



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL E INGENIERÍA
EN ALIMENTOS

LICENCIATURA EN ALIMENTACIÓN SUSTENTABLE

**“Condiciones óptimas para la microencapsulación del extracto de tuna
(*Opuntia robusta*) mediante secado por aspersión utilizando una
mezcla de goma arábica y maltodextrina como material pared”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN ALIMENTACIÓN SUSTENTABLE

PRESENTA

Denisse Elizabeth Tapia Morales

Director:

Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

Co-director:

Dr. Román Leyva López

Asesores:

Dr. Uriel González Lemus

Dr. Rubén Jiménez Alvarado

Tulancingo de Bravo Hidalgo, diciembre 2025.

ACTA DE REVISIÓN



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 12 de Diciembre de 2025

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojaky del Rocio Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Alimentación Sustentable, **Denisse Elizabeth Tapia Morales**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Condiciones óptimas para la microencapsulación del extracto de tuna (*Opuntia robusta*) mediante secado por aspersión utilizando una mezcla de goma arábiga y maltodextrina como material pared"**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE Dr. Rubén Jiménez Alvarado

SECRETARIO Dr. Uriel González Lemus

VOCAL 1 Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

VOCAL 2 Dr. Román Leyva López

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"



Dra. Gabriela Medina Pérez
Coordinadora de la Licenciatura en
Alimentación Sustentable



Avenida Universidad #133 Col. San Miguel Huasteco
Santiago Tlaxiaco de Luis Guzmán, Hidalgo
México, C.P. 42775
Teléfono: 771117/250 Ext. 47021
correo_electronico@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios sobre todas las cosas, en tu infinita misericordia me has dado tanto, gracias por tu amor y tu bondad. Gracias por guiarme y cuidarme en cada paso que doy, sé que el aprendizaje obtenido y la enseñanza ha sido por tu voluntad. Gracias por amarme y nunca dejarme caer. Agradezco a Anselmo, por ser mi guía en este transitar; tu luz y tu fuerza me han hecho una mujer valiente y decidida. Gracias por ser mi intercesor y estar presente cada que te hago el llamado.

Agradezco a mis padre, Oscar Tapia e Isabel Morales, por todo su apoyo, su amor, paciencia y empatía para que este sueño se cumpliera. A mis hermanitos, Oscar y Luis, gracias por su comprensión y su cariño. A toda mi familia, son mi pilar más importante.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado Hidalgo, en especial a la carrera de Alimentación Sustentable, aprendí y obtuve demasiado. Agradezco a cada docente que lo conforma: queridos docentes, gracias por su apoyo constante, su paciencia y empatía me ayudo bastante, me llevo mucho de ustedes, gracias por ser mis compañeros clase. En especial, a mi comité de tesis: Dr. Cenobio por su amistad y por la motivación para realizar este trabajo; al Dr. Uriel por ser mi compañero de clase y mi maestro, quien diría que el mundo es tan pequeño; al Dr. Rubén, gracias por sus consejos y apoyo; y al Dr. Román, gracias infinitas por todo; sé que este trabajo no se hubiera concluido tan bien sin su ayuda, y la amistad que construimos ha sido muy grata. Gracias Xoxihua, aprendí demasiado.

Finalmente, gracias a todos mis amigos, cercanos y lejanos a mí, y a ustedes lectores. Espero que este trabajo les sea de gran apoyo.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis lo dedico a la memoria de Guillermito Lozada, sé que observaste algo en mí que ni yo misma sabía que existía, sé que no estás en el plano terrenal, pero donde quiera que te encuentres te agradezco y te dedico este trabajo. Gracias por guiarme.

A mis abuelos Mamá Rosa y Papá Luis, gracias por nunca soltar mi mano porque siempre confiaron en mí y me alentaron para concluir, porque, aunque me entendían poco, nunca dejaron de escucharme. Espero que Dios me conceda la voluntad de tenerlos mucho tiempo, son motivación, fuerza y amor pleno.

A mis padres por impulsarme a cumplir mis sueños, a mis hermanos y mi cuñada Fer, gracias por ser mi brazo fuerte, mi arma secreta.

A mis tíos, Julio, Lety, Erick, Adrián, Lupe, Gena y Ernesto, gracias por siempre alentarme y saber que pase lo que pase siempre podre confiar en ustedes.

A mis primos Melani, Ingrid, Jimena, Maricruz, Jade, Zamira, Yumara, Rodrigo y Anahí, gracias por sentirse orgullosos de mí, quiero ser motivación e inspiración para ustedes.

Te agradezco a ti, tu ausencia y presencia durante todo este tiempo me ayudo a nunca rendirme, sé que nunca me has soltado. Tu amor fue fundamental en mi vida, me hiciste una mujer fuerte, agradezco a dios y a la vida haberte puesto en mi camino.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES	4
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 Nopal	7
3.1.1 Características morfológicas del nopal	7
3.2 Tuna	9
3.3 Tuna tapona	9
3.4 Compuestos antioxidantes	12
3.5 Encapsulación	12
3.5.1 Métodos de encapsulación	14
3.5.2 Secado por aspersión	15
3.5.3 Materiales pared utilizados en microencapsulación	17
3.5.4 Maltodextrina	17
3.5.5 Goma Arábica	18
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVO GENERAL	21
5.1 Objetivos específicos	21
6. HIPÓTESIS	22
7. MATERIALES Y MÉTODOS	23
7.1 Materiales	23
7.2 Obtención del extracto de tuna tapona (Opuntia robusta)	23
7.3 Caracterización del extracto de tuna tapona (Opuntia robusta)	24
7.3.1 Diferencia de color	24
7.3.2 Cuantificación de fenoles totales	24
7.3.3 Actividad Antirradical DPPH	24
7.4 Microencapsulación del extracto	25
7.5 Cuantificación de compuestos bioactivos	27
7.5.1 Actividad de agua	27
7.6 Morfología de microcápsulas mediante Microscopía Electrónica de Barrido	27
7.7 Análisis estadístico	28
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES	29

8.1 Microencapsulación de extracto <i>Opuntia robusta</i>	29
8.2 Rendimiento de la microencapsulación.....	32
8.3 Fenoles totales.....	34
8.4 Actividad de agua.....	37
8.5 Cambio de color.....	39
8.6 Eficiencia de encapsulación	42
8.7 Actividad antirradical DPPH.....	44
8.8 Optimización y caracterización morfológica	46
9. CONCLUSIONES.....	50
11. REFERENCIAS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evidencia bibliográfica sobre eficiencia de encapsulación mediante la técnica de secado por aspersión y resultados obtenidos con el uso de goma arábica o maltodextrina como agentes encapsulantes.....	5
Tabla 2. Variables independientes obtenidas del diseño Box-Behnken para el optimizado.	26
Tabla 3. Diseño experimental Box- Behnken de secado por aspersión para el extracto (Opuntia robusta).....	30
Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo polinómico cuadrático.....	31
Tabla 5. Optimización, valores determinados.	47
Tabla 6. Caracterización física y química de microcápsulas obtenidas bajo condiciones óptimas. ..	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura morfológica del nopal. A) cladodio, B) areolas, C) espinas, D) flores, E) fruto. Adaptada de Britton, (1919–1923).	8
Figura 2. Forma arbustiva Opuntia robusta: imagen de EcuRed., (s.f.).....	9
Figura 3. Floración Opuntia robusta. Fuente Cruz et al. (2016).	10
Figura 4. Fruta tuna tapona, (Opuntia Robusta). Fuente Buono (2018).....	11
Figura 5. Secador por aspersión tipo BUCHI modelo B-29. Partes del equipo: A) Entrada de la solución, B) Atomizador, C) Cámara de secado, D) Panel de control y E) Colector de polvo. Fuente propia (2025).	16
Figura 6. Estructura química de la maltodextrina. Adaptada y tomada de American Chemical Society (s.f).	18
Figura 7. Modelo de superficie de respuesta 3D de Rendimiento en función de A: sólidos solubles totales (SST), B: materiales pared relación Goma Arábica: Maltodextrina (GA:MD) y C: temperatura de entrada (TE).....	33
Figura 8. Modelo de superficie de respuesta 3D de Fenoles totales en función de A: sólidos solubles totales (SST), B: materiales pared relación Goma Arábica: Maltodextrina (GA:MD) y C: temperatura de entrada (TE).....	36
Figura 9. Modelo de superficie de respuesta 3D de aw. a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE) y b) relación Goma Arábica: Maltodextrina (GA:MD) vs Sólidos Solubles Totales (SST).....	38
Figura 10. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre diferencia de color de las microcápsulas. a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs relación Goma arábica: Maltodextrina (GA:MD) b) Temperatura de entrada (TE) vs Sólidos Solubles Totales (SST), c) Temperatura de entrada (TE) vs relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD).	41
Figura 11. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre eficiencia de encapsulación. a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs relación Goma arábica: Maltodextrina (GA:MD), b) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE) y c) relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD) vs Temperatura de entrada (TE).....	43
Figura 12. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre eficiencia de encapsulación. a) relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD) vs Sólidos Solubles Totales (SST) y b) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE).....	45
Figura 13. Micrografía MEB de microcápsulas de extracto de tuna tapona con GA:MD como material de recubrimiento, a 250x (A): 500x (B): 1000x (C) y 2500x (D).	49

RESUMEN

La tuna tapona (*Opuntia robusta*), es una especie perteneciente a la familia *Cactaceae*, es conocida por sus características como la resistencia a sequía, plagas y es capaz de crecer en zonas pedregosas, es una fruta poco comestible, pero se ha visto que presenta compuestos de interés biológico y puede utilizarse como materia prima para la obtención de extractos con aplicaciones alimentarias, bebidas o microencapsulados. La microencapsulación se basa en el recubrimiento de compuestos de interés biológico, evitando la pérdida de la actividad biológica de estos, el método más común es el secado por aspersión. El objetivo de este estudio fue establecer las condiciones óptimas de la microencapsulación de extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*) mediante un diseño Box-Behnken con ajuste del modelo de superficie de respuesta (MSR), utilizando el método de secado por aspersión, y los factores: temperatura de entrada (TE), concentración de sólidos solubles totales (SST) y la relación del material pared (goma arábica: maltodextrina; GA:MD). Las condiciones de optimización fueron de 7.7% de SST, GA:MD (22.3:77.7) y 180 °C de temperatura de entrada en el secador. Con estas condiciones el contenido de compuestos fenólicos totales (FT) y actividad antirradical DPPH fueron de 950 ± 57 mg EAG/ 100g; 367.5 ± 22.4 mmol ET/ g respectivamente. La actividad de agua fue de 0.225, con un cambio de color (ΔE) de 11.3, la eficiencia de encapsulación de 85% y el rendimiento de 75.6%. La microscopía electrónica de barrido (MEB) para los microencapsulados optimizados, demostró que las concentraciones de GA:MD y SST, proporcionan buena cobertura y estabilidad en las microcápsulas.

1. INTRODUCCIÓN

México es considerado el principal productor mundial de tuna, se cultivan alrededor de 80 variedades distintas, con una producción de 400 mil toneladas de tuna por año. Los estados con más producción son Puebla, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí e Hidalgo (SEDARH, 2023).

Entre las variedades más destacadas encontramos tuna blanca, amarilla y roja (*Opuntia ficus-indica*), xoconostle (*Opuntia jocosnotle*) y tuna forrajera (*Opuntia robusta*). Esta última variedad es conocida como tuna tapon, tapón, tapón liso, camueso y bonda. Presenta características especiales entre ellas, resistencia a sequías, plagas y la capacidad de crecer en zonas pedregosas, su crecimiento es de forma arbustivo y puede alcanzar los 2 m de alto. Esta especie se distingue por tener nopales (pencas) muy grandes con areolas y espinas de 2 a 5 cm de largo (SADER, 2020; UNAM, 2020).

Aunque se ha observado que el consumo alimentario es limitado debido a algunos atributos desfavorables (semillas grandes y cantidad de espinas), esta tuna posee compuestos de interés biológico que favorecen al consumo humano (Mota, 2020). Entre los principales compuestos destacan antioxidantes como fenoles, flavonoides, betalainas (betacianinas y betaxantinas), vitamina C y A; minerales como calcio, magnesio y potasio (Curiel, 2024). El descubrimiento de estos compuestos confiere a la tuna propiedades con efecto hepatoprotector, antiinflamatorio, cardioprotector, antidiabético, neuroprotector y antioxidante. Sin embargo, estos compuestos son sensibles a interacción con otros compuestos como oxígeno y nitrógeno, factores como pH, temperatura, luz, oxígeno y condiciones biológicas del tracto gastrointestinal durante la digestión (González-Ponce, 2016).

Para evitar su degradación y potenciar sus beneficios se ha implementado la tecnología de microencapsulación, cuyo objetivo es cubrir compuestos de interés biológico permitiendo su absorción de forma controlada y prevenir la pérdida de la actividad biológica de los compuestos (Dhakal, 2020).

El método de microencapsulación mediante secado por aspersión, combinado con la selección óptima de materiales pared adecuados permiten la obtención de microencapsulados funcionales con propiedades físicas y químicas adecuadas (Guo, 2020). La maltodextrina

(MD) y la goma arábica (GA), son de los materiales pared más utilizados debido a su bajo costo, baja viscosidad, alta solubilidad, sabor neutro y por sus propiedades emulsionantes (de Barros Fernández, 2014). Investigaciones realizadas por Fortes, et al. (2022) reportaron que microencapsular saborizante de plátano utilizando maltodextrina y goma arábica como materiales pared, se alcanzó el 91.9% de rendimiento y un 96.4% de retención de saborizantes. En otro estudio realizado por Aragüez, et al. (2018) se demostró que distintas mezclas de goma arábica y maltodextrina en la microencapsulación por medio del secado por aspersión de jugo concentrado de naranja permitió lograr un 82% de rendimiento y 72.8% de retención de ácido ascórbico. Por lo tanto, la microencapsulación de compuestos de interés biológico mediante secado por aspersión utilizando mezclas de goma arábica y maltodextrina como material pared pueden mejorar la estabilidad de compuestos, la eficiencia de absorción y el rendimiento, además de brindar propiedades funcionales para los consumidores. El objetivo principal de este trabajo es determinar las condiciones óptimas para la microencapsulación de extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*) mediante un diseño Box-Behnken, evaluando temperatura del secador por aspersión, concentración de sólidos solubles totales y la relación material pared (goma arábica: maltodextrina), con la finalidad de garantizar la funcionalidad del extracto y preservar la estabilidad de los compuestos bioactivos microencapsulados.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad la microencapsulación mediante secado por aspersión es una de las técnicas que la industria alimentaria ha implementado para la innovación de nuevos productos, como los alimentos funcionales; que tienen como objetivo ofrecer beneficios adicionales para la salud del consumidor. Estos productos son enriquecidos con diversos compuestos bioactivos como antioxidantes, prebióticos, probióticos, vitaminas y minerales, siendo ingredientes que mejoran la salud (Michel Michel, 2024). La tecnología de microencapsulación permite enmascarar sabores no deseables, proteger compuestos sensibles a condiciones como temperatura, pH, humedad, oxígeno, entre otros, mejorar su estabilidad durante el almacenamiento y controlar su liberación en el organismo. Entre algunos compuestos que se han microencapsulado se encuentran: antioxidantes, prebióticos y probióticos, sustancias oleosas como ácidos grasos omega-3, vitaminas, minerales, extractos vegetales y frutales que brindan sabores y aromas deseados en matrices alimentarias (Silva, 2014; Tangarife, 2021). Estos compuestos deben estar mezclados con agentes denominados “material pared” que tienen como objetivo aislar el núcleo del medio externo, permitir una liberación controlada del compuesto bioactivo y mantener características deseadas (Jyothi, 2010). La eficiencia de encapsulación y liberación del compuesto depende de varios factores como: la volatilidad y concentración del compuesto, el tamaño de las microcápsulas, la compatibilidad del material pared con el núcleo, así como las propiedades fisicoquímicas del material pared (Carneiro, 2013). Entre los agentes encapsulantes más utilizados destacan los polisacáridos como almidón, quitina, dextrina, gomas (arábica y xantana, utilizadas especialmente por su afinidad al agua) y maltodextrina: además algunas proteínas de origen animal y vegetal como el gluten, caseína, grenetina y algunos lípidos (Díaz-Montes E. , 2023).

