





## Efecto del mucílago del pericarpio de tuna (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*) en el secado por aspersión de jugo de tuna

## The effect of prickly pear pericarp mucilage (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*) on spray drying of prickly pear juice

Márquez-Lemus, M.<sup>1</sup> , Cano-Sampedro, E.<sup>2</sup> , Alamilla-Beltrán, L.<sup>1</sup> ,  
Mora Escobedo, R.<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Campus Zacatenco, Avenida Wilfrido Massieu S/N Esq. Stampa, Col. Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero. C.P.07738, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Campus Tlaxcala, Instituto Politécnico Nacional, Guillermo Valle 11, Col. Centro, C.P. 9000, Tlaxcala, México.



**Please cite this article as/Como citar este artículo:** Márquez-Lemus, M., Cano-Sampedro, E., Alamilla-Beltrán, L., Mora Escobedo, R. (2023). The effect of prickly pear pericarp mucilage (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*) on spray drying of prickly pear juice. *Revista Bio Ciencias*, 10 e1476. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1476>

### Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: February 24<sup>th</sup> 2023.

Accepted/Aceptado: June 27<sup>th</sup> 2023.

Available on line/Publicado: September 18<sup>th</sup> 2023.

### RESUMEN

México es el principal productor de tuna a nivel mundial con más de 250 mil toneladas al año. La tuna se comercializa en fresco, descartándose el pericarpio, que representa aproximadamente el 50 % del fruto. Aprovechamos el pericarpio de la tuna para extraer el mucílago. Este se mezcló con maltodextrina en 4 proporciones (P1, 50 %; P2, 33,3 %; P3, 25 % y P4, 20 %) y se usó para secar por aspersión jugo tuna (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*). Los polvos de jugo de tuna se caracterizaron por calorimetría diferencial de barrido, microscopía electrónica de barrido, microscopía de fuerza atómica, microscopía confocal de barrido láser, capacidad antioxidante, contenido de betalaina y color. La adición de mucílago disminuyó el rendimiento y la temperatura de transición vítrea; aumentó la humedad, la actividad del agua y la capacidad antioxidante de los polvos obtenidos por secado por aspersión. Sin embargo, P3 es un polvo con baja humedad y actividad de agua, superficie lisa, tamaño de partícula pequeño y color violeta intenso. Este polvo tiene potencial para ser aplicado en la industria alimentaria. Además, ofrece una alternativa a la comercialización del jugo de tuna.

**PALABRAS CLAVE:** Tuna, mucílago, secado por aspersión, polvo y pericarpio de tuna.

### \*Corresponding Author:

Rosalva Mora Escobedo, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. Avenida Wilfrido Massieu S/N Esq. Stampa, Col. Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero. C.P.07738, Ciudad de México, México. Teléfono: (555) 729 60 00 Ext. 57872. E-mail: [rosalmorae@gmail.com](mailto:rosalmorae@gmail.com)

---

## ABSTRACT

---

Mexico is the main producer of prickly pear worldwide with more than 250 thousand tons per year. The prickly pear is marketed fresh, discarding the pericarp, which represents approximately 50 % of the fruit. We take advantage of the pericarp of the prickly pear to extract the mucilage. This was mixed with maltodextrin in 4 proportions (P1, 50%; P2, 33.3 %; P3, 25 %, and P4, 20 %) and was used to spray dry prickly pear juice (*Opuntia robusta Wendl. var. robusta*). Prickly pear juice powders were characterized by differential scanning calorimetry, scanning electron microscopy, atomic force microscopy, laser scanning confocal microscopy, antioxidant capacity, betalain content, and color. The addition of mucilage decreased the yield and the glass transition temperature; increased the moisture, the water activity, and the antioxidant capacity of the powders obtained by spray drying. However, P3 is a powder with low moisture and water activity, smooth surface, small particle size, and deep violet color. This powder has the potential to be applied in the food industry. In addition, it offers an alternative to the marketing of tuna juice.

---

**KEY WORDS :** Prickly pear, mucilage, spray-dried, powder and prickly pear pericarp.

---

## Introducción

México es el primer productor de tuna a nivel mundial; en 2020 produjo más de doscientas cincuenta mil toneladas (SIAP, 2021). La importancia económica de este cultivo obliga a buscar alternativas para su comercialización. La tuna es un fruto de la especie perteneciente al género *Opuntia*. El fruto se compone de dos partes principales: la pulpa y el pericarpio. La pulpa es la porción comestible de la fruta y constituye del 60 % al 70 % del peso total de la fruta. Sus principales componentes son azúcar, fibra, mucílago y pectinas; las proteínas, los aminoácidos, las vitaminas y los minerales también están presentes en menor grado. También contiene antioxidantes como polifenoles y ácido ascórbico, así como pigmentos como carotenoides y betalainas (Daniloski, *et al.*, 2021).

El pericarpio de tuna (PP) representa alrededor del 50 % del peso total del fruto, predominando los polisacáridos no celulósicos (alrededor del 40 %). Los tejidos de PP están compuestos principalmente por células de parénquima y colénquima, así como por mucílago. El mucílago de PP de tuna (MPP) es un polisacárido complejo de alto peso molecular ( $2.3 \times 10^4$ – $3 \times 10^6$  g/mol) compuesto por L-arabinosa, D-galactosa, D-xilosa, ácido D-galacturónico y L-ramnosa (Habibi *et al.*, .2004).

EIPP es un desecho que puede constituir una fuente de polímeros funcionales y compuestos de valor agregado, particularmente carbohidratos (Gheribi *et al.*, 2019). Sin embargo, aprovechar tanto la pulpa como el pericarpio de la tuna es una oportunidad para la industria alimentaria.

El MPP es un hidrocoloide con capacidad de retener agua y crear coloides viscosos o gelatinosos; también forma parte de la fibra dietética (Habibi *et al.*, 2004). Estudios sobre el uso del mucílago de nopal han aplicado este hidrocoloide como espesante en néctares de frutas (Sepúlveda *et al.*, 2007) y películas comestibles para proteger frutos frescos y aumentar la vida útil de fresas almacenadas a 5 °C, encontrando que los frutos mantuvieron su textura, sabor y evitaron el deterioro durante nueve días de almacenamiento. Medina-Torres *et al.*, (2013) aplicaron secado por aspersión para encapsular ácido gálico, utilizando un extracto acuoso de MPP, que actuó como material de pared, mostrando el potencial de este carbohidrato.

En los últimos años, ha habido una tendencia creciente hacia el desarrollo de productos reformulados mediante secado por aspersión (Bhandari *et al.*, 2013). Esta técnica está bien establecida en la industria alimentaria para transformar líquidos que contienen sustancias bioactivas en sólidos estables (polvos) de alta calidad. Además, el secado por aspersión aumenta la estabilidad del producto y facilita su manipulación, almacenamiento y aplicación; esto depende de las condiciones de manejo, características de alimentación y diseño del secador (Shishir & Chen, 2017).

Para el secado por aspersión se requiere el uso de diferentes materiales conocidos como estabilizantes, adyuvantes, vehículos, materiales de pared o excipientes. Cuando se utiliza el secado por aspersión como método de encapsulación, estos materiales poliméricos tienen la función de proteger los compuestos encapsulados. Los materiales son principalmente poliméricos de alto peso molecular como las maltodextrinas, estos materiales permiten prevenir la pegajosidad que es una de las principales limitaciones del secado por aspersión de productos alimenticios con alto contenido de azúcar, como los jugos (Fazaeli *et al.*, 2012).

