

IMPACTO DE LA LIOFILIZACIÓN SOBRE CAROTENOIDES Y FLUIDEZ EN POLVOS DE FRUTAS TROPICALES

IMPACT OF FREEZE-DRYING ON CAROTENOIDS AND FLOWABILITY IN TROPICAL FRUIT POWDERS^a

Tigreros, J.A.^{1*}; Parra-Londoño, S.¹; Ossa-Ossa, G.¹; Rodríguez, E.²

¹Utedé. Carrera 12 #26c74.

²Agrosavia. Carrera 36A con Calle 23.

* E-mail: ja.tigreros@utede.edu.co

Fecha de envío: 30, mayo, 2025

Fecha de publicación: 10, diciembre, 2025

Resumen:

La industria exportadora de frutas tropicales enfrenta pérdidas significativas debido al deterioro durante el transporte, siendo la liofilización una alternativa tecnológica prometedora para preservar compuestos bioactivos y desarrollar productos con mayor vida útil. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto del proceso de liofilización sobre los parámetros fisicoquímicos y atributos de calidad en mezclas formuladas con uchuva en tres estados de madurez diferentes y gulupa en estado de madurez de consumo, combinadas en proporciones iguales. La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de análisis de alimentos de la UTEDÉ en Guadalajara de Buga, Valle del Cauca, Colombia, utilizando frutos de uchuva (*Physalis peruviana*) del corregimiento de Tenerife y gulupa (*Passiflora edulis* Sims) adquirida localmente. La metodología incluyó la preparación de suspensiones al 50% de cada fruta, liofilización durante 72 horas a -80°C, y posterior evaluación de parámetros fisicoquímicos, contenido de carotenoides, propiedades de color y fluidez. Los resultados demostraron que las uchuvas presentaron índices de madurez crecientes (5.44 a 15.74) pero con discrepancias respecto a las normas técnicas colombianas, mientras que la gulupa mostró cumplimiento parcial de la NTC 6456:2020. El proceso de liofilización redujo significativamente el contenido de carotenoides (60-80% de pérdida), siendo la gulupa fresca la que registró las mayores concentraciones (6.3 mg provitamina A/100g). Las propiedades de fluidez de los polvos liofilizados fueron excelentes según criterios de Carr, con relaciones de Hausner entre 1.07-1.17, validando su viabilidad para aplicaciones industriales y desarrollo de productos alimentarios funcionales.

Palabras clave: Bioactivos, deshidratación, madurez, antioxidantes, Hausner.

^a Proyecto de investigación.

Abstract:

The tropical fruit export industry faces significant losses due to deterioration during transport, with freeze-drying being a promising technological alternative to preserve bioactive compounds and develop products with extended shelf life. The objective of this study was to evaluate the impact of the freeze-drying process on physicochemical parameters and quality attributes in mixtures formulated with cape gooseberry at three different maturity stages and gulupa at consumption maturity stage, combined in equal proportions. The research was conducted at the food analysis laboratory of UTEDÉ in Guadalajara de Buga, Valle del Cauca, Colombia, using cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*) from Tenerife district and gulupa (*Passiflora edulis* Sims) acquired locally. The methodology included preparation of 50% suspensions of each fruit, freeze-drying for 72 hours at -80°C, and subsequent evaluation of physicochemical parameters, carotenoid content, color properties, and flowability. Results demonstrated that cape gooseberries presented increasing maturity indices (5.44 to 15.74) but with discrepancies regarding Colombian technical standards, while gulupa showed partial compliance with NTC 6456:2020. The freeze-drying process significantly reduced carotenoid content (60-80% loss), with fresh gulupa recording the highest concentrations (6.3 mg provitamin A/100g). Flowability properties of freeze-dried powders were excellent according to Carr criteria, with Hausner ratios between 1.07-1.17, validating their viability for industrial applications and development of functional food products.

Keywords: bioactive, dehydration, maturity, antioxidants, Hausner.

INTRODUCCIÓN

Según datos del Ministerio de Agricultura y Legiscomex (2023), la producción de uchuva en Colombia aumentó de 8,000 a más de 11,000 toneladas entre 2007 y 2020. De esta producción, se exportaron aproximadamente 7,000 toneladas en 2022, generando ingresos cercanos a los 30 millones de dólares. En el caso de la gulupa, la producción creció de menos de 5,000 toneladas a más de 10,000 toneladas entre 2007 y 2018. Las exportaciones alcanzaron cerca de 12,500 toneladas en 2022, representando más de 35 millones de dólares en ventas internacionales. Sin embargo, esta expansión comercial contrasta con los desafíos que enfrentan los exportadores de fruta fresca, quienes reportan pérdidas de hasta 15% del volumen exportado debido a problemas logísticos y al deterioro de las características sensoriales y nutricionales del producto (Jiménez et al., 2011). En respuesta a esta problemática, la industria ha adoptado diversas tecnologías innovadoras de conservación y procesamiento. Estas alternativas se clasifican en métodos térmicos y no térmicos, entre los cuales sobresalen el secado por aspersión (spray drying), el procesamiento por altas presiones hidrostáticas, la