Por tal razón, para el análisis de este estudio se consideraron trabajos realizados por distintos autores que emplean la técnica de secado por aspersión para la microencapsulación de distintos alimentos, utilizando como material pared goma arábica y maltodextrina. En dichos estudios se analizó la eficiencia de encapsulación y resultados obtenidos.

Tabla 1.Evidencia bibliográfica sobre eficiencia de encapsulación mediante la técnica de secado por aspersión y resultados obtenidos con el uso de goma arábica o maltodextrina como agentes encapsulantes

Alimento o compuesto encapsulado	Material pared	Resultados	Referencias
Zapote (<i>Manilkara zapota</i>)	Maltodextrina (MD) /goma arábica (GA) Relación: 1:1, 0:1, 1:0 (p/p)	Las muestras material pared 1:1, obtuvieron un alto porcentaje de compuestos bioactivos (catequina, galato, epicatequina, galato de propilo).	(Araujo et al, 2020)
Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.)	MD/GA Relación: 1:1 (p/p)	Se obtuvieron polvos con buena solubilidad, características de flujo y un alto contenido de compuestos bioactivos como antocianinas y polifenoles.	(Archaina et al, 2019)
Noni (<i>Morinda citrifolia</i> L.)	MD/GA Relación: 2:1 (p/p)	Se obtuvieron microcápsulas con buena estabilidad y alta eficiencia de liberación de compuestos en condiciones <i>in vitro</i> .	(Nguyen et al, 2024)
Limón mano de buda (<i>Citrus medica</i> var. <i>Sarcodactylis</i>)	MD/GA/ almidón modificado (AM)/ proteína de suero (PS).	Se realizaron distintas mezclas con formulaciones de 10g/100ml. La mejor mezcla en cuanto a rendimiento, porosidad, fluidez y eficiencia de encapsulación fue: GA:MA:AM 1:1 (p/p).	(Mahdi et al, 2020)
Nopal morado (<i>Opuntia ficus indica</i>)	MD/GA 10,15 y 20% (p/p)	Se observó que concentraciones del 10% MDX:GA, se obtuvo un gran aporte de compuestos fenólicos y betalainas y con 90 días de almacenamiento se obtuvo protección de compuestos bioactivos.	(Toledo et al, 2019)

Garambullo (<i>Myrtillocactus geometrizans</i>)	MD/ mucílago de aloe vera (MAD), almidón (AM), dióxido de silicio (SiO ₂)	Microcápsulas obtenidas con mayor concentración de betalaínas y compuestos fenólicos, con formulación de MD 23.70%, MAD 3.17%, AM 31,60% y SiO ₂ 4.73%, a 160°C de temperatura.	(Gómez-Espinoza et al, 2024)
Astaxantina	MD/GA Relación 1:1 (p/p)	Eficiencia de encapsulación del 89.1% y polvo de alta solubilidad debido a las propiedades del material de recubrimiento.	(Rivera-Salas et al., 2020)
Pulpa de tuna amarilla/naranja (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	MD y mucílago de tuna (M), mezcla (M+MD) Relación: 1:1 (p/p)	Eficiencia de encapsulación mayor a 90% y estabilidad del pigmento, optimización material pared mezcla (M+MD 3:1 p/p).	(Carmona et al, 2021)

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Nopal

El nopal (*Opuntia spp.*) perteneciente a la familia de las cactáceas, es una planta ampliamente reconocida en el continente americano, existen alrededor de 200 especies distribuidas desde las regiones montañosas, hasta regiones costeras del continente americano (Gaona, 2024). En México, se encuentra principalmente en regiones áridas y semiáridas del centro y norte del país (Zárate-Martínez, 2025). Los principales estados productores de distintas variedades de nopal son Morelos, Ciudad de México, Estado de México, Coahuila, Zacatecas, Hidalgo, Puebla y Aguascalientes (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Una parte del crecimiento de esta cactácea es de forma silvestre, mientras que otra parte es cultivada para consumo humano con fines alimenticios y forraje de animales como el caprino, bovino, ovino y porcino (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

En cuanto al consumo humano aporta múltiples beneficios entre ellos encontramos vitaminas del complejo B, (B1, B2 y B3), así como vitamina A y C. Además, se ha visto que presenta efectos en la desintoxicación de sustancias nocivas a la salud gracias a los minerales presentes como el calcio, potasio, magnesio (Bonilla, 2020). Una investigación de Pérez Laguna et al. (2024) menciona que el nopal tiene efecto positivo en la regulación del índice glucémico en las personas, ya que aporta antioxidantes y fibra soluble, que retrasa el vaciamiento gástrico y contribuye al control de glucosa en sangre.

3.1.1 Características morfológicas del nopal

El nopal se caracteriza por ser una planta arbustiva con estructuras planas denominadas cladodios (Figura 1A), que varían de tamaño, los brotes más tiernos se conocen como “nopalitos” y los más maduros como “pencas”. Los cladodios están formados de capas que evitan la contaminación de microorganismos y conservan el tejido vegetal (Bonilla, 2020). En la superficie de los cladodios se encuentran areolas (Figura 1B), puntos de crecimiento donde pueden aparecer nuevas pencas, raíces, espinas y flores (Gaona, 2024). Las espinas presentan estructura (Figura 1C), filosa y rígida, varían de número y tamaño por la especie y

la etapa de maduración del cladodio (Esteban Cortina, 2020). Las flores (Figura 1D), existen de distintos colores (rojo, amarillo, blanco y naranja) determinadas por la especie. Son de estructura temporal, ya que su apertura dura aproximadamente un día y una (Gaona, 2024). El fruto conocido como “tuna” (Figura 1E), son de morfología variable (ovoides, redondas y elípticas), de diversos colores (rojo, amarillo, naranja y púrpura) y en cuanto al sabor varían desde lo muy dulce hasta lo más ácido. Todas estas características dependen de la variedad del nopal (Gaona, 2024).

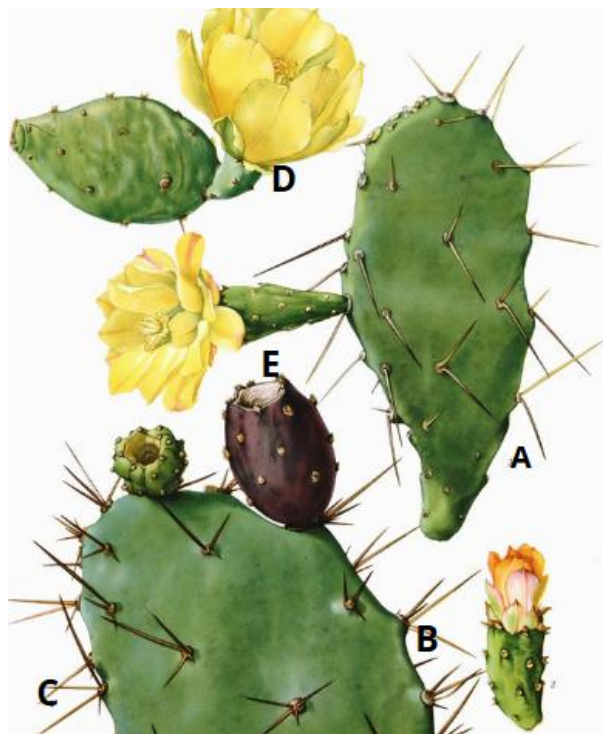


Figura 1. Estructura morfológica del nopal. A) cladodio, B) areolas, C) espinas, D) flores, E) fruto. Adaptada de Britton, (1919–1923).

3.2 Tuna

La tuna (*Opuntia spp.*) es un fruto obtenido del nopal consta de una cáscara gruesa con espinas de distintos tamaños, dentro de la cáscara encontramos pulpa rodeando a una gran cantidad de semillas, estas a diferencia de otras semillas se consideran semillas comestibles. Existen distintas variedades de tuna que se caracterizan por tener distintos colores como la tuna rosa, roja, anaranjada, amarilla y blanca, siendo esta última la más consumida (Sabtain, 2021). En México, se encuentran alrededor de 23 variedades de tunas comestibles, las zonas de mayor producción son el Estado de México, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí e Hidalgo, este último estado aporta 20,524 toneladas a la producción nacional (Infografías JB – Instituto de Biología, 2018-2019). Entre sus componentes principales encontramos la vitamina C, vitamina E, algunos minerales como el calcio, magnesio y compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides y fibra insoluble (Albuquerque, 2020). Esta fruta normalmente se consume en fresco y en la actualidad se ha implementado en muchos platillos como salsas, mermeladas, helados, bebidas y dulces (Barrera, 2011).

3.3 Tuna tapona

Fruto del nopal tapón o nopal camueso (*Opuntia robusta*), perteneciente a la familia de las cactáceas, este tipo de nopal se encuentra ramificado (figura 2), en la forma arbustiva puede llegar a medir de 1 a 4 m de altura, cada hoja es cilíndrica, carnosa de 30 cm de diámetro, cubiertas de areolas en cada una de ellas crecen espinas de hasta 5 cm de largo (Márquez Lemus, 2023).



Figura 2. Forma arbustiva *Opuntia robusta*: imagen de EcuRed., (s.f.)

El periodo de floración ocurre en primavera y verano, presentando flores de color amarillo (figura 3). Con el tiempo crece el fruto denominado “tuna tapona”, este tipo de tuna es de color rojo, que en estado de inmadurez es de color verde y que con el tiempo de maduración se torna de color morado, es de cascara muy gruesa, tiene poca pulpa y una gran cantidad de semillas (figura 4) (Ortiz, 2014).



Figura 3. Floración Opuntia robusta. Fuente Cruz et al. (2016).

El consumo de esta tuna es mínimo ya que presenta características sensoriales no agradables como el tamaño de las semillas, pulpa menos jugosa y una cáscara muy gruesa con espinas abundantes que dificultan su pelado, por ello el principal uso de esta tuna es como forraje para animales. Es considerada una tuna silvestre ya que el nopal tapón crece en zonas pobres de nutrientes, resiste a heladas y puede contribuir en la restauración de suelos (Mota, 2020).



Figura 4. Fruta tuna tapona, (*Opuntia Robusta*). Fuente Buono (2018).

En México, los principales estados donde se encuentra esta tuna son Guanajuato, San Luis Potosí, Tlaxcala, Querétaro e Hidalgo. En este último, los municipios más representativos donde se puede encontrar son, Santiago de Anaya, Pachuca de Soto, Zempoala, Tezontepec de Aldama, Metzititlán y Cuautepec de Hinojosa (Ecojardín-UNAM, 2012). Se ha identificado que el extracto de esta tuna contiene vitamina C y E, compuestos fenólicos como ácido ferúlico y pigmentos como betalaínas, dentro de esta clase se encuentran betaxantinas y betacianinas (Villa-Jaimes, 2023).

Diversas investigaciones respaldan que el consumo frecuente de este fruto tiene propiedades beneficiosas a la salud. Estos efectos se atribuyen a su alto contenido en compuestos antioxidantes, entre los que destacan son: polifenoles, betalaínas y vitamina C, asociadas a propiedades hepatoprotectores, hipoglucemiantes, antiinflamatorias y analgésicas. Por ejemplo, Villa et al. (2023) demostraron que el extracto de *Opuntia robusta* tiene efecto hepatoprotector en el daño hepático inducido con diclofenaco a ratas. De manera similar, Hornedo et al. (2022) observaron efecto contra fibrosis hepática, inducida con tioacetamida en ratas Wistar macho. Por otro lado, González et al. (2020) comprobaron que compuestos antioxidantes presentes en la tuna como betalaínas y betacianinas ejercen efecto protector contra el daño hepático causado por sobredosis de acetaminofén en modelos animales.

3.4 Compuestos antioxidantes

Son sustancias que neutralizan radicales libres (definidos como moléculas que pueden dañar las células y los tejidos del cuerpo) evitando la generación de enfermedades. Estas sustancias pueden tener efecto antiinflamatorio, anticancerígeno, contribución al fortalecimiento del sistema inmunológico, retrasar el envejecimiento y algunas de estas sustancias funcionan como precursores para ciertas vías de señalización celular e intracelular. Estas sustancias se encuentran en las plantas, principalmente en la cáscara y las semillas de las frutas (Villa-Jaimes, 2023). Actualmente se busca extraer estos compuestos de tal manera que se conserven en su estado natural, permitiendo su incorporación en matrices alimentarias con el fin de potenciar su efecto a la salud, así como adicionarlos a cosméticos y productos farmacéuticos (Castro Ramírez R. J., 2022).

Estos compuestos deben de ser estables para su uso; sin embargo, influyen factores que pueden afectar su estabilidad, como la temperatura, actividad de agua, pH, acción enzimática, presencia y ausencia de luz, oxígeno y metales. Para evitar que estas condiciones afectan a dichos compuestos se ha implementado la tecnología de encapsulación que permite la protección, la mejora de almacenamiento y la liberación controlada del compuesto bioactivo en el organismo (Mejía Vásquez, 2023; Díaz-Montesa, 2023).

3.5 Encapsulación

Técnica utilizada para recubrir compuestos con el fin de protegerlos de factores ambientales. Sus principales ventajas incluyen prolongar la vida útil de los compuestos lo que permite mejorar su estabilidad, controlar su liberación, aumentar la resistencia al paso por el tracto gastrointestinal y la capacidad de enmascarar sabores no agradables para la aceptación sensorial en la industria alimentaria (Díaz-Montesa, 2023). El método de encapsulación dependerá de factores tales como el tamaño de partícula requerido, propiedades del material de recubrimiento, mecanismo de liberación deseada y los costos involucrados (Díaz-Montesa, 2023). La encapsulación puede clasificarse en dos niveles:

- **Nanoencapsulación:** técnica que consiste en recubrir partículas a escala nanométrica (20 a 200 nm), es utilizada para proteger compuestos sensibles en aplicaciones alimentarias, nutracéuticas, farmacéuticas y cosméticas (Ojeda G. A., 2019).

En cuanto a las aplicaciones alimentarias encontramos compuestos que se pueden encapsular:

- a. Compuestos orgánicos: vitaminas, minerales, antioxidantes, bacterias, ácidos grasos, colorantes y saborizantes, combinados con lípidos, proteínas y polisacáridos como material pared, que permiten mayor biodisponibilidad, estabilidad y absorción del compuesto (Pateiro, 2021). Por ejemplo, micro y nano-encapsulación de aceites esenciales vegetales (cártamo, maíz, almendras, soja, linaza, chía y orégano) ha demostrado mejorar la formulación y brindar estabilidad a productos lácteos como mantequilla, yogur, queso tipo labneh, entre otros (Delshadi, 2020).
- b. Compuestos inorgánicos: metales (plata, hierro, zinc) óxido de metales (TiO_2 , SiO_2) y metaloides (silicio, nanoarcilla), utilizados para mejorar la composición de alimentos y prolongar la vida útil del envase. Por ejemplo, nanocompuestos de plata (Ag) utilizados por su eficiencia antimicrobiana en el envasado de pan, quesos, carnes y hierbas, sin alterar la composición del alimento (Ojeda G. A., 2019).

- **Microencapsulación:** técnica que consiste en encapsular sustancias líquidas, sólidas o gaseosas a nivel micrométrico (1 a 1000 μm). Esta técnica en la industria alimentaria se utiliza principalmente para la incorporación de compuestos que confieren funcionalidad extra al alimento (Niamah, 2021). Por ejemplo:

- a. Antioxidantes (vitamina C y E, polifenoles, betacianinas y betaxantinas).
- b. Aceites esenciales (omega-3 y omega-6).
- c. Probióticos y prebióticos (que mejoran la salud intestinal).
- d. Compuestos aromáticos y de sabor (orégano, cardamomo, citronela, mejorana y cúrcuma).