Algunos de los materiales utilizados en el secado por aspersión incluyen polisacáridos (almidones, maltodextrinas, jarabes de maíz y goma arábiga), lípidos (ácido esteárico y mono y diglicéridos) y proteínas (gelatina, caseína, suero, soya y trigo). La maltodextrina (MD) es un polisacárido de bajo contenido de azúcar que consta de unidades de D-glucosa unidas principalmente con enlaces  $\alpha$ -1,4 y se obtiene por hidrólisis ácida de varios almidones (maíz, papa u otros). Es altamente soluble en agua, tiene baja viscosidad y sabor suave y produce soluciones incoloras. Por ello, es muy utilizado en la industria alimentaria (Sáenz *et al.*, 2009) y microencapsulación.

Ya se ha probado el uso de mucílago de algunas variedades de *Opuntia* como agente encapsulante de betalaína de varias fuentes. Se ha reportado que el mucílago retiene más del 90 % de las betalaínas de los frutos de *Escontria chiotilla* y *Stenocereus queretaroensis* después de tres meses de almacenamiento (Soto-Castro *et al.*, 2019). También se reportó el potencial del mucílago de *Opuntia ficus-indica* en el proceso de secado por aspersión (León-Martínez *et al.*, 2010). Asimismo, existen estudios en los que se aprovecha la tuna para mejorar el contenido de antioxidantes (Gómez-Salazar *et al.*, 2022). Además, se probaron diferentes procesos de encapsulación para proteger los compuestos bioactivos en la pera (Fernández-Repetto *et al.*,

2023; Kurek *et al.*, 2021). Sin embargo, actualmente existen pocos datos experimentales que describan el uso del mucílago de tuna en el secado por aspersión (Otálora *et al.*, 2015; Soto Castro *et al.*, 2019).

Con el fin de aprovechar el pericarpio de la tuna como fuente de MPP y evaluar su potencial como coadyuvante en el secado por aspersión, utilizamos MPP en combinación con maltodextrina para secar el jugo con el objetivo de obtener productos de alto valor agregado y ofrecer una alternativa novedosa para el consumo y comercialización de la tuna (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*).

## Material y Métodos

La tuna (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*) se obtuvo en Santiago Tolman, municipio de Otumba, Estado de México, y se seleccionó según su grado de madurez. Los sólidos solubles ( $\geq 12$  °Bx) se midieron con un refractómetro digital (HI 96801, Hanna, Instruments, USA) con escala de 0-85 °Brix y resolución 0.1 °Brix según NMX-FF030SCFI-2006. El fruto se lavó y peló para la extracción de jugo y mucílago.

### Preparación del jugo de tuna

La extracción del jugo se realizó triturando las tunas sin pericarpio (PP) en un extractor de jugo, para obtener dos fracciones: jugo y pulpa con semillas. El jugo de tuna (PJ) se tamizó a través de mallas de 2 mm y 1 mm para eliminar pequeños trozos de pulpa, luego se midió (°Brix) utilizando un refractómetro digital.

### Extracción de mucílago del pericarpio de tuna (MPP)

El pericarpio de tuna se cortó en cubos de 1 cm<sup>3</sup> que se colocaron en un recipiente de acero inoxidable con agua en una proporción de 1:2 p/p (pp/agua). La mezcla se calentó a 80 °C durante 15 min (Medina-Torres *et al.*, 2013). Luego se filtró para recuperar el agua de cocción y eliminar los cubos del PP. El agua de cocción se concentró calentándola a 18–20 °Brix. El concentrado corresponde a MPP y se mezcló con cuatro proporciones de maltodextrina (MD) para encapsular PJ mediante secado por aspersión.

### Secado por aspersión de jugo de tuna con mucílago de tuna y maltodextrina

Se aplicó un diseño experimental de mezclas de dos componentes. El análisis de datos se realizó con Design-Expert® v7.0.11 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN). Se obtuvieron cuatro mezclas de mucílago de pericarpio de tuna/maltodextrina (MPP/MD) y control: P1 (50/50 %), P2 (33.3/66.6 %), P3 (25/75 %), P4 (20/80 %). y P0 como control (0/100 %). La mezcla alimentada al secador por aspersión tenía 16.6 °Brix con una proporción de 1:1 de material de pared (MPP/MD) y PJ. El proceso de secado por aspersión de PJ mezclado con MPP y maltodextrina se llevó a cabo en un secador de flujo con la misma dirección del flujo (Mobile Minor 2000, Gea Niro, Dinamarca). Se utilizó una boquilla neumática de dos fluidos a una presión de aspersión de

0.8 kg/cm<sup>2</sup> mientras que las temperaturas de entrada y salida del aire de secado fueron de 180 y 80 °C, respectivamente (Porrás-Saavedra *et al.*, 2015). Los polvos se mantuvieron en recipientes de plástico en la oscuridad a temperatura ambiente.

### **Rendimiento del producto (recuperación de polvo)**

El rendimiento de encapsulación (EY) se determinó como la relación porcentual entre la masa total del producto recuperado después del secado por aspersión y la masa del extracto alimentado al sistema en base seca (Tontul & Topuz, 2017).

### **Caracterización del jugo de tuna en polvo**

#### **Determinación del contenido de humedad y la actividad del agua**

La actividad de agua ( $a_w$ ) se midió en un medidor de actividad de agua (HBD5-MS2100WA, MAPISA, China) con compensación de temperatura y utilizando el método del punto de rocío hasta alcanzar el equilibrio. Se utilizó un gramo del producto en polvo a una temperatura de  $21 \pm 0.01$  °C. El contenido de humedad (g de agua/100 g de muestra) se evaluó por gravimetría. Se pesaron 3 g de muestra y se colocaron en estufa a 105 °C hasta peso constante.

#### **Determinación de la temperatura de transición vítrea (Tg)**

Las propiedades térmicas del polvo se determinaron en un calorímetro diferencial de barrido (Discovery, TA Instruments, EE. UU.) equipado con un sistema de enfriamiento del reactor (RCS). El equipo se calibró con indio (punto de fusión 156.4 °C, entalpía  $H = 6.8$  cal/g); el gas de purga utilizado fue nitrógeno seco. Se colocaron 3 mg de muestra (base seca) en bandejas de aluminio. El programa de calentamiento utilizado incluyó una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en un rango de temperatura de -50 a 150 °C (Zotarelli *et al.*, 2017). Los termogramas se analizaron en TRIOS v4.3.1.39215 (TA Instruments).

#### **Determinación del color**

El color del polvo de tuna se midió con un lector de color (CR10, Konica Minolta) siguiendo las instrucciones del fabricante. Se utilizó el sistema CIEL\*a\*b\*. El lector indicó los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Las determinaciones de cada muestra se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como media  $\pm$  SD de tres repeticiones.

El color se evaluó determinando el índice de color (CI) obtenido a partir de la ecuación. (1)

$$\text{Índice de color} = \frac{a^* 1000}{L^* B^*} \quad (1)$$

Donde  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son los parámetros del sistema de color CIELAB (Solórzano *et al.*, 2015).

## Pruebas de flujo de polvo

### Densidades aparentes y compactas

La densidad aparente es la relación entre la masa de la muestra en polvo sin compactar y su volumen, incluida la contribución del volumen del espacio entre las partículas. La densidad aparente se determinó en 2 g de polvo pesado colocado en una probeta graduada (10 mL). Se registró el volumen final y se calculó la densidad aparente dividiendo el peso de la muestra por el volumen (g/mL).