tecnología de plasma frío y el secado por ventana de refractancia, técnicas que permiten preservar mejor las características del producto final (Cortés-Rodríguez et., 2023; Ma et al., 2025; Song et al., 2025; Quintero et al., 2025). Dentro de las tecnologías de deshidratación de cuarta generación, la liofilización se posiciona como una alternativa destacada. El proceso implica la congelación del producto seguida por la sublimación directa del hielo bajo presión subatmosférica (Cortés-Rodríguez et al., 2015), minimizando así la pérdida de compuestos bioactivos termolábiles característicos de las matrices alimentarias. Rakariyatham et al. (2025) evaluaron tres métodos de deshidratación (secado por aire caliente, vacío y liofilización) para el procesamiento de orujo de guayaba blanca y rosa. Los resultados demostraron que la liofilización fue superior a los otros métodos, ya que preservó de manera más efectiva los compuestos nutricionales y bioactivos, generando polvos con propiedades funcionales mejoradas, incluyendo una mayor capacidad de absorción de agua y retención de actividad antioxidante. Por su parte, Dadhaneeya et al. (2023) evaluaron el efecto de tres métodos de secado (hornos de aire caliente, secado al vacío y liofilización) en rodajas y pulpa de pitaya (*Hylocereus undatus*). Aunque la liofilización registró los valores más altos de contenido de fenoles totales y actividad antioxidante en comparación con los otros métodos, requirió tiempos de procesamiento significativamente mayores, lo que representa una limitación operacional importante del proceso. La formulación de mezclas de frutas liofilizadas también ha sido investigada. Naranjo-Durán et al. (2023) analizaron el efecto sinérgico resultante de combinar uchuva (*Physalis peruviana* L.) y gulupa (*Passiflora edulis* f. *Edulis Sims*) en proporciones de 83% y 17% respectivamente, determinando que esta formulación constituía la mezcla óptima para maximizar la capacidad antioxidante del producto final. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto del proceso de liofilización sobre los parámetros fisicoquímicos y atributos de calidad (contenido de humedad, color, solubilidad, densidad y carotenoides) en mezclas formuladas con uchuva en tres estados de madurez diferentes y gulupa en estado de madurez de consumo, combinadas en proporciones iguales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de muestra

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana*) en diferentes estados de madurez (4, 5 y 6), clasificados según la NTC 4580 de 2022, fueron suministrados por un productor del corregimiento de Tenerife, municipio de Cerrito, Valle del Cauca, Colombia. La gulupa (*Passiflora edulis* Sims) se adquirió en un supermercado local de la ciudad de Guadalajara de Buga en estado de madurez de consumo, siguiendo los criterios establecidos en la NTC 6456 de 2020. Posteriormente, ambas frutas fueron trasladadas al laboratorio de análisis de alimentos de la UTEDÉ en Guadalajara de Buga, Valle del Cauca, Colombia.

Preparación de la suspensión de alimentación

Inicialmente, las frutas fueron lavadas y desinfectadas en una solución de hipoclorito a 200 ppm. Posteriormente, la uchuva (en 3 estados de madurez) y la gulupa se homogeneizaron por separado en una licuadora Home Elements® durante 4 min (posición 2). La suspensión de gulupa obtenida se filtró a través de un tamiz de malla de 500 µm, mientras que las suspensiones de uchuva no requirieron filtración. Se formularon lotes de 200 g de suspensión, conformados por 50% de gulupa y 50% de uchuva en cada uno de sus estados de madurez. Como control se utilizó una suspensión de 100% gulupa.

Proceso de liofilización

Se realizó en un liofilizador de contenedor tipo platos (Biocool Model Lab1C80E, Beijing, China). Las condiciones de la liofilización fueron: temperatura condensador: -80°C, vacío: 018 Pa durante 72 h y la temperatura final de secado fue entre 25 y 31°C.

Evaluación del color superficial mediante sistema CIELab

Se empleó la metodología establecida por Ordóñez-Santos et al. (2017). La caracterización cromática de las muestras correspondientes a cada fruta se llevó a cabo mediante un colorímetro NS-810 3nh (Guangzhou, China), utilizando el sistema de coordenadas CIELab* (L^* , a^* y b^*). Se aplicó un iluminante patrón D65 con un ángulo de observación de 2°. La calibración del equipo se realizó empleando placas de referencia de color negro y blanco.

