



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CALKINÍ

**“FORMULACIÓN DE UNA TORTILLA FUNCIONAL ELABORADA A PARTIR DE
EXTRACTOS MICROENCAPSULADOS DE CASCARA DE PITAHAYA
(HYLOCEREUS UNDATUS)”**

TESIS PROFESIONAL

EGRESADO:

Diana Laura Chi Calcanio

Ingeniería en Industrias Alimentarias

DIRECTOR Y CODIRECTOR:

Dr. Julio Enrique Oney Montalvo

Dr. Dany Alejandro Dzib Cauich

VOCAL:

Dr. Luis Alfonso Can Herrera

Calkiní, Campeche, México

Marzo 2025

Constancia de no inconveniencia



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Subdirección de Planeación y Desarrollo

Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante

Calkiní, Campeche **06/03/2025**

P/03/25/597

INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

CONSTANCIA DE NO INCONVENIENCIA

MODALIDAD: TESIS

C. DIANA LAURA CHI CALCANIO 7338
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS.
PRESENTE

Con relación a lo establecido en el Reglamento de Estudios de Licenciatura, capítulo VII, fracción I, vigente en este Instituto, y una vez emitido el fallo favorable por el director DR. JULIO ENRIQUE ONEY MONTALVO, y el co-director DR. DANY ALEJANDRO DZIB CAUICH, respectivamente, este Instituto consta de no tener inconveniencia para la realización del acto protocolario de titulación integral de su trabajo profesional titulado: **"FORMULACIÓN DE UNA TORTILLA FUNCIONAL ELABORADA A PARTIR DE EXTRACTOS MICROENCAPSULADOS DE CASCARA DE PITAHAYA (HYLOCEREUS UNDATUS)"**.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Sabiduría. Fortaleza de Nuestra Cultura®

Dr. Jorge Alfonso Hau Puc.
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante.

C.c.p. Archivo



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE CALKINÍ

"DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR Y APOYO A
ESTUDIANTES"

CLAVE: 04MSU0013P
CALKINÍ, CAMPECHE, MÉXICO



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Ah Canul S/N por Carretera Federal, Calkiní, Campeche,
C.P. 24900 Tel. 996-8134870,
e-mail: se_dcalkini@tecnm.mx | itescam.edu.mx



Dedicatoria

“Estás cerca, aunque no te vea, estás conmigo, aunque estés lejos, estás en mi corazón, en mis pensamientos, en mi vida, siempre.”

(f)

Agradecimientos

Quisiera comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Julio E. Oney Montalvo, a mi co-director el Dr. Dany A. Dizib Cauich, y mi asesor de tesis el Dr. Luis Alfonso Can Herrera cuya experiencia, paciencia y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su guía no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y superar los desafíos.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN	10
MARCO TEÓRICO.....	12
1. Pitahaya (Hylocereus undatus)	12
1.1 Origen e historia	12
2. Producción de pitahaya en la península de Yucatán.....	13
3. Aplicaciones de la pitahaya en la industria alimentaria	14
3.1. Usos de la Pitahaya.....	14
3.2. Potencial industrialización de la pitahaya	15
3.3. Productos derivados de la pitahaya.....	15
4. Cáscara de Pitahaya	15
5. Compuestos bioactivos en la cascara de pitahaya.....	16
6. Método de extracción en microondas para la obtención de compuestos bioactivos.....	17
7. Microencapsulación de compuestos bioactivos.....	19
CAPÍTULO 2	26
MATERIALES Y MÉTODOS	26
CAPITULO 3	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
CAPITULO 4	43
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
Referencias	45
Anexos	51

Índice Figuras

Figura 1. Pitahaya (<i>Hylocereus undatus</i>).	12
Figura 2. Ubicación de la Región de “Los Chunes”; principal zona productora de pitahaya del Estado de Quintana Roo, México.	13
Figura 3. Estructura química del ácido betalmico.	17
Figura 4. Diagrama para la obtención de la harina de cáscara de Pitahaya.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Diagrama para la obtención de betalainas totales mediante la extracción asistida por microondas.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Evaluación de la extracción por microondas de betalainas totales utilizando diferentes tiempos.	33
Figura 7. Evaluación de la extracción por microondas de betalainas totales utilizando diferentes potencias.	34
Figura 8. Diagrama de Pareto del efecto de las variables independientes en la extracción de betalainas totales.	36
Figura 9. Superficie de respuesta de la optimización de la extracción por microondas de las betalainas totales.	37
Figura 10. Microencapsulación de compuestos betalainas por el método de secado por aspersión.	38

Índice Tablas

Tabla 1. Usos de las partes de <i>Hylocereus undatus</i>	14
Tabla 2. Composición nutricional de pitahaya (<i>Hylocereus undatus</i>)	16
Tabla 3. Compuestos bioactivos en pitahaya (<i>Hylocereus undatus</i>)......	16
Tabla 4. Métodos de extracción reportados.....	18
Tabla 5. Métodos de microencapsulación reportados.	20
Tabla 6. Condiciones para la optimización de la extracción por microondas de betalainas.....	27
Tabla 7. Diseño experimental	27
Tabla 8. Resultados de la optimización de la extracción de betalainas por microondas.....	35
Tabla 9. Análisis de varianza del diseño experimental.	35
Tabla 10. Valor teórico y experimental optimo de las condiciones optimizadas de la extracción por microondas.	37

RESUMEN

La pitahaya (*Hylocereus* spp.) es un fruto exótico considerado en el estado de Campeche como el “oro rosado” a causa del gran impulso que ha tenido en la agricultura. Su cáscara constituye alrededor de un tercio de la fruta, y a menudo se descarta como un desperdicio de su consumo o del procesamiento de la pulpa. No obstante, la cáscara de la pitahaya es rica en nutrientes y sustancias bioactivas como polifenoles y betalainas, las cuales son de gran importancia en la industria farmacéutica y alimentaria debido a sus características antioxidantes. Por ello, el objetivo de este proyecto es elaborar una tortilla funcional a partir de microcapsulas enriquecidas con extractos de cáscara de pitahaya obtenidos de la extracción por microondas, esto con la finalidad de determinar su potencial como fuente de antioxidantes naturales en la elaboración de alimentos funcionales. La investigación que se realizó tiene la intención de respaldar al programa Sembrando Vida a través del aprovechamiento del potencial industrial de la cáscara de pitahaya y del aumento del valor agregado del fruto, además de sustentar los proyectos estratégicos del Tecnológico Nacional de México (TecNM) como la agenda para la autosuficiencia alimentaria y el rescate del campo mexicano, así como la agenda de salud y bienestar.

Se optimizó la extracción de betalainas totales utilizando la técnica de extracción por microondas, siendo las condiciones óptimas una potencia del 10% y un tiempo de extracción de 65 segundos. Dando como resultado un máximo de extracción experimental de 1526.57 ± 19.62 ug/mL de betalainas totales. Posteriormente, se realizó la microencapsulación de las betalainas utilizando el método de secado por aspersión con un flujo de aire de 100 m³/h y una temperatura de entrada de 165 °C. Con las capsulas obtenidos se llevó a cabo la formulación de tortillas al 0, 5 y 10 % del microencapsulado. La formulación con el 0% fue la que tuvo el valor más bajo de betalainas totales (21.25 ± 0.37 µg/g), seguido de la formulación del 5% de microcápsulas (42.49 ± 13.09 µg/g). Finalmente, la formulación con 10% de microcápsulas dio los valores más altos (53.99 ± 15.61 µg/g). Permitiendo concluir que la técnica de extracción por microondas es apropiada para la obtención de extractos a partir de la cascara de Pitahaya, los cuales tienen potencial para ser aprovechados en la industria alimentaria

debido a su contenido de betalainas y compuestos antioxidantes, recomendándose la microencapsulación de estos extractos para conservar estos compuestos de interés y facilitar su adición en las formulaciones alimenticias.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La pitahaya, también conocida como fruta del dragón, es una fruta exótica que se obtiene de una especie de cactus perenne del género *Hylocereus*. Esta fruta es originaria de las regiones tropicales y subtropicales de América (Chen et al., 2021). Sus frutos son ovalados y miden entre 10 y 12 cm de diámetro. La cáscara es de un atractivo color rosado y presenta brácteas triangulares elevadas, mientras que su pulpa es blanca, salpicada de numerosas semillas negras (Verona-Ruiz et al., 2020).

Recientemente, la pitahaya ha captado un creciente interés debido a su valor económico y a sus potenciales beneficios para la salud (Oney-Montalvo et al., 2023). La cáscara de la fruta representa aproximadamente un tercio de su peso, y usualmente se descarta como residuo tras el consumo o como subproducto en la producción de bebidas a base de pitahaya. Sin embargo, esta es rica en nutrientes y compuestos bioactivos (Jiang et al., 2021). Entre estos compuestos destacan las betalaínas, que pueden aprovecharse para desarrollar alimentos funcionales o como antioxidantes, contribuyendo a prolongar la vida útil de otros alimentos (Cunha et al., 2018).

Para aprovechar los beneficios de estos compuestos, se han desarrollado métodos de extracción que facilitan la producción de betalaínas. Una de las técnicas más efectivas es la extracción por microondas, la cual ha demostrado eficiencia en la extracción de compuestos bioactivos, los cuales pueden ser posteriormente microencapsulados para su conservación y uso para la elaboración de alimentos funcionales.

Debido a lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se pretende utilizar el proceso de extracción mediante microondas, el cual favorece la ruptura de las paredes celulares y la liberación de los pigmentos en un menor tiempo y con menor uso de solventes en comparación con los métodos tradicionales, como la extracción por maceración o percolación (Zhang et al., 2020). Esto, permite una mayor difusión de los compuestos bioactivos, lo que incrementa el rendimiento de la extracción. Siendo el principal desafío en la extracción de betalaínas de la cáscara de pitahaya, el optimizar

los parámetros del proceso, como la potencia de las microondas, el tiempo de exposición, la relación solvente/biomasa y la temperatura. (Liu et al., 2021).