La densidad compactada se obtuvo utilizando la misma muestra de la evaluación de la densidad aparente sin sacarla de la probeta. La abertura de la probeta se cubrió antes de la prueba. La probeta se elevó a una altura de  $10 \pm 5$  cm y se golpeó 250 veces contra una superficie lisa y plana a una velocidad constante. El volumen obtenido ( $V_f$ ) se registró a la unidad más cercana en la escala del cilindro. La densidad de colada (g/mL) se calculó mediante la fórmula  $m/V_f$  donde  $V_f$  es el volumen final de la colada (Ortiz-Basurto *et al.*, 2017).

### Índice de compresibilidad de Carr y relación de Hausner

El índice de Carr y la relación de Hausner expresan la tendencia de un polvo a comprimirse; miden la capacidad de compactación del polvo y permiten evaluar la importancia relativa de las interacciones entre partículas. Estos índices se calcularon con las Ec. 2 y 3, respectivamente:

$$CI = \frac{100(V_o - V_f)}{V_o} \quad (2)$$

$$H_r = \frac{V_o}{V_f} \quad (3)$$

Donde CI es el índice de Carr,  $H_r$  es la relación de Hausner,  $V_o$  es el volumen aparente del polvo sin acentar (mL) y  $V_f$  es el volumen final acentado (mL).

### Ángulo de reposo

Se vertieron cinco gramos del polvo sobre una superficie horizontal desde una altura de 10 cm usando un embudo. Se midió el diámetro y la altura del cono formado (Bhandari *et al.*, 2013) para calcular el ángulo creado (Ec. 4):

$$AR = \arctan \frac{A}{r} \quad (4)$$

Donde AR es el ángulo de reposo, A es la altura del cono (cm) y r es el radio del cono (cm).

## **Caracterización por microscopía del polvo de jugo de tuna**

### **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La morfología de los polvos se evaluó a través de imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (JSM-5800LV, JEOL). Las muestras se colocaron en portaobjetos con cinta adhesiva. Las muestras se recubrieron por pulverización catódica con oro durante 10 min. Posteriormente, se obtuvieron imágenes a diferentes aumentos (1000x, 2500x y 5000x) con un voltaje constante de 15 kV (Porrás-Saavedra *et al.*, 2015).

### **Microscopía de fuerza atómica (AFM)**

Se utilizaron imágenes de microscopía de fuerza atómica (AFM) de las muestras para medir las propiedades topográficas de los polvos. Se utilizó un microscopio multimodo Di V Veeco. Se analizaron secciones de  $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}^2$  de cada muestra en contraste de fase en modo de golpeteo (contacto intermitente de punta a superficie) usando una sonda RTSP. Para obtener la rugosidad media aritmética (Ra) y la rugosidad cuadrática media (Rq) de las imágenes, se realizó el análisis de imágenes mediante el programa NanoScope Analysis 1.5 (Pereyra-Castro *et al.*, 2019).

### **Microscopía confocal de barrido láser**

Para determinar la distribución de PJ, MPP y maltodextrina en los polvos, se utilizó un microscopio de barrido láser confocal LSM 710 (Carl Zeiss, Alemania). Las imágenes de autofluorescencia de todas las muestras se obtuvieron de la siguiente manera: 405 nm al 4 %, 488 nm al 9 %, 561 nm al 2 % y 633 nm al 2 % de potencia; Aumento de 40x con un objetivo de inmersión en aceite (Porrás-Saavedra *et al.*, 2015).

### **Determinación de la capacidad antioxidante**

La capacidad antioxidante de los polvos de PJ secados por aspersion se determinó usando dos métodos diferentes y concentraciones de 2.5, 5 y 10 mg/mL.

### **Poder reductor de hierro**

Una mezcla que contenía la muestra (1 g), 2.5 mL de tampón fosfato y 2.5 mL de solución de ferricianuro de potasio al 1 % se incubó en una incubadora de uso general (ESCO) Isotherm® a 50 °C durante 20 min. Luego se agregaron 2.5 mL de ácido tricloroacético (10 %). Las muestras se centrifugaron a 8000 rpm durante 10 min. El sobrenadante (2.5 mL) se mezcló con 2.5 mL de agua destilada y 0.5 mL de solución de cloruro férrico al 0.1 %. La absorbancia se leyó a 700 nm (Vijayalakshmi & Ruckmani, 2016).

## Radical hidroxilo

El ensayo se realizó utilizando el radical hidroxilo (OH) producido a partir de la reacción de Fenton (Brands *et al.*, 2019). La reacción se produjo mezclando 1 mL de 1,10-fenatrolina, 2 mL de tampón fosfato (pH 7.4), 1 mL de FeSO<sub>4</sub> (3 mM), 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0.12 %) y 1 mL de muestras (2.5, 5 y 10 mg/mL), cada una de ellas disuelta en agua destilada. La mezcla se incubó a 37 °C durante 90 min y se leyó la absorbancia a 536 nm.

## Cuantificación de betalaínas y betaxantinas

Se pesó 1 g de muestra y se dispersó en 10 mL de agua destilada. La suspensión se agitó en vortex durante 1 min y luego se filtró a través de una malla de 0.45 µm, según el método propuesto por Coria-Cayupán *et al.* (2011). El contenido de betalaína y betaxantina se midió en un espectrofotómetro (6705 UV/visible, Jenway, Staffordshire, Reino Unido) a 536 y 480 nm, respectivamente, siguiendo el método de Stintzing *et al.* (2005). Los extractos se diluyeron con agua destilada hasta obtener valores de absorbancia de 0.9 < A < 1.0 para considerar el valor máximo. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. El contenido de pigmento (mg/L) se determinó de acuerdo con la ecuación. (5):

$$\text{Contenido de pigmentos } mg / L \text{ pigment} = \frac{A * FD * MW * 1000}{e * L} \quad (5)$$

Donde A es la absorbancia, L es la longitud de la celda (1 cm), FD es el factor de dilución, MW es el peso molecular (betalaína 550 g/mol y betaxantina 308 g/mol) y e es el coeficiente de extinción molar para betalaínas de 60000 L/ (mol cm) y betaxantina 48000 L/(mol cm).

## Determinación de la higroscopicidad

La higroscopicidad de los encapsulados de PJ se determinó según el método propuesto por Zotarelli *et al.*, (2017). Se pesó el polvo (1 g) y se colocó en un recipiente hermético a 25 °C; se añadió una solución saturada de NaCl para crear una atmósfera de 75 % de humedad relativa. Siete días después se pesaron las muestras y se determinó la higroscopicidad; se expresó en g de agua adsorbida/100 g de sólido seco.

## Análisis estadístico

Los datos se registraron como el valor promedio de tres repeticiones ± SD. Se analizaron en Sigma Plot mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey (α = 0.05).



## Resultados y discusión

### **Rendimiento del producto (recuperación del polvo), contenido de humedad, actividad del agua y temperatura de transición vítrea de polvos de tuna secados por aspersión.**

El mayor rendimiento de producto (PY) fue P0 (Tabla 1), con un valor de 78.2 %. Can-Karaca *et al.* (2016) reportaron que la MD como material de pared en jugo de cereza secado por aspersión permitió un PY de 23-92 % dependiendo de las condiciones de operación. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad de la cáscara de tuna como fuente de mucílago para poder utilizarla en el secado por aspersión de jugo de tuna. Por lo tanto, las condiciones de secado fueron constantes y se varió la proporción de mucílago en el secado. A medida que la cantidad de MPP aumentó hasta un 50 % como material de pared en el encapsulado (P1), el PY se redujo al 43.22 %. Las muestras P0, P2, P3 y P4 alcanzaron más del 50 % de polvo recuperado mostrando una buena recuperación según lo establecido por Tontul & Topuz (2017). Por lo tanto, los polvos 3 y 4 que contienen MPP muestran un rendimiento de polvo de recuperación similar siendo una buena opción para el secado por aspersión PJ.

