

UNIVERSIDAD DEL PAPALOPAN

CAMPUS TUXTEPEC

T E S I S

Efecto de la modificación por ultrasonido del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) sobre sus propiedades encapsulantes

Que para obtener el título de:

Ingeniera en Alimentos

Presenta:

Fátima Rojas Soto

Director de Tesis:

Co-directora de Tesis:

Dr. Lucio Abel Vázquez León Dra. Violeta Carpintero Tepole

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., 2024



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
CAMPUS TUXTEPEC

INGENIERIA EN ALIMENTOS


ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la ciudad de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, el día 09 de julio del 2024, los miembros de la comisión revisora de tesis designada por la jefatura de carrera de la licenciatura en Ingeniería en Alimentos decidieron examinar la tesis titulada “Efecto de la modificación por ultrasonido del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) sobre sus propiedades encapsulantes” presentada por la egresada C. Fátima Rojas Soto, aspirante al título de Licenciatura.


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la comisión manifestaron que la tesis **satisface** los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes, otorgando su **aprobación** para que la aspirante proceda con el proceso de titulación.

Tuxtepec, Oaxaca. A 12 de Julio del 2024

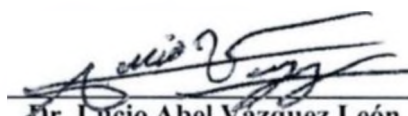
Atentamente
LA COMISIÓN REVISORA



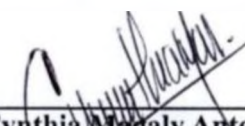
Dr. Miguel Ángel García Muñoz
Profesor Investigador
Universidad del Papaloapan
Revisor de tesis



Dr. Aurelio Ramírez Hernández
Profesor Investigador
Universidad del Papaloapan
Revisor de tesis



Dr. Lucio Abel Vázquez León
Profesor Investigador
Director de tesis



Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros
Profesora Investigadora
Universidad del Papaloapan
Revisor de tesis



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
CAMPUS TUXTEPEC

INGENIERIA EN ALIMENTOS

Tuxtepec, Oax. 09 de Julio del 2024

Oficio No.	JCIA/012/2024
Asunto	Autorización de impresión de tesis

C. Fátima Rojas Soto
Egresada de la carrera Ingeniería en Alimentos
Universidad del Papaloapan
Presente

Con base en el dictamen de la comisión revisora, se autoriza la impresión del trabajo de tesis titulado: "Efecto de la modificación por ultrasonido del almidón de malanga (*Colosia esculenta*) sobre sus propiedades encapsulantes" para obtener el título de Licenciado en Ingeniería en Alimentos.

Por lo anterior y de acuerdo al reglamento institucional, se le da trámite legal para que proceda a la impresión del trabajo presentado.

El jurado del examen profesional esta compuesto por los siguientes profesores investigadores:

Dr. Miguel Ángel García Muñoz (Presidente, Universidad del Papaloapan)
Dr. Alejandro Aparicio Saguilán (Secretario, Universidad del Papaloapan)
Dr. Aurelio Ramírez Hernández (Vocal, Universidad del Papaloapan)
Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros (Primer suplente, Universidad del Papaloapan)
Dra. Delia Esther Páramo Calderón (Segundo suplente, Universidad del Papaloapan)

Sin más por el momento, le agradezco el apoyo. Reciba un saludo cordial.

Atentamente
Terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chi jí jú



Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros
Jefatura de carrera Ingeniería en Alimentos

INGENIERIA EN
ALIMENTOS
CAMPUS TUXTEPEC

ccp. Egresada, para su conocimiento
ccp. Dr. Lucio Abel Vázquez León. Director de tesis, para su conocimiento
ccp. Archivo

Vo. Bo. M. en C. Héctor López Arjona
ViceRector Académico



VICE-RECTORIA
ACADEMICA

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado del trabajo y las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

Dedicatorias

Al llegar al final de este largo camino, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de esta tesis. Este trabajo ha sido uno de los desafíos más complejos que he enfrentado, y es el fruto de mucho esfuerzo, dedicación y sacrificio. Sin embargo, también ha sido posible gracias al apoyo incondicional de quienes me acompañaron y me ayudaron a convertirlo en una experiencia más agradable.

En primer lugar, quisiera expresar mi más profundo agradecimiento **a mis padres**, Pragedes S. y Ángel R., quienes han sido mi mayor fuente de apoyo durante todos estos años. Su fe incondicional en mí me dio la fortaleza para superar cada obstáculo. Mamá y papá, gracias por su comprensión y su arduo esfuerzo fueron la pieza clave para poder culminar este trabajo.

A mis hermanos, Fernanda I. y Gustavo A., ustedes fueron uno de los principales motivos que me impulsaron a seguir adelante, espero que mi logro lo sientan como propio. Gracias por las risas compartidas y por estar a mi lado en los buenos y malos momentos. Recuerden que lo que sea que se propongan lo podrán lograr, ambos son de las personas más inteligentes, creativas y dedicadas que conozco.

A mis amigos, a Susy G., gracias por ser una constante fuente de alegría y apoyo incondicional. Tu amistad durante la universidad es de las cosas que más valoro. Las risas, las conversaciones y los momentos compartidos hicieron que los tiempos más difíciles se sintieran ligeros; a Víctor R., tu comprensión y las palabras de aliento fueron un apoyo importante en este proceso. Tu amistad durante la carrera fue la que menos esperaba, pero acudiste muchas veces a mi ayuda. Les agradezco por brindarme su amistad, este logro también les pertenece, pues sin su compañía, este viaje no habría sido el mismo.

A mi asesor, el Dr. Lucio Abel Vázquez León, gracias por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su guía. Sin su apoyo y adiestramiento, este proyecto no habría sido posible. Gracias por ser un maestro excepcional y, sobre todo, por su paciencia a lo largo de todo este proceso.

Reconocimientos

Este trabajo fue realizado en el LINAM y en el Taller de Alimentos de la Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec, bajo la dirección del Dr. Lucio Abel Vázquez León; así como también, se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tehuacán (México) bajo la codirección de la Dra. Violeta Carpintero Tepole.

Resumen

La encapsulación es una estrategia utilizada para proteger agentes activos frente a factores externos que podrían dañarlos fisicoquímicamente. El secado por aspersión es una técnica común para esta protección y la más utilizada en la industria alimentaria; debido a que es un proceso económico, escalable y continuo. Esta técnica requiere de formadores de pared dispersados en medios generalmente acuosos, en donde también se encuentra el agente activo. Dentro de los materiales de pared, los almidones han ganado importancia debido a su disponibilidad, bajo costo y versatilidad. El almidón de malanga es un biopolímero que ya ha sido utilizado como formador de pared; sin embargo, en su forma nativa suele presentar limitaciones para esta aplicación, debido a que forma agregados esféricos que presentan cavidades o poros en su estructura, lo que impide una completa protección de los agentes activos. Para mejorar esta característica, el almidón debe modificarse. Una de las técnicas de modificación es el ultrasonido, que produce alta fuerza de cizallamiento y rompe la estructura granular del almidón, mejorando sus propiedades. Esto da como resultado una disminución en los tamaños y la frecuencia de los poros/cavidades de dichos sistemas encapsulantes (agregados esféricos).

Contenido

<i>Dedicatorias</i>	<i>ii</i>
<i>Reconocimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iv</i>
<i>Contenido</i>	<i>v</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>viii</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES	3
2.1 Almidón	3
2.1.1 Composición química de los almidones	3
2.1.2 Fuentes de almidón.....	5
2.2 Malanga	5
2.2.1 Producción nacional y mundial de malanga	6
2.2.2 Composición química de la malanga.....	7
2.3 Importancia de la modificación de almidones en la industria de alimentos	8
2.3.1 Modificaciones del almidón para potencializar su funcionalidad encapsulante..	9
2.3.2 Modificaciones físicas del almidón	10
2.4 Modificación del almidón por ultrasonidos	11
2.4.1 Fundamento técnico de la modificación de almidones por ultrasonido	12
2.4.2 Efecto del ultrasonido sobre las propiedades del almidón	13
2.5 Encapsulación de compuestos bioactivos mediante secado por aspersión	15
2.5.1 Descripción técnica del secado por aspersión	17
2.5.2 Sistemas de encapsulación basados en almidón	18
2.5.3 Aplicación de almidón de malanga como material de pared.....	20
3 JUSTIFICACIÓN	22
4 HIPÓTESIS	23
5 OBJETIVOS	23

5.1	Objetivo general	23
5.2	Objetivos específicos	23
6	MATERIALES Y MÉTODOS	24
6.1	Materiales y químicos	25
6.2	Aislamiento del almidón	25
6.3	Modificación del almidón de malanga.....	25
6.4	Encapsulación mediante secado por aspersión.....	26
6.4.1	Preparación de la mezcla de alimentación.....	26
6.4.2	Secado por aspersión.....	26
6.4.3	Rendimiento del proceso.....	27
6.4.4	Eficiencia de encapsulación	27
6.4.5	Determinación de actividad de agua (aw)	28
6.5	Caracterización químico proximal	28
6.5.1	Humedad	28
6.5.2	Proteínas.....	29
6.5.3	Lípidos.....	29
6.5.4	Cenizas	30
6.6	Caracterización morfológica y estructural	30
6.6.1	Distribución del tamaño de partículas	30
6.6.2	Difracción de rayos X.....	31
6.7	Caracterización reológica	31
6.7.1	Viscoelasticidad	31
6.7.2	Curva de flujo.....	32
6.7.3	Perfil de viscosidad	32
6.8	Caracterización térmica: temperatura de transición vítrea.....	32
6.9	Diseño de experimentos y análisis estadístico	33
7	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	34
7.1	Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre el contenido proteico del almidón de malanga	34

7.2	Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre la morfología y estructura del gránulo de almidón de malanga	36
7.2.1	DTP	36
7.2.2	DRX	38
7.3	Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre la temperatura de transición vítrea del almidón de malanga	39
7.4	Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre las propiedades reológicas de dispersiones acuosas del almidón de malanga	41
7.4.1	Perfil de viscosidad	41
7.4.2	Curva de flujo.....	42
7.4.3	Viscoelasticidad	44
7.5	Encapsulación de ácido ascórbico con almidón de malanga modificado por ultrasonido	48
7.5.1	Actividad de agua de las partículas obtenidas.....	48
7.5.2	Distribución de tamaño de las partículas obtenidas	49
7.5.3	Rendimiento de proceso	51
7.5.4	Eficiencia de encapsulación	53
	<i>Conclusiones</i>	<i>55</i>
	<i>Perspectivas</i>	<i>56</i>
	REFERENCIAS	57

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Comparación de datos de producción y de superficie sembrada de malanga en México y a nivel mundial en 2007 y 2018.	7
Tabla 2.2 Composición química de malanga (<i>Colocasia esculenta</i>), en base seca.	7
Tabla 2.3 Métodos de modificación de almidón utilizados para mejorar propiedades encapsulantes.	10
Tabla 2.4 Ejemplos del efecto de las ondas de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas de almidones recuperados a partir de diferentes fuentes.	14
Tabla 2.5 Ejemplos de algunos tipos de materiales de pared empleados para la encapsulación de agentes activos.	16
Tabla 2.6 Clasificación de sistemas de encapsulación basados en almidón, los métodos usados para su fabricación, y procesos adicionales requeridos.	19
Tabla 7.1. Composición química proximal del almidón nativo de malanga.	34
Tabla 7.2 Contenido de proteínas del almidón de malanga modificado por ultrasonido a diferentes tiempos de proceso.	36
Tabla 7.3. Actividad de agua (aw) de las microcápsulas (Cap) obtenidas mediante secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).	49
Tabla 7.4. Rendimiento de proceso de secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).	51
Tabla 7.5. Eficiencia de encapsulación de ácido mediante secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).	53