Los extractos obtenidos de las condiciones óptimas, se microencapsularán mediante el método de aspersión, una técnica innovadora que permite encapsular compuestos bioactivos, como las betalaínas. Este proceso de encapsulación es de gran interés en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica debido a sus ventajas, tales como la protección de los compuestos sensibles y la mejora de su estabilidad, solubilidad y biodisponibilidad (Tavakkol et al., 2021).

Finalmente, la incorporación de microcápsulas de cáscara de pitahaya en la elaboración de tortillas de maíz es una estrategia innovadora que busca mejorar el valor nutricional y funcional de este alimento básico, debido a que las betalainas microencapsuladas poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y protectoras frente al daño celular (Bertelli et al., 2019). Al agregar estas microcápsulas a la masa de maíz, no solo se enriquece el producto con estos beneficios, sino que también se mejora su estabilidad y biodisponibilidad, evitando la degradación de los pigmentos durante el procesamiento (Yuan et al., 2019).

MARCO TEÓRICO

1. Pitahaya (*Hylocereus undatus*)

1.1 Origen e historia

La pitahaya (*Hylocereus undatus*), originaria de México, se cultiva en varios países tropicales y subtropicales, incluyendo Taiwán, el sur de China, Israel, Tailandia, Australia, Estados Unidos y Malasia (Mizrahi y Nerd, 1999). En Vietnam, este fruto es conocido localmente como "Thanh Long" o "dragón verde", nombre que hace referencia al color verde de la fruta inmadura y a las escamas que adornan su superficie, evocando la imagen de un dragón (Hoa et al., 2006). La especie *Hylocereus* (Figura 1) tiene una cáscara color rojo – rosado, una longitud de 15 a 22 cm con un peso de 300 a 800 g, de forma ovalada y cubierta de escamas grandes, largas, rojas y verdes, contiene pulpa blanca y semillas negras.



Figura 1. Pitahaya (*Hylocereus undatus*).

La pitahaya fue domesticada originalmente por culturas precolombinas, que la recolectaban de forma silvestre para su uso en la alimentación y la medicina. Sin embargo, su popularidad global no se consolidó hasta mediados de la década de 1990, cuando comenzó a ser reconocida como una "súper fruta" (Le Bellec y Vaillant, 2011). En la actualidad, la pitahaya es un fruto exótico muy apreciado, no solo por su atractiva forma y color, sino también por sus destacadas propiedades nutricionales que han captado la atención del sector alimentario y comercial. Además, se cultiva como planta

ornamental, destacando por su floración nocturna (Kumar et al., 2018). Su nombre, que significa "fruta escamosa", se refiere tanto a la planta como a su fruto (Zee et al., 2004).

2. Producción de pitahaya en la península de Yucatán

En el Estado de Quintana Roo (Figura 2), el cultivo comercial de pitahaya comenzó en 1996, pero su verdadero impulso se dio alrededor del año 2000. Actualmente, este cultivo se ha convertido en el más importante de los no tradicionales en la región. La planta de pitahaya presenta una notable resistencia a la sequía y se adapta bien a los suelos calcáreos y pedregosos que predominan en el centro de Quintana Roo, lo que ha facilitado su aceptación en diversas comunidades (Cáliz de Dios et al., 2014).

Más del 50% de la producción de pitahaya en Quintana Roo proviene de la región de "Los Chunes", que incluye las comunidades de Chun-Yah, Chun-Pon, Chun-On, entre otras, y forma parte del Municipio de Felipe Carrillo Puerto. Hasta 2011, en "Los Chunes" había 498 hectáreas dedicadas al cultivo de pitahaya, de las cuales 161 estaban en producción. Durante la temporada de junio a octubre, estas áreas produjeron 483 toneladas de frutos comerciables, lo que se traduce en un rendimiento promedio de tres toneladas por hectárea.

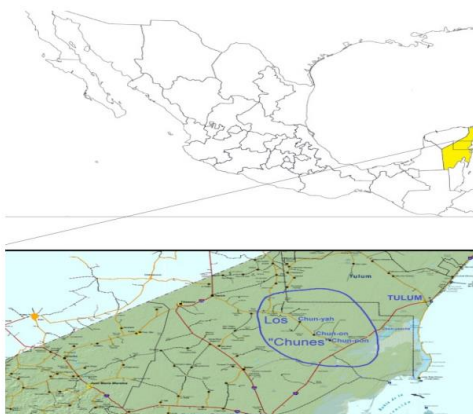


Figura 2. Ubicación de la Región de "Los Chunes"; principal zona productora de pitahaya del Estado de Quintana Roo, México.

El sistema de cultivo en "Los Chunes" se caracteriza por un uso limitado de insumos sintéticos, que se integran de manera armónica al ecosistema local, así como por una baja densidad de plantas y un manejo reducido de las plantaciones. Como resultado, la

producción de pitahaya en esta región es relativamente baja, alcanzando solo el 50% del rendimiento potencial que se podría obtener en otros lugares con condiciones climáticas y edáficas similares.

3. Aplicaciones de la pitahaya en la industria alimentaria

3.1. Usos de la Pitahaya

La pitahaya, también conocida como fruta del dragón, se utiliza principalmente como fuente de alimento. Su fruto es la parte más consumida, y sus semillas pueden actuar como prebióticos gracias a su alto contenido de oligosacáridos (Intagri, 2019). Este cactus es famoso a nivel mundial por su valor alimenticio; además del fruto, las flores son comestibles y se pueden consumir como legumbres, mientras que los brotes se disfrutan como germinados. Las semillas, por su parte, poseen propiedades probióticas (Román, Caetano y Ramírez, 2014).

Una de las características distintivas de la pitahaya es su efecto laxante natural, lo que la convierte en un alimento nutritivo que puede complementarse con una dieta equilibrada para prevenir problemas intestinales (Vigo, 2014). En la Tabla 1 se mencionan algunos de los usos que se les da a las diferentes partes de la Pitahaya.

Tabla 1. Usos de las partes de *Hylucereus undatus*.

Parte de la planta	Área de aplicación	Producto
Tallos	Alimentación humana alimentación animal Medicinal Cosmetológico	Guisos Forrajes Medicamentos Shampoos y jabones
Flores	Ornamental Medicinal Cosmetológico	Medicamentos Esencias
Frutos	Ornamental Alimentación humana Alimentación animal Medicinal Industrial	Pulpa congelada Juegos Jarabes Licores Salsas Forrajes Medicamentos Colorantes
Cáscara	Industrial	Colorantes

3.2. Potencial industrialización de la pitahaya

Se han financiado proyectos orientados a mejorar y aumentar la producción de la pitahaya, así como a optimizar su tratamiento postcosecha y fortalecer su posicionamiento comercial, este impulso se debe a la alta rentabilidad que ofrece esta fruta (Hernández, Andrade y Vargas, 2018).

Es relevante destacar que la pitahaya posee un elevado contenido de betalainas, pigmentos con propiedades antioxidantes, lo que la convierte en una alternativa viable a los colorantes artificiales en la industria alimentaria, entre otros beneficios (Cruz et al., 2015). Además, su alto contenido de sólidos solubles, que puede alcanzar hasta 18 °Brix, le otorga un considerable potencial agroindustrial y comercial (Cruz et al., 2015).

3.3. Productos derivados de la pitahaya

La pitahaya, conocida por sus propiedades nutritivas, se consume tradicionalmente fresca. Sin embargo, también ofrece una variedad de productos derivados que destacan su valor. Entre estos se encuentran la pitahaya deshidratada, la jalea y el zumo. La deshidratación de esta fruta es una excelente forma de preservar y apreciar sus beneficios nutritivos (Méndez, 2020).

Su alto contenido de azúcares la convierte en un ingrediente ideal para la elaboración de zumos y mermeladas, mejorando notablemente las propiedades organolépticas sin la necesidad de añadir edulcorantes. De esta manera, se preserva el valor nutritivo tanto de la pulpa como de las semillas (Méndez, 2020).

4. Cáscara de Pitahaya

La cáscara de la pitahaya se destaca como una rica fuente de nutrientes (Tabla 2), especialmente en fibra dietaria, así como en fitoquímicos bioactivos, incluyendo compuestos fenólicos (Tabla 3). Este subproducto presenta un gran potencial para su aplicación en la industria alimentaria, ya que puede utilizarse en la reformulación de alimentos y en la recuperación de sustancias de alto valor agregado, como amilasas, pectinasa, pectina y antocianinas. Recientes estudios han demostrado que la cáscara y

los extractos de este fruto promueven la salud, lo que sugiere su utilidad en el desarrollo de productos alimenticios innovadores (Jiang et al., 2021).

Tabla 2. Composición nutricional de pitahaya (*Hylocereus undatus*)

Componente	Pulpa	Cáscara
Agua (%)	89.00 ± 0.17	10.66 ± 0.18
Proteína (g)	0.18 ± 0.02	6.00 ± 0.17
Grasa (g)	0.45 ± 0.02	6.20 ± 0.52
Carbohidratos (g)	9.34 ± 0.07	47.78 ± 0.00
Fibra dietaría (g)	0.45 ± 0.03	23.75 ± 0.10

Tabla 3. Compuestos bioactivos en pitahaya (*Hylocereus undatus*.)

Componente	Pulpa	Cáscara
Compuestos fenólicos (mg of GAE)	32.37 ± 1.72	29.10 ± 1.30
Flavonoides (mg RE)	26.71 ± 4.46	22.90 ± 1.49
Vitamina C mg	31.11 ± 3.85	18.33 ± 16.11

5. Compuestos bioactivos en la cascara de pitahaya

Las betalaínas son pigmentos solubles en agua presentes en los frutos del cactus *Hylocereus spp.* A diferencia de otros pigmentos naturales, como las antocianinas, carotenoides y clorofilas, las betalaínas han sido menos estudiadas (Slimen et al., 2017). Se clasifican en dos tipos: betacianinas y betaxantinas, ambas conocidas por sus propiedades antioxidantes, anticancerígenas, antilipídicas y antimicrobianas. La Unión Europea ha aprobado su uso como aditivo alimentario, destacando su mayor estabilidad frente a cambios de pH y temperatura, lo que permite su aplicación en una amplia variedad de productos alimenticios (Thirugnanasambandham & Sivakumar, 2017).