El contenido de humedad y  $a_w$  aumentan a medida que incrementa la relación MPP en la muestra (Tabla 1). La muestra P1 con 50 % de MPP tuvo el mayor contenido de humedad (3.14 %) y actividad de agua (0.34). La capacidad de absorción de agua del MPP podría ser responsable de la tendencia al incremento del %H del aumento en % de humedad (% H) y  $a_w$ . Sin embargo, las muestras P0, P2, P3 y P4 presentaron % H por debajo del 5 % y una  $a_w < 0.30$ . Estos polvos se consideran microbiológicamente seguros y se pueden almacenar durante largos períodos de tiempo, lo que brinda a los productores otra opción para comercializar PJ.

Los valores de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se presentan en la Tabla 1. Estos valores se encuentran dentro del intervalo reportado para el secado por aspersión de otros jugos como el mango ( $T_g$  de 32.4 °C) utilizando MD (10DE) como material de pared (Zotarelli *et al.*, 2017). El contenido de MPP afectó la  $T_g$ . A medida que aumenta el contenido de MMP, la  $T_g$  disminuye debido a la presencia de algunos azúcares como glucosa, fructosa y ácidos orgánicos que tienen valores bajos de  $T_g$  (Roos & Karel, 1991). La  $T_g$  aumenta junto con la densidad de entrecruzamiento. MPP y MD son diferentes tipos de polisacáridos; sus estructuras pueden crear interacciones como dipolo-dipolo y puentes de hidrógeno con moléculas como betalainas y agua, afectando a la  $T_g$  (Otálora *et al.*, 2015).

La Tabla 1 muestra que el polvo P1 tuvo la  $T_g$  más baja ( $8.98 \pm 0.43$  °C). A medida que disminuyó el contenido de MPP, la  $T_g$  aumentó y alcanzó su valor más alto (35.75 °C) en P0. Yousef *et al.*, (2011) reportaron que valores de  $T_g > 40$  °C indican un polvo estable durante el almacenamiento y transporte. Según sus hallazgos, una  $T_g$  baja indica un polvo con alta higroscopicidad, haciéndolo más pegajoso (Yousefi *et al.*, 2011).

## Color de polvos secados por aspersión de jugo de tuna

Se midió el color y se calculó el IC a partir de los parámetros  $L^*a^*b^*$  de los polvos. En la Tabla 1 se muestran los valores de IC obtenidos. Los valores van de  $-75$  a  $-57$ . Según Vignoni *et al.* (2006), un IC de  $-40$  está relacionado con colores desde el azul hasta el violeta intenso. La reducción en el CI de los polvos se debe a una disminución en la proporción del MPP añadida para el secado por aspersión. MPP contiene pigmentos que se encuentran en menor proporción cuando se reduce la cantidad de MPP en la formulación. El ANOVA de CI correspondiente a las muestras secas del PJ usando MPP y MD como material pared, mostró una diferencia significativa entre ellas, excepto para P4 (20 % MPP) y P0 (sin MPP). Esto demostró que agregar 20 % de MPP como material de pared no es suficiente para modificar el IC de polvo de PJ y obtener una diferencia significativa. Otálora *et al.*, (2015) midieron el color del extracto de betalaínas en polvo secado por aspersión. Obtuvieron valores de  $L^*$  66.46,  $a^*$  29.99 y  $b^*$   $-4.84$ . Usando estos datos, encontraron que el IC era  $-93.23$ , que es más alto que el polvo PJ usando MPP y MD como material pared. En este estudio se utilizó todo el PJ, por lo que el contenido de betalaína se vio afectado por los componentes del jugo.

**Tabla 1. Efecto del MPP sobre el rendimiento del producto, humedad,  $a_w$ , Tg y color de PJ secado por aspersión**

	P1	P2	P3	P4	P0
Rendimiento del producto (%)	43.22	52.94	67.80	68.94	78.20
Humedad (%)	3.14 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	2.50 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	2.96 $\pm$ 0.36 <sup>b</sup>	2.46 $\pm$ 0.32 <sup>a</sup>	2.12 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>
Actividad de agua ( $a_w$ )	0.34 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.26 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.24 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.24 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.26 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>
Tg (°C)	28.98 $\pm$ 0.43 <sup>b</sup>	30.09 $\pm$ 0.79 <sup>c</sup>	31.46 $\pm$ 0.79 <sup>d</sup>	32.07 $\pm$ 0.5 <sup>e</sup>	35.57 $\pm$ 0.66 <sup>a</sup>
$L^*$	52.25 $\pm$ 0.2 <sup>b</sup>	56.78 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>	54.4 $\pm$ 0.16 <sup>d</sup>	57.48 $\pm$ 0.3 <sup>e</sup>	61.45 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>
$a^*$	+35.73 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	+34.0 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>	+33.43 $\pm$ 0.19 <sup>d</sup>	+34.03 $\pm$ 0.2 <sup>e</sup>	+31.8 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>
$b^*$	-9.2 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	-9.65 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	-9.93 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	-9.95 $\pm$ 0.11 <sup>e</sup>	-8.85 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>
Índice de color (IC)	-75.77 <sup>d</sup>	-63.32 <sup>c</sup>	-61.35 <sup>b</sup>	-58.86 <sup>a</sup>	-57.85 <sup>a</sup>

P1 polvo (jugo de tuna/mucílago-maltodextrina en proporción 1:1 v/v); P2 polvo (jugo de tuna/mucílago-maltodextrina en proporción 1:2); P3 polvo (jugo de tuna/mucílago-maltodextrina en proporción 1:3); P4 polvo (jugo de tuna/mucílago-maltodextrina 1:4) y P0 (jugo de tuna/maltodextrina).

## Propiedades de flujo del polvo de jugo de tuna

La Tabla 2 muestra las propiedades de flujo de los polvos. El rango de densidad aparente fue de 0.27 a 0.39 g/mL. La adición del MPP al 25 % permitió obtener la mayor densidad aparente y no mostró diferencia significativa vs P0. Shishir & Chen, (2017) informaron que la densidad aparente depende del tamaño, la forma y las propiedades de la superficie de las partículas. Los polvos con las superficies lisas y uniformes tienen una mayor densidad aparente (Figura 1), por lo que el volumen de envasado de la misma cantidad será menor. En general, la densidad aparente aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas cuando más partículas ocupan un volumen determinado. Esto permite que haya menor espacio entre las partículas, lo cual es deseable para reducir los costos de empaque y envío (Tontul & Topuz, 2017).

## Índice de compresibilidad de Carr y relación de Hausner

El índice de Carr se encontró en un rango de 41.09 a 43.76 y Hr de 1.7 a 1.78 para los cinco polvos de PJ secados por aspersión utilizando MPP y MD (Tabla 2). Los resultados muestran que los polvos tienen baja fluidez y son altamente cohesivos. Una variación en la concentración de MPP no afecta significativamente estas proporciones en comparación con solo MD (P0).