Cuantificación de carotenoides y provitamina A

El proceso de extracción y determinación cuantitativa de carotenoides y provitamina A se ejecutó siguiendo la metodología reportada por Ordóñez-Santos et al. (2017). Las lecturas de absorbancia de cada disolución en fase apolar se registraron a longitudes de onda de 450, 444, 451 y 472 nm, utilizando hexano como blanco en un espectrofotómetro (Biobase BK-UV1000, Jinan, Shandong, China).

Análisis fisicoquímico

Todas las muestras de fruta fresca se sometieron a análisis de humedad, brix, acidez, pH e índice de madurez siguiendo el método de la AOAC.

Caracterización de las propiedades de la mezcla en polvo de Uchuva y Gulupa

Solubilidad

Se determinó de acuerdo la metodología descrita por Cortes-Rodríguez et al., (2023) con algunas modificaciones. Se mezclaron 0,5 g de muestra en polvo con 50 mL de agua usando vórtex por 2 min, seguido de centrifugación a 3000 rpm durante 10 min. El sobrenadante se secó en placa petri hasta peso constante y la solubilidad se calculó gravimétricamente expresándose como porcentaje.

Fluidez

La fluidez del polvo se determinó mediante el índice de Carr (%CI) y la relación de Hausner (HR), calculados con las densidades aparente y compactada según Sapei et al. (2025). Para ello, se colocaron 5 g de muestra en una probeta de 10 mL, se determinó el volumen ocupado y se calculó densidad aparente como la relación peso/volumen de la muestra. La densidad tras compactación se determinó siguiendo el mismo procedimiento, pero sometiendo la muestra a cerca de 30 golpes antes de medir el volumen.

Actividad de agua

La actividad de agua se evaluó mediante la metodología AOAC 978.18/2012, empleando un higrómetro de punto de rocío operado a 25°C (4TEV/Aqualab, Decagon Devices, Pullman, WA, EUA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características fisicoquímicas de las muestras

Frutos individuales

Los tratamientos UE4, UE5 y UE6 representan uchuvas en diferentes estados de madurez, evidenciando una progresión clara en los parámetros evaluados. El índice de madurez aumenta desde UE4 (5.44) hasta UE6 (15.74), lo que indica una maduración progresiva de los frutos (Tabla 1). A pesar de las discrepancias encontradas entre los valores experimentales y los rangos establecidos en la NTC 4580 del 2022, se procedió a clasificar las muestras UE4, UE5 y UE6 como estados de madurez 4, 5 y 6 respectivamente. Las variaciones fueron particularmente notables: en el caso del °Brix mínimo, UE4 presentó 11.5 frente al valor normativo de 14.5 (diferencia de -20.7%), UE5 mostró 13.5 versus 14.8 esperado (-8.8%), y UE6 registró 13.6 comparado con 15.1 de la norma (-9.9%), quedando todos los valores por debajo de los mínimos establecidos.

La acidez titulable máxima exhibió comportamientos mixtos: UE4 con 2.11% superó el límite máximo de 2.03% (+3.9%), UE5 con 0.98% se ubicó por debajo del mínimo de 1.83% (-46.4%), y UE6 con 0.86% también quedó significativamente bajo el límite mínimo de 1.68% (-48.8%). El índice de madurez mínimo mostró las mayores discrepancias, donde UE4 alcanzó 5.44 versus 7.1 normativo (-23.4%), mientras que UE5 registró 13.78 frente a 8.1 esperado (+70.1%) y UE6 presentó 15.74 comparado con 9.0 de la norma (+74.9%), excediendo ampliamente los valores máximos establecidos. Estas variaciones significativas, que oscilan entre -48.8% y +74.9%, evidencian que las uchuvas analizadas no se ajustan consistentemente a los rangos normativos, lo que puede deberse a condiciones climáticas específicas de la región de cultivo, prácticas de manejo del cultivo (fertilización, riego, cosecha) o variabilidad genética entre ecotipos colombianos.

La muestra de gulupa analizada presenta un cumplimiento parcial de la normativa colombiana. Mientras que el contenido de sólidos solubles satisface ampliamente los requisitos mínimos, la acidez ligeramente elevada (3.9% vs 3.8% máximo) sugiere que el fruto requiere un período adicional de maduración postcosecha para alcanzar la conformidad total con los estándares de calidad establecidos en la NTC 6456:2020.