- e. Enzimas y células vivas (que benefician el proceso fermentativo y liberación controlada).

Estos compuestos son encapsulados mediante materiales pared seleccionados a partir de características a fines (polisacáridos, proteínas y lípidos) y métodos de encapsulación que garanticen: alta eficiencia de encapsulación, protección (calor, luz, oxígeno y ácido estomacal) así como también afinidad molecular (Calderón-Oliver, The role of microencapsulation in food application., 2022).

3.5.1 Métodos de encapsulación

La industria alimentaria ocupa distintos métodos para la elaboración de microcápsulas, estos pueden clasificar en tres principales categorías:

- a. Métodos químicos: encontramos polimerización interfacial, incompatibilidad polimérica e inclusión molecular (Mendoza-Meneses, 2020: Sotero, 2023).
- b. Métodos fisicoquímicos: este tipo de técnicas incluyen sustancias que permiten envolver una matriz, encontramos coacervación simple, coacervación compleja, liposomas, extracción-evaporación de solvente y gelificación iónica (Mendoza-Meneses, 2020).
- c. Métodos físicos: su principio se basa en utilizar técnicas mecánicas y térmicas, por el cual se solidifican fluidos convirtiéndolos en cápsulas menores a 100 μm , entre estas técnicas encontramos secado por aspersión, recubrimiento por aspersión, extrusión, liofilización y co-extrusión (Sotero, 2023).

A continuación, se describen los métodos físicos más utilizados:

Liofilización: Es un método de conservación de sustancias o compuestos sensibles al calor y susceptibles a la oxidación, el fundamento principal de esta técnica es la fase de sublimación, donde el agua de una sustancia sólida se convierte en estado gaseoso sin pasar por el estado líquido, todo esto en condiciones de vacío (Eun, 2020). Este proceso se divide en dos fases. Sublimación en hielo, donde se congela el compuesto o sustancia, se monitorea la temperatura y la presión de vacío hasta llegar a la desorción del agua no congelada, en esta última fase se aumenta la temperatura logrando condensación hasta obtener el compuesto sólido y deshidratado (Eun, 2020). Entre las desventajas que tiene esta técnica es que es de

costo elevado, ocupa un alto consumo de energía y es de tiempo prolongado en el procesamiento (Rezvankehah, 2020).

Extrusión: Es una técnica que consiste en que una sustancia o compuesto es comprimido en una jeringa o probeta (en menor escala) o una extrusora (a mayor escala), en distintas condiciones de temperatura (dependiendo el producto de interés), añadiendo una solución que les permita obtener cápsulas con sabores y olores específicos (Díaz-Montes, 2023; Bamidele, 2021). Entre las desventajas que tiene esta técnica es la eliminación de compuestos termosensibles ya que manejan temperaturas de 125 a 150°C y es de mayor costo (Abd El-Kader, 2020).

3.5.2 Secado por aspersión

Esta técnica consiste en meter a un secador (figura 5), una emulsión líquida llena de compuestos bioactivos que serán encapsulados y al final pulverizados, a partir de la administración de aire caliente y la nivelación de presión (Mason, 2005). Este proceso es de los más utilizados en el sector alimentario y farmacéutico, entre las ventajas que encontramos es que es más económico que otras técnicas, permite controlar la morfología de las microcápsulas ya que se puede ajustar el tamaño y la humedad del producto final, se ajustan las variables como temperatura de entrada y de salida, beneficiando a la conservación de la matriz encapsulada, esta técnica permite reproducirse a grande escala (Piñón-Balderrama, 2020)

El proceso consta de cuatro etapas:

1. **Preparación de solución y del equipo:** este proceso consta de homogeneizar el material de núcleo con los agentes encapsulantes y preparar las mezclas para meterlas al equipo, a la par es importante preparar el equipo con las condiciones adecuadas tales como, temperatura, presión y tiempo de alimentación (Mardani, 2024).
2. **Atomización:** inicia la deshidratación de las partículas al estar en contacto con aire caliente, convirtiéndolas en finas partículas mediante una boquilla, en este proceso influye la presión y la temperatura del equipo (Piñón-Balderrama, 2020).

3. **Cámara de secado:** contacto total de la partícula con el aire caliente, ocurre la evaporación hasta de 95% del contenido de agua, en esta etapa la velocidad de evaporación se vuelve constante (Mardani, 2024).
4. **Colector de polvo:** en esta fase se recupera todo el polvo, su forma y tamaño dependen de los agentes encapsulantes (Samborska, 2020). Las principales variables que influyen en este proceso es la temperatura de alimentación, temperatura de entrada y temperatura de salida, de esto depende la conservación de compuestos o sustancias encapsuladas (Sobulska, 2021).



Figura 5. Secador por aspersión tipo BUCHI modelo B-29. Partes del equipo: A) Entrada de la solución, B) Atomizador, C) Cámara de secado, D) Panel de control y E) Colector de polvo. Fuente propia (2025).

3.5.3 Materiales pared utilizados en microencapsulación

En la microencapsulación mediante el secado por aspersión, la elección del material de pared es fundamental, ya que estas sustancias proporcionan características físicas y químicas a las microcápsulas, como estabilidad, recubrimiento adecuado del núcleo, dan estructura interna y externa y proporcionan mayor rendimiento lo que permite la reducción de costos (Lu, 2021).

Entre las principales sustancias utilizadas como material pared se encuentran:

- a. Proteínas de origen animal, como gelatina, caseinato de sodio, grenetina, proteínas lácticas; y de origen vegetal como la proteína de soja y gluten (Mohammadalinejhadi S. &., 2021).
- b. Extractos vegetales como: almidón, pectina, celulosa y maltodextrina y gomas entre ellas la goma xantana, alginato y goma arábiga (Rivas, 2021).

La influencia que tienen estos materiales en la microencapsulación es primordial, por lo que su elección debe basarse en criterios específicos como viscosidad, solubilidad, capacidad de retención y propiedades emulsionantes. Estos parámetros dependen del tipo de compuesto a encapsular. En este sentido los polisacáridos y extractos vegetales, como la maltodextrina y la goma arábiga, se ha visto que cumplen con dichas características y se han convertido en los principales agentes encapsulantes (Lu, 2021).

3.5.4 Maltodextrina

La maltodextrina es una mezcla de polímeros de origen vegetal con fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n \cdot H_2O$ (Figura 6) (Reyes, 2024), obtenida a partir del hidrólisis controlada de almidón del maíz, papa, arroz o trigo. En la industria alimentaria, se utiliza comúnmente como sustituto de azúcar, y presenta propiedades aglutinantes y espesantes (Torres, 2017). En la elaboración de microcápsulas, la maltodextrina actúa como agente estabilizante, facilitando la formación de polvo reduciendo la humedad, lo que permite la estabilidad en los polvos obtenidos (Mohammadalinejhadi S. &., 2021). Este polisacárido es de bajo costo y gracias a que puede presentar baja capacidad emulsionante es posible combinarla con otros

agentes encapsulantes como el ácido ascórbico, goma de tara, goma guar y goma arábica (Finotelli, 2005).

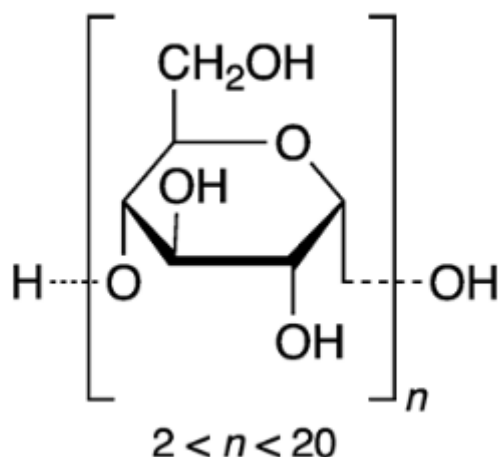


Figura 6. Estructura química de la maltodextrina. Adaptada y tomada de American Chemical Society (s.f).

3.5.5 Goma Arábica

La goma arábica, es una mezcla de polisacáridos de alto peso molecular, que se obtiene de distintas variedades de *Acacia senegal*, específicamente de la resina exudada por estos árboles (Tiamiyu, 2023). Esta goma es altamente soluble y presenta baja viscosidad, lo que la hace ampliamente utilizada en la industria alimentaria, principalmente en la industria de la confitería para la elaboración de dulces, helados y gelatinas donde actúa como espesante y emulsionante (Prasad, 2022). Además, evita el pardeamiento enzimático en frutas deshidratadas, mejora la textura y estabiliza pigmentos presentes en ciertos alimentos (Al-Hamayda, 2023). En la microencapsulación, este material pared ofrece protección y estructura al componente bioactivo encapsulado, gracias a su capacidad para formar películas delgadas (Atgié, 2019). Así mismo, al ser un material que no proporciona sabor ni olor, permite resaltar y mantener sabores y aromas deseados de las microcápsulas (Zong, 2023).

4. JUSTIFICACIÓN

Diversos géneros de *Opuntia spp.* han demostrado aportar beneficios ambientales y económicos, ya que pueden desarrollarse en climas áridos previniendo la erosión, favoreciendo la fijación del suelo. Así mismo se destacan por su bajo costo y la alta producción en México. Estas especies se caracterizan por tener compuestos de interés biológico con efectos funcionales los cuales han sido analizados e implementados en productos de la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria. Estos compuestos son extraídos de cladodios o pencas, flores o frutos de *Opuntia spp.*, y se ha demostrado que contribuyen a la prevención de enfermedades y mejoramiento de la salud. Entre ellos incluyen aminoácidos, vitaminas, minerales y antioxidantes como fenoles, flavonoides, antocianinas y betacianinas. Dentro de este grupo se han identificado alrededor de 24 diferentes betalaínas (betacianinas, betaxantinas, entre otras) y diversos polifenoles (fenoles y flavonoides), en 10 variedades de tunas analizadas, entre ellas la tuna tapona (*Opuntia robusta*). Esta variedad color rojo- púrpura tradicionalmente se destina como alimento para animales, tiene compuestos que mejoran la salud, es rica en fibra y se encuentra disponible en la región de Hidalgo.

Los compuestos antioxidantes son neutralizadores de radicales libres; los radicales libres son moléculas inestables que tienen la característica de estar desapareados, promoviendo la reacción de otras moléculas, aumentando un daño o provocando una desestabilización. El sistema antioxidante permite proteger al organismo de estas moléculas, pero la cantidad de antioxidantes que genera el cuerpo es insuficiente, por ende, es necesario suplirlas con alimentos con carga antioxidante como frutas y verduras. Una de las características de estos compuestos es que son inestables a ciertos factores ambientales como cambios de temperatura, exposición a la luz y reacción a ciertas sustancias

La microencapsulación es una técnica utilizada en la industria alimentaria que permite el recubrimiento, protección y preservación de ingredientes funcionales sensibles a factores ambientales. Este proceso consiste en encapsular compuestos bioactivos, sabores o aromas en estructuras microscópicas con la finalidad de mejorar su biodisponibilidad en ciertos alimentos. Estas microcápsulas están compuestas por materiales de pared que funcionan como barrera entre materiales externos y materiales del núcleo. Generalmente entre los

materiales encapsulantes encontramos polisacáridos naturales o sintéticos. La goma arábica es un polisacárido natural que presenta una fracción proteica y proporciona propiedades estabilizantes de baja viscosidad y alta solubilidad, no altera sabor ni textura. Por otro lado, la maltodextrina es un polisacárido natural hidrolizado de almidón, con alta solubilidad, baja viscosidad, no presenta sabor ni aroma y es de bajo costo, en microcápsulas presenta estabilidad térmica, estabilidad en condiciones ácidas y solubilidad en partículas de agua. Una de las tecnologías que se emplean para preparar micropartículas, es el secador por aspersión que permite pulverizar un líquido de un polvo mediante secado rápido con gas caliente, se caracteriza por ser un método económico que permite controlar temperatura de entrada y de salida, así como el tamaño y la distribución de microcápsulas. Por todo lo anterior se propuso en esta investigación optimizar la microencapsulación del extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*) mediante secado por aspersión utilizando maltodextrina y goma arábica como materiales pared.

5. OBJETIVO GENERAL

Optimizar mediante un diseño Box-Behnken, la temperatura del secador por aspersión, concentración de sólidos solubles totales y relación material pared (goma arábica: maltodextrina), a partir de la obtención de microcápsulas de extracto de tuna tapona.

5.1 Objetivos específicos

1. Caracterizar fisicoquímicamente el extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*), obtenido mediante licuado y filtración, con la finalidad de asegurar el proceso de microencapsulación.
2. Diseñar un modelo experimental mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR) basada en el diseño Box-Behnken, para microencapsular el extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*), utilizando maltodextrina y goma arábica como material pared, mediante secado por aspersión.
3. Caracterizar fisicoquímicamente las microcápsulas obtenidas mediante la determinación de actividad de agua (a_w) y color, con el fin de evaluar su estabilidad en humedad y consistencia de color.
4. Evaluar la concentración de compuestos bioactivos presentes en las microcápsulas, así como su actividad antioxidante por inhibición del radical DPPH, con el propósito de obtener su estabilidad funcional y obtener la optimización del proceso de microencapsulación.

6. HIPÓTESIS

La optimización del proceso de secado por aspersión del extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*) con maltodextrina y goma arábiga como material pared, mediante un diseño experimental tipo Box-Behnken, dará como resultado microcápsulas con características fisicoquímicas favorables y presencia de compuestos bioactivos que presenten actividad antioxidante de las mismas.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Materiales

Se recolectaron tunas de la variedad (*Opuntia robusta*) en estado de madurez fisiológica durante la temporada junio-septiembre 2024, en el municipio de Cuauhtepic de Hinojosa Hidalgo (ubicada en 20° 02' 08'' latitud norte y 98° 18' 33'' longitud oeste con latitud de 2241 m s. n. m.).

Se utilizó maltodextrina (M100 GPC de grado alimentario) de Grupo Pochteca, S.A.B. de C.V. (CDMX), y goma arábica (Polvo USP/FCC) de Droguería Cosmopolita (Benito Juárez, CDMX).

7.2 Obtención del extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*)

El trabajo se realizó en el laboratorio de Aprovechamiento Agroalimentario del Instituto de Ciencias Agroalimentario en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Para la obtención del extracto se utilizó la metodología descrita por Maran, et al. (2012). Se utilizó como materia prima tuna tapona (*Opuntia robusta*), se les retiró la parte gruesa de la cáscara manualmente, los frutos se lavaron a fondo con agua corriente eliminando cualquier impureza, se cortaron en pesos de 1.4 mg y se introdujeron en matraces Erlenmeyer de 250 ml. Se utilizaron 50 ml de agua destilada como disolvente, añadiendo a cada matraz la fruta completamente sumergida en el disolvente. Los matraces se cubrieron con film transparente durante los experimentos, posteriormente se incubaron a 40 °C a 114 min. Después de la extracción se durante el tiempo seleccionado, la mezcla se centrifugó a 2268 g durante 15 min (centrífuga Prp At 4000 RPM) y se recolectó el líquido sobrenadante, el extracto se almacenó en frascos color ámbar en ultra congelación a una temperatura de -75°C hasta su posterior utilización.

7.3 Caracterización del extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*)

7.3.1 Diferencia de color

El color se determinó con un colorímetro 3nh portátil NR110 de mano, analizando tres espacios de color: (L), (a*) y (b*). Las muestras se analizaron por triplicado y se determinó la diferencia total de los colores obtenidos con la ecuación Delta E*ab (CIE 1976) (Fórmula 1) (Calva Quintana, 2021).