Químicamente son moléculas derivadas del ácido betalmico (Figura 3) cuya estructura se muestra en la figura. Se divide en betacianinas (desde el color rojo hacia el violeta) y betaxantinas (desde el amarillo hasta el naranja).

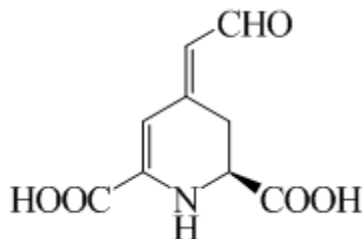


Figura 3. Estructura química del ácido betalámico.

Se ha documentado la presencia de betalaínas en trece familias de plantas del orden Caryophyllales. Sin embargo, nunca se ha observado la coexistencia de betalaínas y antocianinas (Stafford, 1994; Clement y Mabry, 1996; Brockington et al., 2011).

6. Método de extracción en microondas para la obtención de compuestos bioactivos

Los métodos de extracción convencionales, como la maceración, el reflujo y la extracción Soxhlet, son ampliamente utilizados debido a su facilidad de operación y bajo costo. Sin embargo, presentan desventajas significativas, como largos tiempos de extracción, bajos rendimientos y un alto consumo energético (Yang et al., 2011). En contraste, los métodos de extracción no convencionales ofrecen ventajas ambientales al reducir la necesidad de productos químicos y acortar los tiempos de extracción, al mismo tiempo que mejoran tanto el rendimiento como la calidad del extracto. Técnicas como la extracción por ultrasonido, pulsos eléctricos, digestión enzimática, extrusión, microondas y fluidos supercríticos se emplean para optimizar el rendimiento y la selectividad en la extracción de compuestos bioactivos (Azmir et al., 2013).

La tabla 4 presenta los principales métodos reportados para la extracción de compuestos bioactivos de la cáscara de pitahaya, destacando sus principios, ventajas y aplicaciones. Estudios recientes han demostrado que técnicas como la extracción asistida por ultrasonido y el pretratamiento con microondas mejoran significativamente la eficiencia de recuperación de compuestos fenólicos y antioxidantes, debido a su capacidad para romper la pared celular y facilitar la liberación de metabolitos de interés (Rodríguez et al., 2020). Asimismo, los tratamientos enzimáticos han sido utilizados para aumentar el

rendimiento de la extracción al hidrolizar componentes estructurales de la matriz vegetal, mientras que los métodos térmicos, como el secado por convección, pueden influir en la concentración y estabilidad de los compuestos extraídos (González-Mendoza et al., 2021). Estas metodologías han permitido optimizar la valorización de los subproductos agroindustriales de la pitahaya, promoviendo el desarrollo de ingredientes funcionales y extractos naturales con potencial en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (López-Herrera et al., 2019).

Tabla 4. Métodos de extracción reportados.

Método de extracción	Compuestos bioactivos extraídos	Descripción	Referencias
<i>Extracción con Solventes</i>	Polifenoles, flavonoides, antocianinas	Se utiliza una mezcla de solventes (etanol, metanol, etc.) para extraer compuestos bioactivos.	Shih et al. (2019).
<i>Extracción con Ultrasonido (UAE)</i>	Carotenoides, flavonoides, compuestos fenólicos	Método clásico que utiliza calor y solvente continuo para extraer compuestos de la pitahaya.	Sethi et al. (2021).
<i>Extracción con CO₂ Supercrítico</i>	Ácidos grasos, compuestos volátiles, carotenoides	Utiliza CO ₂ en estado supercrítico como solvente para obtener compuestos lipofílicos de la pitahaya.	Oliveira et al. (2020).
<i>Extracción Enzimática</i>	Pectinas, polisacáridos, antocianinas	Usa enzimas específicas para degradar la pared celular y liberar compuestos bioactivos.	Da Silva et al. (2019).
<i>Extracción con Microondas (MAE)</i>	Polifenoles, antioxidantes, flavonoides	Utiliza microondas para calentar rápidamente el solvente y facilitar la extracción de compuestos bioactivos.	Kamboj et al. (2020).

Las microondas son campos electromagnéticos que operan en un rango de frecuencia de 300 MHz a 300 GHz. Alupului et al. (2012) propusieron un proceso de extracción asistida por microondas en tres etapas secuenciales: 1) separación de los solutos de los sitios activos de la matriz debido al aumento de temperatura y presión; 2) difusión del

disolvente a través de la matriz; y 3) liberación de los solutos al disolvente. Esta técnica se ha investigado para la obtención de polifenoles en cáscaras de cítricos (Nayak et al., 2015), como pretratamiento en la extracción de astaxantina de *Phaffia rhodozyma* (Villalobos-Castillejos et al., 2013) y en la extracción de betalaínas de betabel (Cardoso-Ugarte et al., 2014).

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso de pretratamientos con microondas para aumentar la eficiencia en la extracción de compuestos bioactivos de la cascara de pitahaya. Además, se buscó determinar el impacto de la presencia de betacianinas, betaxantinas, betalaínas totales, compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante en la cascara de pitahaya.

7. Microencapsulación de compuestos bioactivos

La microencapsulación representa una alternativa significativa en el desarrollo de sistemas de liberación de compuestos bioactivos. Muchos de estos compuestos se utilizan como agentes terapéuticos, pero a menudo presentan limitaciones debido a su inestabilidad fisicoquímica en ciertos fluidos corporales, como la saliva y los jugos gástricos, lo que restringe su administración a través de diversas vías (Reddy, 2014). Para superar estos desafíos, se han propuesto diferentes enfoques, entre los que destaca la modificación química de la molécula, y la microencapsulación de estas utilizando materiales poliméricos (Flores & Chicaiza, 2016).

Las microesferas se fabrican a partir de polímeros biocompatibles y se utilizan como sistemas de liberación controlada de compuestos bioactivos. En este sistema, el principio activo se encuentra distribuido en una matriz polimérica y se libera mediante dos mecanismos: la difusión a través de la matriz y la degradación del polímero, que ocasiona la erosión de las partículas. Los polímeros empleados pueden ser tanto naturales como sintéticos, siendo los copolímeros de ácido láctico y ácido glicólico algunos de los más destacados en este contexto (Islas, 2014).

La siguiente tabla presenta los principales métodos de microencapsulación reportados para la cáscara de pitahaya, destacando su efectividad en la protección y estabilidad de

compuestos bioactivos. Entre los métodos más utilizados, el secado por aspersión ha demostrado ser una técnica eficiente y económica, permitiendo la obtención de polvos con alta estabilidad y fácil manejo, especialmente cuando se emplean agentes encapsulantes como la maltodextrina y la goma arábiga (González et al., 2021).

Por otro lado, la liofilización es una alternativa que preserva mejor la actividad antioxidante de los compuestos bioactivos debido a la ausencia de altas temperaturas durante el proceso, lo que minimiza su degradación (Martínez et al., 2020). La selección del agente encapsulante es crucial, ya que influye en la eficiencia del proceso y la funcionalidad del producto final. Estudios recientes han demostrado que la encapsulación de polifenoles y flavonoides extraídos de la cáscara de pitahaya puede mejorar su biodisponibilidad y estabilidad, facilitando su incorporación en la industria alimentaria y farmacéutica (Ramírez & López, 2019).

Tabla 5. Métodos de microencapsulación reportados.

Método de Microencapsulación	Compuestos Bioactivos Microencapsulados	Condiciones de Microencapsulación Reportadas	Referencias
<i>Spray Drying (Secado por aspersión)</i>	Antocianinas, flavonoides, carotenoides, polifenoles	Temperatura de entrada: 160-180°C; Temperatura de salida: 80-90°C; Relación de núcleo a pared: 1:3-1:5; Material de pared: goma arábiga o maltodextrina	Ahmed et al. (2020).
<i>Liofilización</i>	Polifenoles, compuestos antioxidantes	Temperatura de congelación: -20°C; Tiempo de liofilización: 48-72 horas; Material de pared: goma de tragacanto o gelatina	Sani et al. (2021).
<i>Extrusión</i>	Pectinas, carotenoides, fibra dietética	Temperatura: 70-100°C; Humedad: 20-25%; Relación de núcleo a pared: 1:3; Material de pared: almidón o proteínas vegetales	Ghafoor et al. (2022).
<i>Electrospinning</i>	Antocianinas, flavonoides, compuestos fenólicos	Voltaje: 15-25 kV; Caudal de solución: 0.5-1.0 mL/h; Material	Cheng et al. (2019).

		de pared: PCL (policaprolactona), goma arábica	
Coacervación	Proteínas, polisacáridos, compuestos fenólicos	pH: 4.5-5.5; Temperatura: 25-30°C; Relación de núcleo a pared: 1:2-1:3; Material de pared: alginato o goma arábica	Simić et al. (2020).
Matriz de gel (Gelificación iónica)	Flavonoides, antocianinas, pectinas	Concentración de polímero: 2-4%; pH: 4-6; Material de pared: alginato de sodio o carragenina	Liang et al. (2019).

8. Alimentos funcionales

Un alimento funcional es aquel que, además de cumplir con los requisitos nutricionales básicos y ofrecer características organolépticas agradables para el consumidor, proporciona beneficios adicionales para la salud. Esto se logra mediante la modificación o potenciación de las propiedades saludables de alguno de sus componentes.

El International Life Science Institute (ILSI) define los alimentos funcionales como aquellos que contienen un componente, ya sea nutriente o no nutriente, con efectos selectivos sobre una o varias funciones del organismo. Estos efectos van más allá de su valor nutricional, y sus beneficios justifican que el producto sea clasificado como funcional o incluso saludable.

Para que un alimento sea considerado funcional, debe cumplir con ciertas características:

- Su producción debe involucrar la modificación de algún componente mediante procesos tecnológicos o biológicos, como la eliminación, reducción o adición de ingredientes específicos para lograr un beneficio adicional, o una combinación de estos métodos.
- Aunque debe mantener las características del producto tradicional, debe incorporar componentes que tengan un efecto beneficioso sobre el organismo.