Cuadro1. Índice de madurez de las frutas expresadas entre la relación de °Brix/porcentaje de acidez

Table 1. Fruit maturity index expressed as the ratio of °Brix/percentage of acidity

Tratamiento	°Brix	%Acidez (ácido cítrico)	Índice de madurez	Frutas
UE4	11.5±0.1	2.11±0.05	5.44±0.13	
UE5	13.5±0.06	0.98±0.05	13.78±0.72	
UE6	13.6±0.2	0.86±0.04	15.74±0.49	
Gulupa	12.9±0.15	3.9±0.04	3.3±0.01	

Nota. UE4 (uchuva etapa 4); UE5 (uchuva etapa 5); UE6 (uchuva etapa 6).

Al comparar los resultados experimentales con los valores reportados en la literatura científica (Naranjo-Durán et al., 2023), se evidencian discrepancias notables en los parámetros fisicoquímicos de las uchuvas analizadas. En cuanto al contenido de °Brix, las muestras UE4, UE5 y UE6 registraron valores de 11.5, 13.5 y 13.6 respectivamente, los cuales superan consistentemente a los reportados en el estudio de referencia (10.0, 11.33 y 13.0 para estados de madurez 3, 5 y 6). Sin embargo, las diferencias más pronunciadas se observaron en la acidez titulable, donde UE4 presentó 2.11% frente al 1.27% reportado (+65.4%), mientras que UE5 y UE6 exhibieron valores significativamente menores (0.98% y 0.86% versus 1.28% en ambos casos, representando reducciones del -23.4% y -32.8% respectivamente). Esta variabilidad en los patrones de acidificación durante la maduración, donde el estudio de referencia muestra valores prácticamente constantes (1.27-1.28%) entre los estados 3-6, contrasta con la tendencia decreciente observada en las muestras experimentales, sugiriendo posibles diferencias varietales, ambientales o de manejo postcosecha que podrían influir en la expresión de estos parámetros de calidad.

Suspensiones de uchuva-gulupa

En la presente investigación se evaluaron características físicas y químicas en las muestras en fresco de uchuva y gulupa, en suspensión y tratadas por liofilización (Figura 1 y 2). Los valores de pH fueron más elevados en las muestras de uchuva en estado de maduración cinco y seis, alcanzando valores por encima de 4. Los valores más bajos de acidez fueron observados en las muestras de gulupa en fresco.

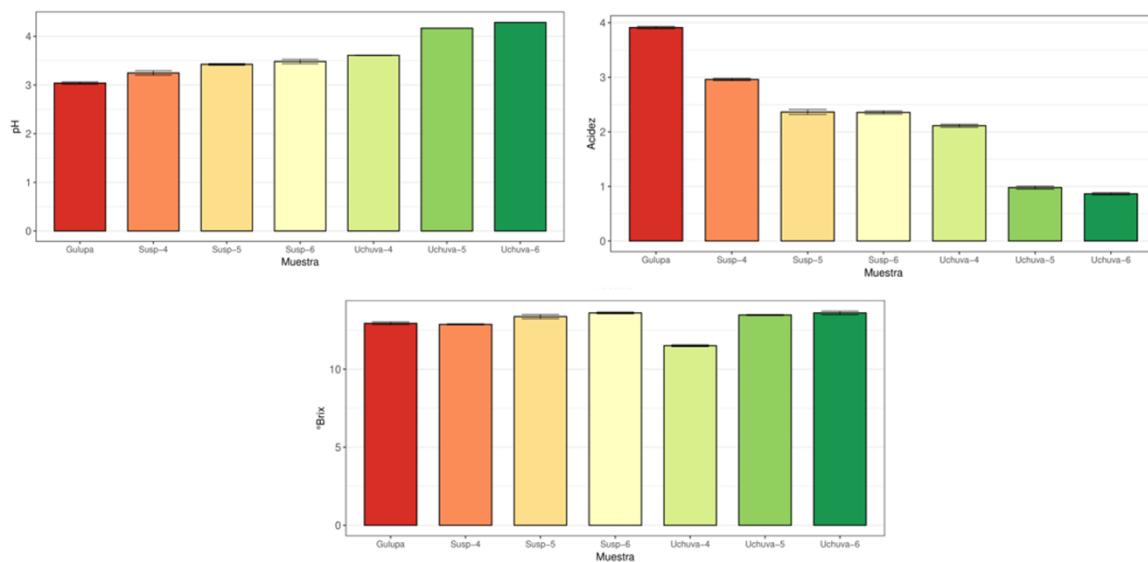


Figura 1. Promedio y error estándar de las variables pH, acidez y grados Brix en las muestras de uchuva y gulupa en fresco, en suspensión y tratadas por liofilización.

Figure 1. Mean and standard error of pH, acidity and Brix degrees variables in fresh, suspension and freeze-dried samples of cape gooseberry and gulupa.