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

7.3.2 Cuantificación de fenoles totales

La cuantificación de fenoles totales se llevó a cabo a través del método de Folin-Ciocalteu siguiendo la metodología descrita por Özen et al. (2008) con ligeras modificaciones. Se colocaron 100 µL del extracto obtenido, en un tubo de ensayo de 10 mL, posteriormente se adicionaron 1000 µL de agua destilada y 500 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu, se les aplicó una leve agitación en Vortex (marca Scientific Industries) , posteriormente se quedaron en reposo por 3 min. Después se agregó 1500 µL de Na₂CO₃ (2%), se incubaron por 40 min en la oscuridad y se midieron a una absorbancia de 765 nm. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico (mg EAG) /mL en base a una curva estándar de 0 a 500 ppm.

7.3.3 Actividad Antirradical DPPH

La inhibición del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracina) se determinó de acuerdo con el método de Brand-Williams et al. (1995), este radical se obtuvo mediante la reacción de 2,2-difenil-1-picrilhidracina (DPPH) (2.5 mg de DPPH aforado a 50 mL de metanol al 80%) permaneciendo en oscuridad. Posteriormente se ajustó la solución a una absorbancia de 0.5. Por otro lado, a un tubo de 10 mL se adicionaron 200 µL del sobrenadante obtenido, 2000 µL de la solución ajustada y se dejó reaccionar durante 40 min en oscuridad. Se midió a una absorbancia de 520 nm y los resultados se expresaron en micromoles equivalentes de trolox.

7.4 Microencapsulación del extracto

La relación de goma arábica (GA), maltodextrina (MD) y extracto se estableció en 1:1 (p/p). Las mezclas para el secado se llevaron a cabo mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR) basada en el diseño Box-Behnken considerando tres factores: porcentaje de sólidos (5%, 12.5% y 20%), temperatura (100°C, 140°C y 180°C), concentración GA:MD (0%, 50% y 100%), obteniendo así un total de 15 tratamientos, (Tabla 2). Las mezclas se homogeneizaron en una parrilla magnética hasta disolverse, posteriormente se convirtieron en polvo utilizando un secador tipo BUCHI modelo B-29. Se realizó un optimizado por (MSR) para obtener las condiciones óptimas de la microencapsulación del extracto por medio del secado por aspersión las muestras fueron analizadas por triplicado. Los polvos recolectados se guardaron en frascos color ámbar a 25°C hasta su posterior utilización.

Tabla 2. Variables independientes obtenidas del diseño Box-Behnken para el optimizado.

Variables independientes			
Corrida	Sólidos (%)	GA:MD (%)	Temperatura (°C)
1	12.5	50	140
2	12.5	0	100
3	5	100	140
4	12.5	0	180
5	20	50	100
6	5	50	100
7	5	0	140
8	20	0	140
9	12.5	100	100
10	12.5	50	140
11	12.5	100	180
12	20	100	140
13	12.5	50	140
14	20	50	180
15	5	50	180

GA:MD: relación de goma arábiga y maltodextrina

7.5 Cuantificación de compuestos bioactivos

Se pesaron 200mg de las microcápsulas obtenidas y se les adicionó 10 ml de metanol acidificado (1%), las muestras se agitaron en una parrilla magnética por 10 min con la finalidad de romper las cápsulas. Posteriormente se centrifugaron las muestras a 3500 rpm en 10 min, se recuperó el sobrenadante y se guardó en tubos de plástico a 25°C, para técnicas posteriores. Metodología descrita y modificada por Leyva-López et al. (2024).

Las determinaciones de color, fenoles totales y actividad antioxidante (DPPH), se realizaron siguiendo las metodologías descritas en las secciones 7.3.1, 7.3.2 y 7.3.3.

7.5.1 Actividad de agua

La actividad de agua (a_w) se determinó utilizando un medidor de actividad de agua Aqualab (3TE, Decagón Decives, In, EE. UU.) Previamente calibrado con carbón activado ($a_w < 0.500$) y agua destilada. Las muestras se analizaron por triplicado según el método propuesto por Carrillo-Navas et al, (2010).

7.6 Morfología de microcápsulas mediante Microscopía Electrónica de Barrido

Para la evaluación morfológica de las microcápsulas se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), donde se llevaron diferentes tratamientos, montados en cintas de carbón doble cara, se recubrieron con una capa de oro durante 500 s, sobre un soporte de revestimiento de carbono (IB-12510CCH), posteriormente se llevaron a microscopía electrónica de barrido (con microscopio MEB; JEOL, Modelo IT300, Boston, MA, EE.UU) ubicado en la Escuela Superior de Apan- UA EH. Metodología descrita por Paredes-López et al. (1994).

7.7 Análisis estadístico

Se aplicó Método de Superficie de Respuesta para investigar las condiciones óptimas de microencapsulado de tuna tapona (*Opuntia robusta*), se empleó un Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) con 8 puntos factoriales (± 1), 6 puntos centrales (nivel 0) y 6 puntos axiales (± 1.68), dando un total de 15 corridas experimentales para evaluar la interrelación de las variables independientes y las de respuesta.

Para el diseño experimental se utilizó una temperatura de entrada (TE) (100°C, 140°C y 180°C) un porcentaje de sólidos (%) (5%, 12.5% y 20, relación GA:MD) (1:1). Se realizó un análisis de regresión sobre datos experimentales.

Los valores óptimos de variables independientes se analizaron mediante análisis de deseabilidad, técnica que asigna puntuación entre 0 (no deseable) y 1 (óptimo) y se eligen los factores que maximizan la puntuación (Bezerra, 2008). Se ejecutó en el software Design Expert v7.1.6 (Stat-Ease. Inc., MN, EE.UU.) para el proceso de optimización, análisis de regresión, cálculo de coeficientes de correlación y ANOVA.

Las variables de respuesta para la optimización fueron: actividad de agua, diferencia de color, compuestos fenólicos y actividad antioxidante DPPH.

Se encontraron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre la comparación de medias y se realizaron comparaciones múltiples en STATISTICA v10 utilizando la prueba de Tukey.

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1 Microencapsulación de extracto *Opuntia robusta*

Para la optimización de la microencapsulación de *Opuntia robusta* (OR) con goma arábica (GA) y maltodextrina (MD), se empleó un diseño experimental Box-Behnken, con tres factores de estudio: temperatura de entrada (TE), porcentaje de sólidos solubles totales (SST) y relación de material pared (GA:MD), el cual se muestra en la Tabla 3. Se observó una diferencia significativa ($p < 0.05$) de las variables independientes sobre las respuestas evaluadas: cambio total de color, fenoles totales, actividad DPPH, eficiencia de encapsulación y actividad de agua.

El análisis de varianza (ANOVA) de los factores de estudio sobre las variables de respuesta incluye, efectos principales (A: % de sólidos solubles totales, B: material pared mezcla GA:MD y C: Temperatura de entrada en el secador por aspersión), la interacción de factores (AB, AC, BC) y expresiones cuadráticas (A^2 , B^2 , C^2) (Tabla 4) A continuación, se analizará cada variable de respuesta para llegar al optimizado del microencapsulado de OR.

Tabla 3. Diseño experimental Box- Behnken de secado por aspersión para el extracto (Opuntia robusta).

Variables independientes					Variables dependientes				
Corrida	Sólidos Solubles Totales	Material pared (GA:MD)	Temperatura Entrada	Rendimiento	Fenoles Totales	a_w	Cambio Color	Eficiencia Encapsulación	AA DDPH
	(%)	(%)	(°C)	(%)	(mg EAG/100g)			(%)	($\mu\text{mol ET/g}$)
1	5	0	140	73.62	682	0.265	8.73	78.8	335.5
2	20	0	140	79.08	304	0.269	14.65	66.3	349.6
3	5	100	140	67.45	215	0.268	18.44	65.7	405.4
4	20	100	140	70.33	275	0.255	10.65	66.7	409.6
5	5	50	100	69.89	250	0.309	10.61	65.5	364.7
6	20	50	100	74.18	812	0.299	12.33	70.6	378.3
7	5	50	180	70.16	1006	0.196	15.92	79.8	362.1
8	20	50	180	73.85	100	0.185	13.54	61.3	385.7
9	12.5	0	100	74.53	850	0.335	7.25	63.8	331.3
10	12.5	100	100	68.72	858	0.322	5.38	74.5	393.1
11	12.5	0	180	76.82	1013	0.215	6.43	85.4	330.5
12	12.5	100	180	68.15	515	0.175	11.93	55.9	410.1
13	12.5	50	140	71.13	315	0.262	11.41	68.6	373.4
14	12.5	50	140	71.45	231	0.271	11.75	68.3	375.9
15	12.5	50	140	72.14	350	0.265	11.79	67.9	378.7

EAG= Equivalentes de ácido gálico, AA DPPH: Actividad Antirradical 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, ET= Equivalentes de Trolox.

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo polinómico cuadrático.

Término	Rendimiento	Fenoles Totales (FT)	a_w	Cambio de color (ΔE)	Eficiencia Encapsulación	Actividad Antirradical DPPH
Intercepto	72.1	298.667	0.2594	11.65	69.2733	372.26
A	2.04	-82.75	-0.00375	-0.31625	-3.1125	6.9375
B	-3.675	-123.25	-0.008	1.1675	-3.9375	33.9125
C	0.2075	-17	-0.06175	1.53125	1	2.625
AB		109.5		-3.4275	3.375	
AC		-367		-1.025	-5.9	
BC		-126.5		1.8425	-10.05	
A ²		-98.3333		3.41		
B ²		168.667		-1.9425		
C ²		341.667		-1.96		
Residual	6.72	13841.67	0.0016	0.889	10.5	10.5
R ²	0.9547	0.9902	0.9519	0.9949	0.9870	0.9870
R ² Ajustada	0.9424	0.9727	0.9388	0.9856	0.9773	0.9773
F	6.18	6361	0.0015	0.8018	10.26	10.26
p-valor	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Los valores de p mayores o iguales a 0.05 son significativos y se muestran en negrita.

A: Concentración de sólidos solubles totales (%), B: relación goma arábica: maltodextrina (GA:MD), C: Temperatura de entrada (TE), DPPH: 2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo.

8.2 Rendimiento de la microencapsulación

Los resultados de rendimiento de las microcápsulas se resumen en la Tabla 3. El rendimiento mínimo fue de 67.45% (SST= 5% y GA:MD= 1:0) mientras que el máximo fue de 79.08% (SST= 20% y GA:MD= 0:1). Esta relación nos permite determinar que valores mayores de SST y una mayor concentración de MD como material pared, se obtuvo mayor porcentaje de rendimiento (Figuras 6a y 6b). Esto se debe a la naturaleza del material pared, en este caso la GA entre las propiedades que tiene es la viscosidad, efecto aglutinante y espesante a diferencia de MD, en proporciones mayores puede provocar la deficiencia de recubrimiento en las microcápsulas, provocando que algunas gotas del extracto se adhieran a la pared del secador, evitando la evaporación total de la microencapsulación (Tan, 2015). Tolve et al. (2021) llegan a la misma conclusión, al investigar el rendimiento de los microencapsulados del extracto polifenólico rico en taninos utilizando como material pared MD y GA, el rendimiento osciló entre el 29.75% y el 48.92%, en donde el aumento de GA tuvo un efecto negativo en el rendimiento y por otro lado una mayor concentración de MD tuvo una correlación positiva. Otro factor determinante es la TE. En la Figura 6b se muestra que el rendimiento de encapsulación mostró una leve tendencia con el aumento de la TE. Shiga et al. (2004) observó que una mayor TE conduce a una mayor transferencia de calor y masa, lo que provoca que el agua se evapore de manera más rápida y exista un mayor rendimiento en las microcápsulas. Este comportamiento es similar a lo reportado por Miranda-Jara et al. (2024), donde observaron un mayor rendimiento en la microencapsulación de miel (*Apis mellifera*) con mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y MD como material pared, a una TE de 110°C vs 100°C, para ese trabajo se optimizó el proceso con TE de 120°C.

Estos resultados son dados a los términos A y B con una significancia de $p < 0.05$. Los coeficientes de determinación son $R^2 = 0.9547$ y R^2 ajustada=0.9424, estos valores confirmaron que el modelo matemático de la ecuación fue adecuado para predecir el rendimiento de las microcápsulas (Tabla 4).

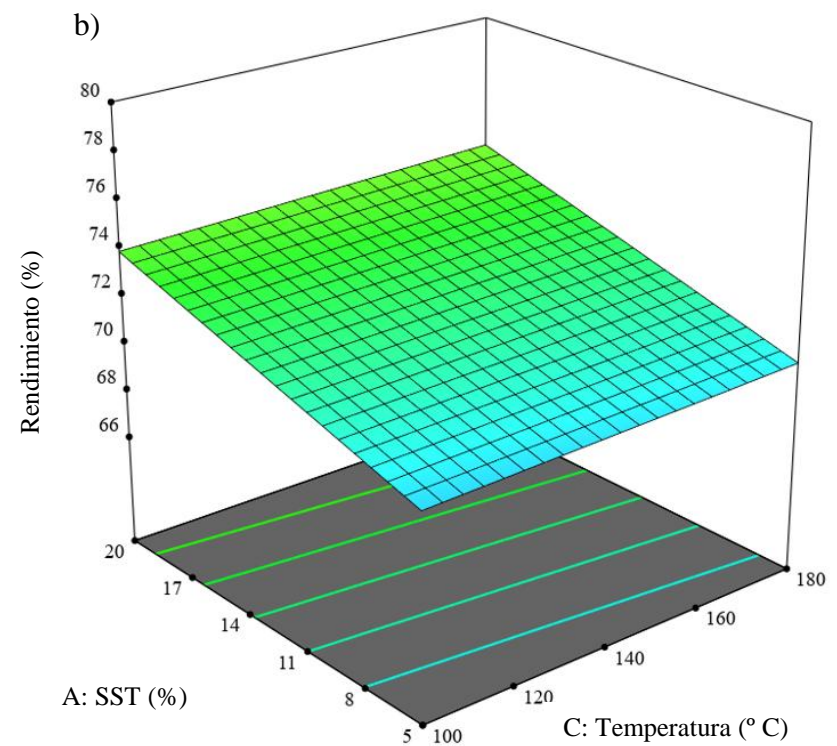
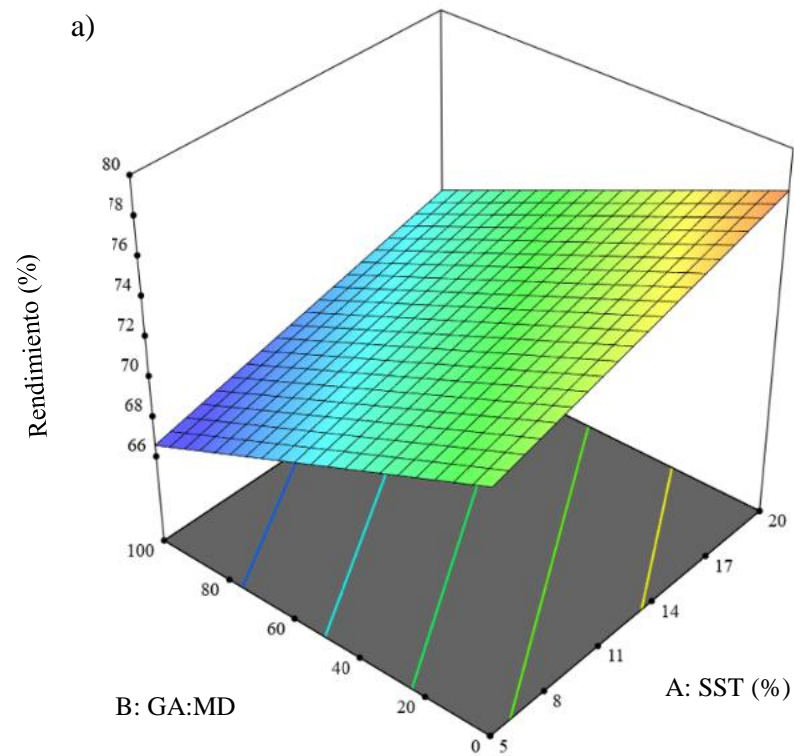


Figura 7. Modelo de superficie de respuesta 3D de Rendimiento en función de A: sólidos solubles totales (SST), B: materiales pared relación Goma Arábica: Maltodextrina (GA:MD) y C: temperatura de entrada (TE).