- La presentación debe ser la de un alimento convencional, sin alterar sus características originales. No debe presentarse, bajo ninguna circunstancia, en forma de cápsulas o comprimidos.
- Estos alimentos deben complementar la función nutritiva básica de los alimentos comunes y, al mismo tiempo, ofrecer efectos preventivos frente a ciertas enfermedades.

Es importante señalar que la respuesta del organismo a los alimentos funcionales puede variar según factores como la genética, el estado fisiológico del consumidor y la composición general de su dieta.

9. La tortilla

La tortilla es un producto alimenticio elaborado a partir de masa, la cual puede ser combinada con ingredientes opcionales, y que se somete a un proceso de cocción. La masa se obtiene mediante la molienda húmeda de granos de maíz nixtamalizado o a partir de una pasta hecha con harina de maíz nixtamalizado, harina de trigo, harinas integrales o sus combinaciones, a la que se le añade agua. Además, puede incluir ingredientes opcionales y aditivos permitidos para el consumo humano.

La tortilla es un alimento tradicional de Mesoamérica, cuya preparación involucra la cocción alcalina del maíz (nixtamalización), seguido de la molienda húmeda del grano, su lavado para obtener la masa, y luego el moldeado y cocción sobre una superficie caliente a temperaturas superiores a 180°C durante aproximadamente 5 minutos. El producto final tiene forma de discos de entre 10 y 20 cm de diámetro y un espesor de 2 a 3 mm. Las tortillas pueden consumirse de inmediato o ser empaquetadas en bolsas de polietileno para su distribución y venta.

10. Optimización

La optimización de la extracción de betalainas de la cáscara de pitahaya ha sido un área de interés creciente debido a las propiedades antioxidantes y antiinflamatorias de estos pigmentos naturales. Se ha demostrado que diferentes factores como el tipo de solvente,

la temperatura, el tiempo de extracción y la relación de materia prima a solvente influyen significativamente en el rendimiento de las betalainas. El uso de métodos de extracción como la extracción asistida por ultrasonido o el secado por aspersión puede mejorar la eficiencia de la extracción al reducir los tiempos de procesamiento y maximizar la liberación de compuestos bioactivos. Además, el control preciso de estas variables permite una mayor conservación de la calidad de las betalainas, que son sensibles a factores como la temperatura y la luz, lo que podría reducir su degradación durante el proceso (Liang et al., 2019; González et al., 2021).

La cáscara de pitahaya, que a menudo se desecha como subproducto, representa una fuente rica de betalainas que se puede valorizar mediante optimización de procesos. Investigaciones recientes han abordado el uso de diferentes técnicas de pretratamiento, como el secado y la molienda de la cáscara, antes de la extracción para aumentar la liberación de betalainas. En particular, se ha señalado que el uso de mezclas de solventes, como etanol o metanol, en combinación con temperaturas moderadas, proporciona una extracción eficiente, al mismo tiempo que preserva las propiedades funcionales de las betalainas. Estos avances no solo optimizan el aprovechamiento de los compuestos de la cáscara de pitahaya, sino que también promueven el uso sostenible de un recurso que, de otro modo, sería descartado (Hernández et al., 2020; Sethi et al., 2021).

JUSTIFICACIÓN

Uno de los alimentos básicos en la dieta de la mayoría de los mexicanos son los derivados del maíz, en particular las tortillas. Aunque estas son un alimento esencial en la gastronomía mexicana, su perfil nutricional básico podría mejorarse, debido a que no poseen características funcionales. Este contexto, convierte a las tortillas de maíz en la base ideal para realizar un enriquecimiento nutricional mediante la adición de compuestos bioactivos (Contreras-Jiménez et al., 2014).

Una de las materias primas que podrían ser utilizadas para darle características funcionales a la totilla es la cascara de pitahaya. Esta es conocida por sus destacadas propiedades antioxidantes y nutritivas, las cuales pueden contribuir significativamente a la mejora de la calidad nutricional de las tortillas, transformándolas en una opción aún más benéfica para la salud (Muñoz, 2011).

Antes de adicionar los componentes bioactivos a la formulación, se procederá a realizar el microencapsulado mediante la técnica de secado por aspersión. Este es un proceso unitario en el cual un líquido se atomiza en una corriente de aire caliente para convertirlo instantáneamente en polvo. Es empleada en la protección de compuestos bioactivos, especialmente sobre los polifenoles en diferentes matrices; además, es una de las técnicas más sencillas y económicas de secado, lo cual ha favorecido su transferencia tecnológica a escala industrial. (Ferrari et al., 2012).

1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

2. Objetivo general

- Obtener una tortilla adicionada de compuestos bioactivos extraídos a partir de la cascara de pitahaya (*Hylocereus undatus*)

3. Objetivos específicos

- Evaluar la extracción por microondas para la obtención de betalaínas de la cascara de pitahaya.
- Microencapsular mediante la técnica de secado por aspersión los extractos obtenidos.
- Preparar la tortilla funcional y evaluar la actividad antioxidante de las diferentes formulaciones propuestas.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de harina

La obtención de harina a partir de la cáscara de pitahaya (*Hylocereus undatus*) inicia con la recolección de las cascaras en el mercado local del municipio de Calkiní en el estado de Campeche en México. Posteriormente, las cascaras se lavaron para eliminar cualquier residuo, y se deshidrataron con ayuda de un horno de convección a una temperatura de 45 °C durante un periodo de 48 horas. Una vez alcanzada la deshidratación completa, las cáscaras fueron trituradas hasta obtener un polvo fino. El cual se tamizó con ayuda de un tamiz con malla del # 40. La harina obtenida se almacenó de manera segura en un tubo falcón, asegurando su conservación y calidad.

Extracción asistida con microondas

La muestra se colocó en el centro de un horno de microondas de uso doméstico (Acros AM1007Q, China, 1050 W). La extracción se llevó a cabo colocando 500 mg de la muestra en un vaso de precipitado y 10 agregando 10 mL de agua destilada. Una vez realizada la extracción, los extractos se colocaron en tubos Falcon de 15 mL y centrifugaron a 4500 rpm durante 15 minutos, se filtró el sobrenadante con ayuda de un filtro de jeringa y se analizó por espectroscopia UV-Vis.

Evaluación preliminar del efecto potencia y tiempo

Con la metodología previamente mencionado se evaluó el efecto de los factores potencia y tiempo. Para realizar esto, se analizaron por triplicado muestras que fueron sometidas a diferentes niveles de potencia (0, 50 y 100 %) manteniendo un tiempo de extracción fijo (45 segundos). Mientras que el efecto del tiempo de extracción se evaluó sometiendo muestras por triplicado a diferentes tiempos de extracción (15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 segundos) y manteniendo fija la potencia del equipo (50 %).

Los resultados obtenidos en este experimento sirvieron para analizar si los factores propuestos realmente tienen un efecto significativo en la extracción de betalainas totales de la cascara de pitahaya, además de que no ayudará a tener un parámetro que nos permitiera proponer los niveles de los factores potencia y tiempo para realizar la optimización de la extracción mediante un diseño factorial central compuesto utilizando la técnica de microondas.

Optimización de las condiciones para la extracción asistida por microondas

En la Tabla 6 se muestran las variables independientes que se analizaron en el diseño experimental para optimizar la extracción de betalainas totales de la cascara de pitahaya utilizando la técnica de microondas. Para la variable potencia se trabajó con tres niveles, una bajo (-1) que corresponde a una potencia de 20%, uno intermedio (0) que corresponde a una potencia de 50% y uno alto (1) que corresponde a una potencia de 80%. En el caso del factor tiempo también se evaluaron tres niveles, los cuales fueron 30 , 60 y 90 segundos, que corresponden al nivel bajo (-1), intermedio (0) y alto (1). La variable de respuesta propuesta es la cantidad de betalainas totales que se logrará extraer mediante la técnica de microondas.

Tabla 6. Condiciones para la optimización de la extracción por microondas de betalainas

Independent variables	Levels		
	-1	0	1
Potencia (%)	20	50	80
Tiempo (min)	30s	60s	90s

Mientras que en la Tabla 7 se representa el diseño central compuesto (DCC) de superficie de respuesta utilizado para la optimización, en este se observa la combinación de los diferentes niveles de las variables, así como los puntos estrella (1.41 ó -1.41), los hacen referencia a un conjunto de puntos que se seleccionan de manera específica para explorar de manera eficiente el espacio de diseño en la optimización.

Tabla 7. Diseño experimental

Experimento	Potencia	Tiempo
1	0	-1.41
2	-1	1
3	1.41	0
4	1	1
5	1	-1
6	-1.41	0
7	-1	-1
8	0	1.41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

La relación entre las variables independientes y los valores de respuesta se construyó utilizando un modelo de superficie de respuesta polinomial de segundo orden. Cada variable de respuesta se ajustó a la siguiente ecuación de regresión:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i \neq j=1}^3 \beta_{ij} x_i x_j$$

Donde Y_i es la variable de respuesta, la concentración de betalainas totales. Mientras que β_0 , β_i , β_{ii} y β_{ij} son los coeficientes que representan la regresión del modelo, mientras que x_i y x_j son las variables codificadas que afectan a la respuesta.

La precisión del modelo matemático se determinó utilizando el coeficiente R^2 . STATGRAPHICS Centurion XIX (Statgraphics Technologies Inc., The Plains, Virginia, EE.UU.). Se realizó superposiciones de trazados de contorno y de superficies de respuesta tridimensionales, y se seleccionaron las condiciones óptimas de extracción basándose en las superficies de respuesta de todas las variables.