Por otra parte, los valores de acidez tuvieron un comportamiento contrario al de pH, observando valores más elevados en la gulupa y más bajos en las uchuvas en estado de maduración cinco y seis (Figura 1). Los valores de grados Brix fueron similares entre las diferentes muestras evaluadas, logrando el menor valor en uchuvas en fresco en estado de madurez 4. Para todas las mediciones y tratamientos el error estándar fue pequeño, indicando estabilidad y confiabilidad en las mediciones realizadas.

La evaluación del porcentaje de humedad y sólidos totales (Figura 2), mostró que la mayor cantidad de agua se presentó en las muestras en fresco de uchuva y gulupa, al igual que en la suspensión, alcanzando valores aproximados de 83%. Por otra parte, el mayor porcentaje de sólidos totales, alrededor de 83%, se encontró en las muestras tratadas por liofilización. Cuando se compararon las muestras en fresco de las frutas empleadas, se presentaron valores similares de sólidos totales (17%).

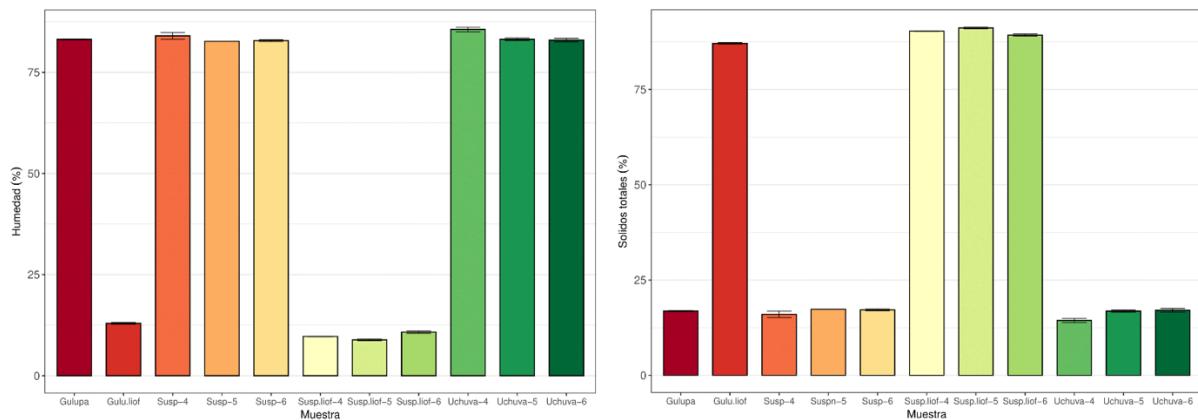


Figura 2. Promedio y error estándar de las variables humedad y sólidos totales en las muestras de uchuva y gulupa en fresco, en suspensión y tratadas por liofilización.

Figure 2. Mean and standard error of moisture and total solids variables in fresh, suspension and freeze-dried samples of cape gooseberry and gulupa.

Concentración de carotenoides en las muestras

La medición de la concentración de carotenoides en las diferentes muestras utilizadas fue mayor en todos los casos, para las muestras en fresco de gulupa, seguido por las tres diferentes suspensiones elaboradas con las frutas frescas (Figura 3). Contrariamente, el proceso de liofilización afectó significativamente (p -valor < 0.001) la concentración de estos compuestos, obteniendo el menor valor en las muestras en suspensión liofilizadas preparadas con uchuva en estado de madurez 5.