8.3 Fenoles totales

Los resultados de Fenoles Totales (FT) en las microcápsulas se presentan en la Tabla 4, donde se obtuvieron valores de 100 mg EAG/100 g a 1013 mg EAG/100 g. En la Figura 7a se observa la interacción, material de recubrimiento (GA:MD) vs SST, lo que indica que a menor concentración de SST y menor proporción de GA respecto a MD (GA:MD), se obtiene una mayor concentración de FT. Este comportamiento es atribuido a la capacidad de concentración de las mezclas, donde al disminuir la concentración de sólidos en la matriz se aumenta la disponibilidad de compuestos bioactivos (Estupinan-Amaya, 2022). Todorović et al. (2022) demostraron un comportamiento similar en la encapsulación del extracto de arándano utilizando GA:MD como agentes encapsulantes, donde mencionan que al aumentar SST y proporción de maltodextrina existe una limitación en la capacidad de encapsulación, disminuyendo la concentración de compuestos bioactivos.

Por otro lado, la Figura 7b muestra la interacción entre TE vs SST. Se observa que a bajas concentraciones de SST y altas temperaturas de entrada (TE) (160°C a 180°C) existe una mayor concentración de FT, tal como se describe en la Tabla 3. Antony et al. (2022) mencionan que la concentración de compuestos fenólicos está en función a la temperatura, ya que dependen de la naturaleza química del compuesto y la especie vegetal, algunos compuestos fenólicos se encuentran inmersos en el tejido de las especies vegetales y pueden liberarse al aumentar temperaturas. Esto coincide con lo reportado por Sarabandi et al. (2019) quienes explican que la encapsulación de polvo de berenjena utilizando GA:MD como material pared, la concentración de compuestos bioactivos se vio influenciada por la TE del secador por aspersión (140-170 °C), los polvos con mayor concentración de compuestos fenólicos totales se obtuvieron al utilizar TE de 170 °C.

En la Figura 8c se muestra que el material pared (GA:MD) vs la temperatura de entrada (TE) presentan una interacción negativa significativa (Tabla 4). Se puede observar que, al aumentar la temperatura de entrada en el secador por aspersión, alrededor de 180°C y baja concentración de GA (alta concentración MD) se presenta un mayor contenido de FT. Este comportamiento es similar a lo reportado por Iturri et al. (2021) quienes concluyeron que ciertos compuestos fenólicos se mantienen estables a temperaturas de 160 a 210°C. De igual manera la MD permite formar una matriz que evite la migración y degradación de

compuestos fenólicos, en combinación con otros materiales pared donde la MD sea el material que predomine, dando como resultado una mayor concentración y protección de FT. De igual manera Lourenço et al. (2020) microencapsularon extracto hidroalcohólico de cáscara de piña rico en compuestos fenólicos, utilizando como material pared MD, inulina y goma arábica, demostraron que la concentración de fenoles totales tuvo mayor adherencia cuando se utilizó MD en mayor proporción con respecto a GA. Esto se atribuye a las propiedades de ambos agentes encapsulantes: baja viscosidad de MD y alta capacidad emulsionante de GA, en proporciones adecuadas permiten la protección de compuestos bioactivos en la microencapsulación.

Estos resultados son dados en función a términos estadísticos A y B; interacciones de AB, AC, BC y términos cuadráticos A^2 , B^2 , C^2 con una significancia de $p < 0.05$. Los coeficientes de determinación R^2 fueron de 0.9902 y de R^2 ajustada de 0.9727 para FT (Tabla 4). Estos valores demuestran que el modelo de regresión presenta un ajuste adecuado, ya que se observa una variabilidad del 97% este efecto explica de manera significativa las variables independientes sobre los compuestos fenólicos.

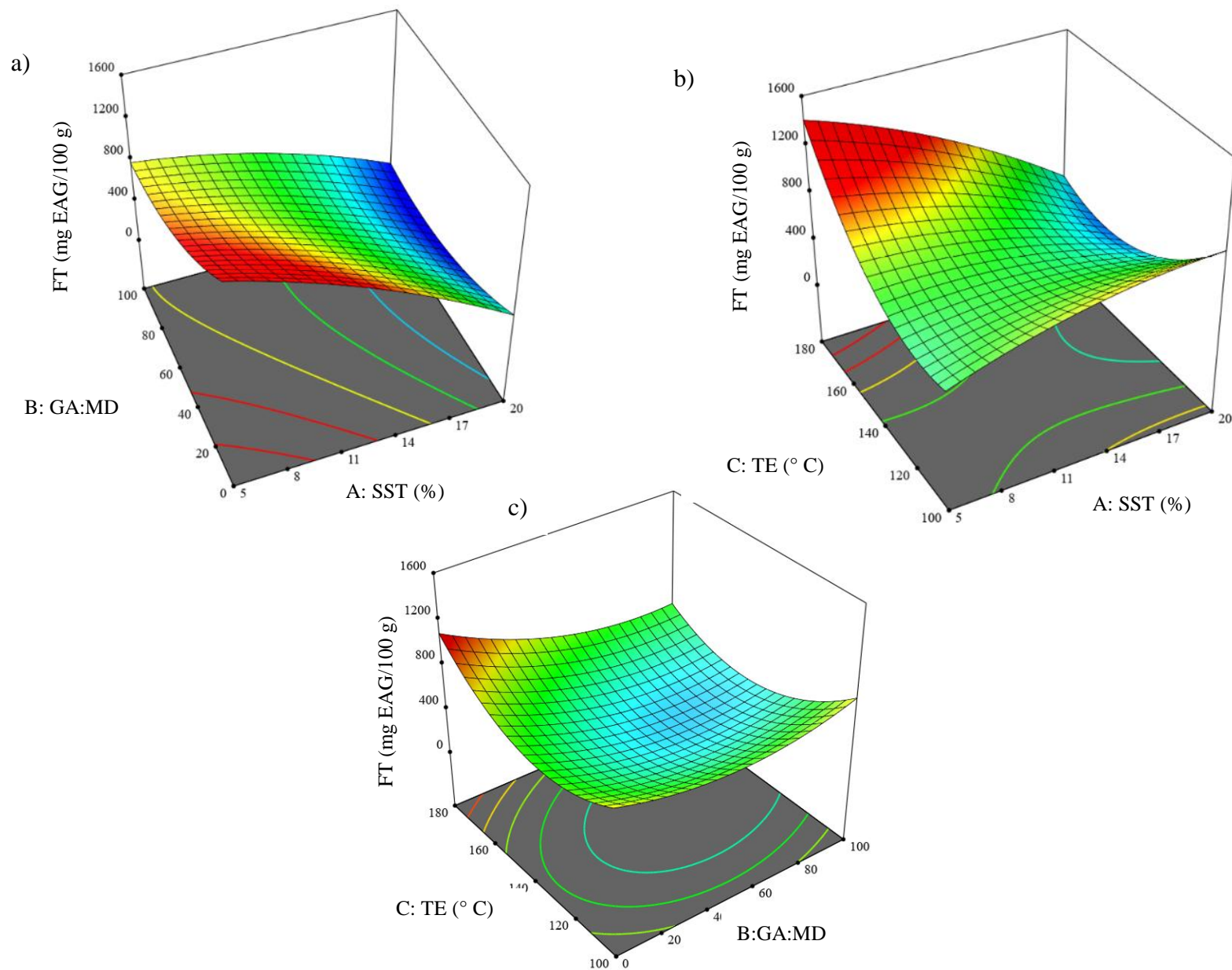


Figura 8. Modelo de superficie de respuesta 3D de Fenoles totales en función de A: sólidos solubles totales (SST), B: materiales pared relación Goma Árabe: Maltodextrina (GA:MD) y C: temperatura de entrada (TE).

8.4 Actividad de agua

La actividad de agua (a_w) es la propiedad fisicoquímica que tienen los alimentos para mantenerse en equilibrio, esta propiedad influye en el almacenamiento y proliferación de microorganismos. Su valor oscila de 0 a 1, donde el valor de 0.98 es considerado un ambiente ideal para el crecimiento de la mayoría de los microorganismos patógenos y el valor de < 0.40 es el ideal para maximizar la vida útil de los microencapsulados ya que estabiliza el crecimiento de microorganismos (Anfaco-Cecopesca, 2023;CSIRO, 2023). Los valores de a_w en los tratamientos fueron de 0.175 a 0.335 (Tabla 3), de acuerdo con Fernández et al. (2018), los valores <0.328 son considerados óptimos para polvos ya que microbiológicamente son más estables.

El contenido de a_w está en función del término lineal de temperatura entrada en el secador (C), existiendo una correlación negativa (Tabla 4).

El análisis de las Figuras 8a y 8b muestra las interacciones SST vs TE y SST vs GA:MD respectivamente. En la Figura 8a se observa que, a mayor temperatura y menor concentración de sólidos, se presenta un incremento en a_w (interacción A y C, Figura 8a). Por otro lado, en la figura 8b (interacción B y A) no se muestra diferencia significativa, ya que la concentración de sólidos y materiales pared no presentan influencia en la a_w . Estos hallazgos son similares a lo reportado por Pérez et al. (2009) quienes en su estudio obtuvieron valores de 0.108 a 0.743 a_w , este comportamiento se atribuye a la cantidad de sólidos presentes, ya que una alta concentración de sólidos dificulta la disolución de materiales pared, por ende, la extracción de agua y la estabilidad de la microcápsula se pierde por completo. Por otro lado, Ríos-Hernández et al. (2024) nos mencionan que la temperatura juega un valor importante ya que una mayor temperatura aporta energía al agua disponible, favoreciendo su evaporación, en dicho estudio los valores obtenidos fueron de 0.23 a 0.33, lo que demostró buena estabilidad a sus microencapsulados.

En el análisis estadístico (Tabla 4), los coeficientes de determinación R^2 (0.9519) y R^2 ajustada (0.9388), demuestran que el modelo es altamente confiable y preciso, con variabilidad del 95% en los datos experimentales ya mencionados

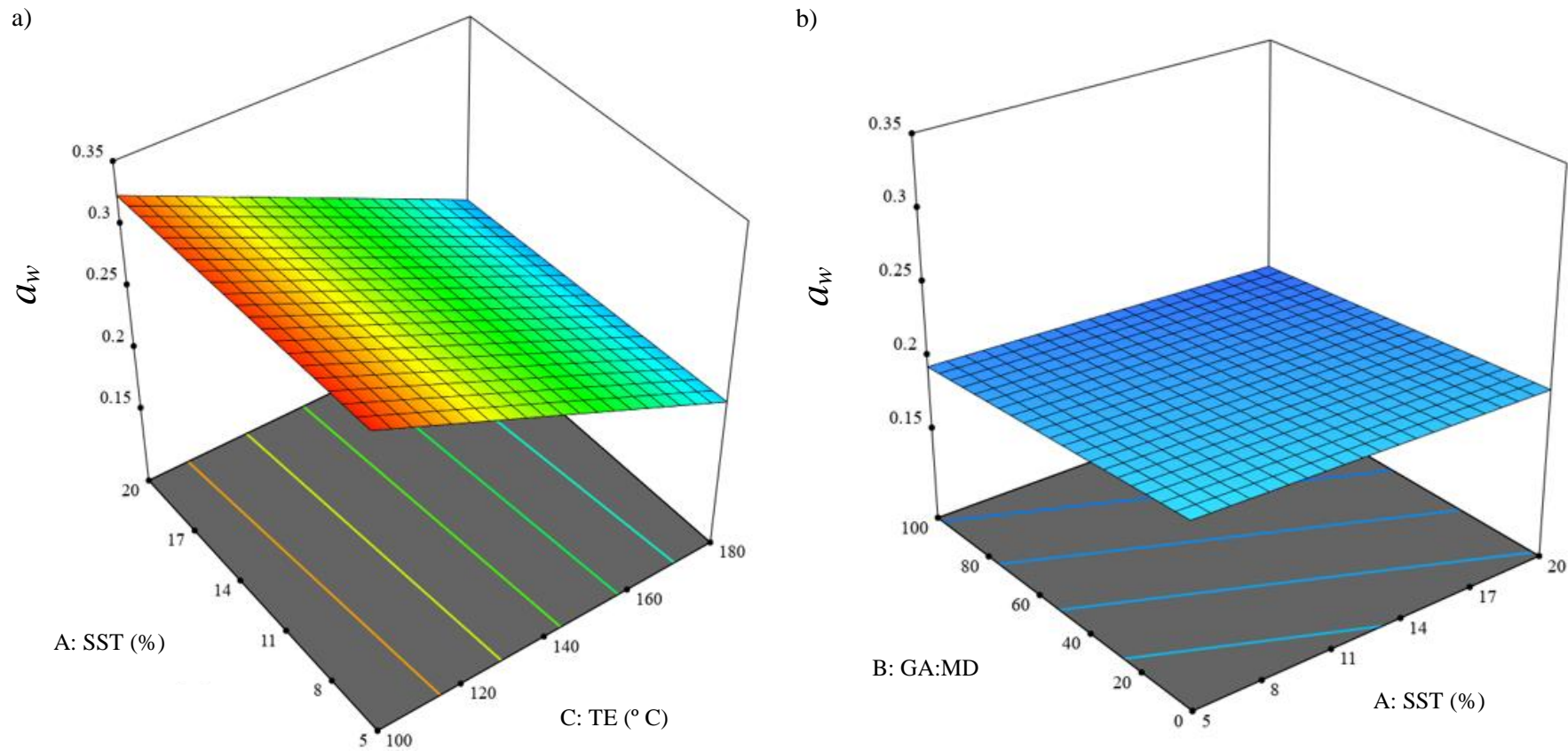


Figura 9. Modelo de superficie de respuesta 3D de a_w . a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE) y b) relación Goma Arábica: Maltodextrina (GA:MD) vs Sólidos Solubles Totales (SST).

8.5 Cambio de color

La diferencia de color (ΔE) surge desde la necesidad de distinguir, percibir y reconocer los colores, para ello se utiliza un modelo matemático que permita comparar de forma subjetiva los colores obtenidos para facilitar el control de calidad (Mokrzycki, 2011). Determinar si ΔE es menor o igual a 1 indicará que el aumento en el color de la muestra no es perceptible para el ojo humano. Cuando los valores ΔE están entre 1 y 2, el color es perceptible mediante una observación atenta. Sin embargo, si los valores ΔE determinados son superiores a 2, dentro de un intervalo de 2 a 10, la diferencia de color puede percibirse a simple vista Sharma et al. (2005)

En la figura 9a, se puede observar que a menor concentración de SST y mayor relación de GA:MD existe un mayor ΔE , esto podría deberse a que los pigmentos presentes en las microcápsulas en concentraciones bajas de material pared (SST) quedan más expuestos, y siendo más susceptibles a ciertas reacciones, aunque GA como material pared funciona como recubrimiento, en concentraciones elevadas puede desestabilizar dichos compuestos, aumentando así el cambio de color (Wei, 2022; Do, 2018). Este comportamiento es similar al trabajo realizado por Jiménez-Aguilar et al. (2011) donde observaron que la variación de color es mayor cuando hay concentraciones bajas de SST y hay un aumento en la concentración de goma de mezquite como material pared en la microencapsulación del extracto de arándano.

Por otro lado, en la Figura 9b (SST vs TE) se observa que a una alta concentración de SST y una baja TE se presenta un ligero aumento en el cambio de color en las microcápsulas. Este comportamiento podría deberse al aumento en el tiempo de secado con temperaturas alrededor de 140°C, existe una ligera movilidad molecular, degradación térmica y pardeamiento de las microcápsulas, desestabilizando el color (Verma, 2015). Estos resultados son similares a lo reportado por Rigon et al. (2016) quienes encapsularon extracto de mora acidificado con ácido cítrico al 2% utilizando como material pared goma arábica y povidex, donde obtuvieron un cambio de color al aumentar la concentración de SST y disminuir la TE.