Lista de Figuras

Figura 2.1 Estructuras moleculares de (a) amilosa con enlace α -(1,4) y (b) amilopectina con enlace α -(1,4) y α -(1,6). Tomado de Ruiz-Ruiz (en curso).....	4
Figura 2.2 Cultivo de malanga en Santa Rosa, Veracruz (a), plantas en etapa productiva (9 meses de desarrollo) (b) y raíz de malanga (c). Tomado de Martínez-Cigarroa (en curso).....	6
Figura 2.3 Representación del proceso de cavitación ①, compresión y rarefacción de las burbujas de cavitación inducidas por ultrasonidos cerca de las paredes celulares, ②; las burbujas se colapsan tras alcanzar un tamaño crítico, ③; el colapso provoca una gran fuerza de cizallamiento que destruye las paredes celulares. Adaptado de Cui y Zhu (2020).....	12
Figura 2.4 Micrografías del almidón de malanga en estado nativo (NS) y modificado por ultrasonido al 60% de amplitud (US 60%). Tomado de Martins <i>et al.</i> , (2020).....	13
Figura 2.5 Estructura de los principales componentes de una microesfera y una microcápsula. Tomada de Brignone <i>et al.</i> , (2020).	15
Figura 2.6 Ejemplo del funcionamiento del secador por aspersion en su configuración más utilizada: circulación en paralelo (co-corriente) de la alimentación y del aire de secado. (Tomada de Büchi, 2002).	17
Figura 2.7 Micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido de agregados esféricos de malanga formados mediante secado por aspersion. Tomada de Hoyos-Leyva <i>et al.</i> , (2018).	20
Figura 6.1 Metodología general propuesta en el presente proyecto de investigación.	24
Figura 7.1 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la distribución de tamaño de partículas de almidón de malanga.	37
Figura 7.2 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre el patrón de difracción de rayos X y el porcentaje de cristalinidad del almidón de malanga.	38

Figura 7.3 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la temperatura de transición vítrea del almidón nativo de malanga.	40
Figura 7.4 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre el perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v).....	42
Figura 7.5 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la curva de flujo de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) a 25 °C (a), cocción a 90 °C (b), y enfriamiento a 25 °C posterior a la cocción (c).....	43
Figura 7.6 Barridos de frecuencia de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) modificado a diferentes tiempos de sonicación, sometidas a cocción a 90 °C [G' , (a); G'' , (b)], y enfriamiento a 25 °C posterior a la cocción [G' , (c); G'' , (d)].....	45
Figura 7.7 Dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) modificado a diferentes tiempos de sonicación, sometidas a tratamientos de cocción-enfriamiento (90 °C - 25 °): $\tan \delta$ a 90 °C (a) y 25 °C (b), y viscosidad compleja a 90 °C (c) y 25 °C (d)	47
Figura 7.8 Distribución del tamaño de las microcápsulas (Cap) obtenidas mediante secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).	50

1 INTRODUCCIÓN

El almidón es un biopolímero formado de amilosa y amilopectina, sintetizado principalmente por la naturaleza (específicamente por las células vegetales) para funcionar como reserva energética, sin embargo, el ser humano ha extendido su uso mucho más allá de su diseño original, de tal manera que este polisacárido posee una amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria (Taggart 2004; Guo *et al.*, 2021).

Entre sus tantas aplicaciones, el almidón puede ser utilizado como un importante material de pared para la encapsulación de compuestos bioactivos como polifenoles, micronutrientes, enzimas y antioxidantes; formando una barrera contra ciertas condiciones (como la luz, oxígeno, pH, humedad etc.) que afectan a estos compuestos; en consecuencia, se mejora la estabilidad física y química de dichos componentes (Shishir *et al.*, 2018).

Para la encapsulación de estos compuestos existen diferentes técnicas, entre ellas, el secado por aspersión, el cual es de los procesos más usados para la encapsulación de los compuestos bioactivos, por ser una técnica rápida, económica y sencilla; la cual se basa en cuatro principios: la atomización de la alimentación líquida en forma de gotas muy pequeñas (que contienen el compuesto activo y el material formador de pared), el suministro de aire caliente en la cámara de secado, el secado de las gotas con la consecuente formación de las cápsulas, y la separación de éstas por recuperación en el ciclón (Shishir *et al.*, 2018).

Los encapsulantes pueden fabricarse a base de almidones nativos, aunque presentan propiedades pobres de barrera a la humedad y limitaciones en sus propiedades mecánicas por su rápida retrogradación (Ramos-García, 2018), por esta razón suelen aplicarse métodos de modificación sobre los almidones nativos, con la finalidad de mejorar sus características funcionales, como su solubilidad, estabilidad térmica, resistencia a la digestión, capacidad de formación de películas, entre otros (Guo *et al.*, 2021).

Dichos métodos de modificación suelen clasificarse en químicos, enzimáticos y físicos. Estos últimos pueden basarse en tecnologías térmicas o no térmicas como el ultrasonido (US) (Campo-Vera *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2021). La técnica de US se fundamenta en el fenómeno de la cavitación, el cual se basa en la formación, crecimiento e implosión rápida de burbujas en el líquido, dando como resultado generación de calor y presión con efecto de cizalla en un tiempo breve; lo que permite romper la estructura granular del almidón y bajo ciertas condiciones mejora las propiedades funcionales de los almidones nativos, de tal manera que el almidón se convierte en un polímero útil con aplicaciones industriales como, por ejemplo, materiales de pared (Ríos-Romero *et al.*, 2016; Monroy *et al.*, 2018).

En diferentes estudios, se ha reportado que el almidón nativo de malanga (*Colocasia esculenta*) forma agregados esféricos durante el secado por aspersion por el contenido y perfil proteico, que actúa como ligante de los gránulos de almidón. Esta característica funcional del almidón de malanga se ha aprovechado para encapsular probióticos y compuestos bioactivos mediante secado por aspersion. Sin embargo, a la fecha se reportan bajos porcentajes de eficiencia de encapsulación, debido a que los agregados esféricos del almidón de malanga poseen cavidades que permiten la permeación de humedad y oxígeno, es decir, no es una cápsula o matriz de superficie lisa que generalmente se forma durante el secado por aspersion con algunos materiales de pared comerciales.

En el trabajo anterior se propuso romper el gránulo del almidón nativo de malanga mediante la acción de ondas de ultrasonido, con el fin de conseguir tamaños menores en comparación con el gránulo nativo. Esto se realizó con el fin de evitar la presencia de cavidades durante la formación de los agregados esféricos del almidón de malanga mediante secado por aspersion, y con ello mejorar la eficiencia de encapsulación en comparación con su contraparte nativa.

2 ANTECEDENTES

2.1 Almidón

De acuerdo con Taggart (2004), el almidón, después de la celulosa es considerado el segundo polisacárido más abundante e importante en la naturaleza. Es sintetizado principalmente por las células vegetales de las plantas encontrándose en una gran variedad de tejidos, incluyendo hojas, tubérculos, frutas y semillas; su función principal es de reserva energética y su concentración varía dependiendo del estado de madurez, como ejemplo de este comportamiento está el mango y el plátano, donde en su estado inmaduro (verde), la fracción mayoritaria está constituido por almidón siendo en el mango del 30-50% y 70% en el plátano, base seca (Taggart 2004; Bello-Pérez *et al.*, 2006; Antonio-Estrada *et al.*, 2009).

2.1.1 Composición química de los almidones

Los almidones están constituidos químicamente por dos tipos de polisacáridos, la amilosa y la amilopectina (Figura 2.1), sin importar de la fuente o el tejido vegetal de donde se obtengan. Ambos componentes poliméricos se depositan en gránulos de diversos tamaños y formas; además, se componen solo de unidades de glucosa (α -D-glucosa), las cuales están unidas por enlaces $\alpha(1-4)$ en cadenas lineales. El componente principal de todos los almidones es la amilopectina, la cual se forma partiendo de un gran número de cadenas más cortas unidas en su extremo reductor por enlaces $\alpha(1-6)$ haciendo que este gran polisacárido se encuentre muy ramificado, al contrario de la amilosa, la cual se forma por una o más cadenas largas haciendo que la estructura de esta molécula sea lineal o muy poco ramificada. Comúnmente los almidones contienen alrededor del 20-30% de amilosa, pero los gránulos que suelen presentar alto contenido de este polisacárido suelen tener una forma irregular, esto de acuerdo con Jane (1994), quien afirmó que “los almidones de maíz con alto contenido en amilosa tienen gránulos relativamente lisos de forma irregular” (BeMiller, 1993; Bertoft, 2018; Cornejo-Ramírez *et al.*, 2018).

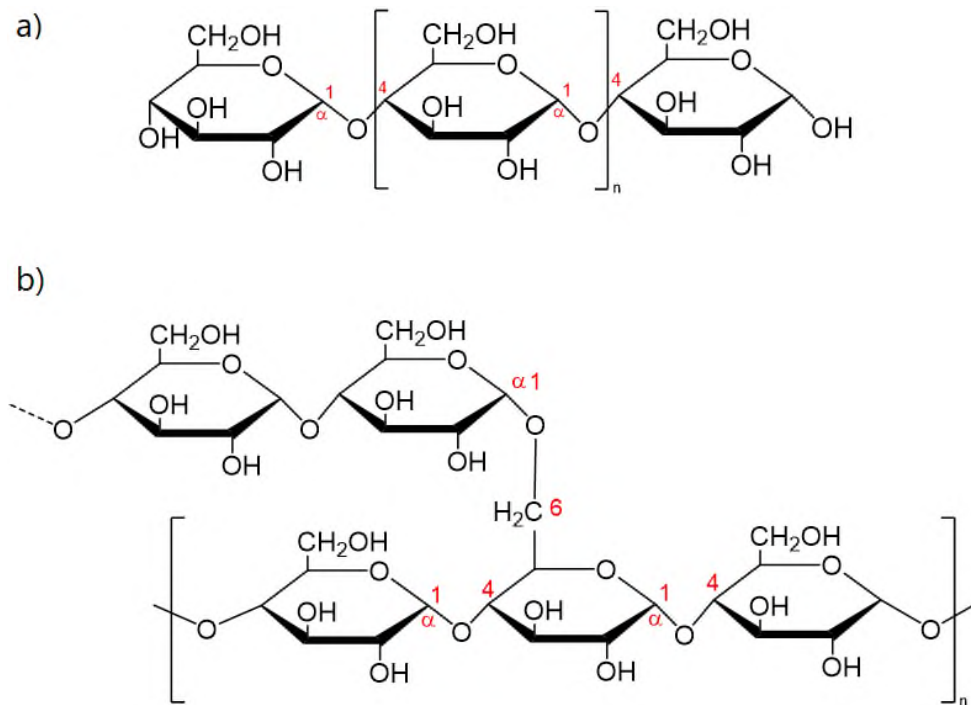


Figura 2.1 Estructuras moleculares de (a) amilosa con enlace α -(1,4) y (b) amilopectina con enlace α -(1,4) y α -(1,6). Tomado de Ruiz-Ruiz (en curso).