Evaluación de las propiedades bioactivas

Determinación de betalainas

Las betalaínas totales se determinaron siguiendo el procedimiento descrito por Shakir y Simone (2024), con algunas modificaciones. Se colocaron muestras en células y se realizaron mediciones de absorbancia a 538 nm para betacianinas y a 480 nm para betaxantinas. La concentración total de betalaínas se calculó como la suma de las concentraciones de betacianinas y betaxantinas, utilizando un espectrómetro UV-Vis (PerkinElmer®). Las absorbancias obtenidas se analizaron mediante la siguiente fórmula para determinar las concentraciones de betacianinas y betaxantinas en los extractos:

$$\text{Betacianinas o betaxantinas } (\mu\text{g/mL}) = \frac{(A)(DF)(MW)}{(e)(l)}$$

Donde A representa la absorbancia a 538 nm para la betacianina y a 480 nm para la betaxantina; DF es el factor de dilución; MW es el peso molecular (betacianina: 550 g/mol; betaxantina: 308 g/mol); ϵ es el coeficiente de extinción molar (betacianina: 60,000 L/mol·cm; betaxantina: 48,000 L/mol·cm); y l es la longitud de la celda (1 cm).

Microencapsulación de los extractos

La microencapsulación de los extractos se realizó utilizando maltodextrina como agente encapsulante, esto debido a su bajo costo y alta eficiencia como compuesto encapsulante, esta se utilizó una proporción del 10% con respecto al volumen del extracto obtenido. El proceso de secado por aspersión se realizó en un mini secador por aspersión de la marca BUCHI. La mezcla de alimentación se mantuvo bajo agitación magnética constante a 20 °C hasta homogeneidad y se secó por aspersión inmediatamente con un flujo de aire de 100 m³/h y una presión de aire del compresor de 4 bar. El diámetro interno de la boquilla fue de 0,5 mm, el flujo de alimentación fue de 485 ml/h y las temperaturas del aire de entrada y salida fueron de 170 ± 2 y 98 ± 4 °C, respectivamente. Las microcápsulas obtenidas fueron recolectadas y almacenadas herméticamente en un tubo Falcon de 50 mL y colocadas a 4 °C para su conservación.

Preparación de las tortillas

Las tortillas se prepararon en 3 formulaciones diferentes, la tortilla control (T0) que tenía 0% de microcápsulas, la tortilla T2 que tenía en su formulación 5% de microcápsulas, y la tortilla T3 que estaba formulada con 10% de microcápsulas.

La tortilla control (T0) se formuló pesando 8.75 g de harina de maíz y se añadiendo 13.25 mL de agua (H₂O), mezclando bien hasta obtener una masa suave y manejable. La tortilla T1 se elaboró pesando 0.4375 g de microcápsulas de pitahaya (lo que representa el 5% del peso de la harina utilizada), estas se distribuyeron de manera uniforme en 8.3125 g de harina de maíz y se le adicionó 13.25 mL de agua. Finalmente, la formulación de la tortilla T2 (10% de microcápsulas) se realizó pesando 0.875 g de microcápsulas y mezclándolo con 7.875 g de harina de maíz, añadiendo al final 13.25 mL de agua.

Una vez que la mezcla estuvo completamente integrada, se formaron bolitas con la masa de las diferentes formulaciones. Estas bolitas se aplanaron con las manos para darles la forma tradicional de las tortillas. Finalmente, se cocinaron en un sartén caliente, a fuego medio, durante 30 segundos a 1 minuto por cada lado, hasta que alcanzaron una textura dorada y ligeramente inflada.

Evaluación de las tortillas

Las tortillas formuladas a diferentes porcentajes de microcápsulas (0, 5 y 10 %) fueron evaluadas para ver como las diferentes formulaciones afectaba los compuestos antioxidantes presentes y la concentración de betalainas. Para esto, 1 g de tortilla fue sometido a un proceso de extracción por ultrasonido, utilizando como solvente agua destilada con ácido acético al 2 %, este proceso se realizó durante un tiempo de 30 minutos. Posteriormente, el sobrenadante fue filtrado con ayuda de un filtro de jeringa con tamaño de poro de 0.45 μm y analizado espectrofotométricamente para la determinación de las betalainas totales.

Adicionalmente, se determinó la actividad antioxidante de las tortillas fortificadas con las microcápsulas, para esto se utilizaron las técnicas de DPPH y ABTS. Las cuales son descritas a continuación.

Determinación de actividad antioxidante por ABTS.

La determinación de la capacidad antioxidante mediante la metodología ABTS se realizó siguiendo el protocolo descrito por Nenadis et al. (2004), con algunas modificaciones. Para preparar la solución ABTS+, se pesaron 19,2 mg del reactivo y se disolvieron en 5 mL de agua destilada. Posteriormente, se añadieron 88 µL de K₂S₂O₈ (37,8 mg/mL) y la mezcla se incubó a temperatura ambiente durante 16 horas. Finalmente, la solución de ABTS+ se diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de 0,7 ± 0,02 a 734 nm.

Se añadieron 2970 µL de la solución de ABTS a un tubo falcón de 15 ml. A continuación, se incorporaron 30 µL del extracto de cáscara de pitahaya y se homogenizó la mezcla utilizando un vortex. La mezcla se dejó reposar durante 8 minutos, y posteriormente se midió la absorbancia en un espectrofotómetro Perkin Elmer Precisely Lambda 25 a 734 nm.

$$\% \text{ de inhibición de ABTS} = \frac{A_{t0} - A_{t8}}{A_{t0}} \times 100$$

Donde: At0 es la absorbancia de tiempo a los 0 minutos; At8 es la absorbancia a los 8 minutos. La curva de calibración se preparó utilizando diferentes concentraciones de Trolox (100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 µM).

Determinación de actividad antioxidante por DPPH

La actividad antioxidante se determinó utilizando el método de eliminación del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), siguiendo el protocolo descrito por Brand-Williams et al. (1995), con algunas modificaciones. En tubos Falcon de 15 mL, se añadieron 3800 µL de solución DPPH (0,1 mM) y 200 µL de extracto. La mezcla se homogeneizó mediante un vórtex y se incubó en oscuridad a temperatura ambiente durante 60 minutos. Posteriormente, se midió la absorbancia a 515 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®). El porcentaje de inhibición de DPPH para cada muestra se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de inhibición de DPPH} = \frac{A_{t0} - A_{t60}}{A_{t0}} \times 100$$

Donde: A_{t0} es la absorbancia a los 0 minutos; A_{t60} es la absorbancia a los 60 minutos.
La curva de calibración se preparó utilizando diferentes concentraciones de Trolox (100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 μM).

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Betalainas totales en la cáscara de pitahaya

La siguiente representación gráfica, muestra las betalainas totales que se obtuvieron empleando el microondas con una potencia de 50 variando los tiempos (15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 s), durante el estudio se observó que el tratamiento con un tiempo de 75 s presentó un rendimiento superior al de los otros tratamientos, teniendo un valor de betalainas totales de 833.62 ug/mL. Posterior a ese tiempo, se observa una disminución de la cantidad de betalainas extraídas, pudiéndose deber este comportamiento a una degradación por parte de estos compuestos. En los primeros segundos la extracción fue menor posiblemente a que no era el tiempo necesario para lograr la extracción de la mayor cantidad de betalainas presentes en la cascara de pitahaya.

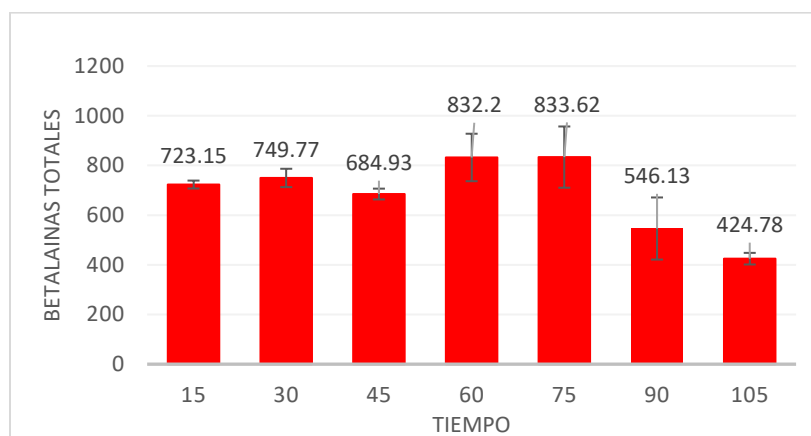


Figura 4. Evaluación de la extracción por microondas de betalainas totales utilizando diferentes tiempos.

Con base en los resultados anteriores se estableció un solo tiempo para la extracción a 60 s, posteriormente y empleando dicho tiempo se probaron 3 potencias de microondas (0%, 50% y 100%) como se puede observar en la Figura 7, la mayor extracción de betalainas totales se dio empleando una potencia de 50%, siendo el valor de las betalainas totales de 832.2 ug/mL.

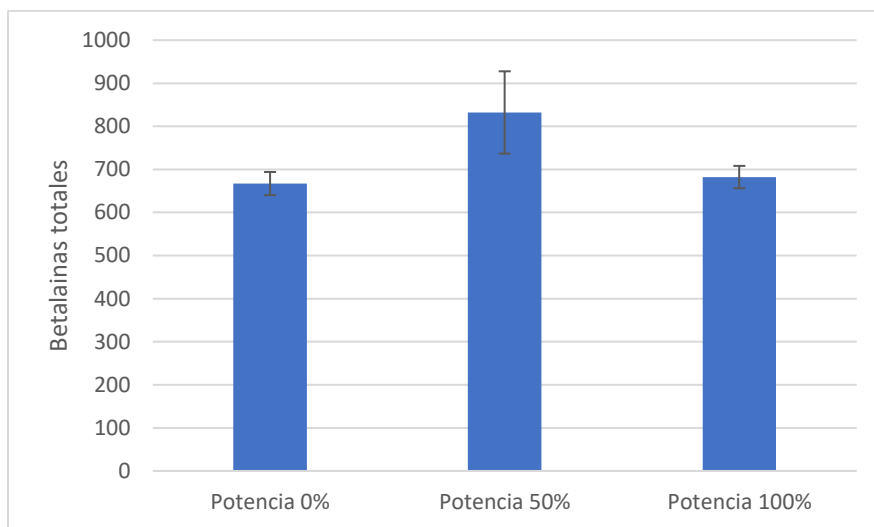


Figura 5. Evaluación de la extracción por microondas de betalainas totales utilizando diferentes potencias.