## Análisis microestructural del jugo de tuna en polvo

La Tabla 2 también muestra el tamaño (diámetro) del PJ secado por aspersión. El diámetro se encontró en un rango de 3.57 a 8.26  $\mu\text{m}$ ; el área osciló entre 0.1 y 0.26  $\mu\text{m}^2$ . El polvo de menor tamaño fue P0 (solo MD). La adición de MPP aumentó el tamaño.

Medina-Torres *et al.* (2013) reportaron que el uso de MPP en el secado por aspersión genera interacciones entre el MPP y los compuestos encapsulados. Esto es favorable porque reduce el tamaño de los agregados. Además, la encapsulación con MPP como material de pared es interesante ya que la composición química de la sustancia presenta algunos residuos ácidos que le confieren un comportamiento polielectrolítico.

A partir de los resultados mostrados en las Tablas 1 y 2 se seleccionó el polvo P3 para la caracterización por microscopía. El polvo P3 contiene 25 % de MPP con las mejores propiedades tecnofuncionales y superficiales respecto al polvo secado sólo con maltodextrina como material pared.

**Tabla 2. Efecto del MPP en las propiedades de flujo de PJ secado por aspersión.**

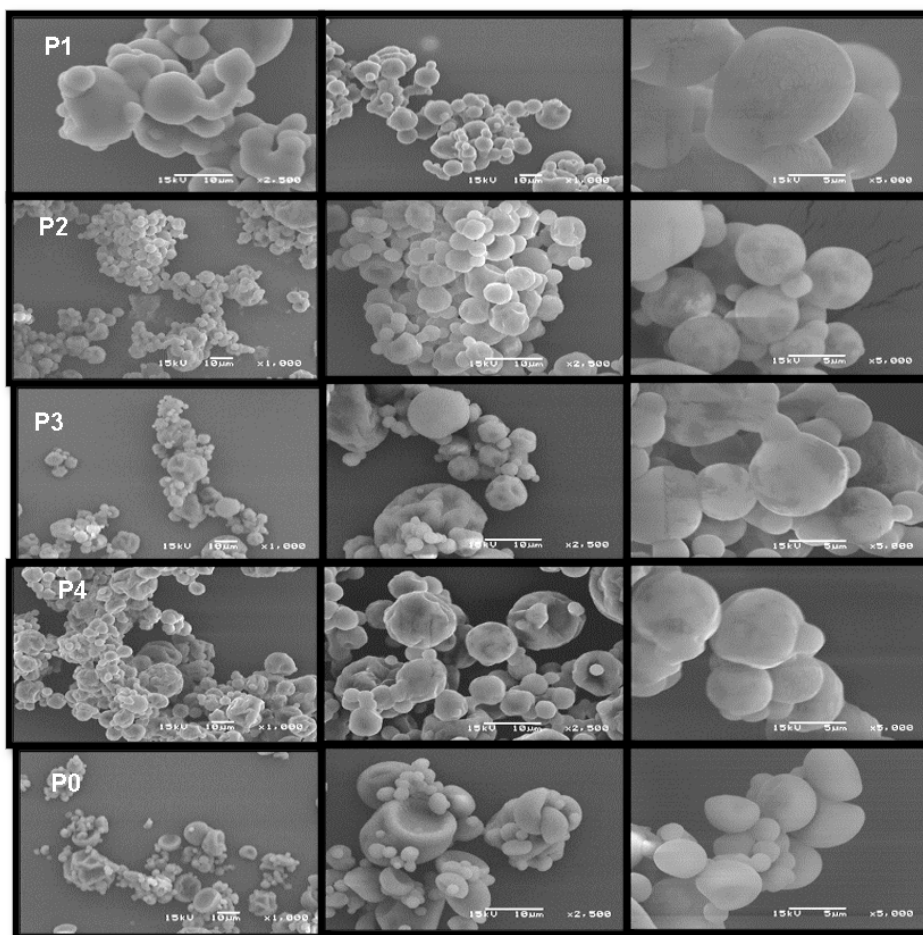
Prueba de flujo de potencia	P1	P2	P3	P4	P0
Densidad aparente (g/mL)	0.27 ±0.04 <sup>b</sup>	0.32 ±0.02 <sup>a</sup>	0.39 ±0.02 <sup>a</sup>	0.29 ±0.08 <sup>a</sup>	0.36 ±0.02 <sup>a</sup>
Densidad compacta (g/mL)	0.48 ±0.07 <sup>b</sup>	0.57 ±0.02 <sup>a</sup>	0.72 ±0.08 <sup>a</sup>	0.50 ±0.2 <sup>c</sup>	0.64 ±0.03 <sup>a</sup>
Ángulo de reposo (AR)	40.4	40.5	41.4	41.4	37.3
Índice de Carr (Carr I)	43.76 ±1.41	43.70 ± 3.9	43.54 ± 2.8	41.09 ± 1.4	43.03 ± 3.2
Índice de Hausner (IH)	1.78 ± 0.04	1.78 ± 0.13	1.78 ± 0.11	1.70 ± 0.05	1.76 ± 0.1
Área (µm <sup>2</sup> )	0.247 <sup>e</sup>	0.262 <sup>a</sup>	0.143 <sup>c</sup>	0.168 <sup>d</sup>	0.100 <sup>b</sup>
Diámetro (µm)	8.26 <sup>e</sup>	7.11 <sup>a</sup>	4.89 <sup>c</sup>	5.58 <sup>d</sup>	3.57 <sup>b</sup>
Ra nm	2.01 ± 1.07 <sup>b</sup> -	17.60±6.80 <sup>a</sup>	4.90 ± 3.12 <sup>c</sup>	16.35±6.77 <sup>a</sup>	10.64 ± 5.87 <sup>a</sup>
Rq nanómetro	2.87 ± 1.71 <sup>b</sup>	23.53±9.54 <sup>a</sup>	6.71 ± 4.00 <sup>c</sup> -	21.23±8.56 <sup>a</sup>	14.30±7.24 <sup>a</sup>

P1 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:1 v/v); P2 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:2); P3 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:3); P4 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina 1:4) y P0 (jugo de tuna/ maltodextrina).

### Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Figura 1 compara imágenes de polvos de PJ con MPP y MD como material pared. Las partículas muestran aglomeración con diferentes tamaños en forma redondeada con una superficie lisa, también se observan partículas grandes escindidas. La formación de superficies irregulares en las partículas obtenidas a través de secado por aspersión se atribuye a la contracción de las partículas debido a la temperatura de entrada durante el proceso de secado (Medina-Torres *et al.*, 2013).

El contenido de MPP no influyó en la morfología de los polvos P2, P3, y P4. El polvo P1 exhibió partículas fusionadas que mantuvieron una forma redonda. Otálora *et al.*, (2015) reportaron que la morfología esférica de las partículas es una característica favorable en los polvos obtenidos dada la alta tensión superficial de las cadenas moleculares en los mucílago de *Opuntia* después de la deshidratación. Esto demuestra su potencial fisicoquímico como material para el secado por aspersión de matrices alimentarias con pigmentos y moléculas bioactivas como el PJ.



**Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de polvos secados por aspersion de jugo de tuna.**

P1 polvo (jugu de tuna/mucilago-maltodextrina en proporcion 1:1 v/v); P2 polvo (jugu de tuna/mucilago-maltodextrina en proporcion 1:2); P3 polvo (jugu de tuna/mucilago-maltodextrina en proporcion 1:3); P4 polvo (jugu de tuna/mucilago-maltodextrina 1:4) y P0 (jugu de tuna/ maltodextrina).