Los almidones pueden mostrar una composición química muy variada en cuanto a humedad, lípidos, proteínas, α -glucanos y residuos fosforilados, dependiendo de la fuente de la que provengan y del tipo de almidón del que se trate; así como también pueden mostrar variaciones en la estructura de sus componentes, las cuales se relacionan con la superficie de los gránulos de almidón, la dureza y la cristalinidad. Esto es importante porque ambas características, tanto físicas como químicas, interfieren en sus propiedades y su funcionalidad (Cornejo-Ramírez *et al.*, 2018).

Es necesario conocer las propiedades funcionales del almidón para elegir o seleccionar el almidón a utilizar, y así cumplir con las necesidades para las cuales va a ser requerido (Cornejo-Ramírez *et al.*, 2018).

2.1.2 Fuentes de almidón

Dentro de las fuentes convencionales de extracción/aislamiento de almidón están los cereales como el trigo, maíz y arroz; y tubérculos como la papa. Pero es importante señalar en las dos últimas décadas se han explorado algunas fuentes no convencionales como leguminosas y frutos verdes; con la finalidad de identificar y/o aprovechar sus variadas propiedades funcionales (Antonio-Estrada *et al.*, 2009; McDonagh 2012).

A pesar de su amplia distribución en el reino vegetal, son pocas las fuentes vegetales que se utilizan ampliamente en la producción comercial de almidón, la fuente de almidón comercial por excelencia es el maíz, sin embargo como se ha citado, poco a poco se ha incrementado la búsqueda de nuevas fuentes alternas o no convencionales para aislar el almidón, esto por dos motivos particulares: 1) satisfacer la demanda de las industrias que emplean el almidón como materia prima o ingrediente; 2) buscar almidones con propiedades funcionales/técnicas diferentes o mejores a las fuentes convencionales (Betancur y Chel, 1997; Antonio-Estrada *et al.*, 2009). Ejemplos de fuentes no convencionales pueden considerarse frutos como el plátano y el mango, aunque en forma general la tendencia de la obtención de almidón se ha centrado en el uso de frutos en estado verde y de tubérculos, como la malanga (Bello-Pérez *et al.*, 2006).

2.2 Malanga

La malanga (*Colocasia esculenta*) es un tubérculo comestible que pertenece a la familia de las *Araceae*, cuya forma es entre ovoide y redonda con una pulpa blanca almidonosa y posee una cáscara de color marrón oscura que puede permanecer bajo tierra hasta 16 meses (Figura 2.2) (Antonio-Estrada *et al.*, 2009). Es originario de Asia y se cultiva generalmente en regiones tropicales o subtropicales del mundo (Oeste de África e India, Caribe, Sur de América, etc.), incluyéndose a México, donde su producción es reciente, encontrándose solo en Oaxaca, Veracruz y Puebla (Antonio-Estrada *et al.*, 2009; Mazariegos-Sánchez *et al.*, 2017). Debido a que la malanga tiene un alto contenido de humedad se

considera como un producto altamente perecedero, por lo que es propenso a pérdidas postcosecha y por esta razón tanto su uso como su consumo son limitados (Antonio-Estrada *et al.*, 2009).



Figura 2.2 Cultivo de malanga en Santa Rosa, Veracruz (a), plantas en etapa productiva (9 meses de desarrollo) (b) y raíz de malanga (c). Tomado de Martínez-Cigarroa (en curso).

2.2.1 Producción nacional y mundial de malanga

La malanga se clasifica como un producto exótico o no tradicional, cuyo consumo a nivel nacional y mundial ha ido incrementando de manera considerable (Tabla 2.1) tomando en cuenta el interés que tienen los sectores crecientes de consumidores (Mazariegos-Sánchez *et al.*, 2017). Se estimó que el volumen de producción a nivel mundial fue de 16.8 millones de toneladas en el 2018 aumentando a 17.7 millones de toneladas para el 2022 (FAO, 2024). De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) del gobierno mexicano, durante 2022 a nivel nacional, se obtuvo una superficie cosechada de 495 ha y una producción de 39,666 toneladas de malanga, siendo Veracruz el principal exportador (SIAP, 2024).

La malanga se considera una fuente de alimento nutritiva y de alta digestibilidad, esto se debe al contenido de almidón de estructura micro-granular, a los minerales y las vitaminas (Mazariegos-Sánchez *et al.*, 2017). Además, debido a que el contenido de almidón que presenta es alto (30-85% base seca), ha

adquirido importancia en países en desarrollo, aprovechándose como una fuente de almidón que puede modificarse para producir derivados de alto valor agregado (Antonio-Estrada *et al.*, 2009; Dendy, 2001).

Tabla 2.1 Comparación de datos de producción y de superficie sembrada de malanga en México y a nivel mundial en 2018 y 2022.

	Datos en México		Datos Mundiales	
	2018	2022	2018	2022
Producción (t)	38, 330	39, 666	16.8 millones	17.7 millones
Superficie sembrada (ha)	495	495	2 millones	2.5 millones

Fuente: SIAP, (2024); FAO, (2024).

2.2.2 Composición química de la malanga

La composición química de la malanga en base seca se muestra en la Tabla 2.2; estos valores pueden variar dependiendo del tipo de suelo y temporada de cosecha (Nagar *et al.*, 2021), pero se destaca que el contenido de carbohidratos es el que se encuentra en mayor proporción (80.00-92.00 % bs). De acuerdo con Dendy (2001); la malanga presenta un contenido de almidón muy variable del 30 al 85 % bs, además, contiene niveles característicos de proteínas (1.40-7.00 % bs), grasas (0.11-0.88 % bs) y de fibra cruda (0.60-0.80 % bs); así como también, presenta en menor proporción vitaminas y minerales. Algunas de las vitaminas que este tubérculo posee, son la tiamina, riboflavina, la vitamina A, C y E; además de minerales como el magnesio, hierro, fósforo, potasio, calcio, sodio, cobre y manganeso (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2011; Mazariegos-Sánchez *et al.*, 2017).

Tabla 2.2 Composición química de malanga (*Colocasia esculenta*), en base seca.

Componentes	Contenido (% bs)
Almidón	30.00 – 85.00
Humedad	60.00 – 83.00
Carbohidratos	80.00 – 92.00
Grasas	0.11 – 0.88
Proteínas	1.40 – 7.00
Cenizas	3.54 – 7.78
Fibra cruda	0.60 – 1.18

Adaptado de Martins *et al.*, (2020) y Rodríguez-Miranda *et al.*, (2011).

Las altas cantidades de almidón que posee la malanga, permite que este tubérculo pueda ser utilizado para sustituir o ser una alternativa de producción y comercialización de las materias primas convencionales en la industria alimentaria, porque hay unas pocas fuentes convencionales de almidón, como las papas, el maíz, el arroz y el trigo (Taggart 2004; Torres-Rapelo *et al.*, 2013).

Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas, como la gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles (Hernández-Medina *et al.*, 2008). Por lo tanto, su caracterización en esos términos es importante para identificar las aplicaciones potenciales de almidones no convencionales como el de malanga. El uso del almidón de malanga permitiría un aumento en los beneficios de quienes lo producen y lo procesan, motivando así la investigación y la producción de la malanga, lo que generaría una estabilidad en los precios de venta tanto de los almidones como de los subproductos de éstos (Torres-Rapelo *et al.*, 2013).

2.3 Importancia de la modificación de almidones en la industria de alimentos

Una característica importante de los almidones es que se reconocen como un ingrediente multifuncional, por tanto, en términos de aplicación es muy versátil; lo que significa que en la industria de alimentos y bebidas tiene una amplia gama de aplicaciones, donde suele utilizarse para elaborar papillas, pudines, embutidos, jarabes, entre otros, lo cual se atribuye a las buenas propiedades que presentan como gelificante y espesante (Betancur y Chel, 1997; Taggart, 2004). Sin embargo, en la producción de algunos alimentos, los almidones nativos presentan ciertas limitaciones como la descomposición térmica, una baja resistencia al cizallamiento, alta retrogradación y sinéresis; lo que provoca que su uso en la industria alimentaria disminuya, mientras que el uso de almidones modificados aumenta (Betancur y Chel, 1997).

Además de esto, los métodos de modificación también se han utilizado para el desarrollo de agentes encapsulantes (materiales de pared) a base de almidón, debido a que éstos pueden sufrir cambios físicos, enzimáticos o incluso formar complejos con otros compuestos químicos, adquiriendo diferentes propiedades funcionales según las modificaciones realizadas y los agentes químicos utilizados (Guo *et al.*, 2021).

Un ejemplo de almidón modificado es el almidón OSA (modificado con anhídrido octenil succínico), el cual, en comparación con otros biopolímeros como proteínas o gomas, es preferido para distintos procesos de encapsulación debido a que presentan una alta versatilidad, funcionalidad y eficiencia; asimismo su papel como encapsulante es amplio porque permite la encapsulación de nutrientes, fragancias, productos agroquímicos, sabores solubles en aceite y activos farmacéuticos (Jin *et al.*, 2018). Una vez encapsulados, estos componentes pueden utilizarse para el desarrollo de nuevos productos alimenticios, garantizando su fácil dosificación y su mayor estabilidad física y química durante su procesamiento, almacenamiento e incluso durante su ingesta o aplicación.

2.3.1 Modificaciones del almidón para potencializar su funcionalidad encapsulante

Existe gran interés por utilizar almidón para la elaboración de materiales de pared (MP), esto debido a los bajos costos de su producción, la abundancia del producto, y a su biodegradabilidad. Sin embargo, los MP elaborados a partir del almidón nativo muestran limitaciones en su uso debido a que presentan propiedades pobres de barrera a la humedad por su carácter hidrofílico, y a sus bajas propiedades mecánicas, debido a su semi-cristalinidad y rápida retrogradación (Ramos-García, 2018). Por eso es necesario eliminar las deficiencias y mejorar los atributos positivos de los almidones nativos por lo que la industria de la modificación del almidón está en constante evolución con numerosas posibilidades para lograr este objetivo (Ramos-García, 2018).

Algunos de los diferentes métodos de modificación (Tabla 2.3) utilizados para la elaboración de encapsulantes a base de almidón se emplean con el objetivo de mejorar las características funcionales de

dichos almidones, como la solubilidad en agua, resistencia a la digestión, la capacidad de formar películas, la estabilidad térmica y la capacidad de adsorción, entre otras (Guo *et al.*, 2021).

Tabla 2.3 Métodos de modificación de almidón utilizados para mejorar propiedades encapsulantes.

Tipo de modificación	Fundamento	Ejemplos
Química	Introducen grupos funcionales en las moléculas de almidón mediante reacciones químicas sin alterar la morfología o la distribución del tamaño de los gránulos de almidón.	Acetilación Esterificación Entrecruzamiento Oxidación e hidrólisis ácida
Enzimática	Implica principalmente el uso de enzimas para modificar las estructuras moleculares o granulares del almidón.	Amilasa, Isoamilasa, Amiloglicosidasas, Amilomaltasa
Física	Implican el uso de humedad, calor, presión, irradiación y cizallamiento para mejorar la solubilidad en agua del almidón y reducir el tamaño del gránulo del almidón.	Tratamiento de calor-humedad Pregelatinización Tratamiento de alta presión Radiación Molienda mecánica Sonicación

Adaptada de Guo *et al.*, (2021) y Tadini (2017).