En la Figura 9c (TE vs GA:MD), se observa que a mayor concentración de MD y mayor TE el cambio de color aumenta. De acuerdo con Mudgil et al. (2024) este comportamiento podría

atribuirse a que un aumento gradual de temperatura puede presentar reacciones de pardeamiento, degradación de ciertos compuestos fenólicos que se despolimerizan.

En el análisis estadístico los resultados se observan en la Tabla 4, las variables de estudio muestran que están en función de los términos lineales para B y C; de las interacciones entre los factores (AB, AC y BC) y de los términos cuadráticos (A^2 , B^2 y C^2), con una significancia de $p < 0.05$. Los coeficientes de determinación R^2 son de 0.9949 y R^2 ajustada de 0.9856. Estos valores demuestran que el modelo de regresión explica adecuadamente el efecto de las variables con respecto a la diferencia de color en las microcápsulas. Es decir, más del 99% de la variabilidad puede ser explicado por MSR.

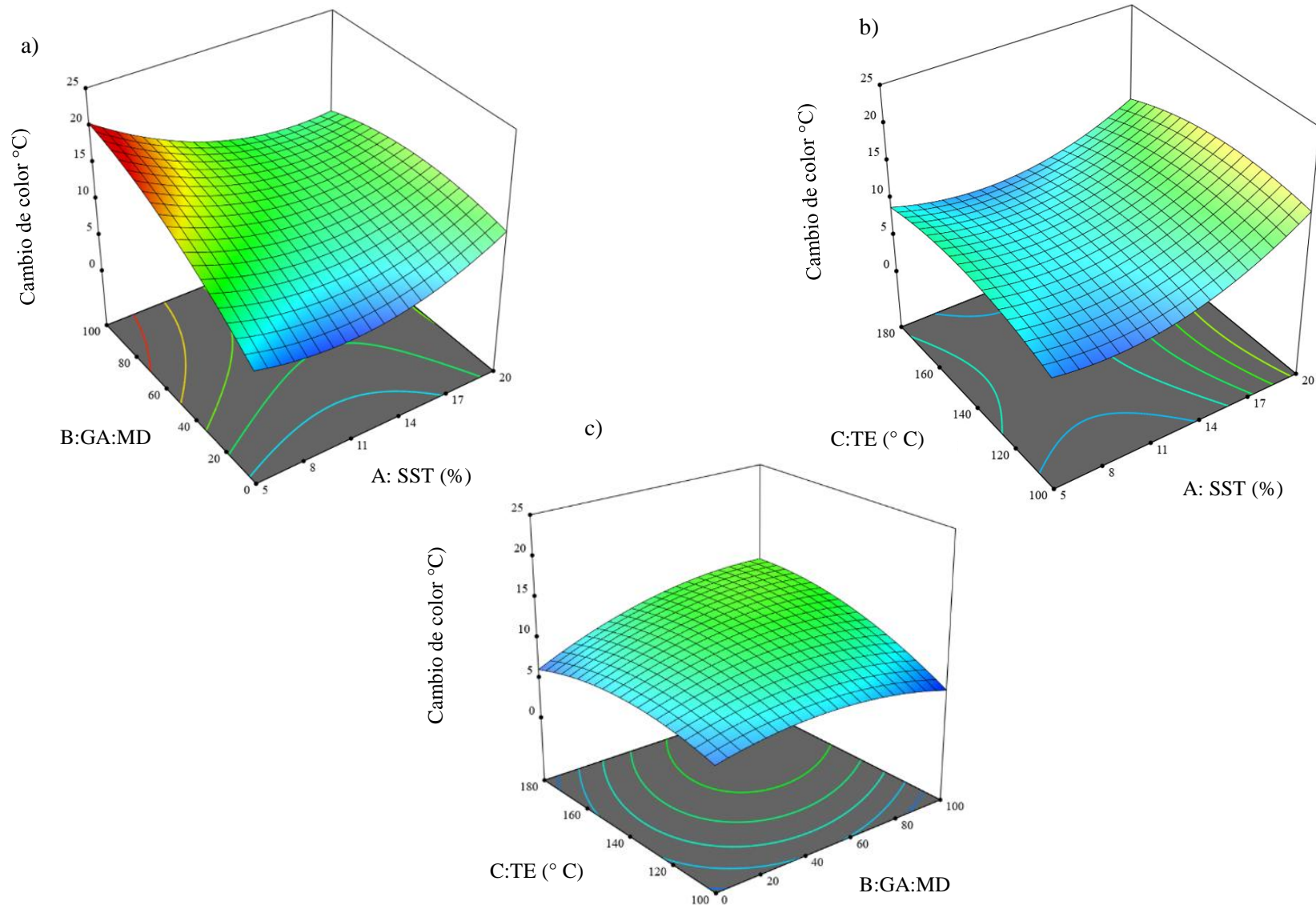


Figura 10. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre diferencia de color de las microcápsulas. a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs relación Goma arábica: Maltodextrina (GA:MD) b) Temperatura de entrada (TE) vs Sólidos Solubles Totales (SST), c) Temperatura de entrada (TE) vs relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD).

8.6 Eficiencia de encapsulación

Los valores obtenidos sobre la eficiencia de encapsulación de las microcápsulas del extracto de tuna taponan se encuentran en la Tabla 3, dichos valores oscilan entre 55.9% y 85.4% estos valores fueron similares a lo reportado por Do Nascimento et al. (2024) donde encapsularon extracto acuoso de Bauhinia (conocida como pata de vaca), usando como material pared MD y pectina, obteniendo valores que van de 60% a 83% respectivamente

En la Figura 10a se observa que concentraciones altas de MD con respecto a la GA como material pared, la EE disminuye ligeramente. Xiao et al. (2022) atribuye este comportamiento a que la MD por sí sola tiene una baja capacidad emulsionante y al combinarse con otros materiales, como la goma arábiga, esto ayuda a aumentar la concentración de sólidos formando un revestimiento alrededor de las gotas secas durante el secado por aspersion.

En las figuras 10b y 10c se observa que TE altas, la EE aumenta significativamente. Este comportamiento se debe a que las temperaturas elevadas evaporan la humedad más rápido (existe un gradiente de temperatura mayor) creando una barrera que protege el núcleo con el exterior de la microcápsula (Tao et al. 2024; Piñón-Balderrama et al. 2020). Estos estudios son similares a lo reportado por Verma et al. (2015) quienes demostraron que el incremento de TE aumentó drásticamente el rendimiento, higroscopicidad y EE, en la microencapsulación de zumos de distintas frutas (mango, plátano, naranja, guayaba, sandía y piña), de igual manera demostraron que la concentración de MD tuvo un efecto negativo en la higroscopicidad de los polvos y en el rendimiento debido a la viscosidad que presenta dicho material pared. En otro estudio reportado por Sarabandi et al. (2019) demuestran un efecto similar en la microencapsulación del extracto de berenjena utilizando GA:MD como material pared, ya que al aumentaron de 140 °C a 170 °C TE y observaron un EE de encapsulación con un aumento de 53.03% a 66.47%.

En cuanto el análisis estadístico se observa en la Tabla 4 donde demuestra que los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustada fueron de 0.9870 y 0.9773; la EE está en función a los términos lineales A, B y C, con interacción de AB, AC y BC, con una significancia de $p < 0.05$.

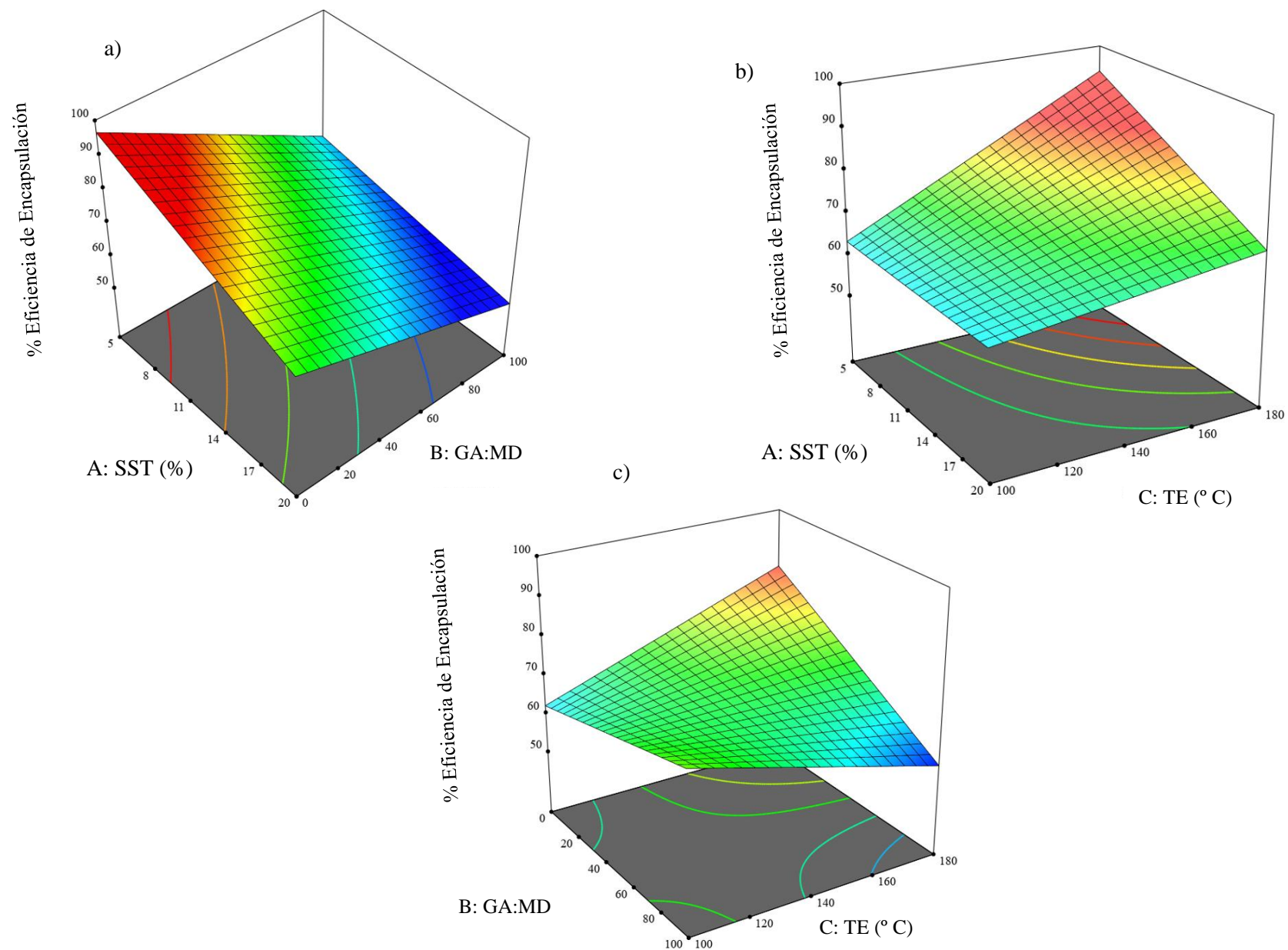


Figura 11. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre eficiencia de encapsulación. a) Sólidos Solubles Totales (SST) vs relación Goma arábica: Maltodextrina (GA:MD), b) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE) y c) relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD) vs Temperatura de entrada (TE)

8.7 Actividad antirradical DPPH

Los valores obtenidos en la actividad antirradical DPPH se observan en la Tabla 3, estos valores van de un intervalo de 330.5 a 410.1 $\mu\text{mol ET/g}$. En el análisis estadístico se observa que los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustada fueron de 0.9870 y 0.9773, esto indica que el modelo es altamente confiable. Esta variable de respuesta está en función de los términos lineales de A y B, con una significancia de $p < 0.05$.

En la Figura 11a se observa la interacción de GA:MD vs SST donde explica que a una relación 1:0 de GA:MD y concentraciones elevadas de SST, la actividad antirradical DPPH es mayor. Las microcápsulas formadas con la mezcla GA:MD tienen una alta capacidad antioxidante, y es mayor conforme aumenta la concentración de GA en la mezcla, lo que indica una mayor protección. Esto se puede relacionar con las características estructurales de los radicales libres y las interacciones químicas con MD-GA (de Araújo et al. 2020). Similar comportamiento fue reportado por Laureanti et al. (2023) donde encapsularon la mezcla de extracto de pimienta rosa (*Schinus terebinthifolius*) con extracto de propóleo verde (*Baccharis dracunculifolia*) y se observó que el material pared GA-MD resultó en un aumento de aproximadamente 31% en la inhibición del radical DPPH, en comparación con el control (maltodextrina). Una mayor proporción de GA respecto a MD, aumenta la protección del núcleo, da firmeza y estabilidad a las microcápsulas (Velazquez et al., 2021).

Por otro lado, en la Figura 11b se muestra la interacción SST vs TE, esto indica a medida que aumenta la concentración de SST y la TE, la actividad antirradical DPPH es mayor. Este comportamiento ocurre porque una mayor concentración de SST en las microcápsulas mejora la retención de compuestos antioxidantes (Mutavski et al. 2025). De acuerdo a lo reportado por Medina et al. (2025) el aumento en la TE no presentó ningún efecto en la actividad antirradical, ya que algunos compuestos antioxidantes se muestran estables a altas temperaturas. Este comportamiento es similar a lo reportado por Seyrekoğlu et al. (2024) quienes encapsularon extracto de hierba de San Juan (*Hypericum perforatum*), donde se obtuvo un porcentaje de 58.56% en la inhibición de radical DPPH a una TE de 180°C, relación 1:1 de GA:MD.

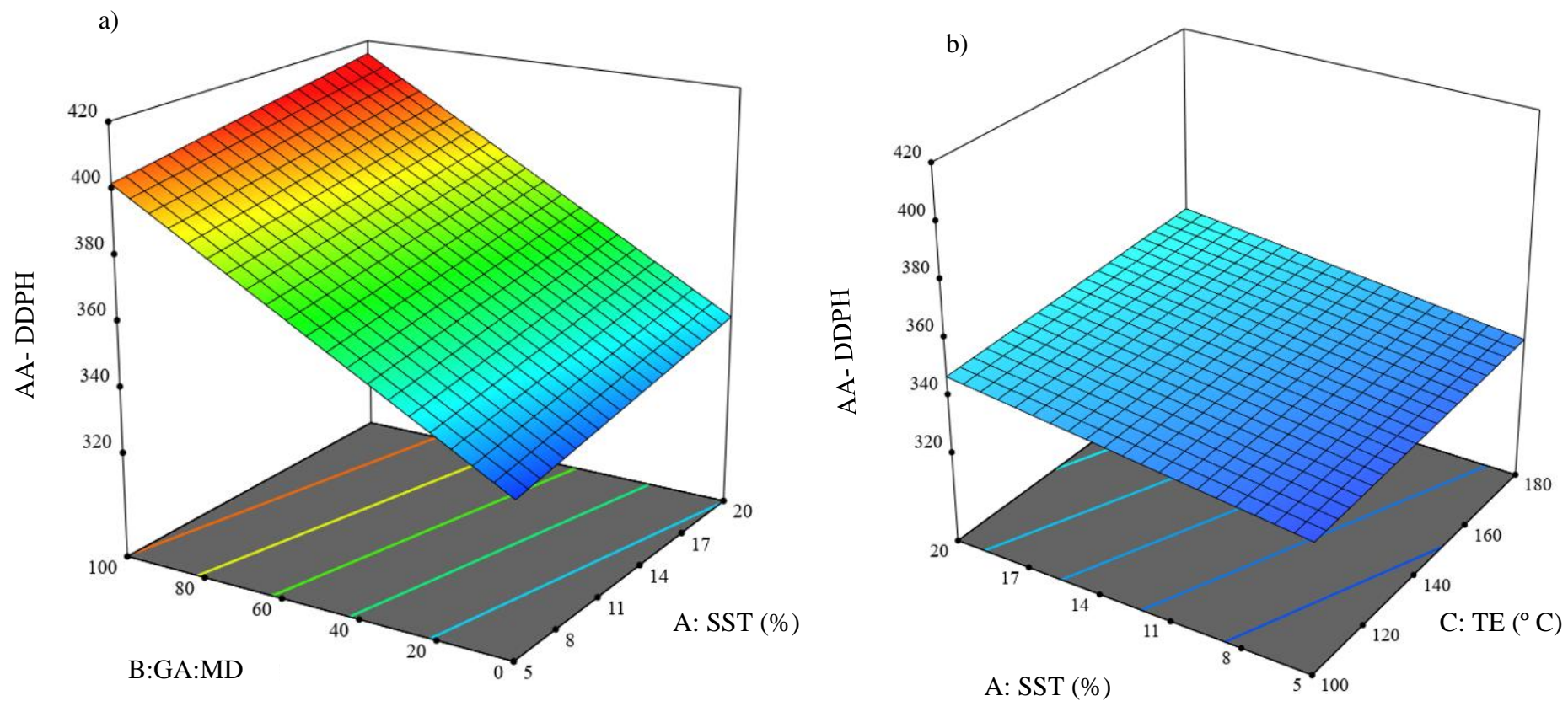


Figura 12. Modelo de superficie de respuesta 3D sobre eficiencia de encapsulación. a) relación Goma Arábica y Maltodextrina (GA:MD) vs Sólidos Solubles Totales (SST) y b) Sólidos Solubles Totales (SST) vs Temperatura de entrada (TE).

