and Bioprocess Processing*, 110, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.006>
- Zhao, C., Niu, J., Wang, W., Wang, Y., Wang, Y., Cheng, L., Meng, Y., Guo, Y., y Song, S. (2021). Deterioration in the quality of ‘Xuxiang’ kiwifruit pulp caused by frozen storage: An integrated analysis based on phenotype, color, antioxidant activity, and flavor compounds. *Foods*, 10(12), 3168. <https://doi.org/10.3390/foods10123168>
- Wu, J., Jia, X., y Fan, K. (2022). Recent advances in the improvement of freezing time and physicochemical quality of frozen fruits and vegetables by ultrasound application. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 3352–3360. <http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.15744>

Declaración de roles de autores:

- Lizeth N. Santiago-Castillo: Conceptualización; metodología y administración del proyecto.
- Miguel A. Grados-Poémape: Análisis, validación de datos y redacción.
- César Moreno-Rojo: Revisión, supervisión, validación y edición final.