2.3.2 Modificaciones físicas del almidón

Entre las modificaciones que se pueden utilizar para obtener agentes encapsulantes basados en almidón (Tabla 2.3) se destacan las modificaciones físicas, por su simplicidad, y nulo uso de disolventes orgánicos, reactivos o enzimas; por lo que se reconocen como métodos amigables con el medio ambiente. Entre estos métodos físicos de modificación de almidón se incluyen tratamientos térmicos controlados y aplicaciones de agua/humedad o calor/humedad, en este último se lleva a cabo la desintegración completa de los gránulos de almidón, algunos ejemplos de estos métodos físicos serían la pregelatinización, extrusión o cocción por aspersión, mientras que en la primera aplicación, algunos ejemplos serían el recocado y los tratamientos térmicos; además de los ya mencionados, existen otros ejemplos de modificación física, entre ellos se encuentra la molienda y el hinchamiento en agua fría; así como otras modificaciones que son denominadas como no convencionales; entre las que se encuentran

las altas presiones hidrostáticas, pulsos eléctricos de alta intensidad de campo, irradiación, pulsos lumínicos, campos magnéticos oscilantes y ultrasonidos, etc., (Taggart, 2004; Campo-Vera *et al.*, 2018).

La modificación por ultrasonidos, es un ejemplo de modificación física la cual puede verse afectada por ciertos parámetros, como lo son la frecuencia, tiempo, temperatura e intensidad (Martins *et al.*, 2020). Los efectos principales que surgen sobre las propiedades del almidón debido a esta modificación, implican la porosidad, solubilidad y poder de hinchamiento, digestibilidad, reducción del tamaño de las partículas, entre otras (Schmiele *et al.*, 2019).

2.4 Modificación del almidón por ultrasonidos

El ultrasonido, además de que puede ser una alternativa a diferentes procesos considerados como “tradicionales” como la filtración, la cocción, la extracción, entre otros; es denominada como una técnica novedosa empleada en la industria alimentaria. Además, este método presenta ventajas como el buen rendimiento y productividad, reduce el uso de reactivos químicos y calor, así como los tiempos de procesos, mejora atributos de calidad, y sobre todo es respetuosa con el medio ambiente debido a que emplea menos tiempo, agua y energía, considerándose como tecnología verde (Campo-Vera *et al.*, 2018; Schmiele *et al.*, 2019).

El uso de esta tecnología consiste en la aplicación de ondas mecánicas cuya frecuencia es suficiente (20 kHz) para atravesar el medio (líquido, sólido o aire) en el que se encuentre el sistema a modificar; dichas ondas propagadas generan una vibración que ocasiona que las partículas sean desplazadas, donde la disminución de la densidad es sinónimo del aumento de la presión. Por ende, el único tipo de energía impartida es mecánica (Ríos-Romero *et al.*, 2016; Schmiele *et al.*, 2019).

Debido a que el agua presenta baja presión de vapor y viscosidad, puede considerarse un fluido bueno para producir burbujas, haciéndolo apto para usarse como medio en un sistema líquido-sólido (bifásico) para la aplicación de ultrasonido sobre los gránulos de almidón (Schmiele *et al.*, 2019).

2.4.1 Fundamento técnico de la modificación de almidones por ultrasonido

La cavitación es un fenómeno importante que se presenta durante el procesamiento por ultrasonido (Figura 2.3), a este fenómeno se le atribuyen los cambios en las propiedades del almidón a modificar (como los poros y las fisuras en los gránulos), este proceso se basa en que las burbujas de gases que han sido formadas en las cavidades, debido a la disminución de la presión, golpean los gránulos del almidón antes de que colapsen por el aumento de la presión (Monroy *et al.*, 2018; Schmiele *et al.*, 2019). Finalmente, cuando las burbujas colapsan rápidamente, es cuando surgen las fuerzas de cizallamiento, causando una interrupción en las cadenas de algunos polímeros como el almidón (Monroy *et al.*, 2018).

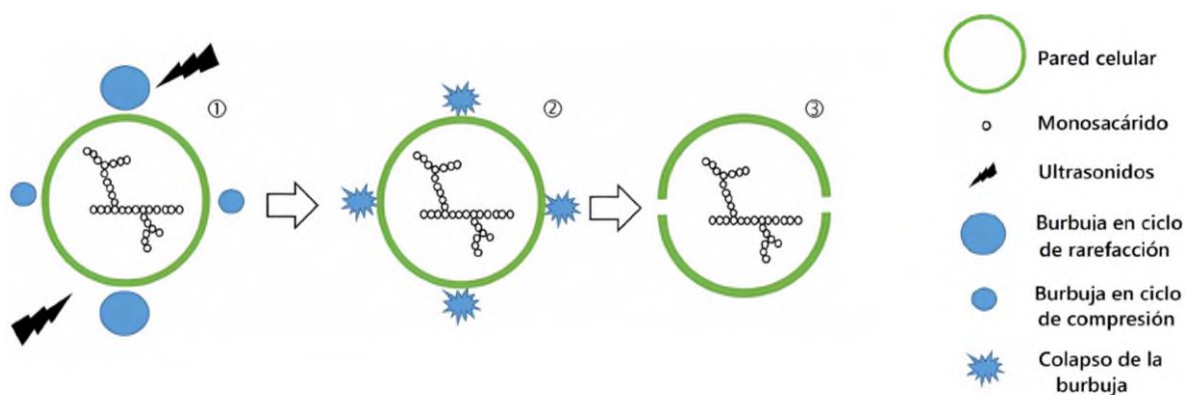


Figura 2.3 Representación del proceso de cavitación ①, compresión y rarefacción de las burbujas de cavitación inducidas por ultrasonidos cerca de las paredes celulares, ②; las burbujas se colapsan tras alcanzar un tamaño crítico, ③; el colapso provoca una gran fuerza de cizallamiento que destruye las paredes celulares. Adaptado de Cui y Zhu (2020).

La eficiencia de esta modificación depende de múltiples parámetros como la frecuencia y la potencia, así como también del tiempo y la temperatura del tratamiento, y la concentración y el origen biológico del almidón (propiedades de la suspensión de almidón) (Monroy *et al.*, 2018).

2.4.2 Efecto del ultrasonido sobre las propiedades del almidón

El tratamiento con ultrasonido, presenta diferentes efectos en las propiedades de los almidones, como en la solubilidad y capacidad de hinchamiento, en la gelatinización, en la capacidad de absorción de agua y aceite, en su retrogradación, en su estructura y sobre los tamaños de los gránulos del mismo (Figura 2.4). En la Tabla 2.4 se presentan ejemplos del efecto del ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas de almidones recuperados de diferentes fuentes (Ríos-Romero *et al.*, 2016).

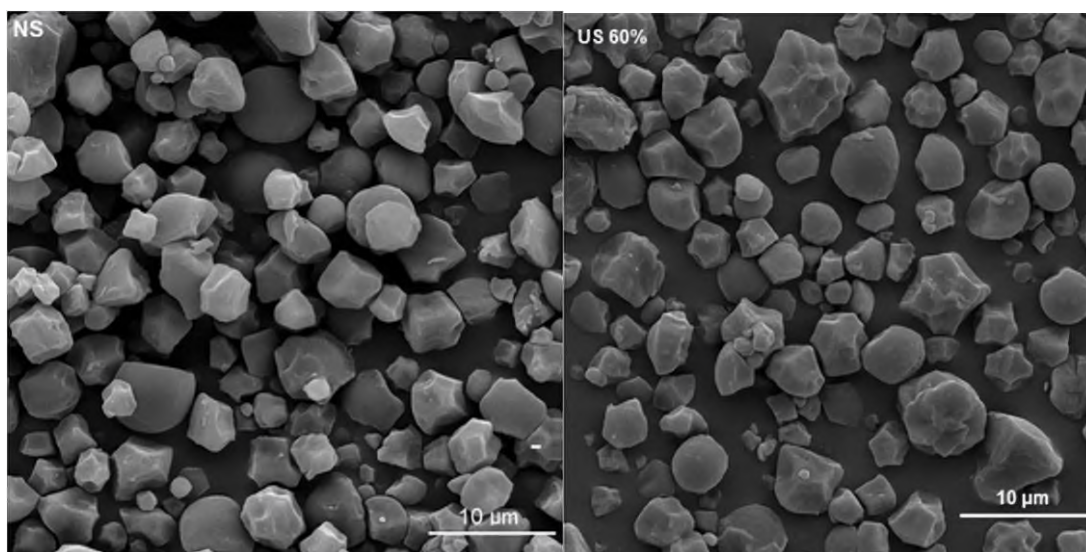


Figura 2.4 Micrografías del almidón de malanga en estado nativo (NS) y modificado por ultrasonido al 60% de amplitud (US 60%). Tomado de Martins *et al.*, (2020).

Tabla 2.4 Ejemplos del efecto de las ondas de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas de almidones recuperados a partir de diferentes fuentes.

Fuente de almidón	Condiciones de tratamiento	Resultados	Referencia
Maíz, papa, soja verde y sagú	Tiempo: 10 min.	La solubilidad incrementó y se observó un aumento en el pico de viscosidad con respecto a los almidones nativos, excepto en el almidón de papa.	Chan <i>et al.</i> , (2010)
Maíz	10% p/v de almidón en agua, 15 y 30 min; 34, 55, 73 W/cm ² ; 24 kHz.	Disminuyó la entalpía de gelatinización, mientras que el poder de hinchamiento aumentó, y en el coeficiente de consistencia hubo una disminución significativa, con respecto al almidón nativo.	Jambrak <i>et al.</i> , (2010)
Plátano verde	2% p/v de almidón en agua, 1 h, 24 W, 20 kHz y 40% de amplitud.	Se redujo la cantidad de energía requerida para gelatinizar el almidón, mientras que la solubilidad, el poder de hinchamiento y la capacidad de absorción de agua aumentó.	Izidoro <i>et al.</i> , (2011)
Tapioca	3% de almidón en agua; 10, 15 y 30 min; 400 W, 24 kHz, 50 y 100% de amplitud.	Aumentó la solubilidad y el poder de hinchamiento.	Manchun <i>et al.</i> , (2012)
Maíz, trigo, arroz y papa	30% p/v de almidón en etanol o agua, 30 min, 20 °C, 170 W y 20 kHz.	El tratamiento, especialmente en agua, influyó sobre las propiedades funcionales de los almidones, causando un aumento en la absorción de agua y aceite, menor viscosidad y mayor solubilidad y poder de hinchamiento en comparación con el almidón nativo.	Sujka y Jamroz, (2013)
Arroz no ceroso	5% p/v de almidón en agua, 0-120 min; y 100, 500 y 1000 W	El procesamiento puede cambiar las temperaturas inicial y pico del almidón de arroz retrogradado y disminuir la entalpía de retrogradación.	Yu <i>et al.</i> , (2013)
Malanga (Taro)	10% p/v de almidón en agua; 30 min; 40, 50 y 60% de amplitud.	Aumento la estabilidad térmica, mientras que la temperatura de gelatinización disminuyó ligeramente; además se observó una reducción en el tamaño de los gránulos.	Martins <i>et al.</i> , (2020)

Adaptada de Ríos-Romero *et al.*, (2016).