Optimización de extracción de betalainas por microondas

En la Tabla 8 se observa que el experimento 2 dio los valores más altos de betalainas, corresponde a una extracción realizada en un tiempo de 30 segundos a una potencia de 90 %. El segundo valor más alto corresponde al experimento 5, en el cual el tiempo fue de 90 segundos con una potencia de 30 %. Finalmente podemos encontrar que el experimento 3 obtuvo el menor porcentaje en betalainas este realizado en un tiempo de 102.3 segundos y una potencia de 60 %.

Tabla 8. Resultados de la optimización de la extracción de betalainas por microondas.

Exp.	Tiempo (segundo)	Potencia (%)	Betalainas totales
1	60 (0)	7.7 (-1.41)	1465.3
2	30 (-1)	90 (1)	1508.56
3	102.3 (1.41)	60 (0)	570.67
4	90 (1)	90 (1)	955.81
5	90 (1)	30 (-1)	1500.01
6	17.7 (-1.41)	60 (0)	1451.02
7	30 (-1)	30 (-1)	1333.66
8	60 (0)	92.3 (1.41)	1089.68
9	60 (0)	60 (0)	1442.74
10	60 (0)	60 (0)	1413.32
11	60 (0)	60 (0)	1470.06

En la Tabla 9 se observa los resultados obtenidos del análisis de varianza, en este se observa que, de los factores evaluados, el tiempo mostro efecto significativo en la extracción de betalainas por microondas. Mientras que la potencia del equipo no tuvo efecto significativo. También se puede observar que el diseño experimental tuvo una r^2 del 81.8, indicando que se tienen un buen ajuste.

Tabla 9. Análisis de varianza del diseño experimental.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Relación F</i>	<i>Valor p</i>
A: Tiempo	332684.	1	332684.	10.26	0.0239
B: Potencia	101364.	1	101364.	3.13	0.1372
AA	164184.	1	164184.	5.06	0.0742
AB	129276.	1	129276.	3.99	0.1023
BB	7809.9	1	7809.9	0.24	0.6443
Total, error	162085.	5	32417.0		
Total(corr.)	890631.	10			

R cuadrado = 81,8011 %

R cuadrado (ajustado para d.f.) = 63,6022 %

PULSE 1.14478E6

R cuadrado (predicho) = 0,0 %

Error estándar de est. = 180.047

Error absoluto medio = 88,8017

Estadístico de Durbin-Watson = 2,00722 (P=0,3887)

Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,0177165

En la Figura 8 se observan el diagrama de Pareto del efecto de las variables independientes en la extracción de betalainas totales mediante la técnica de microondas. En este se puede observar que el tiempo de extracción fue el factor que mostro mayor efecto en la extracción de las betalaínas totales, mostrando un efecto positivo, lo que indica que al aumentar el tiempo también se incrementa el rendimiento de la extracción. Por otro lado, la potencia y la interacción de los factores potencia y tiempo no mostraron tener efecto significativo.

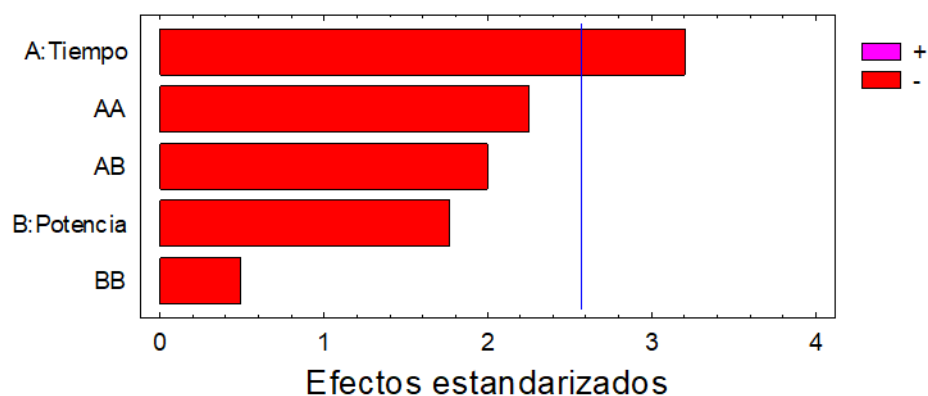


Figura 6. Diagrama de Pareto del efecto de las variables independientes en la extracción de betalainas totales.

En la Figura 9 se represente el diagrama de superficie de respuesta obtenido de la optimización de las condiciones de la extracción por microondas, en este se observa un máximo de extracción que corresponde a unas condiciones de extracción de potencia del 10% y un tiempo de 65 segundos. Dando como resultado un máximo de extracción experimental de 1526.57 ± 19.62 ug/mL. También se puede observar en la Figura 9 que al trabajar a potencias de microondas altas por tiempos prolongados provoca una disminución considerable en la extracción de las betalainas, pudiéndose deber este efecto a una degradación de estos compuestos.

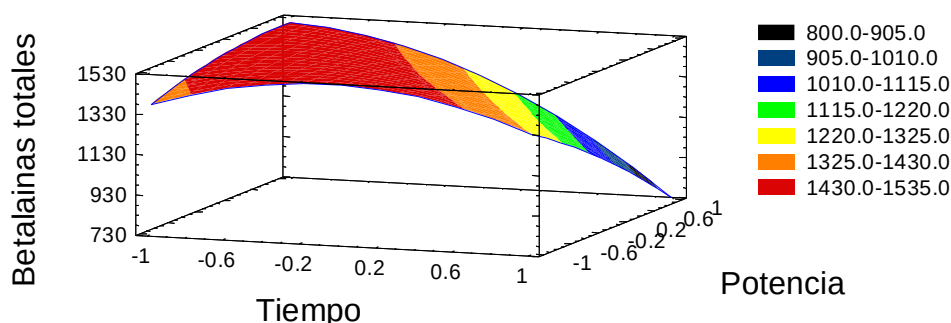


Figura 7. Superficie de respuesta de la optimización de la extracción por microondas de las betalainas totales.

En la Tabla 10 se muestran los valores teóricos y experimentales de la extracción de betalainas totales de la cascara de pitahaya utilizando la extracción por microondas. En este se puede observar que los valores obtenidos de forma experimental son estadísticamente iguales a los que indica el diseño experimental, dando validez a los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Tabla 10. Valor teórico y experimental optimo de las condiciones optimizadas de la extracción por microondas.

	Valor teórico	Valor experimental
Betalainas Totales	1530.56	1526.57 ± 19.62

Obtención de microcápsulas

El proceso de secado por aspersión implica la transformación de una emulsión líquida en un polvo seco mediante la atomización y la evaporación rápida del solvente en una corriente de aire caliente. Para llevar a cabo la microencapsulación de betalainas, se empleó un agente encapsulante, la maltodextrina, esta protege los compuestos activos y mejoran sus propiedades de almacenamiento.

Se utilizó el método de secado por aspersión con un flujo de aire de 100 m³/h y una temperatura de entrada de 165 °C, en el cual se obtuvo una pequeña cantidad de las microcápsulas, se comenzó con la preparación de una solución o emulsión en la que las betalainas extraídas de la cáscara de pitahaya se dispersaron junto con el material encapsulante. Posteriormente, esta mezcla fue alimentada a un secador por aspersión, donde se atomizó en pequeñas gotas dentro de una cámara de secado con aire caliente. La rápida evaporación del agua solidifica las partículas, obteniendo un polvo microencapsulado con una mayor estabilidad y biodisponibilidad.



Figura 8. Microencapsulación de compuestos betalainas por el método de secado por aspersión.

Elaboración de tortillas

En la Figura 12 se presentan tres formulaciones de tortillas con diferentes concentraciones de microcápsulas: 0%, 5% y 10%. La primera formulación (0%) se obtuvo únicamente con una mezcla de agua y maíz, sin adición de microcápsulas. En la segunda formulación (5%), la incorporación de microcápsulas otorgó a la tortilla un ligero tono lila. Por último, en la tercera formulación (10%), el color lila característico de las microcápsulas es más intenso, lo que se atribuye al mayor porcentaje de microcápsulas incorporado en la mezcla.



Figura 12. Tortillas crudas adicionadas con microcápsulas,

En la Figura 13 se observa que, tras el proceso de cocción, las tortillas presentaron una disminución en la intensidad de su color en comparación con su versión cruda. Este cambio podría atribuirse a una leve pérdida de compuestos bioactivos responsables de la coloración, posiblemente ocasionada por las condiciones térmicas durante la cocción.



Figura 13. Tortillas cocidas adicionadas con microcápsulas

Evaluación de Betalainas totales en las tortillas

La figura 14 representa la concentración de betalainas totales ($\mu\text{g/g}$) en tortillas con diferentes concentraciones de microcápsulas (T0%, T5% y T10%). T0% (sin microcápsulas) presenta la menor concentración de betalainas ($\sim 22 \mu\text{g/g}$), lo que sugiere que la tortilla sin microcápsulas tiene un contenido basal de estos compuestos. La barra de error es muy pequeña, indicando que las mediciones son consistentes. T5% (5% de microcápsulas) se observa un incremento significativo ($\sim 42 \mu\text{g/g}$), lo que confirma que la adición de microcápsulas aumenta la concentración de betalainas. Sin embargo, la barra de error es grande, sugiriendo variabilidad en las mediciones o diferencias en la distribución de los pigmentos. T10% (10% de microcápsulas) muestra la mayor concentración ($\sim 55 \mu\text{g/g}$), lo que confirma una relación dosis-dependiente entre la cantidad de microcápsulas y el contenido de betalainas. Sin embargo, la alta variabilidad de los datos, reflejada en la barra de error grande, sugiere que la estabilidad o distribución de las betalainas en la matriz de la tortilla podría ser un factor a considerar.