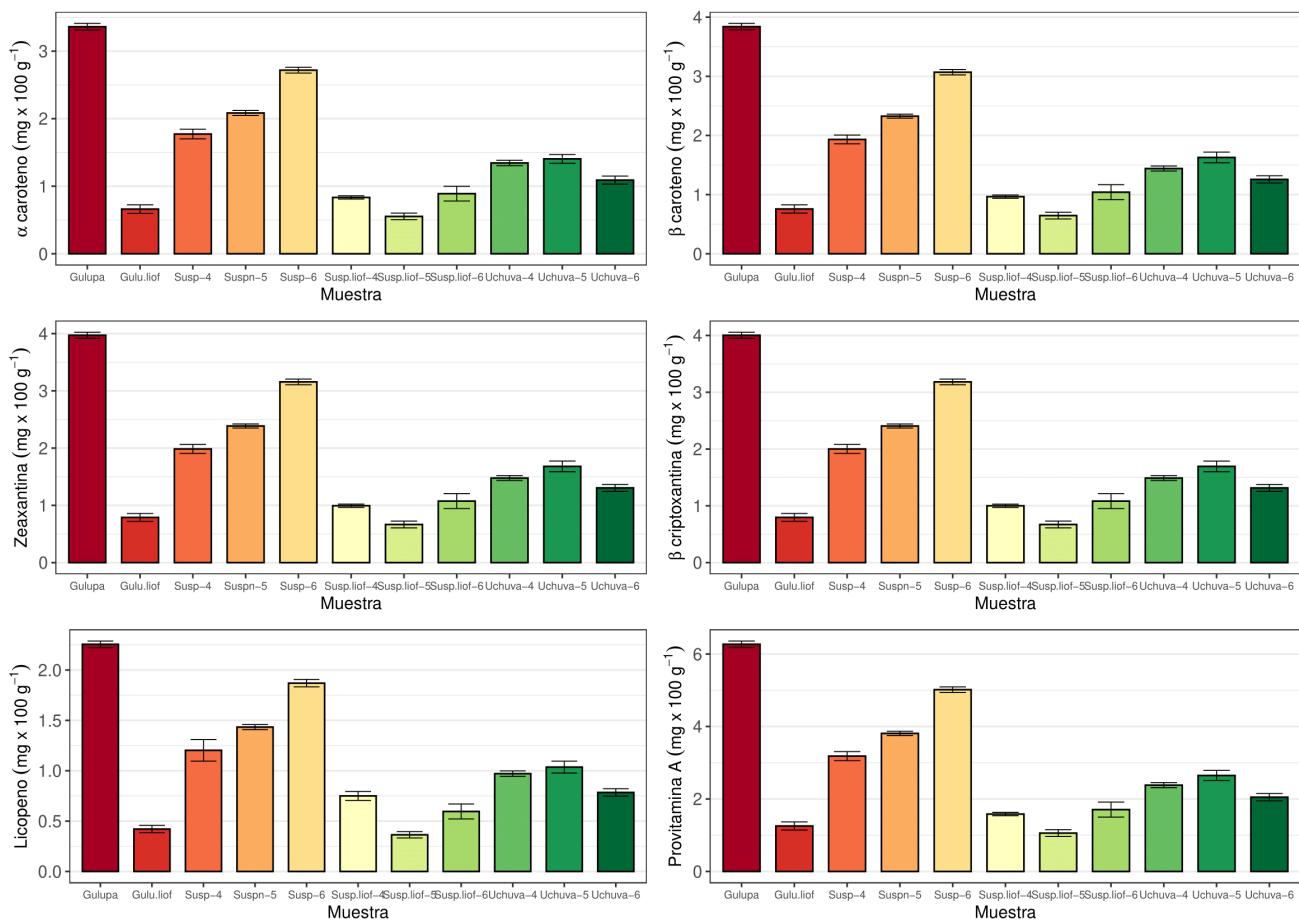


Figura 3. Promedio y error estándar del contenido de carotenoides en las muestras de uchuva y gulupa en fresco, en suspensión y tratadas por liofilización.

Figure 3. Mean and standard error of carotenoid content in fresh, suspension and freeze-dried samples of cape gooseberry and gulupa.

El resultado del análisis de post ANOVA, empleando el test de Tukey, para la comparación entre los promedios de carotenoides obtenidos, mostró el mayor valor en las muestras de gulupa fresca, alcanzado valores promedio de 6.3 mg de provitamina A por cada 100 g de fruto. Las muestras tratadas con liofilización tuvieron las menores concentraciones, sin importar el grado de madurez de la uchuva empleada (Tabla 2). Aquellos grupos de muestra que comparten letras similares no presentaron diferencias significativas entre ellos.

Tabla 2. Análisis de post-ANOVA para la comparación entre promedios en la concentración de carotenoides.

Table 2. Post-ANOVA analysis for comparison between means in carotenoid concentration.

Muestra	Post - ANOVA
Gulupa	a
Suspensión 6	b
Suspensión 5	c
Suspensión 4	d
Uchuva 5	de
Uchuva 4	ef
Uchuva 6	fg
Suspensión liof 6	gh
Suspensión liof 4	ghi
Gulupa liof	hi
Suspensión liof 5	i

Evaluación del color en las muestras

Los atributos del color evaluados empleando la escala CIELAB, mostraron muestras con mayor luminosidad (L^*) cuando son tratadas por suspensión y liofilización con uchuvas en estado de madurez seis (Tabla 3). Los valores más bajos se observaron en uchuvas con estado de madurez cuatro. La intensidad del rojo (a^*) es baja para todas las muestras, mientras la del amarillo (b^*) es alta. Los valores más elevados de a^* fueron observados en las muestras liofilizadas y en suspensión.

Fluidez

Comparando los resultados experimentales de las suspensiones uchuva-gulupa liofilizadas con los criterios establecidos en la literatura científica (Schlick-Hasper et al., 2022), todos muestran un comportamiento excelente según los criterios de Carr, con relaciones de Hausner entre 1.07-1.17 e índices de Carr entre 6.75-14.35%, clasificándose como "excelente" a "buena" fluidez (Tabla 4).