Los cambios presentados en los almidones debido a las condiciones de ultrasonido a las que son sometidas, son importantes de evaluar y estudiar con el fin de comprender y correlacionar cómo afectarían a los resultados de la encapsulación de compuestos bioactivos.

2.5 Encapsulación de compuestos bioactivos mediante secado por aspersión

La encapsulación se basa en encerrar dentro de una capa de recubrimiento o embebidas en una matriz, pequeñas partículas, un líquido o un gas, formando así cápsulas (Figura 2.5). El ingrediente a encapsular puede denominarse de múltiples formas, ya sea como activo, núcleo, carga útil, fase interna, encapsulado o relleno, y la gama de productos que pueden encapsularse es amplia, incluyendo aromas, sabores, aceites, cultivos probióticos, vitaminas, nutraceuticos, compuestos bioactivos, y mucho más. El material que envuelve a dicho ingrediente suele ser insoluble y no reactivo con el núcleo, y puede denominarse como pared, recubrimiento, fase externa, fase de soporte o membrana; estos materiales de pared son numerosos, y en la Tabla 2.5 se muestran algunos ejemplos (Dyvelkov y Sloth 2014; Sobel *et al.*, 2014).

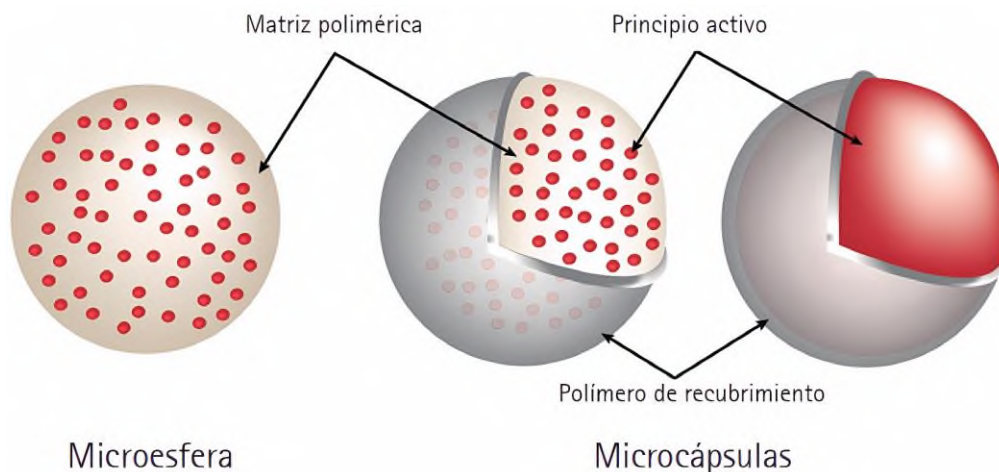


Figura 2.5 Estructura de los principales componentes de una microesfera y una microcápsula. Tomada de Brignone *et al.*, (2020).

Tabla 2.5 Ejemplos de algunos tipos de materiales de pared empleados para la encapsulación de agentes activos.

Materiales de pared	Ejemplos	Tipos de activos que pueden encapsularse
Polisacáridos	Almidón, maltodextrinas, jarabe de glucosa, dextrina, almidón modificado, celulosa o ciclodextrinas.	Activos hidrofóbicos
Proteínas	Gluten, caseína, gelatina, concentrado de proteína de suero o caseinato.	
Gomas	Goma arábica, alginato, carragenina o pectina.	
Lípidos	Grasa dura e hidrogenada, glicéridos, fosfolípidos, ácidos grasos, esteroides, cera, parafina o cera de abeja	Activos hidrofílicos
Polímeros	Etilcelulosa o goma laca.	

Adaptada de Sobel *et al.*, (2014).

Existen diversas razones para usar la encapsulación, además de la facilidad de manipulación, almacenamiento y dosificación del agente activo, es una tecnología que tiene diferentes funciones para las cuales se puede emplear, la más destacada es la de agente protector, debido a que suele usarse para evitar la degradación del agente activo, la cual surge de la exposición a factores ambientales (como el agua, oxígeno, calor o la luz), además de que la encapsulación puede utilizarse para enmascarar olores, sabores y colores indeseables, evitando de esta manera su interferencia en el producto (Sobel *et al.*, 2014).

El secado por aspersión es una de las técnicas de encapsulación más usadas en la industria de alimentos, el cual se basa en el secado de líquidos, soluciones y suspensiones líquidas, que contienen el agente activo y el material de pared dispersos generalmente en agua. Para este proceso, los almidones modificados ofrecen una alta retención de agentes activos, así como una larga vida útil y una alta eficiencia de fabricación (Dyvelkov y Sloth, 2014; Jin *et al.*, 2018).

2.5.1 Descripción técnica del secado por aspersión

El secado por aspersión es un método basado en la atomización de un líquido o una suspensión (alimentación) sobre una corriente de gas caliente con la finalidad de obtener un polvo seco (Jacobs, 2014). En la Figura 2.6 se muestra el funcionamiento del secador por aspersión de manera general.

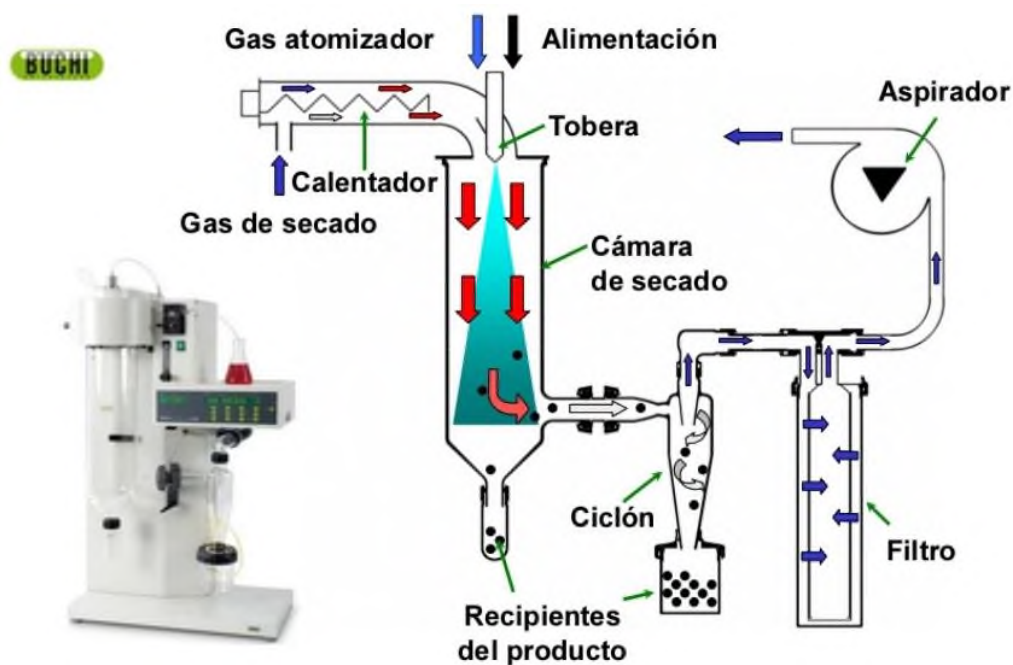


Figura 2.6 Ejemplo del funcionamiento del secador por aspersión en su configuración más utilizada: circulación en paralelo (co-corriente) de la alimentación y del aire de secado. (Tomada de Büchi, 2002).

Los atomizadores usados en los secadores por aspersión pueden ser de diversos tipos: rotativos, boquillas de alta presión de un solo fluido y boquillas de dos fluidos; y utilizan como corriente de gas caliente, nitrógeno o generalmente aire (Jacobs, 2014). De manera muy extendida, la atomización de la alimentación se realiza en forma de gotas desde la parte superior de la cámara de secado, dichas gotas se desplazan hacia el flujo turbulento de gas calentado (aire) y ambos fluyen hacia la misma dirección (a la cámara de secado), formando así un flujo co-corriente (Figura 2.6). A medida que el líquido de la suspensión (alimentación) es calentado rápidamente, sus moléculas se mueven hacia la superficie de la gota para así poder ser transferidos a la fase gaseosa (Figura 2.6). Mientras las gotas se van solidificando,

estas son arrastradas por el flujo de aire calentado desplazándose hacia una cámara de flujo ciclónico donde el gas es expulsado a la atmósfera y los sólidos salen de la cámara (Jacobs, 2014).

2.5.2 Sistemas de encapsulación basados en almidón

El almidón es considerado como un material de pared valioso debido a las diferentes funcionalidades que aporta como la retención de agua y una viscosidad adaptable; además de ser de bajo costo y tener alta disponibilidad (Guo *et al.*, 2021). Existen diferentes mecanismos de encapsulación que se han reportado para los almidones, dichos sistemas de encapsulación basados en almidón se muestran en la Tabla 2.6. Es importante señalar, que el secado por aspersión es una de las operaciones que está presente en todos los sistemas de encapsulación descritos en dicha Tabla.

Estos sistemas a base de almidón son usados porque además de encapsular ayudan a suministrar de manera controlada y selectiva, una amplia diversidad de bioactivos o nutrientes, además de extender la vida útil de los productos alimenticios (Guo *et al.*, 2021).

En la Tabla 2.6 se observa también que uno de los sistemas de encapsulación basados en almidón son los agregados esféricos de sus gránulos, los cuales, de acuerdo con diferentes reportes, pueden formarse utilizando el almidón nativo de malanga.

Tabla 2.6 Clasificación de sistemas de encapsulación basados en almidón, los métodos usados para su fabricación, y procesos adicionales requeridos.

Sistema de encapsulación	Métodos de fabricación		Proceso adicional
Almidón poroso	-Modificación enzimática - Gelatinización + atomización - Intercambio de disolventes	- Tratamiento de calor/humedad + modificación enzimática - Combinación de tratamientos enzimáticos y ultrasónicos	<ul style="list-style-type: none"> • Liofilización • Secado por aspersión • Secado en horno • Secado en microondas
Microgeles	- Emulsificación para obtener gotitas y la gelificación mediante la reticulación de la emulsión o la mezcla con hidrogel de almidón o calentando las dispersiones de emulsión-almidón.	- Entrecruzamiento químico (por ejemplo, almidón oxidado o carboximetilalmidón con metafosfato trisódico) - Extrusión con jeringa y gelificación iónica (por ejemplo, para formar hidrogeles por interacción electrostática entre grupos carboxílicos e iones de calcio)	<ul style="list-style-type: none"> • Liofilización • Secado por aspersión • Encapsulación mediante interacción electrostática (para microgeles entrecruzados) • Extracción supercrítica de la emulsión + liofilización
Agregados moleculares	- Interacción hidrofóbica e interacción electrostática del polímero (autoensamblaje)	- Complejación de la amilosa y ligandos hidrofóbicos	<ul style="list-style-type: none"> • Liofilización • Secado por aspersión
Agregados esféricos de gránulos de almidón	- Secado por aspersión de una dispersión de almidón para formar agregados esféricos de almidón con o sin un agente aglutinante	- Secado por aspersión de la mezcla de almidón dispersado y agentes activos	
Partículas normales	- Mezclado del encapsulante y el agente activo en un disolvente (que puede ser tratado por ultrasonidos)	- Mezclado del encapsulante y el agente activo en un estado altamente concentrado	<ul style="list-style-type: none"> • Liofilización • Secado por aspersión • Extrusión del fundido caliente

Tomada de Guo *et al.*, (2021).