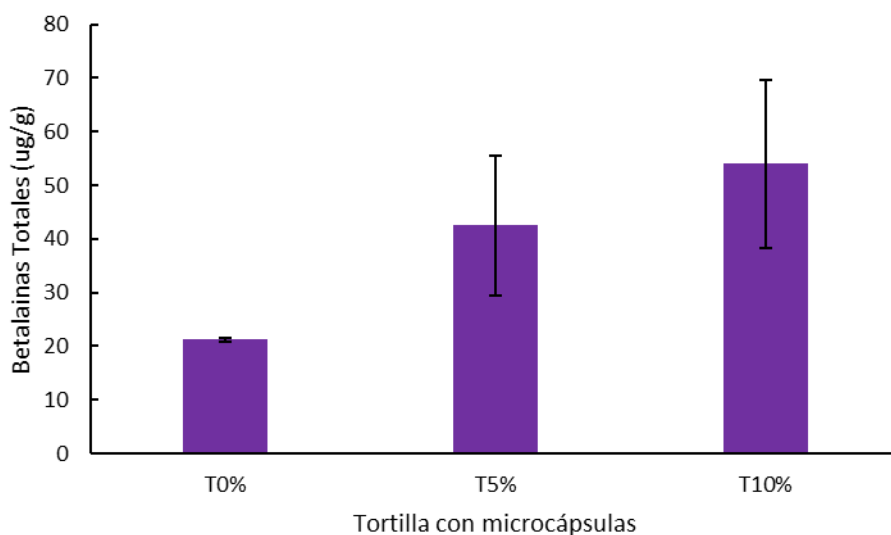


Figura 14. Betalainas totales de las diferentes muestras de tortilla adicionadas con microcápsulas.

Evaluación de la actividad antioxidante en las tortillas

La figura 15 muestra el efecto de la adición de microcápsulas en tortillas sobre la actividad antioxidante medida como el porcentaje de inhibición del DPPH. Existe una relación positiva entre el porcentaje de microcápsulas y la actividad antioxidante de la tortilla. A medida que aumenta la cantidad de microcápsulas, el porcentaje de inhibición por DPPH también se incrementa, T0% muestra el valor más bajo (~2-3%), indicando una baja capacidad antioxidante. Seguidamente T5% presenta un incremento significativo (~8%), lo que sugiere que la adición de microcápsulas mejora notablemente la actividad antioxidante. Finalmente, T10% alcanza el valor más alto (~11%), confirmando que una mayor cantidad de microcápsulas está asociada con un mayor efecto antioxidante. Las barras de error en cada barra del gráfico representan la variabilidad de los datos. Son relativamente pequeñas, lo que sugiere que las mediciones son consistentes y reproducibles, aumentando la confiabilidad de los resultados.

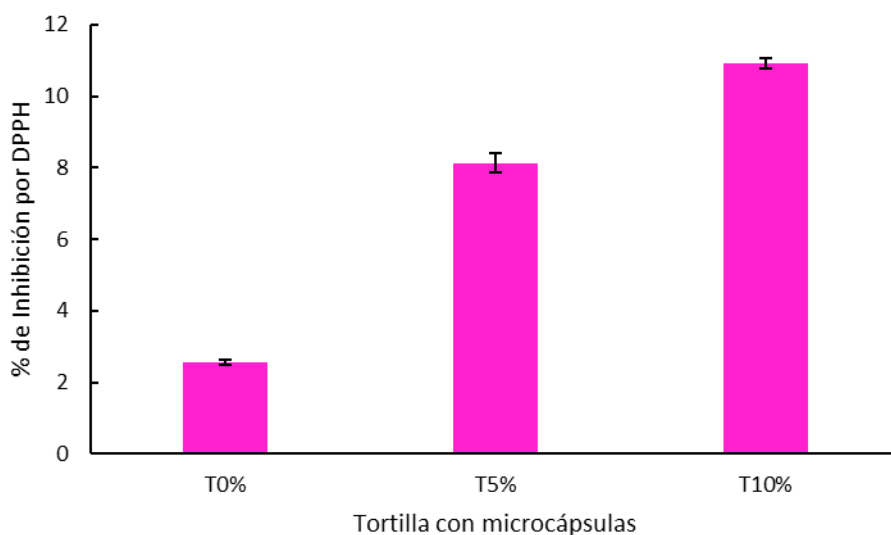


Figura 15. Betalainas totales de las diferentes muestras de tortilla adicionadas con microcápsulas.

La figura 16 muestra el porcentaje de inhibición del ABTS en tortillas con diferentes concentraciones de microcápsulas (T0%, T5% y T10%). La inhibición de ABTS es un indicador de la capacidad antioxidante de los compuestos presentes en la muestra. T0% (sin microcápsulas), presenta la menor capacidad antioxidante (~2.3%), lo que sugiere que la tortilla sin microcápsulas tiene baja actividad frente al radical ABTS. T5% (5% de microcápsulas) existe un ligero aumento en la inhibición (~3%), pero la diferencia con T0% es relativamente pequeña y presenta una barra de error amplia, indicando mayor variabilidad en los datos. T10% (10% de microcápsulas) se puede observar un incremento significativo en la actividad antioxidante (~5.8%), lo que indica que una mayor concentración de microcápsulas está asociada con una mayor capacidad antioxidante.

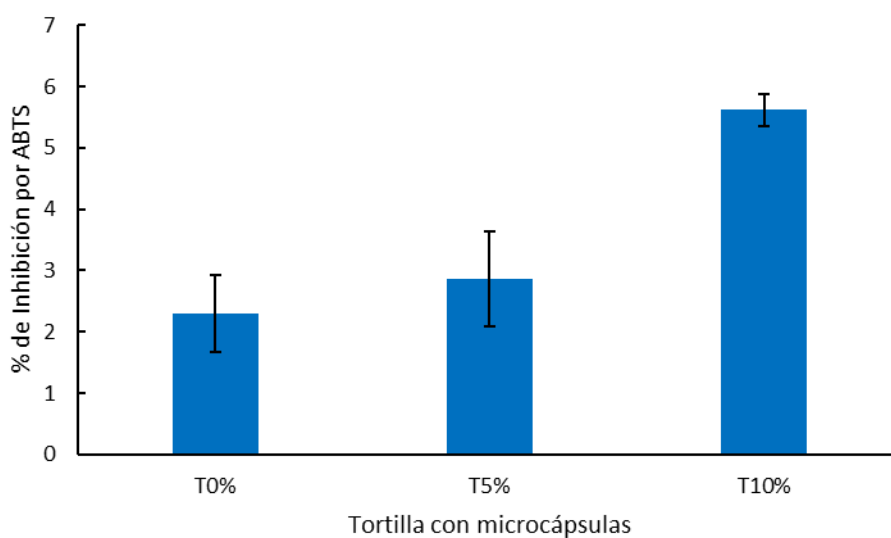


Figura 16. Betalainas totales de las diferentes muestras de tortilla adicionadas con microcápsulas.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación abordó el aprovechamiento de la cáscara de pitahaya como fuente de betalaínas, explorando su extracción mediante tecnología de microondas, la microencapsulación de los extractos obtenidos y la incorporación de estos en la formulación de una tortilla funcional con propiedades antioxidantes.

En primer lugar, la evaluación de la extracción por microondas permitió optimizar el proceso de obtención de betalaínas a partir de la cáscara de pitahaya, un subproducto agroindustrial con alto potencial de valorización. Esta técnica destacó por su eficiencia en la recuperación de compuestos bioactivos, reduciendo tiempos de extracción y minimizando la degradación térmica de los pigmentos. Además, se observó que la selección de parámetros adecuados, como la potencia de microondas y el tiempo de exposición, influyó significativamente en la concentración y estabilidad de las betalaínas extraídas, lo que favorece su posterior aplicación en alimentos funcionales.

Posteriormente, la microencapsulación de los extractos obtenidos mediante secado por aspersión demostró ser una estrategia eficaz para mejorar la estabilidad y biodisponibilidad de las betalaínas. Este proceso permitió la formación de micropartículas protectoras que resguardan los compuestos bioactivos de factores ambientales como la luz, la temperatura y la humedad, lo que prolonga su vida útil y facilita su manipulación en aplicaciones alimentarias. Asimismo, la elección de agentes encapsulantes adecuados fue clave para mantener las propiedades antioxidantes de los extractos, asegurando su liberación controlada en la matriz alimentaria final.

Finalmente, la formulación y evaluación de la tortilla funcional enriquecida con extractos microencapsulados de cáscara de pitahaya representó una innovación en el desarrollo de alimentos con propiedades antioxidantes mejoradas. A través del análisis de diversas formulaciones, se pudo determinar la influencia de la adición de los extractos en las características sensoriales, fisicoquímicas y antioxidantes del producto final. Los resultados indicaron que las tortillas funcionales lograron un incremento significativo en

su capacidad antioxidante sin comprometer su aceptabilidad sensorial, lo que resalta el potencial de estos ingredientes naturales en la industria alimentaria.

En conclusión, el estudio demostró que la extracción de betalaínas por microondas, su posterior microencapsulación y su incorporación en una tortilla funcional constituyen un enfoque integral para el desarrollo de alimentos innovadores con beneficios para la salud. Estos hallazgos no solo impulsan la valorización de subproductos agroindustriales, sino que también fomentan el uso de tecnologías sostenibles en la industria alimentaria. En futuras investigaciones, sería interesante explorar la aplicación de este tipo de extractos en otros productos alimenticios y evaluar su impacto en la salud a través de estudios clínicos y de biodisponibilidad.

Referencias

- Alupului, A., I. Călinescu, and V. Lavric. 2012. Microwave extraction of active principles from medicinal plants. U P B. Sci. Bull., Series B. 74: 129-142.
- Contreras-Jiménez, B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M. L., & Gaytán-Martínez, M. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. *CyTA - Journal of Food*, 12(3), 263-270. <https://doi.org/10.1080/19476337.2013.840804>
- Ferrari, C, S. Marconi, and J. Aguirre. 2012. Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. *Drying Technology*
- Hernández, J. (2024). *Producción de Antibióticos*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TECÁMACDIVISIÓN QUÍMICO BIOLÓGICAS.
- Muñoz, L. (2011). Impacto del consumo de harina de maíz con un bajo nivel de enriquecimiento en niños de zonas rurales. *NUTRICION HOSPITALARIA*, 5, 1097-1104. <https://doi.org/10.3305/nh.2011.26.5.5127>
- Suarez, D. (2018). *Principios Básicos De La Cromatografía Líquida De Alto Rendimiento Para La Separación Y Análisis De Mezclas*. 4(1).
- Cáliz de Dios, H., Castillo, R., & Caamal, H. (2014). Caracterización de la producción de pitahaya (*Hylocereus* Spp.). *Agroecología*, 9, 123–132.
- Fathordoobady, F., Mirhosseini, H., Selamat, J., & Manap, M. Y. A. (2016). Effect of solvent type and ratio on betacyanins and antioxidant activity of extracts from *Hylocereus polyrhizus* flesh and peel by supercritical fluid extraction and solvent extraction. *Food Chemistry*, 202, 70–80.
- Huang, Y., Brennan, M. A., Kasapis, S., Richardson, S. J., & Brennan, C. S. (2021). Maturation process, nutritional profile, bioactivities and utilisation in food products of red pitaya fruits: A Review. *Foods*, 10(11), 2862.
- Jiang, H., Zhang, W., Li, X., Shu, C., Jiang, W., & Cao, J. (2021). Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 199-217.