8.8 Optimización y caracterización morfológica

La optimización se refiere a los parámetros de secado por aspersión para obtener microcápsulas con alta retención de FT, alta actividad antioxidante antirradical DPPH, altos rendimientos y EE, la mínima a_w y la menor ΔE (Tabla 5). Las condiciones óptimas son consideradas en función de la mayor deseabilidad. Los modelos estadísticos utilizados para optimizar los parámetros son variables, según las condiciones de cada estudio. Este estudio de microencapsulación mediante secado por aspersión, el diseño obtenido tuvo una deseabilidad de 0.823, similar a lo reportado por Leyva-López et al. (2024), Başığit et al. (2020) y Rosales-Chimal et al. (2023), para la obtención de microcápsulas mediante secado por aspersión. Las condiciones de optimización fueron de 7.7% de SST, GA:MD (22.3: 77.7) y 180 °C de temperatura de entrada en el secador, en la obtención de microencapsulados.

La caracterización morfológica de los optimizados de las microcápsulas del extracto de tuna (*Opuntia robusta*) con MD:GA como material pared se estudió utilizando microscopía electrónica de barrido (MEB) a diferentes ampliaciones (250x, 500x, 1000x y 2500x). Esto se realizó para conocer la forma, estructura y características de la superficie.

La Figura 12 presenta micrografías de las microcápsulas bajo las condiciones óptimas. Las micrografías revelan partículas de distintas formas, aglomeración y ciertas grietas en la superficie. Las depresiones creadas en algunas superficies pueden estar relacionadas con la contracción y colapso de las gotas durante las etapas de secado y enfriamiento (Frascareli et al., 2012). Según la barra de la escala de MEB, la mayoría de las microcápsulas no son uniformes en tamaño y cada partícula varía de 10 a 25 micrómetros. Pero, de todos modos, la falta de fractura de la pared en la superficie de la microcápsula confirma que la encapsulación se ha realizado con éxito. Según Otálora et al. (2023) estas características pueden atribuirse a las características fisicoquímicas de GA:MD como material de recubrimiento (ya que suelen proporcionar viscosidad), a concentraciones elevadas de SST, un aumento en la TE.

En la Figura 12B se observa con más definición microcápsulas aglomeradas, mostrando algunos pliegues y ondulaciones leves, según Karaaslan et. al (2021) demuestran que este comportamiento sucede a las propiedades higroscópicas del material de pared utilizado y a la concentración de SST. En la figura 12C las microcápsulas se observan de forma muy

definida ya que se aprecian de forma individual, con buena estructura superficial y esféricas de distintos tamaños, esto se atribuye a una buena atomización, concentraciones equilibradas de GA:MD, una correcta evaporación de agua (Seyrekoğlu F. T., 2024). En la figura 12D las microcápsulas se observan en su mayoría lisas con algunos bordes, partículas pequeñas aglomeradas a las partículas grandes dando estructura. Diversos autores han reportado que este comportamiento se atribuye a la TE que se utilizó, a las mezclas de GA:MD y a la presión que se ejerció en el proceso de atomización (Tonon, 2011; Mohammadalinejad et al. 2021).

En la Tabla 6, se muestran los resultados basales y porcentajes de asertividad del Modelo de Superficie Respuesta (MSR), observando predicciones entre 86.3% y 97.7% lo que podríamos concluir que el modelo es confiable.

Tabla 5.Optimización, valores determinados.

Nombre	Objetivo	Límite inferior	Límite superior	Importancia
A: Sólidos	Dentro del rango	5	20	3
B: GA:MD	Dentro del rango	0	100	3
C: Temperatura	Dentro del rango	100	180	3
Rendimiento	Dentro del rango	60	90	4
Fenoles Totales (FT)	Maximizar	800	1100	4
a_w	Dentro del rango	0.2	0.4	3
Cambio de color (ΔE)	Dentro del rango	0	10	1
Eficiencia de Encapsulación (EE)	Dentro del rango	70	90	3
Actividad Antirradical DPPH	Maximizar	250	410	3

Tabla 6. Caracterización física y química de microcápsulas obtenidas bajo condiciones óptimas.

Parámetro	Predicción	Resultado basal	Asertividad (%)
Rendimiento (%)	73.1	75.6 ± 3.3	96.7
Compuestos fenólicos totales (mg EAG/ 100g)	1100	950 ± 57	86.3
a _w	0.204	0.225 ± 0.002	90.7
Cambio de color (ΔE)	10.0	11.3 ± 0.88	88.5
Eficiencia de encapsulación (EE) (%)	85.0	78.2 ± 5.32	92.0
Actividad antirradical DPPH (mmol ET/ g)	351.6	367.5 ± 22.4	95.7

^a EE fue determinada como el porcentaje de retención de fenoles totales.

°: Promedio de tres repeticiones ± error estándar.

EAG: Equivalentes de Ácido Gálico.

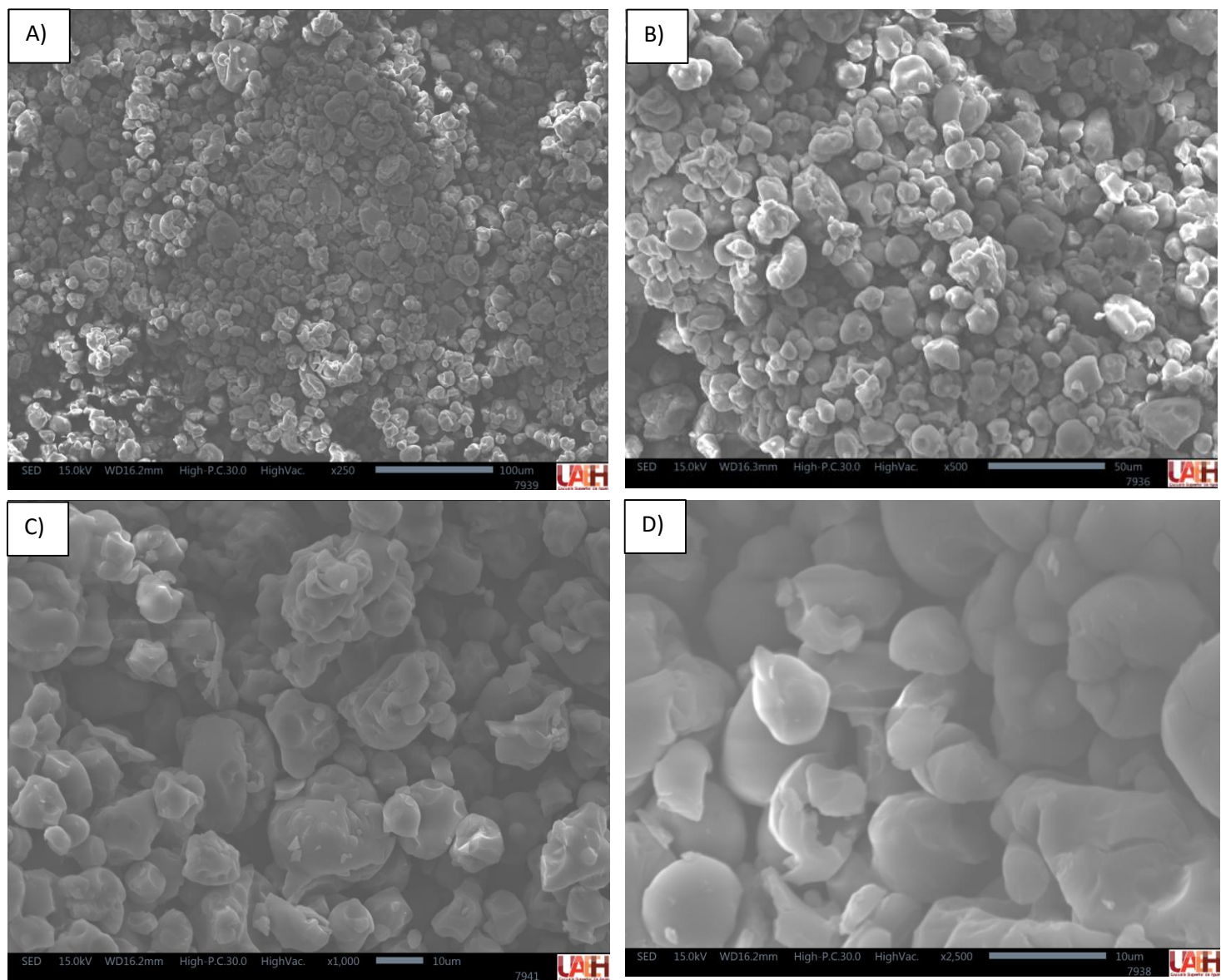


Figura 13. Micrografía MEB de microcápsulas de extracto de tuna tapona con GA:MD como material de recubrimiento, a 250x (A): 500x (B): 1000x (C) y 2500x (D).

9. CONCLUSIONES

1. A través del diseño Box-Behnken y el ajuste del Modelo de Superficie de Respuesta permitió establecer las condiciones óptimas de microencapsulación del extracto de tuna tapona (*Opuntia Robusta*), integrando tres factores: sólidos solubles totales (SST), relación de material pared (goma arábica; maltodextrina; GA:MD) y temperatura de entrada (TE), por lo que los resultados obtenidos fueron de interés para las diferentes variables de respuesta.
2. El uso de diferentes concentraciones de material pared en la obtención de microcápsulas mediante secado por aspersión tiene efectos significativos sobre el rendimiento, concentración de fenoles totales, actividad antirradical DPPH, eficiencia de encapsulación, actividad de agua y cambio de color.
3. Las variables tomadas para aplicar la ecuación de predicción (deseabilidad), con lo obtenido en el laboratorio, muestran una predicción de más del 86%, lo que concluye que las condiciones para la encapsulación del extracto de tuna tapona (*Opuntia robusta*), obtenidas por MSR, son precisas y confiables.
4. La caracterización morfológica de las microcápsulas demostró una estructura morfológica bien definida y uniforme, gracias a las concentraciones adecuadas de material pared, a la concentración de sólidos solubles totales y a la temperatura de entrada en el secador por aspersión.
5. Los resultados obtenidos en este estudio podrían contribuir a la protección de compuestos bioactivos de interés, con futuras aplicaciones en el área de los alimentos, específicamente en el desarrollo de alimentos funcionales.

11. REFERENCIAS

- Abd El-Kader, A. &. (2020). Encapsulation techniques of food bioproduct. *Egyptian Journal of Chemistry*,, 63(5), 1881-1909.
- Aghbashlo, M. M. (2013). Influence of wall material and inlet drying air temperature on the microencapsulation of fish oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1561-1569.
- Albuquerque, T. G. (2020). Prickly pear. In *Nutritional composition and antioxidant properties of fruits and vegetables*, (pp. 709-728).
- Al-Hamayda, A. A.-J. (2023). Advances in microencapsulation techniques using Arabic gum: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products*,, 205, 117556.
- Anfaco-Cecopesca. (24 de 08 de 2023). *La Actividad de Agua: Fundamentos y Aplicaciones*. Obtenido de <https://anfaco.es/wp-content/uploads/2023/07/actividad-agua.pdf>
- Antony, A. &. (2022). Effect of temperatures on polyphenols during extraction. *Applied Sciences*, 12(4), 2107.
- Aragüez, Y. P.-R. (2018). Influence of maltodextrin-gum arabic and inlet air temperature on the spray drying of concentrated orange juice. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 27-33.
- Araujo, H. C. (2020). Effect of maltodextrin and gum arabic on antioxidant activity and phytochemical profiles of spray-dried powders of sapota (*Manilkara zapota*) fruit juice. *Drying Technology*, 39(3), 392-404.
- Archaina, D. V.-G.-B. (2019). Physical and functional properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract spray dried with maltodextrin-gum arabic mixtures. *Journal of Food Processing and Preservation*,, 43(9), e14065.
- Atgié, M. G. (2019). Gum Arabic in solution: Composition and multi-scale structures. *Food Hydrocolloids*, 91, 319-330.
- Barrera, J. L. (2011). Producción y comercialización de tuna en fresco bajo diferentes modalidades en Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 28, 605-614.
- Başıyigit, B. S. (2020). Microencapsulation of sour cherry oil by spray drying: Evaluation of physical morphology, thermal properties, storage stability, and antimicrobial activity. 364, 654-663.
- Bezerra, M. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*,, 76(5), 965-977.

- Bonilla, B. E. (2020). Análisis económico de productores y comercializadores de nopal en el Valle de Teotihuacán. *RICEA Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración*, 9(17), 72-108.
- Calderón-Oliver, M. &.-A. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499.
- Carmona, J. C. (2021). Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt. *Lwt*, 138, 110672.
- Carneiro, H. C. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of food engineering*, 115(4), 443-451.
- Castro Ramírez R. J., A. V. (2022). Optimización en la extracción de antioxidantes de la cáscara de tuna morada (*Opuntia ficus – indica*) de Carhuaz,. *Cátedra Villareal Posgrado*, 93-103. doi:<https://doi.org/10.24039/rcvp2023221701>
- CSIRO. (2023). *Food preservation methods* . Obtenido de Division of Food Science and Technology.: https://pmp-errc-ars-usda-gov.translate.google.com/translate/a/wateractivity.aspx?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Curiel, L. G. (2024). Potencial nutricional y terapéutico de la tuna y de sus subproductos: Un panorama general de su composición química y aplicaciones. *Biología y Sociedad*, 7(14), 26-43.
- de Barros Fernandes, R. V. (2014). de Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., & Botrel, D. A. *Carbohydrate polymers*, 101, 524-532.
- Delshadi, R. B. (2020). Micro and nano-encapsulation of vegetable and essential oils to develop functional food products with improved nutritional profiles. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 72-83.
- Dhakal, S. P. (2020). Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review. *Food Research International*, 137, 109326.
- Díaz-Montes, E. (2023). Wall materials for encapsulating bioactive compounds via spray-drying: A review. *Polymers* 15, (12), 2659.
- Díaz-Montes, E. C.-M.-L. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 17-28.
- Díaz-Montesa, E. C.-M.-L. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática Encapsulation of bioactive compounds: a systematic review. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 17-28.