2.5.3 Aplicación de almidón de malanga como material de pared

Como se ha comentado, el almidón de malanga ha sido utilizado como material de pared durante el secado por aspersión, ya que pueden formar fácilmente agregados esféricos debido a su contenido y perfil proteico, lo que permite atrapar al agente activo en su interior (Figura 2.7) (Gonzales-Soto *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2021; Hoyos-Leyva *et al.*, 2018).

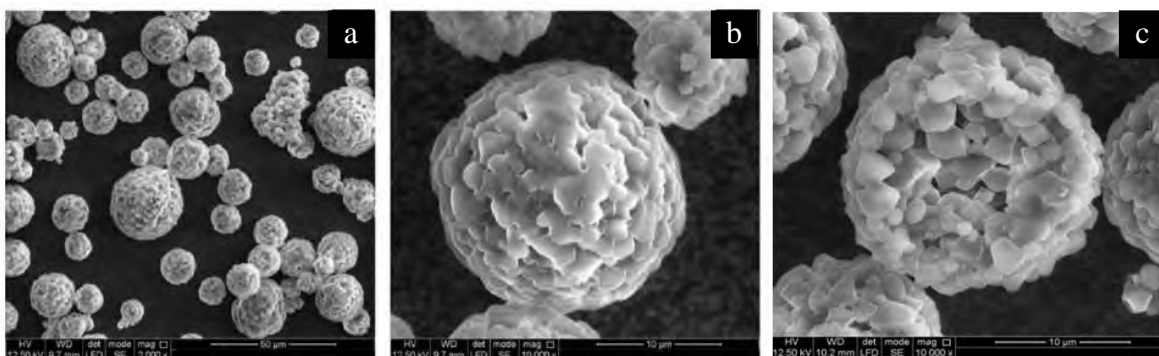


Figura 2.7 Micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido de agregados esféricos de malanga formados mediante secado por aspersión. Tomada de Hoyos-Leyva *et al.*, (2018).

Hoyos-Leyva *et al.*, (2018), indicaron que los agregados esféricos a base de almidón de malanga no pueden ser usados como encapsulantes para ser añadidos en líquidos (como los jugos y bebidas), dado que estos agregados presentaron una baja estabilidad al estar en presencia de agua y bajo condiciones de agitación; sin embargo, pueden ser aplicados en aquellos alimentos (o cosméticos) que presenten bajo contenido de humedad y que sean viscosos.

Existen diferentes estudios donde ya ha sido utilizado el secado por aspersión con almidón nativo de malanga para formar agregados esféricos (Figura 2.7) para encapsular ácido ascórbico (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018), aceite de almendra (Hoyos-Leyva *et al.*, 2019), *Lactobacillus paracasei* (Alfaro-Galarza *et al.*, 2020), y aceite de aguacate (Romero-Hernández *et al.*, 2021). Es importante resaltar que los primeros estudios sobre este material consideraron utilizar el ácido ascórbico como agente activo a encapsular,

debido a que es termosensible, y se recomienda su uso cuando se desea explorar la formación de cápsulas con nuevos materiales.

En términos generales, en los trabajos citados sobre encapsulación con almidón nativo de malanga mediante secado por aspersión, se han alcanzado rendimientos del proceso mayores al 50%, actividades de agua bajas (< 0.4), y eficiencias de encapsulación de hasta del 37% en compuestos bioactivos. Sin embargo, en todos los trabajos reportan agregados esféricos con poros o cavidades (ver Figura 2.7), lo cual afecta la eficiencia de encapsulación y no genera por completo una barrera entre el compuesto bioactivo y el exterior, impidiendo protegerlos en su totalidad a las reacciones de degradación. Una alternativa para disminuir o erradicar este inconveniente es disminuir el tamaño del gránulo de almidón de malanga, para que durante la formación de los agregados esféricos las cavidades/poros se reduzcan en tamaño y frecuencia.

3 JUSTIFICACIÓN

La encapsulación es una estrategia utilizada para proteger agentes activos frente a factores externos (pH, humedad, oxígeno, luz) que podrían dañarlos fisicoquímicamente. Dicha protección potencializa la aplicación de compuestos bioactivos en el desarrollo de alimentos funcionales, que además de nutrir representan un beneficio a la salud de quien lo consume. En este contexto, el secado por aspersión es una de las técnicas más utilizadas a nivel industrial para la formación de cápsulas o matrices que protegen a los agentes activos. Esta técnica requiere de formadores de pared dispersados en medios generalmente acuosos, en donde también se encuentra el agente activo. Dentro de los materiales de pared, los almidones han ganado importancia debido a su disponibilidad, bajo costo y versatilidad.

El almidón nativo de malanga es un biopolímero que se ha utilizado como un agente formador de agregados esféricos durante el secado por aspersión, debido a su contenido y perfil proteico. Este tipo de sistemas encapsulantes ha demostrado ser útil e interesante para la encapsulación de compuestos bioactivos y microorganismos. Sin embargo, también se reporta que dichos agregados presentan cavidades o poros en su estructura. Esto impide una completa protección de los agentes activos frente a factores externos, como el oxígeno y la humedad; por lo tanto, su viabilidad se vería reducida en poco tiempo. Una alternativa para contrarrestar esta desventaja sería la reducción del tamaño del gránulo, pues permitiría reducir los tamaños y la frecuencia de los poros/cavidades de estos sistemas

Por ello, en el presente estudio se propuso realizar una reducción del tamaño del gránulo del almidón nativo de malanga, utilizando ondas de ultrasonido. Esta operación se ha utilizado ampliamente para modificar almidones, y no sólo ha permitido reducir y homogenizar el tamaño de los gránulos, sino que se ve notablemente incrementada la solubilidad del material en agua. Por lo tanto, también se caracterizó el material modificado para identificar otras posibles aplicaciones.

4 HIPÓTESIS

La modificación del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) por ultrasonido permitirá reducir el tamaño de partícula de los gránulos, disminuyendo también la frecuencia de las cavidades durante la formación de agregados esféricos mediante secado por aspersión, mejorando así la eficiencia de encapsulación.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar la encapsulación de ácido ascórbico mediante secado por aspersión utilizando almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) modificado por ondas de ultrasonido.

5.2 Objetivos específicos

- ❖ Caracterizar el almidón nativo de malanga en términos de química proximal, propiedades fisicoquímicas, morfológicas y térmicas.
- ❖ Estudiar el efecto del tiempo de exposición a las ondas de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas, morfológicas y térmicas del almidón de malanga.
- ❖ Evaluar la eficiencia de encapsulación de ácido ascórbico, el rendimiento del proceso y las características fisicoquímicas, morfológicas y térmicas de las partículas obtenidas mediante secado por aspersión, utilizando como materiales de pared los almidones de malanga modificados por ondas de ultrasonido.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en dos etapas. En la primera, se realizó el aislamiento, modificación y caracterización de los almidones nativos y modificados. En la segunda, se realizó la encapsulación mediante secado por aspersión, y la caracterización de las partículas obtenidas (Figura 6.1).

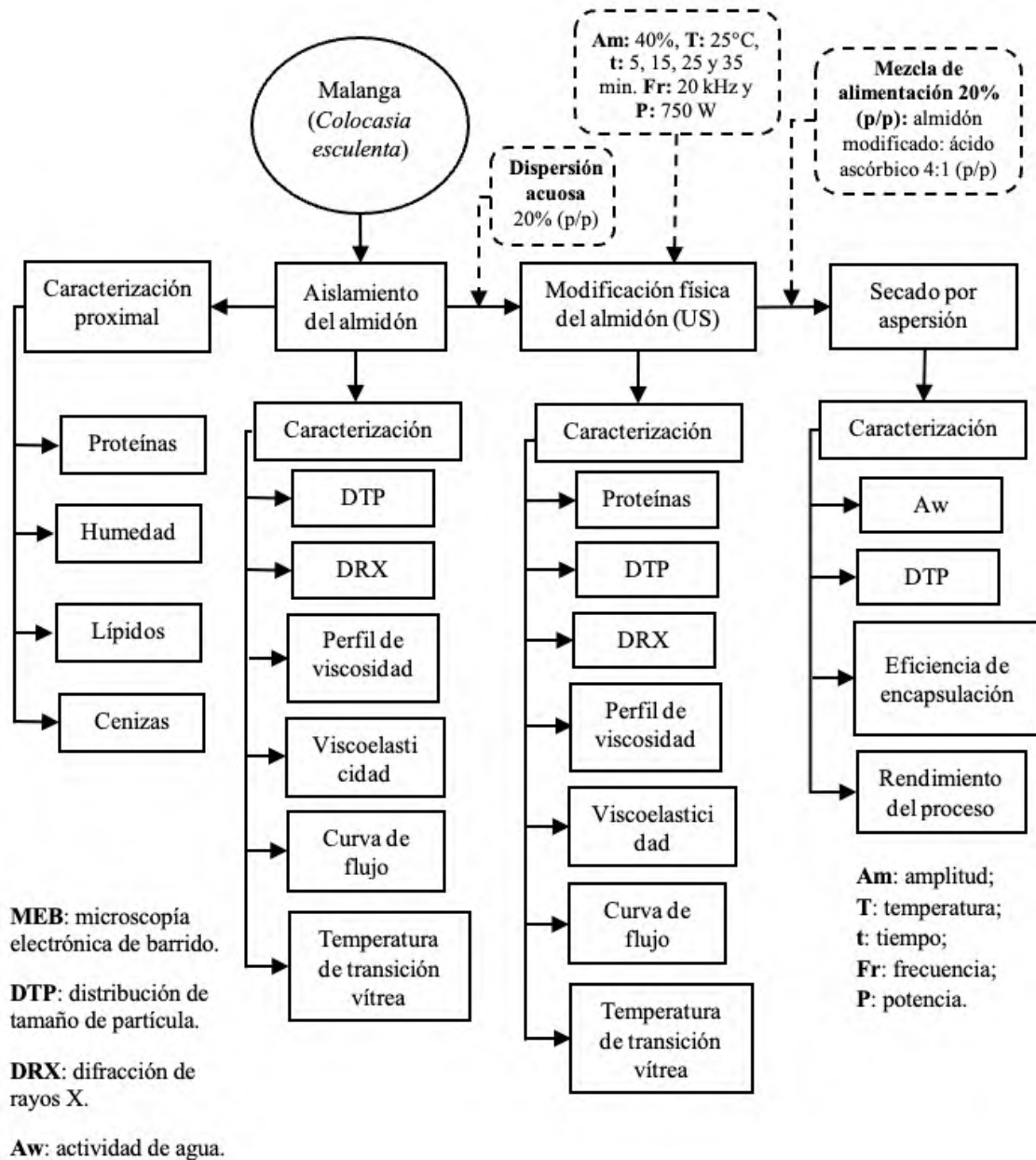


Figura 6.1 Metodología general propuesta en el presente proyecto de investigación.