La gulupa pura (GL) presenta los mejores parámetros ($H=1.07$, $IC=6.75\%$), mientras que las mezclas uchuva-gulupa mantienen propiedades favorables sin comprometer significativamente el flujo del material. Estos valores, muy por debajo de los límites críticos establecidos ($H<1.25$), validan la viabilidad técnica de estos polvos para

aplicaciones industriales, facilitando operaciones de manejo, almacenamiento y dosificación en el desarrollo de productos alimentarios funcionales.

Tabla 3. Promedios y error estándar de los atributos del color en la escala CIELab*^{b*} para las muestras evaluadas.

Table 3. Means and standard error of color attributes in the CIELab scale for the evaluated samples.

Tratamiento	L*	a*	b*	C	h
Gulupa	39,16 ± 2,94	9,11 ± 0,92	32,98 ± 2,77	34,22 ± 2,90	74,59 ± 0,55
Gulupa Liofi	43,45 ± 5,72	10,61 ± 1,44	35,48 ± 2,47	37,09 ± 2,47	73,33 ± 2,26
Suspensión 4	38,06 ± 0,55	7,12 ± 0,62	28,99 ± 0,85	29,86 ± 0,93	76,24 ± 0,94
Suspensión 5	39,03 ± 0,26	8,99 ± 0,29	29,29 ± 0,08	30,64 ± 0,16	72,94 ± 0,47
Suspensión 6	37,17 ± 1,56	9,75 ± 1,05	30,43 ± 0,75	31,97 ± 0,94	72,31 ± 1,61
Suspensión liof 4	48,19 ± 2,60	7,68 ± 0,71	39,07 ± 1,87	39,82 ± 1,93	78,90 ± 0,75
Suspensión liof 5	47,79 ± 1,49	9,96 ± 0,37	40,44 ± 1,70	41,65 ± 1,69	76,13 ± 0,58
Suspensión liof 6	50,28 ± 1,98	10,66 ± 1,17	41,80 ± 1,00	43,17 ± 0,97	75,69 ± 1,59
Uchuva 4	25,36 ± 1,25	4,95 ± 1,06	20,93 ± 0,75	21,55 ± 0,93	76,89 ± 2,47
Uchuva 5	28,80 ± 0,74	7,55 ± 0,21	20,46 ± 0,67	21,81 ± 0,70	69,74 ± 0,13
Uchuva 6	27,45 ± 1,09	7,70 ± 0,44	23,30 ± 2,35	24,55 ± 2,37	71,58 ± 0,76

Tabla 4. Propiedades de fluidez del polvo liofilizado obtenido a partir de la mezcla de uchuva-gulupa (n=3).

Table 4. Flow properties of freeze-dried powder obtained from cape gooseberry-gulupa mixture (n=3).

Tratamiento	Densidad aparente	Densidad compactada	Índice de Carr %	Relación de Hausner	Fluidez
	g/mL	g/mL			
SUGLE4	0,56±0,01	0,62±0,02	10,16±3.13	1,11±0,04	Excelente
SUGLE5	0,54±0,03	0,63±0,01	14,35±4.16	1,17±0,06	Bueno
SUGLE6	0,56±0,02	0,62±0,02	10,68±2.36	1,12±0,03	Bueno
GL	0,64±0,02	0,69±0,02	6,75±2.94	1,07±0,03	Excelente

Nota. SUGLE4 (suspensión uchuva-gulupa liofilizada etapa 4); SUGLE5 (suspensión uchuva-gulupa liofilizada etapa 5); SUGLE5 (suspensión uchuva-gulupa liofilizada etapa 5); GL (gulupa liofilizada).

Actividad de Agua (aw)

Los valores de actividad de agua obtenidos en todas las formulaciones (0.201-0.211) se encuentran dentro del rango óptimo para productos deshidratados estables, situándose significativamente por debajo del límite crítico de 0.6 que previene el crecimiento microbiano (Cortés-Rodríguez et., 2015). La muestra SUGLE5 registró el valor más bajo (0.201), seguida por SUGLE6 (0.206), SUGLE4 (0.211) y GL (0.211), evidenciando que el estado de madurez de la uchuva influye mínimamente en este parámetro. Estos valores garantizan estabilidad microbiológica prolongada y minimizan las reacciones de deterioro enzimático y oxidativo, validando la efectividad del proceso de liofilización para preservar la calidad del producto durante el almacenamiento.