## Microscopía de fuerza atómica (AFM)

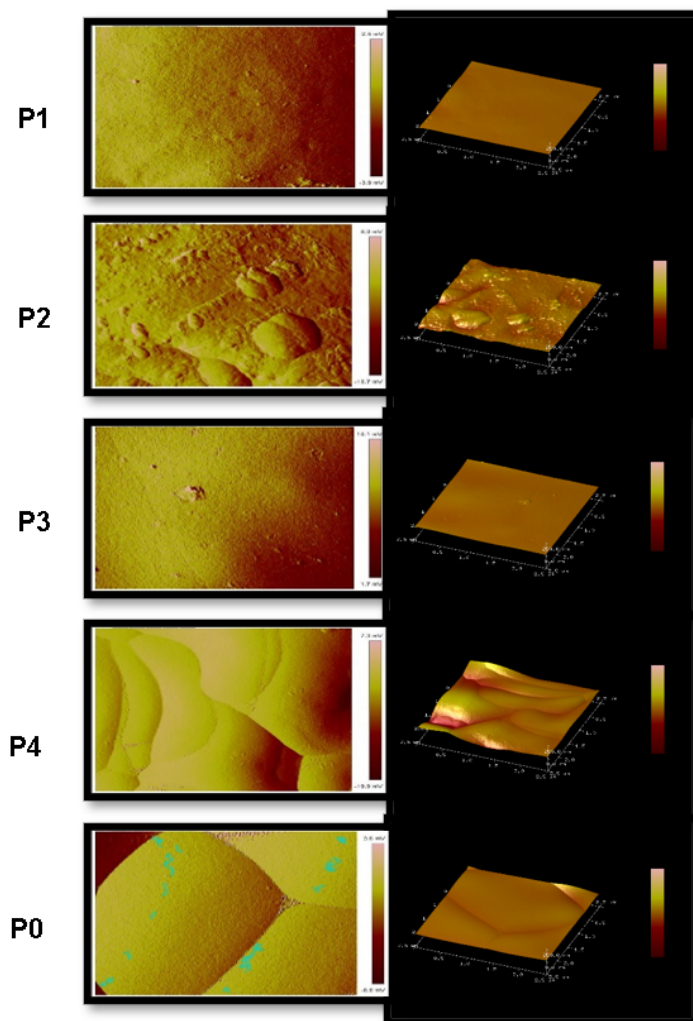
La Tabla 2 también muestra el análisis de las imágenes obtenidas por AFM. La rugosidad media aritmética (Ra), es la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas del perfil de rugosidad ordenadas relacionadas con la línea media dentro de la longitud de medición y la raíz cuadrada media de la rugosidad (Rq) del polvo PJ con MPP y MD. Los valores de Ra oscilaron entre 2.01 y 17.6; P1 presentó la menor rugosidad y P2 la mayor, no se observó tendencia con respecto a los valores y contenido de MPP agregado. El análisis de varianza reveló que no existe diferencia significativa entre P2, P4 y P0, que tienen los Ra y Rq más altos, lo que indica que tienen partículas más rugosas.

La Figura 2 muestra imágenes topográficas en 3D y 2D de polvo de PJ secado por aspersión utilizando MPP y MD en un área de 2.5  $\mu\text{m}$ . Acosta-Domínguez *et al.*, (2016) reportaron que los microencapsulados con una superficie homogénea y nanocavidades < 15 nm tienen superficies lisas. Esto aumenta la energía en la superficie, lo que conduce a una mayor capacidad de absorción y una distribución más uniforme del agua y el calor. Actúan como una barrera física que reduce la movilidad de las moléculas de agua, lo que podría restringir el desarrollo de reacciones químicas y evitar el deterioro de ciertos componentes de los alimentos (Acosta-Domínguez *et al.*, 2016).

Las nanocavidades de P2 y P4 midieron más de 15 nm y, por lo tanto, no se consideraron para determinaciones posteriores. En cambio, los de P1, P3 y P0 midieron por debajo de 15 nm. Se seleccionó P3 para su posterior caracterización debido a que contiene MPP, lo que permitió obtener partículas con las mejores características superficiales y propiedades tecnofuncionales en comparación con P0.

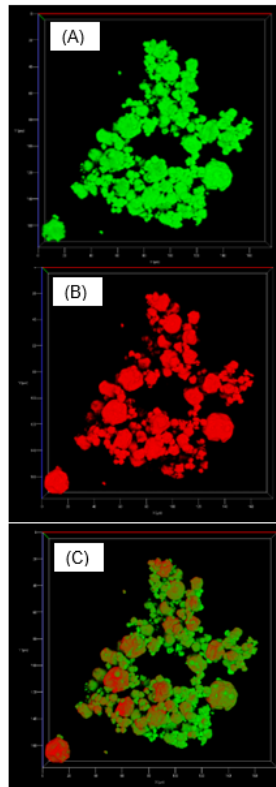
## Microscopía confocal de barrido láser

Se obtuvieron imágenes de microscopía confocal de barrido láser (SLCM) de PJ secado por aspersión con MPP y MD en una relación v/v de 1:3 (P3). Los escaneos de excitación de las moléculas de polvo a longitudes de onda entre 450 y 700 nm y los picos de emisión revelaron que MPP, MD y PJ presentan autofluorescencia.



**Figura 2. Imágenes de microscopía de fuerza atómica de los polvos secados por aspersión de jugo de tuna.**

P1 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:1 v/v); P2 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:2); P3 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina en proporción 1:3); P4 polvo (jugo de tuna/mucílago- maltodextrina 1:4) y P0 polvo (jugo de tuna/ maltodextrina).



**Figura 3. Imágenes 3D SLCM del polvo P3. (A) Mucílago de pericarpio de tuna y maltodextrina; (B) Jugo de tuna; (C) Superposición de imágenes (A) y (B).**

La Figura 3 muestra las imágenes 3D SLCM del polvo P3. La imagen A) corresponde a la fluorescencia del mucílago de pericarpio de tuna (MPP) y maltodextrina (MD) en verde, B) la fluorescencia del jugo de tuna (PJ) en rojo y C) son las imágenes superpuestas de los dos componentes. En la Imagen C, hay algunas áreas rojas en la superficie de algunas partículas, principalmente las más grandes, pero no en la superficie de las partículas más pequeñas. Estas imágenes muestran el potencial de MPP en combinación con maltodextrina no solo para el secado del jugo sino también para procesos de encapsulación y protección de los compuestos bioactivos del jugo. Las partículas más pequeñas exhiben un color verde uniforme, correspondiente al MPP, lo que demuestra que el PJ está totalmente encapsulado.

El uso de MPP como material de pared en combinación con maltodextrina para el secado por aspersión del jugo, permitió obtener encapsulados de color violeta intenso, baja humedad y aw, superficie lisa, tamaño de partícula pequeño y una encapsulación total del jugo como se muestra por las diferentes microscopías realizadas, lo que favorece su estabilidad y posible uso como aditivo en la industria alimentaria.



### Capacidad antioxidante, contenido en betalaínas y betaxantinas

La Tabla 3 muestra que P3 presentó una capacidad antioxidante de 9.03 mM Trolox/L, más del doble que P0 (4.23 mM Trolox/L) determinada por el ensayo de poder reductor. Según el ensayo de radicales OH, la inhibición de P3 es un 38 % mayor que la de P0.