6.1 Materiales y químicos

Los tubérculos de malanga (*Colocasia esculenta* L.) fueron adquiridos en la localidad de Santa Rosa, Veracruz. El compuesto encapsulado (ácido ascórbico) se obtuvo en Sigma-Aldrich S.L. (Toluca, México). Todos los reactivos químicos y disolventes utilizados fueron de grado reactivo.

6.2 Aislamiento del almidón

Se realizó tomando como base el método propuesto por Flores-Gorosquera *et al.*, (2004), debido a que permite eliminar con los lavados parte del ácido hidrocianico y del oxalacetato que contiene la malanga. Este método se realizó omitiendo la adición de ácido ascórbico y modificándolo ligeramente. Los tubérculos fueron pelados, cortados en trozos pequeños (de 2 cm) y triturados en un molino de discos (diámetro de los discos: 24 cm; potencia del motor: 2 hp), después el producto molido se cribó en mallas de acero inoxidable y de distintos tamaños (No. 40, 100, 200 y 325), posteriormente se eliminó el material retenido en las mallas mientras que el líquido obtenido fue sedimentado a 20 °C por 12 h para eliminar el sobrenadante por decantación. El precipitado se lavó por suspensión en agua y se centrifugó (Heraus Megafuge, 16 R, ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, USA) a 4000 xg por 10 min a 20 °C, y se repitió el proceso 3 veces, por último se secó la pasta (sedimento) en un secador de charolas (SUSESA, México) a 45 °C hasta que llegó a masa constante.

El producto seco obtenido, se trituró con cuchillas y se tamizó con una malla No. 100, después se almacenó a temperatura ambiente en contenedores de sellado hermético para que se pudieran usar posteriormente para su caracterización y modificación.

6.3 Modificación del almidón de malanga

Se realizó una modificación física por ultrasonidos (Cole-Parmer, Modelo CPX750), preparando dispersiones de almidón en agua al 20% p/p y sometiénolas a cuatro tiempos diferentes de procesamiento ultrasónico (5, 15, 25 y 35 min), a una frecuencia de 20 kHz y una potencia de 750 W, a

temperatura constante de 25 °C y evaluando una sola amplitud (40 %). Las modificaciones se realizaron por cuadruplicado, de las cuales 2 réplicas se llevaron a centrifugación a 4000 *xg* por 10 min a 20 °C, seguido de un proceso de secado a 45 °C hasta masa constante, y finalmente se realizó una molienda con cuchillas y un tamizado en malla No. 100. Estas muestras se envasaron en vasos de sellado hermético, y se mantuvieron a 25 °C hasta su posterior análisis. Las otras 2 réplicas se utilizaron en forma de dispersión para encapsular ácido ascórbico mediante secado por aspersión, el mismo día de su modificación.

6.4 Encapsulación mediante secado por aspersión

El estudio de viabilidad del uso del almidón modificado de malanga como material de pared (agente encapsulante) se realizó mediante secado por aspersión para la formación de cápsulas.

6.4.1 Preparación de la mezcla de alimentación

Se preparó una dispersión de 4:1 (p/p) del material de pared (almidón modificado por ultrasonido) y del ácido ascórbico, es decir, por cada 4 g de almidón se adicionó 1 g de ácido ascórbico. Este último se adicionó directamente en la dispersión de almidón previamente modificado por ultrasonidos. Posteriormente la mezcla se agitó magnéticamente durante 15 min a 25 °C.

6.4.2 Secado por aspersión

Se utilizó el secador por aspersión a escala laboratorio (BÜCHI, Micro Spray Dryer B-290; Flawil, Herau, Suiza) ubicado en el Instituto Tecnológico de Tehuacán (México). Se usó una boquilla de diámetro estándar de 0.7 mm, un tapón de rosca de boquilla de 1.5 mm de diámetro y aire como gas de secado. El flujo de gas de atomización se mantuvo fijo a 40 mm en el indicador rotámetro de gas, lo que corresponde a 667 L·h⁻¹ según las especificaciones del fabricante, mientras que la presión de atomización fue de 6×10⁵ Pa. La tasa de aspiración se mantuvo al 100% de la capacidad operativa (35 m³·h⁻¹ de acuerdo con las especificaciones del fabricante). La temperatura del aire de entrada (T_{ent}) y la

temperatura del aire de salida (Tsal) al secador se mantuvieron a 140 y 70 °C, respectivamente, siguiendo los resultados obtenidos por Dang *et al.*, (2016). Las mezclas se alimentaron con una bomba peristáltica con caudal variable para controlar la respectiva Tsal. El estudio de secado por aspersión se realizó por duplicado y las cápsulas obtenidas se almacenaron en bolsas laminadas selladas térmicamente, manteniéndolas a 25 °C hasta sus análisis posteriores.

6.4.3 Rendimiento del proceso

De acuerdo a lo planteado por Vázquez-León *et al.*, (2022), el rendimiento del proceso de secado por aspersión se calculó como la relación entre la masa seca total del producto recuperado y los sólidos secos totales de la alimentación.

6.4.4 Eficiencia de encapsulación

La estimación del contenido de ácido ascórbico (AA) en la superficie de las cápsulas (*AA superficial*) se realizó de acuerdo con lo descrito por Leyva-López *et al.*, (2019). Se pesaron 250 mg de la muestra obtenida mediante secado por aspersión y se le adicionaron 25 mL de agua destilada, la mezcla se agitó durante 15 s. Se transfirieron 100 µL de la muestra a un matraz de 10 mL, se aforó con el diluyente (4 mL de ácido sulfúrico, 120 mL de acetona, 876 mL de agua Mili-Q), para asegurar la integridad de la muestra, y se después se filtró. La muestra filtrada se analizó en un cromatógrafo iónico (Metrohm, 919 Autosampler Plus; Herisau, Suiza) acoplado a un detector de conductividad (Metrohm, IC Conductivity Detector; Herisau, Suiza) de acuerdo con el método descrito por Vázquez-Espinosa *et al.*, (2019). Este mismo procedimiento se llevó a cabo para determinar el contenido de ácido ascórbico total en las cápsulas (*AA total*); la única diferencia fue que la mezcla se llevó a sonicación (Bandelin, SONOPULS HD 3200; Berlín, Alemania) durante 10 min a 15 °C, potencia de 200 W, y frecuencia de 45 kHz; esto para asegurar la ruptura total de la cápsula. La concentración de ácido ascórbico en las muestras se determinó utilizando la curva de calibración para el ácido ascórbico que se

realizó en el intervalo de 1 a 100 ppm. La eficiencia de encapsulación se estimó de acuerdo con a la ecuación 6.1:

$$\text{Eficiencia de encapsulación (\%)} = \frac{AA \text{ total} - AA \text{ superficial}}{AA \text{ total}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

6.4.5 Determinación de actividad de agua (aw)

Para este estudio se utilizó un medidor de actividad de agua (Analizador de Sorción de Vapor, AQUALAB, mod. VSA1144, México) donde las muestras se analizaron a $25 \pm 1^\circ\text{C}$; siguiendo lo propuesto por Vázquez-León *et al.*, (2022).

6.5 Caracterización químico proximal

El almidón nativo, los almidones modificados por ultrasonidos, y las partículas obtenidas mediante secado por aspersion fueron sometidas a los mismos análisis de caracterización, con excepción de la química proximal que solo fue para el almidón nativo, y la determinación de proteínas que fue realizada para el almidón modificado y nativo. Para las cápsulas se determinó aw, eficiencia de encapsulación y rendimiento de encapsulación como caracterizaciones extras. Todas las pruebas se realizaron por duplicado y se describen en las siguientes secciones.

6.5.1 Humedad

Este análisis se determinó por pérdida de masa, utilizando el método 44-16.01 de la AACC, (2000) (estufa de vacío). En charolas de aluminio previamente secas a masa contante, se pesaron muestras de 1 g aproximadamente, posteriormente estas charolas se introdujeron en la estufa de vacío a 1,400 Pa (Shel Lab, Mod. 1425; Cornelius, OR, USA) y se mantuvieron dentro hasta que las muestras llegaron a masa constante; una vez pasó esto, las muestras fueron retiradas de la estufa, y se enfriaron en un desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, después se pesaron en una balanza analítica (Ohaus, Mod.

AR2140, Parsippany, NJ, USA), para así poder determinar el porcentaje de humedad en base seca por diferencia de masa.

6.5.2 Proteínas

Se utilizó el método AACC International (2000) No. 46-13 para la determinación del contenido de proteínas, donde se cuantificó el nitrógeno con base en el método Kjeldahl y utilizando un factor de 5.85 para la conversión al contenido proteico con la ecuación 6.2. En tubos Kjeldahl se pesó 0.25 g de muestra y se le adicionaron 2 g de sulfato de cobre, 10 g de sulfato de sodio anhidro y 5 mL de ácido sulfúrico, después los tubos se colocaron en el digestor Micro Kjeldahl de bloques (Prendo, Mod. DIK-40; Puebla, México) para calentarlos gradualmente hasta alcanzar 400 °C, la temperatura se mantuvo durante 1.5 h, tiempo suficiente para que todo el material se carbonizara y se lograra observar que el contenido de los tubos obtuvo un color verde claro. Posteriormente, se dejaron enfriar las muestras hasta alcanzar temperatura ambiente (25 °C), aproximadamente durante 30 min. Luego los tubos se colocaron en el destilador Micro Kjeldahl (Prendo, Mod. DEK-1; Puebla, México) y se adicionaron 21 mL de agua destilada para disolver completamente el residuo del matraz y 15 mL de solución de hidróxido de sodio al 60% (p/v). El destilado se recibió en un matraz Erlenmeyer que contenía 12 mL de ácido bórico al 4%, y 2 gotas de indicador de Wesslow. Se destiló hasta recolectar 50 mL aproximadamente y se retiró el matraz para finalmente titular con ácido clorhídrico 0.1 N hasta obtener un viraje a color violeta.

$$Proteínas(\%) = \frac{(mL\ de\ HCl\ gastados)(N\ del\ HCl)(0.014)}{Sólidos\ secos\ de\ la\ muestra\ (g)} \times F \times 100 \quad (6.2)$$

Donde N es la normalidad y F el factor de proteína utilizado para este estudio (5.85).

6.5.3 Lípidos

El contenido de lípidos se determinó con el método de la AACC International (2000) No. 30-25, donde se empleó el equipo de extracción Soxhlet usando como disolvente éter de petróleo. La muestra

de almidón se colocó en un cartucho de celulosa y se sometió a extracción durante 4 h (a 3 reflujos por hora), para después estimar el porcentaje de lípidos mediante la ecuación 6.3.

$$\text{Lípidos (\%)} = \frac{\text{Peso final del matraz (g)} - \text{Peso inicial del matraz (g)}}{\text{Sólidos secos de la muestra (g)}} \times 100 \quad (6.3)$$

6.5.4 Cenizas

Con el método de la AACC International (2000) No. 08-01 se determinó el contenido de cenizas. Se llevó previamente un crisol a masa constante y después se colocaron las muestras de almidón, las cuales se calcinaron totalmente en un quemador de parrilla. Luego se introdujeron en una mufla (Wise Therm, mod. FH-14, Alemania) a 550 °C durante 5 h. Pasando las 24 h de apagado, las muestras se retiraron y para atemperarlas se pusieron en un desecador, al final se pesaron en una balanza analítica y el porcentaje de las cenizas se calculó con base en la ecuación 6.4.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{\text{Peso final del crisol (g)} - \text{peso inicial del crisol (g)}}{\text{Sólidos secos de la muestra (g)}} \times 100 \quad (6.4)$$

6.6 Caracterización morfológica y estructural

6.6.1 Distribución del tamaño de partículas

Este análisis se llevó a cabo siguiendo lo propuesto por Vázquez-León *et al.*, (2022). La distribución del tamaño de partículas se realizó a temperatura ambiente utilizando un analizador por dispersión de luz estática Mastersizer 3000 (Malvern Instruments; Malvern, Reino Unido) el cual estuvo equipado con una unidad de dispersión acuosa (Hydro EV, Malvern Instruments Ltd., 1990). El tamaño se comparó en función de los perfiles de distribución del tamaño de los gránulos, y de los diámetros Dv10, Dv50 y Dv90, representando el 10 %, 50 % y 90 % del volumen total en la distribución de partículas.