- Do Nascimento Remigio, M. S.-J.-C. (2024). Spray-Drying Microencapsulation of Phenolic Compounds from *Bauhinia unguolata* L. Var. *Obtusifolia* Aqueous Extract: A Comparative Study Using Different Wall Materials. *Pre prints. org*, 31.
- Do, H. T. (2018). Effects of spray-drying temperatures and ratios of gum arabic to microcrystalline cellulose on antioxidant and physical properties of mulberry juice powder. *Beverages*, 4(4), 101.
- Ecojardín-UNAM. (26 de Junio de 2012). *Ecojardín-UNAM*. Obtenido de ecojardinunam.wordpress.com/nopal-tapon/.
- Esteban Cortina, A. (2020). Propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal químicamente modificado. *Tesis*. Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas, Xalapa, Veracruz.
- Estupinan-Amaya, M. F.-C. (2022). Evaluation of mixtures of maltodextrin and gum Arabic for the encapsulation of Andean blueberry (*Vaccinium meridionale*) juice by freeze-drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 7379-7390.
- Eun, J. B. (2020). A review of encapsulation of carotenoids using spray drying and freeze drying. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(21), 3547-3572.
- Fernández Bernabé, M. C. (2018). Evaluación de efecto protector de dos biopolímeros sobre la estabilidad fisicoquímica de microcápsulas de col morada (Doctoral dissertation. *Tesis Doctoral*. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas., Región Córdoba-Orizaba.
- Finotelli, P. V.-L. (2005). Microencapsulation of ascorbic acid in maltodextrin and capsul using spray-drying. *In Second mercosur congress on chemical engineering*, 12.
- Fortes, Y. A. (2022). Microencapsulación de un saborizante de plátano. *Tecnología de Alimentos*, 32(3), 1-6.
- Frascareli, E. S. (2012). Efecto de las condiciones de proceso en la microencapsulación de aceite de café mediante secado por aspersión. *Procesamiento de alimentos y bioproductos*, 90 (3), 413-424.
- G. Sharma, W. W. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations,. 30(1) (2005). 21-30, .
- Gaona, E. G. (2024). El Nopal: ecofisiología del nopal en México. *El Nopal: ecofisiología del nopal en México*.
- Gómez-Espinoza, D. R.-F.-M.-O.-P. (2024). Microencapsulation of betalains obtained from garmbullo fruit (*Myrtillocactus geometrizans*) by spray drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12.

- González-Ponce, H. A.-S.-S.-M.-H.-J. (2016). Hepatoprotective effect of *Opuntia robusta* and *Opuntia streptacantha* fruits against acetaminophen-induced acute liver damage. *Nutrients*, 8(10), 607.
- Guo, J. L. (2020). Microencapsulation of curcumin by spray drying and freeze drying. *Lwt*, 132, 109892.
- Infografías JB – Instituto de Biología, U. (2018-2019). *Infografías del Jardín Botánico del IBUNAM, Infografías JB*,. Recuperado el 26 de 06 de 2025, de "Nopal tapón.": infografiasjb.ib.unam.mx/nopal-tapon.html.
- Iturri, M. C. (2021). Microparticles of *Eugenia stipitata* pulp obtained by spray-drying guided by DSC: An analysis of bioactivity and in vitro gastrointestinal digestion. . *Food Chemistry*, 334, 127557.
- Jiménez-Aguilar, (2011). olor and chemical stability of spray-dried blueberry extract using mesquite gum as wall material. *Journal of food composition and analysis*, , 24(6), 889-894.
- Jyothi, N. V. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of microencapsulation*,, 27(3), 187-197.
- Karaaslan, M. Ş. (2021). Gum arabic/maltodextrin microencapsulation confers peroxidation stability and antimicrobial ability to pepper seed oil. *Food Chemistry*, 337, 127748.
- Leyva-López, R. V.-T.-O.-S.-N.-R. (2024). Microencapsulación de extracto de *Hibiscus sabdariffa* L. utilizando almidón poroso y goma arábica: Proceso optimizado, caracterización, estabilidad y condiciones gastrointestinales simuladas. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277 , 133754.
- Leyva-López, R. V.-T.-O.-S.-N.-R. (2024). Microencapsulation of *Hibiscus sabdariffa* L. extract using porous starch and gum Arabic: Optimized process, characterization, stability, and simulated gastrointestinal conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*,, 277, 133754.
- Lourenço, S. C.-M. (2020). Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and arabic gum as wall matrices. *Foods*,, 9(6), 718.
- Lu, W. Y. (2021). Choosing the appropriate wall materials for spray-drying microencapsulation of natural bioactive ingredients: Taking phenolic compounds as examples. *Powder technology*,, 394, 562-574.
- Mahdi, A. A.-A.-M. (2020). Microencapsulation of fingered citron extract with gum arabic, modified starch, whey protein, and maltodextrin using spray drying. *International journal of biological macromolecules*,, 152, 1125-1134.
- Mardani, M. S. (2024). Microencapsulation of natural products using spray drying; an overview. *Journal of microencapsulation*, 41(7), 649-678.

- Márquez Lemus, M. C. (2023). The effect of prickly pear pericarp mucilage (*Opuntia robusta* Wendl. var. *robusta*) on spray drying of prickly pear juice. *Revista bio ciencias*,, 10.
- Martínez, E. L. (2016). Efecto de la temperatura sobre los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en el residuo de la producción de jugo de mandarina (*Citrus reticulata* Satsuma). *Mexico, Mexico*,, 8.
- Mason, T. J.-B. (2005). Application of ultrasound. In *Emerging technologies for food processing*. *Academic Press*,, pp. 323-351.
- Medina-Jaramillo, C. &.-C. (2025). Enhancing the Physicochemical, Thermal, and Technological Properties of Freeze-Dried Welsh Onion Leaf Juice: Influence of Maltodextrin and Gum Arabic as Carrier Agents. *Polymers*,, 17(6), 801.
- Mejía Vásquez, L. V. (2023). Determinación de la concentración de betalaínas y betaxantinas en tunas (*Opuntia ficus-indica*) de diferentes coloraciones evaluados a dos temperaturas. *Tesis Ingenieria*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca Perú.
- Mendoza-Meneses, C. J.-M.-S.-P. (2020). Physicochemical and thermal characteristics of microencapsulated Fe by electrostatic coacervation. *Revista bio ciencias*,, 7.
- Michel Michel, M. R.-Z. (2 de Febrero de 2024). *La microencapsulación y su papel en los alimentos*. Obtenido de Hablemos Claro. Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Valles. : <https://hablemosclaro.org/la-microencapsulacion-y-su-papel-en-los-alimentos/>
- Miranda-Jara, Angélica, Mg. Arteaga-Llacza, Pedro, Mg. Quispe-Prado, Wilber, Chuquilín-Goicochea,. (2024). Microencapsulation of *Apis mellifera* honey by spray drying with *Opuntia ficus indica* mucilage as covering material. *Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service*, 6.
- Mohammadalinejad, S. &. (2021). Microencapsulation of anthocyanins—Critical review of techniques and wall materials. *Applied sciences*,, 11(9), 3936.
- Mokrzycki, W. S. (2011). Colour difference ΔE survey. *Mach. Graph. Vis*,, 20(4), 383-411.
- Mota, J. M. (2020). Extraction and characterization of pectin from the fruit peel of *Opuntia robusta*. *ChemistrySelect*, 5(37), 11446-11452.
- Mudgil, D. &. (2024). Acacia gum: Chemistry, properties & food applications. *Food and Humanity*,, 2, 100264.
- Mutavski, Z. V.-N. (2025). Stabilization and preservation of bioactive compounds in black elderberry by-product extracts using maltodextrin and gum arabic via spray drying. *Foods*, , 14(5), 723.

- Nguyen, C. T. (2024). Microencapsulation of noni fruit extract using gum arabic and maltodextrin—Optimization, stability and efficiency. *International Journal of Biological Macromolecules*, 269, 132217.
- Niamah, A. K.-S. (2021). Electro-hydrodynamic processing for encapsulation of probiotics: A review on recent trends, technological development, challenges and future prospect. *Food Bioscience*, 44, 101458.
- Ojeda, G. A. (2019). Nanotecnología y su aplicación en alimentos Nanotechnology and its applications in food. *Mundo Nano*, 12(23), 89-102.
- Ojeda, G. A. (2019). Nanotecnología y su aplicación en alimentos. . *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 12(23), 0-0.
- Ortiz, D. G.-G. (2014). Opuntia robusta Wendland (Cactaceae) en la provincia de Valencia. *Revista científica internacional dedicada al estudio de la flora ornamental*, 71.
- Otálora, M. C.-T. (2023). Spray-drying microencapsulation of Andean blueberry (*Vaccinium meridionale* Sw.) anthocyanins using prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel mucilage or gum arabic: a comparative study. *Foods*, 12(9), 1811.
- Özen, T. &. (2008). Determination of antioxidant activity of various extracts of *Parmelia saxatilis*. *Biologia*, 211-216.
- Oziyici, H. R. (2013). Effects of processing method and storage temperature on clear pomegranate juice turbidity and color. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 899-906.
- Paredes-López, O. B.-P. (1994). Amylopectin: Structural, gelatinisation and retrogradation studies. 50(4), 411-417.
- Pateiro, M. G. (2021). Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality and the appearance of the final food products. *Molecules*, 26(6), 1547.
- Peng, Z. L. (2013). Effect of carriers on physicochemical properties, antioxidant activities and biological components of spray-dried purple sweet potato flours. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), 348-355.
- Pérez-Alonso, C. E.-M.-L.-P.-B.-H. (2009). Interrelationship between the structural features and rehydration properties of spray dried manzano chilli sauce microcapsules. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(2), 187-196.
- Piñón-Balderrama, C. I.-P.-F.-S.-S.-L. (2020). Encapsulation of active ingredients in food industry by spray-drying and nano spray-drying technologies. . *Processes*, 8(8), 889.
- Prasad, N. T. (2022). Gum arabic—A versatile natural gum: A review on production, processing, properties and applications. *Industrial Crops and Products*, 187, 115304.

- Reyes, M. R.-B.-B.-J.-R. (2024). Maltodextrinas modificadas: estructura, fuentes, aplicaciones e importancia en la industria alimentaria. . *Materiales Avanzados*, (41), 162-167.
- Rezvankhah, A. E.-D. (2020). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Drying Technology*, 38(1-2), 235-258.
- Rigon, R. T. (2016). Microencapsulation by spray-drying of bioactive compounds extracted from blackberry (*Rubus fruticosus*). *Journal of food science and technology*, , 53(3), 1515-1524.
- Ríos-Hernández, J. P.-S.-M.-G.-L. (2024). Obtaining coffee mucilage microcapsules by spray drying using chemically modified banana starch. *Ingeniería y competitividad*, 26(2).
- Rivas, J. C.-L. (2021). Microencapsulation of guava pulp using prebiotic wall material. *Brazilian Journal of Food Technology*, 24, e2020213.
- Rivera-Salas et al. (2020). Optimización del proceso de microencapsulación de astaxantina con maltodextrina y goma arábiga mediante secado por aspersión. *Revista Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5, 277–282.
- Rosales-Chimal, S. N.-C.-P.-T.-R. (2023). Optimal conditions for anthocyanin extract microencapsulation in taro starch: Physicochemical characterization and bioaccessibility in gastrointestinal conditions. 227, 83-92.
- Sabtain, B. F. (2021). A narrative review on the phytochemistry, nutritional profile and properties of prickly pear fruit. *Open Access J. Biog. Sci. Res*, 7(7).
- SADER, S. d. (2020). *Crece producción de tuna en 2020, fruto para consumir esta temporada*. Obtenido de Gobierno de México. : gob.mx/agricultura/prensa/crece-produccion-de-tuna-en-2020-fruto-para-consumir-esta-temporada?idiom=es
- Samborska, K. P. (2020). Innovations in spray drying process for food and pharma industries. *Journal of Food Engineering*, 321, 110960.
- Sarabandi, K. J. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International journal of biological macromolecules*, 140, 59-68.
- Sarabandi, K. J. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International journal of biological macromolecules*, 140, 59-68.
- SEDARH, S. d. (2023). *Tuna*. Obtenido de En Sistema Estatal de Información Agropecuaria (SEIA): Cultivos.: Recuperado de Sedarh.gob.mx
- Seyrekoğlu, F. T. (2024). Optimization of Hypericum Perforatum Microencapsulation Process by Spray Drying Method. *Aaps Pharmscitech*, 25(5), 99.

- Shiga, H. Y. (2004). Encapsulation of shiitake (*Lenthinus edodes*) flavors by spray drying. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 68(1), 66-71.
- Sobulska, M. &. (2021). Advances in spray drying of sugar-rich products. *Drying Technology*, 39(12), 1774-1799.
- Sotero, R. E. (2023). Tesis. *ENCAPSULACIÓN DE SABORIZANTES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO, TOLUCA, MÉXICO.
- Tan, S. P. (2015). Optimising the encapsulation of an aqueous bitter melon extract by spray-drying. *Foods*, 4(3), 400-419.
- Tao, Y. T. (2024). Effects of spray drying temperature on physicochemical properties of grapeseed oil microcapsules and the encapsulation efficiency of pterostilbene. *LWT*, 193, 115779.
- Tiamiyu, Q. O. (2023). Gum Arabic edible coating and its application in preservation of fresh fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry Advances*, 2, 100251.
- Todorović, A. Š.-J. (2022). Encapsulation of bilberry extract with maltodextrin and gum arabic by freeze-drying: Formulation, characterisation, and storage stability. *Processes*, 10(10), .
- Toledo-Madrid, K. I.-V.-V.-R. (2019). Spray drying microencapsulation of purple cactus pear (*Opuntia ficus indica*) peel extract and storage stability of bioactive compounds. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 31(12), 958-968.
- Tolun, A., Artik, N., & Altintas, Z. (2020). Effect of different microencapsulating materials and relative humidities on storage stability of microencapsulated grape pomace extract. *Food chemistry*, 302, 125347.
- Tolve, R. G. (2021). Optimization model of phenolics encapsulation conditions for biofortification in fatty acids of animal food products. *Foods*, 10(4), 881.
- Tonon, R. V. (2011). Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying. *Food research international*, 44(1), 282-289.
- Torres, G. Y. (2017). Tesis de Maestria. *Obtención de Maltodextrinas por vía enzimática a partir del almidón de camote de cerro*. Intituto Politécnico Nacional, Michoacán.
- UNAM, J. B. (2020). *Nopal tapón (Opuntia robusta)*. Obtenido de <https://infografiasjb.ib.unam.mx/nopal-tapon.html>
- Velazquez-Martinez, (2021). Antimicrobial, shelf-life stability, and effect of maltodextrin and gum arabic on the encapsulation efficiency of sugarcane bagasse bioactive compounds. *Foods*, 10(1), 116.

- Verma, A. &. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(5), 701-719.
- Villa-Jaimes, (2023). Molecular and antioxidant characterization of *Opuntia robusta* fruit extract and its protective effect against diclofenac-induced acute liver injury in an in vivo rat model. *Antioxidants*, 12(1), 113.
- Wei, N. S. (2022). EFFECT OF MALTODEXTRIN, ARABIC GUM, AND BEETROOT JUICE CONCENTRATION ON THE POWDER PROPERTIES OF SPRAY-DRIED BEETROOT SKIM MILK MIXTUR. *Acta Universitatis Cinbinesis, Series E: Food Technology*, 26(2).
- Xiao, Z. X. (2022). Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. *Carbohydrate polymers*, 298, 120113.
- Zárate-Martínez, W. V. (2025). Caracterización del sistema de producción de nopal (*Opuntia* spp.) en la Huasteca de Tamaulipas, México. *Agronomía Mesoamericana*, Agronomía Mesoamericana.
- Zong, M. T. (2023). Enhancement of gum Arabic/casein microencapsulation on the survival of *Lactiplantibacillus plantarum* in the stimulated gastrointestinal conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125639.