- Lee, S., Suh, D. H., Lee, S., Heo, D. Y., Kim, Y.S., Cho, S. K., & Lee, C. H. (2014). Metabolite profiling of red and white pitayas (*Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*) for comparing betalain biosynthesis and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(34), 8764–8771.
- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., & Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 80-89.
- Lin, X. E., Gao, H., Ding, Z., Zhan, R., Zhou, Z., & Ming, J. (2021). Comparative metabolic profiling in pulp and peel of green and red pitayas (*Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*) reveals potential valorization in the pharmaceutical and food industries. *BioMed research international*, 1-12.
- Madane, P., Das, A. K., Nanda, P. K., Bandyopadhyay, S., Jagtap, P., Shewalkar, A., et al. (2020). *Journal of Food Science & Technology*, 57(4), 1449–1461.
- Madadi, E., Mazloun-Ravasan, S., Yu, J. S., Ha, J. W., Hamishehkar, H., & Kim, K. H. (2020). Therapeutic application of betalains: A review. *Plants*, 9(9), 1–27.
- Rodríguez, A. (2013). Pitahaya (*Hylocereus undatus*) producción y comercialización en México. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Shiau, S. Y., Li, G. H., Pan, W. C., & Xiong, C. (2020). Effect of pitaya peel powder addition on the phytochemical and textural properties and sensory acceptability of dried and cooked noodles. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14491.
- Slimen, I. B., Najar, T., & Abderrabba, M. (2017). Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(4), 675–689.
- Sosa, V., & Pérez-Orozco, A. (2022). Las pitahayas: frutos mayas del futuro. *Ecofronteras*, 22-25.
- Anderson, E.F. 2001. *The Cactus Family*. Portland, Oregon: TimberPress.
- Bauer R. 2003. A synopsis of the tribe Hylocereeae F. Buxb. (Cactaceae). *Systematics Initiatives* 17: -63.
- Bravo-Hollis H. 1978. *Las Cactáceas de México*, Vol. 1. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.
- Britton, N. L. y J. N. Rose. 1963. *The Cactaceae*. Vol. II. Carnegie Inst. Washington: Washington.USA.
- Cáliz de Dios, H. 1996. Aspectos taxonómicos de la pitahaya. En: R. Castillo M., y H. Cáliz De Dios (Comps.). *Primer curso*

teórico práctico sobre el cultivo de la pitahaya (memorias). Universidad de Quintana Roo.
Chetumal, Quintana

Roo, México. Págs: 33-48. Sin ISSN

Cáliz de Dios, H., y R. Castillo M. 2000. Soportes vivos para pitahaya (*Hylocereus* spp.) en sistemas agroforestales.

Agroforestería de las Américas. 2(1): 23-27. ISSN 1022-7482. [Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica, Centro América].

Cunha, LCM, Monteiro, MLG, Costa-Lima, BRC, Guedes-Oliveira, JM, Alves, VHM, Almeida, AL, Tonon, RV, Rosenthal, A., & Conte-Junior, CA (2018). Effect of microencapsulated extract of pitaya (*Hylocereus costaricensis*) peel on color, texture and oxidative stability of refrigerated ground pork patties submitted to high pressure processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* , 49 , 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.08.009>

Jiang, H., Zhang, W., Li, X., Shu, C., Jiang, W., & Cao, J. (2021). Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: A comprehensive review. *Trends in Food Science and Technology* , 116 (June), 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.040>

Laqui-Vilca, C., Aguilar-Tuesta, S., Mamani-Navarro, W., Montaña-Bustamante, J., & Condezo-Hoyos, L. (2018). Ultrasound-assisted optimal extraction and thermal stability of betalains from colored quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) hulls. *Industrial Crops and Products* , 111 (November 2017), 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.034>

Oney-Montalvo, E., & Rivera3, ACP and E. de JR (2023). Pitahaya (*Hylocereus* spp.) as a functional food: source of nutrients and phytochemicals. *Milenaria, Ciencia y Arte* , 1 (2) (21), 5–7.

Slimen, I.B., Najar, T., & Abderrabba, M. (2017). Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* , 65 (4), 675–689. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04208>

- Tabio-García, D., Paraguay-Delgado, F., Sánchez-Madrigal, M., Quintero-Ramos, A., Espinoza-Hicks, J.C., Meléndez-Pizarro, CO, Ruiz-Gutiérrez, M.G., & Espitia-Rangel, E. (2021). Optimization of the ultrasound-assisted extraction of betalains and polyphenols from *Amaranthus hypochondriacus* var. Nutrisol. *Ultrasonics Sonochemistry* , 77 . <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105680>
- Thirugnanasambandham, K., & Sivakumar, V. (2017). Microwave assisted extraction process of betalain from dragon fruit and its antioxidant activities. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* , 16 (1), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.02.001>
- Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J., & Paucar-Menacho, LM (2020). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): Culture, physicochemical characteristics, nutritional composition, and bioactive compounds. *Scientia Agropecuaria* , 11 (3), 439–453. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.16>
- Flores, A., & Chicaiza, V. (2016). Evaluación de extracción, encapsulación y capacidad antioxidante de las antocianinas de la flor de Jamaica. Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5760/1/AGI-2016-T015.pdf>
- Reddy, K. R. (2014). Controlled Release, Pegylation, Liposomal Formulations: New Mechanisms in the Delivery of Injectable Drugs, 34. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10928404>
- Islas, R. P. (2014). Alimentos Microencapsulados : Particularidades de los Procesos para la Microencapsulación de Alimentos para Larvas de Especies Acuícolas, (May). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228544375_Alimentos_Microencapsulados_Particularidades_de_los_Procesos_para_la_Microencapsulacion_de_Alimentos_para_Larvas_de_Especies_Acuicolas
- Shih, Y., et al. (2019). Bioactive compounds from pitaya: Extraction and characterization. *Food Chemistry*, 300, 125232.
- Sethi, S., et al. (2021). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from dragon fruit. *Journal of Food Science*, 86(4), 1441-1449.

- Oliveira, J., et al. (2020). Chemical composition of pitaya and its bioactive potential. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1-12.
- Lopes, D., et al. (2021). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from pitaya. *Food and Bioproducts Processing*, 129, 58-65.
- Da Silva, L., et al. (2019). Enzymatic extraction of bioactive compounds from pitaya. *Food Research International*, 116, 429-438.
- Kamboj, S., et al. (2020). Microwave-assisted extraction of bioactive compounds from pitaya. *Antioxidants*, 9(7), 635.
- Ahmed, M., et al. (2020). Microencapsulation of pitaya anthocyanins by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 285, 110106.
- Sani, A., et al. (2021). Lyophilization of pitaya bioactive compounds: Optimization and stability. *Food Bioprocess Technology*, 14(3), 598-610.
- Ghafoor, K., et al. (2022). Extrusion encapsulation of bioactive compounds from pitaya pulp. *Journal of Food Science*, 87(10), 4123-4131.
- Cheng, Z., et al. (2019). Electrospinning for the encapsulation of pitaya-derived anthocyanins. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 12.
- Simić, A., et al. (2020). Coacervation process for microencapsulation of pitaya bioactives. *Food Hydrocolloids*, 102, 105622.
- Liang, X., et al. (2019). Ionic gelation for microencapsulation of pitaya bioactive compounds. *Food Biopolymers*, 3(4), 45-55.
- Liang, X., et al. (2019). "Optimization of betalain extraction from pitaya peel using response surface methodology." *Food Science and Technology*, 36(5), 849-857.
- González, M., et al. (2021). "Ultrasound-assisted extraction of betalain pigments from dragon fruit peel." *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15545.
- Hernández, L., et al. (2020). "Valorization of pitahaya peel: Betalains extraction and antioxidant properties." *Food Bioprocess Technology*, 13(7), 1267-1277.

- Sethi, S., et al. (2021). "Optimizing extraction conditions for betalain pigments from pitaya peel using ultrasonic-assisted extraction." *Food and Bioproducts Processing*, 125, 68-75.
- Rodríguez, J., Pérez, M., & Gómez, L. (2020). *Avances en la extracción de compuestos bioactivos de frutas tropicales*. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 15(3), 45-58.
- González-Mendoza, D., Ramírez, A., & Sánchez, P. (2021). *Estrategias de extracción y aprovechamiento de residuos agroindustriales*. *Journal of Agricultural Sciences*, 8(2), 112-126.
- López-Herrera, C., Fernández, R., & Vargas, J. (2019). *Aplicaciones de extractos naturales en la industria alimentaria y farmacéutica*. *Food and Chemical Research*, 12(1), 67-80.
- González, M., Pérez, R., & Vargas, J. (2021). *Microencapsulación de compuestos bioactivos: aplicaciones y desafíos en la industria alimentaria*. *Food Science Journal*, 14(2), 56-73.
- Martínez, A., Torres, L., & Jiménez, C. (2020). *Estrategias para la estabilización de antioxidantes naturales mediante microencapsulación*. *Journal of Applied Biotechnology*, 11(3), 98-110.
- Ramírez, P., & López, G. (2019). *Encapsulación de flavonoides y su impacto en la bioactividad de extractos naturales*. *Chemical Advances*, 7(1), 44-59.

Anexos