**Tabla 3. Capacidad antioxidante, contenido de betalaínas y betaxantinas del PJ secado por aspersión**

Prueba	P3	P0
Poder reductor (mM Trolox /L)	9.03 ± 0.20	4.23 ± 0.17
Radical OH (% de inhibición)	79.68	49.17
Betalaínas (mg/kg SS)	957.33 ± 1.91	808.77 ± 1.82
Betaxantinas (mg/kg SS)	405.69 ± 2.58	342.57 ± 2.65
Total de betalaínas (mg/kg SS)	1363.03	1151.35

P3 polvo de jugo de tuna (mucílago-maltodextrina en proporción 1:3 v/v); P0: P0 polvo jugo de tuna (maltodextrina).

Stintzing *et al.*, (2005) determinaron la capacidad antioxidante de diferentes jugos de tunas en equivalentes de Trolox. La capacidad antioxidante del jugo de tuna morada fue de  $4.99 \pm 0.37$  mM Trolox/L, ligeramente superior a la del P0. Por lo tanto, el valor de capacidad antioxidante obtenido en P3 fue 44.7% superior al informado por Stintzing *et al.* (2005). Esto demuestra que el MPP promueve un aumento en la capacidad antioxidante del polvo. Amaya-Cruz *et al.* (2019) evaluaron el perfil de compuestos bioactivos en pericarpio de tuna roja. Identificaron 145 compuestos: 68 polifenoles extraíbles, 15 polifenoles hidrolizables, 41 betalaínas, 16 carotenoides y 5 fitoesteroles. Sugieren que el MPP se puede utilizar como ingrediente para desarrollar o mejorar los alimentos funcionales.

La tuna morada contiene betalaínas, que se clasifican según su estructura en betacianinas, responsables del color rojo-morado, y betaxantinas, que aportan el color amarillo-naranja. El contenido total de betalaínas en P3 y P0 se muestra en la Tabla 3. El contenido de betalaínas, betacianinas y betaxantinas es mayor en el MPP que en el PJ con 13.7 %, 19.45 % y 6.69 %, respectivamente. El contenido de betacianinas es aproximadamente tres veces

mayor que el de las betaxantinas. García-Cayuela *et al.* (2019) determinaron betalaínas totales (2400.0 mg/kg SS), betacianinas (1670.0 mg/kg SS) y betaxantinas (730 mg/kg SS) en jugo de tuna morada (bola roja). El contenido total de betalaínas en el pericarpio de la tuna mexicana morada fue de 1920.0 mg/kg SS; el de las betacianinas fue de 1350.0 mg/kg SS mientras que el de las betaxantinas alcanzó los 570.0 mg/kg SS. Al comparar estos datos con los obtenidos en este estudio, el contenido total de betalaínas en MPP fue mayor en la tuna O. robusta en un 19.19 % en comparación con la tuna bola roja y en PJ fue menor en un 17.71 %. Esto puede deberse a que el contenido de betalaínas en la tuna depende de la especie, el cultivo y la región geográfica (Castellanos-Santiago & Yahia, 2008).

Los mucílagos de origen vegetal se han utilizado como estabilizadores, emulsionantes, agentes espesantes o gelificantes, modificadores de la viscosidad, agentes encapsulantes y materiales de envasado de alimentos. En estos estudios, se ha informado que los mucílagos tienen potencial para extender la vida útil de los productos alimenticios (Cakmak *et al.*, 2023). La adición de MPP en este estudio aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ) la capacidad antioxidante del producto. El polvo P3 tuvo mayor contenido de betalaínas, betacianinas y betaxantinas en comparación con P0, siendo 15.53 %, 18.36 % y 15.55 %, respectivamente. El proceso de secado por aspersión reduce el contenido de estos compuestos bioactivos. Sin embargo, P3 exhibió la mayor capacidad antioxidante en comparación con P0. La reducción de betalaínas observada en P3 y P0 se atribuyó principalmente al proceso de secado. La retención total de betalaínas para MPP y PJ fue de 59.56 % y 69.02 %. El contenido de betacianina se conservó. Aunque los pigmentos disminuyeron debido al proceso de secado por aspersión, el polvo retuvo un color púrpura al igual que MPP y PJ.

El MPP en el secado por aspersión del jugo permitió obtener un producto con buenas propiedades tecnofuncionales y mayor actividad antioxidante en comparación con el uso solo de MD.

### Higroscopicidad

La higroscopicidad del polvo P3 fue de  $20.6 \pm 0.37$  g/100 g y  $19.8 \pm 0.12$  g/100 g en P0 con diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre ellos. La higroscopicidad del polvo generalmente está relacionada con su composición y el tamaño de partícula del polvo (O'Donoghue *et al.*, 2019). Los valores de higroscopicidad obtenidos en este estudio son inferiores a los informados por Zotarelli *et al.*, (2017) para polvo de pulpa de mango secado por aspersión usando MD. Los autores obtuvieron un valor de 23.9 g/100 g, esta diferencia entre PJ en polvo y mango probablemente se deba al tamaño de las partículas y al contenido de azúcar (14-15 °Brix) de los jugos. Tontul & Topuz (2017) demostraron que los polvos con menos del 20 % de higroscopicidad se clasifican como no higroscópicos. P0 (solo MD) no es higroscópico, pero P3 (MPP y MD) es higroscópico, ya que mostró un valor marginalmente superior al 20 %. Sin embargo, para modificar el tamaño de partícula y disminuir la higroscopicidad se pueden cambiar las condiciones de secado del PJ con MPP y MD.

## Conclusiones

Se estudió el potencial del mucílago de pericarpio de tuna para el proceso de secado por aspersión del jugo. El pericarpio de la tuna morada (*Opuntia robusta*) es un residuo agroindustrial y puede ser utilizado como fuente de mucílago. La adición de mucílago disminuyó el rendimiento y la temperatura de transición vítrea; aumentó la humedad y la actividad del agua de los polvos obtenidos por secado por aspersión. La adición de un 25 % de mucílago permite obtener un polvo con baja humedad y actividad de agua, superficie lisa y tamaño de partícula pequeño con un color violeta intenso, siendo P3, el polvo que presentó mejores características. Este polvo tiene potencial para ser aplicado en la industria alimentaria. Además, ofrece una alternativa a la comercialización del jugo de tuna. El mucílago también aumentó la actividad antioxidante del polvo de jugo de tuna secado por aspersión únicamente con maltodextrina.

Para futuras investigaciones se sugiere evaluar las condiciones de secado para mejorar el rendimiento y reducir la higroscopicidad del polvo. Estos hallazgos promueven el uso del pericarpio de tuna como fuente de mucílago para el secado por aspersión de jugo de tuna, ofreciendo una alternativa para la comercialización y aprovechamiento integral de la tuna.

## Declaraciones

Los conjuntos de datos utilizados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles bajo solicitud razonable del autor de correspondencia.