Solubilidad

Los resultados de solubilidad muestran diferencias marcadas entre las formulaciones, con valores que oscilan entre 71.9% y 89.20%. La gulupa pura (GL) presenta la mayor solubilidad (89.20%), mientras que las mezclas uchuva-gulupa registran valores inferiores: SUGLE6 (79.9%), SUGLE4 (73.62%) y SUGLE5 (71.9%). Esta tendencia sugiere que la incorporación de uchuva reduce la solubilidad del producto final, posiblemente debido a diferencias en la composición de carbohidratos solubles y estructura matricial entre ambas frutas. El estado de madurez 5 de la uchuva mostró el mayor impacto negativo en la solubilidad, lo que podría relacionarse con cambios en la composición de pectinas y otros polisacáridos estructurales durante la maduración.

La correlación inversa entre el contenido de uchuva y la solubilidad establece consideraciones importantes para la formulación de productos instantáneos, donde una alta solubilidad es deseable para la reconstitución rápida y completa del polvo en medios acuosos.

CONCLUSIÓN

El proceso de liofilización se establece como una tecnología viable para desarrollar productos en polvo a partir de mezclas uchuva-gulupa, preservando características funcionales esenciales y generando matrices con excelentes propiedades de fluidez que garantizan su aplicabilidad industrial. La formulación de mezclas binarias

uchuva-gulupa emerge como una estrategia tecnológica prometedora para diseñar ingredientes funcionales con perfiles nutricionales diferenciados y estables, superando las limitaciones individuales de cada matriz frutal y respondiendo a las demandas del mercado de alimentos saludables, validando así el potencial de la liofilización como plataforma tecnológica para la valorización de frutas tropicales colombianas que contribuya al desarrollo de una industria nacional de ingredientes funcionales y al fortalecimiento de las cadenas agroproductivas locales.

LITERATURA CITADA

- Cortés-Rodríguez, M., Herrera, E., & Rodríguez, E. (2015). Experimental optimization of the freeze dry process of cape gooseberry added with active compounds by vacuum impregnation. *Vitae*, 22(1), 47-56.
- Dadhaneeya, H., Kesavan, R. K., Inbaraj, B. S., Sharma, M., Kamma, S., Nayak, P. K., & Sridhar, K. (2023). Impact of different drying methods on the phenolic composition, in vitro antioxidant activity, and quality attributes of dragon fruit slices and pulp. *Foods*, 12(7), 1387. <https://doi.org/10.3390/foods12071387>.
- Jiménez, A. M., Sierra, C. A., Rodríguez-Pulido, F. J., González-Miret, M. L., Heredia, F. J., & Osorio, C. (2011). Physicochemical characterisation of gulupa (*Passiflora edulis Sims. fo edulis*) fruit from Colombia during the ripening. *Food Research International*, 44(7), 1912-1918. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.007>.
- Ma, J., Zhang, L., Ren, X., Luo, Z., Zhao, M., Tong, P., & Long, F. (2025). High hydrostatic pressure pretreated fermented apple juice attenuated anaphylaxis by improving gut microbiota and metabolic regulation. *Food Bioscience*, 64, 105844. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105844>.
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>.
- Quintero, I., Ceccaldi, A., Martínez, H., Santander, M., Rodríguez, J., & Escobar, S. (2025). Dry cacao pulp in chocolate bars: A sustainable, nutrient-rich sweetener with enhanced sensory quality through refractance windows drying. *Applied Food Research*, 5(1), 100700. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100700>.
- Rakariyatham, K., Boonyapranaik, K., Laokuldilok, T., Utama-ang, N., Nutprem, A., Kaewprasit, K., & Tatongjai, K. (2025). Impact of different dehydration

- methods on physicochemical and functional properties of guava (*Psidium guajava* L.) powder prepared from white and pink pomaces. *Applied Food Research*, 5(1), 100696. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100696>.
- Rodríguez, M. C., & Ortega-Toro, R. (2023). Optimization of fluidized bed agglomeration process for developing a blackberry powder mixture. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19577>
- Sapei, L., Mustika, P. C. B. W., Sutrisna, P. D., Agustriyanto, R., Setyopratomo, P., Santoso, G. V., Utama, J. P & Indrawanto, R. (2025). Inulin-coated Virgin Coconut Oil (VCO) powder produced by spray drying. *Applied Food Research*, 100721. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100721>.
- Schlick-Hasper, E., Bethke, J., Vogler, N., & Goedecke, T. (2022). Flow properties of powdery or granular filling substances of dangerous goods packagings—comparison of the measurement of the angle of repose and the determination of the Hausner ratio. *Packaging Technology and Science*, 35(10), 765-782. <https://doi.org/10.1002/pts.2678>.
- Song, C., Wang, J., Wu, L., Liu, J., Liu, G., Gong, D. & Zhang, Z. (2025). Quality and physiological changes in fresh-cut mango fruit as affected by cold plasma-activated water. *Postharvest Biology and Technology*, 225, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113524>.