## Conflictos de interés

Sin conflictos de interés

## Referencias

- Acosta-Domínguez, L., Hernández-Sánchez, H., Gutiérrez-López, G. F., Alamilla-Beltrán, L., & Azuara, E. (2016). Modification of the soy protein isolate surface at nanometric scale and its effect on physicochemical properties. *Journal of Food Engineering*, 168, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.031>
- Amaya-Cruz, D. M., Pérez-Ramírez, I. F., Delgado-García, J., Mondragón-Jacobo, C., Dector-Espinoza, A., & Reynoso-Camacho, R. (2019). An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*, 278, 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.031>
- Bhandari, B., Nidhi, B., Zhang, M., & schuck, P. (2013). Handbook of Food Powders: Processes and Properties. Google Libros. Woodhead Publishing. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BAJEAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=>

- [PP1&dq=food+powders&ots=oM6bYi1xL2&sig=7W0tGcnSRQq9sXM6c21Kn9UvKA#v=onepage&q=foodpowders&f=false](#)
- Brands, S., Schein, P., Castro-Ochoa, K. F., & Galinski, E. A. (2019). Hydroxyl radical scavenging of the compatible solute ectoine generates two N-acetimides. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 674, 108097. <https://doi.org/10.1016/J.ABB.2019.108097>
- Cakmak, H., Ilyasoglu-Buyukkestelli, H., Sogut, E., Ozyurt, V. H., Gumus-Bonacina, C. E., & Simsek, S. (2023). A review on recent advances of plant mucilages and their applications in food industry: Extraction, functional properties and health benefits. *Food Hydrocolloids for Health*, 3, 100131. <https://doi.org/10.1016/J.FHFH.2023.100131>
- Can Karaca, A., Guzel, O., & Ak, M. M. (2016). Effects of processing conditions and formulation on spray drying of sour cherry juice concentrate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(2), 449–455. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7110>
- Castellanos-Santiago, E., & Yahia, E. M. (2008). Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5758–5764. <https://doi.org/10.1021/jf800362t>
- Coria-Cayupán, Y. S., Ochoa, M. J., & Nazareno, M. A. (2011). Health-promoting substances and antioxidant properties of *Opuntia* sp. fruits. Changes in bioactive-compound contents during ripening process. *Food Chemistry*, 126(2), 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.033>
- Daniloski, D., D’Cunha, N.M., Speer, H., McKune, A.J., Alexopoulos, N., Panagiotakos., D.B., Petkoska, A.T., Naumovski, N.. (2022). Recent developments on *Opuntia spp.*, their bioactive composition, nutritional values, and health effects. *Food Bioscience*, 47 101665. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.101665>
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi-Ashtari, A., & Omid, M. (2012). Effect of process conditions and carrier concentration for improving drying yield and other quality attributes of spray dried black mulberry (*Morus nigra*) juice. *International Journal Food Engineering*. 8(1), 1–20. <https://doi.org/10.1515/1556-3758.2023>
- Fernández-Repetto, A., Gómez-Maqueo, A., García-Cayuela, T., Guajardo-Flores, D., & Cano, M. P. (2023). Analysis of hydrocolloid excipients for controlled delivery of high-value microencapsulated prickly pear extracts. *Food Hydrocolloids for Health*, 3. <https://doi.org/10.1016/J.FHFH.2023.100115>
- García-Cayuela, T., Gómez-Maqueo, A., Guajardo, D., Welti-Chanes, J.J., & Cano., P. (2019). Characterization and quantification of individual betalain and phenolic compounds in Mexican an Spanish prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) tissues. A comparative study. *Journal of Foods Composition and Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.11.002>
- Gheribi, R., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2019). Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 238–245. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.12.228>
- Gómez-Salazar, J.A., Patlán-González, J., Sosa-Morales, M.E., Segovia-Hernandez, J. G., Sánchez-Ramírez, E., & Ramírez-Márquez, C. (2022). Multi-objective optimization of sustainable red prickly pear (*Opuntia streptacantha*) peel drying and biocompounds extraction using a hybrid stochastic algorithm. *Food and Bioproducts Processing*, 132, 155–

166. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2022.01.003>
- Habibi, Y., Mahrouz, M., Marais, M. F., & Vignon, M. R. (2004). An arabinogalactan from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate Research*, 339(6), 1201–1205. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.02.004>
- Kurek, M., Benbettaieb, N., Ščetar, M., Chaudy, E., Elez-Garofulić, I., Repajić, M., Klepac, D., Valić, S., Debeaufort, F., & Galić, K. (2021). Novel functional chitosan and pectin bio-based packaging films with encapsulated *Opuntia-ficus indica* waste. *Food Bioscience*, 41, 100980. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.100980>
- León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 864–870. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2010.03.061>
- Medina-Torres, L., García-Cruz, E. E., Calderas, F., González Laredo, R. F., Sánchez-Olivares, G., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *LW-Food Science and Technology*, 50(2), 642–650. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2012.07.038>
- O'Donoghue, L.T., Haque, M.K., Kennedy, D., Laffir, F.R., Hogan, S. A. & James A. (2019). Influence of particle size on the physicochemical properties and stickiness of dairy powders. *International Dairy Journal*, 98:54–63. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.07.002>
- Ortiz-Basurto, R. I., Rubio-Ibarra, M. E., Ragazzo-Sanchez, J. A., Beristain, C. I., & Jiménez-Fernández, M. (2017). Microencapsulation of *Eugenia uniflora* L. juice by spray drying using fructans with different degrees of polymerisation. *Carbohydrate Polymers*, 175, 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.030>
- Otálora, M. C., Carriazo, J. G., Iturriaga, L., Nazareno, M. A., & Osorio, C. (2015). Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (*Opuntia ficus-indica*) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. *Food Chemistry*, 187, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.090>
- Pereyra-Castro, S. C., Pérez-Pérez, V., Hernández-Sánchez, H., Jiménez-Aparicio, A., Gutiérrez-López, G. F., & Alamilla-Beltrán, L. (2019). Effect of composition and homogenization pressure of chia oil emulsions elaborated by microfluidization. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 18(1), 69–81. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/Pereyra>
- Porras-Saavedra, J., Palacios-González, E., Lartundo-Rojas, L., Garibay-Febles, V., Yáñez-Fernández, J., Hernández-Sánchez, H., Gutiérrez-López, G., & Alamilla-Beltrán, L. (2015). Microstructural properties and distribution of components in microparticles obtained by spray-drying. *Journal of Food Engineering*, 152, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.014>
- Roos, Y., & Karel, M. (1991). Water and molecular weight effects on glass transitions in amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. *Journal of Food Science*, 56(6), 1676–1681. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb08669.x>
- Sáenz, C., Tapia, S., Chávez, J., & Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616–622. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.095>
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization

- of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001>
- Shishir, M. R. I. & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science and Technology* 65, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Servicio. de información agroalimentaria y pesquera [SIAP]. (2021). [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- Solórzano, A. C., Martín, A., Salazar, S. M., Sandoval, J. S., & Kirschbaum, D. S. (2015). Correlation between fruit color measurement and total soluble solids concentration in strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Revista. Agronomía. Noroeste Argentina*, 35(1), 55–60.
- Soto-Castro, D., Gutiérrez, M. C., León-Martínez F. M., Santiago-García, P. A., Aragón-Lucero, I., & Antonio-Antonio, F. (2019). Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. *Food Chemistry*, 272, 715–722. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.08.069>
- Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R., & Felker, P. (2005). Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442–451. <https://doi.org/10.1021/jf048751y>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science and Technology* 63, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Vignoni, L. A., M.césari, R., Forte, M., & Mirábile, M. L. (2006). Determinación de índice de color en ajo picado. *Información Tecnológica*, 17(6), 63–67. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600011>
- Vijayalakshmi, M., & Ruckmani, K. (2016). Ferric reducing anti-oxidant power assay in plant extract. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 11(3), 570–572. <https://doi.org/10.3329/BJP.V11I3.27663>
- Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z., & Mousavi, S. M. (2011). Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 677–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0>
- Zotarelli, M. F., da Silva, V. M., Durigon, A., Hubinger, M. D., & Laurindo, J. B. (2017). Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. *Powder Technology*, 305, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.027>