6.6.2 Difracción de rayos X

Se utilizó un difractómetro de rayos-X (Bruker Axs, mod. D8 Advance) para obtener los patrones de difracción y se realizó siguiendo lo descrito por Vázquez-León *et al.*, (2022). Las muestras fueron colocadas en el portamuestras del equipo de ángulo ancho, equipado con una fuente de cobre operado a 40 kV y 30 mA, generando una radiación de Cu- $K\alpha$ con filtro de Ni y rejilla de 2 mm. Los datos se analizaron mediante el software Origin Lab versión 7 (Northampton, MA, USA).

6.7 Caracterización reológica

Se prepararon suspensiones de almidón en agua al 10% (p/v) en base seca y se analizaron en un reómetro (TA Instruments, Discovery HR-2 Hybrid; New Castle, EE. UU.) equipado con una geometría de placa plana de 40 mm de diámetro (Smart Swap™; New Castle, DE, USA), y a un GAP de 500 μm . Las pruebas que se realizaron fueron perfil de viscoelasticidad y curva de flujo. Adicionalmente se determinó el perfil de viscosidad, utilizando una geometría y celda para almidones, a un GAP similar.

6.7.1 Viscoelasticidad

Para la determinación de la Viscoelasticidad se siguió lo propuesto por Páramo-Calderón *et al.*, (2023). Los barridos de amplitud de deformación se realizaron en un rango de 0.1 a 10%, a una frecuencia constante de 1 Hz, y una velocidad de calentamiento-enfriamiento de 2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Primeramente, se realizó un ciclo de calentamiento de 25 a 90 $^{\circ}\text{C}$, seguido de una cocción durante 10 min a 90 $^{\circ}\text{C}$ (primera etapa de medición); posteriormente se realizó un enfriamiento de 90 $^{\circ}\text{C}$ a 25 $^{\circ}\text{C}$ (segunda etapa de medición), para determinar la región viscoelástica lineal (RVL). Los barridos de frecuencia se realizaron en un rango de 0.1 a 10 Hz, con una amplitud de deformación constante del 0.5%, en las dos etapas previamente descritas. En cada etapa se evaluaron los siguientes parámetros: módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G''), tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$) y viscosidad compleja/ η^* / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) mediante el software Trios V4 (TA Instruments; New Castle, DE, EE. UU.).

6.7.2 Curva de flujo

Las mediciones se llevaron a cabo de 25 °C a 90 °C (primera medición) y luego a 25 °C (segunda medición), utilizando una velocidad de calentamiento-enfriamiento de 5 °C/min. Las mediciones se realizaron en dos ciclos: ascendente y descendente de 0.03 a 100 s⁻¹ y un tercer barrido descendente de 100 a 0.03 s⁻¹ (Paramo-Calderón *et al.*, 2023). Los datos obtenidos del tercer ciclo son los que se reportan.

6.7.3 Perfil de viscosidad

Para este estudio se utilizó el reómetro (Discovery HR-2 hibrid, New Castle, USA) y el software TA Instrument Trios versión 4 para obtener los valores de viscosidad con respecto al tiempo y la temperatura. El perfil de viscosidad se determinó siguiendo lo propuesto por Vázquez-León *et al.*, (2022). Se realizó una dispersión acuosa de almidón de 30 mL al 10% (p/v), después esto se depositó en la celda de almidón del reómetro y se programó un ciclo de calentamiento-cocción-enfriamiento, donde la temperatura inicial fue de 30 °C y se mantuvo por 60 s; el calentamiento se efectuó hasta 90 °C a una velocidad de 15 °C·min⁻¹, manteniendo dicha temperatura durante 360 s y finalmente se enfrió disminuyendo la temperatura hasta 30 °C a una velocidad de 30 °C·min⁻¹, manteniéndose a esa temperatura por 420 s.

6.8 Caracterización térmica: temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea (T_g) se determinó con un calorímetro diferencial de barrido (TA Instrument Discovery, DSC250). El gas de purga usado fue el nitrógeno seco de alta pureza (50 mL·min⁻¹). Se utilizó una charola de aluminio hermética vacía como referencia. Se colocaron 2 mg de muestra en charolas de aluminio herméticas y selladas para su análisis. La muestra se sometió a un programa de calentamiento en un intervalo de temperatura de -10 a 150 °C a una velocidad de 10 °C·min⁻¹ para determinar la T_g. La prueba se realizó por duplicado y los datos se analizaron con el software TA

Instruments Tríos versión 4 (New Castle, USA). La Tg se registró como la temperatura media de la discontinuidad en la curva de flujo de calor.

6.9 Diseño de experimentos y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de experimentos de un factor para estudiar la modificación del almidón de malanga por ondas de ultrasonido, donde el factor principal fue el tiempo de exposición a las ondas de ultrasonido, a 5 niveles: 0, 5, 15, 25 y 25 min. Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), seguido de una prueba de pares por Tukey para identificar diferencias significativas entre las medias, a un nivel de significancia del 5 %. Se usó el software Minitab® 18 para el análisis estadístico.

7 RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre el contenido proteico del almidón de malanga

Se obtuvieron 29 kg de pulpa molida a partir de 34 kilogramos de malanga fresca, lo que resultó en la producción de 5.750 kg de almidón, con un rendimiento del 19.83% en base húmeda, mayor a los resultados obtenidos por Chávez-Salazar *et al.*, (2017) para dos variedades de plátanos, Gros Michel (5.78% bh) y Dominico Hartón (12.73%). La variación en los niveles de contenido de almidón puede deberse al método de extracción, ya que este influye en la eficacia del proceso de extracción del almidón (Vázquez-León *et al.*, 2022).

Los resultados del análisis químico proximal del almidón de malanga nativo se presentan en la **Tabla 7.1**. El contenido de humedad presente en la muestra fue de 7.98 %, muy similar a lo reportado por Torres *et al.*, (2015) y Jiménez-Hernández *et al.*, (2007) para malanga (7.21%) y chayote (7.20%), respectivamente; sin embargo, el valor obtenido fue menor a lo reportado para papa, 8.4% (Jiménez-Hernández *et al.*, 2007). También cabe señalar que el contenido de humedad en las muestras dependerá de las condiciones del proceso de secado y de las propiedades psicométricas del aire utilizado para dicho proceso.

Tabla 7.1. Composición química proximal del almidón nativo de malanga.

Componente	Contenido (g/100 g bs)*
Humedad	7.98 ± 0.23
Proteínas	4.63 ± 0.38
Lípidos	0.43 ± 0.24
Cenizas	0.34 ± 0.01

*Los valores corresponden a la media de dos repeticiones ± desviación estándar.

Tattiyakul *et al.*, (2007), reportaron para malanga de tres variedades diferentes, un contenido de lípidos entre 0.15% y 0.28%, valores inferiores a lo reportado en este estudio ($0.43 \pm 0.24\%$), sin embargo, Andrade *et al.*, (2017) reportaron el mismo contenido de lípidos para malanga (0.43%) y Gonzales-Soto *et al.*, (2011) reportaron un valor parecido (0.40%), también para malanga.

Una de las características más notable de los frutos, tubérculos y raíces, es que presentan altos contenidos de cenizas (Gonzales-Soto *et al.*, 2011). El almidón de malanga presentó un valor mayor al de otros tubérculos como el camote (0.26%) y la yuca (0.29%) (Hernández-Medina *et al.*, 2008); sin embargo, el resultado es igual a lo reportado para papa (0.34%) pero menor al valor del chayote (0.46%) (Jiménez-Hernández *et al.*, 2007).

El contenido proteico obtenido en este estudio fue de $4.63 \pm 0.38\%$, ubicándose dentro del intervalo de valores informados por otros investigadores para la malanga, que varían entre el 1% y el 7.5% (Tattiyakul *et al.*, 2007; Gonzales-Soto *et al.*, 2011; Torres *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2017). Se ha mencionado en la literatura, que el alto contenido de proteína se encuentra presente en el mucilago de la raíz de malanga (Gonzales-Soto *et al.*, 2011), lo que quiere decir que las variaciones en la composición proteica podrían originarse tanto por el método de extracción empleado como por las disparidades en las condiciones agroclimáticas de los cultivos (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018).

Se ha reportado que el contenido de proteínas presente en los almidones permite la formación de agregados esféricos durante el secado por aspersión (Vázquez-León *et al.*, 2022, Aparicio-Saguilán *et al.*, 2024), y se reconocen como un sistema encapsulante (Guo *et al.*, 2021). Por ello se decidió evaluar cómo afecta el tiempo de exposición a ondas de ultrasonido al contenido de proteína del almidón de malanga. En la **Tabla 7.2** se presentan los resultados obtenidos y se comparan con su contraparte nativa. Los resultados muestran que el proceso de ultrasonido reduce el contenido de proteínas después de los 5 min de exposición, sin presentar diferencias significativas ($p > 0.05$) hasta los 35 min de exposición.

Tabla 7.2 Contenido de proteínas del almidón de malanga modificado por ultrasonido a diferentes tiempos de proceso.

Tiempo de proceso (min)	Contenido de proteínas (g/100 g bs)*
0	4.63 ± 0.38 ^a
5	3.36 ± 0.02 ^{ab}
15	2.88 ± 0.42 ^b
25	3.20 ± 0.25 ^b
35	2.33 ± 0.67 ^b

*Los valores corresponden a la media de dos repeticiones ± desviación estándar. Los valores que no comparten letra presentan diferencia significativa ($p < 0.05$).

Se ha reportado que el proceso de ultrasonido permite la ruptura mecánica de los gránulos de almidón por el fenómeno de cavitación (Monroy *et al.*, 2018), lo cual podría permitir que la proteína asociada a la estructura granular quedara libre y se pudiese transferir hacia el medio dispersante, que en el presente proyecto fue agua y que se removió por centrifugación para recuperar los sólidos de almidón. Además de que se hicieron lavados sucesivos con agua, removiendo así la proteína liberada durante el proceso de sonicación.

7.2 Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre la morfología y estructura del gránulo de almidón de malanga

Para confirmar el daño generado sobre la estructura física del gránulo de almidón provocado por la exposición a las ondas de ultrasonido se decidió evaluar la distribución de tamaño de partícula (DTP), y los patrones de difracción de rayos X (DRX).

7.2.1 DTP

En la **Figura 7.1**, se aprecia que el almidón nativo de malanga, así como sus homólogos modificados en tiempos de 5, 15 y 25 min, mostraron una distribución granulométrica trimodal y un

tamaño de partícula de aproximadamente 53, 27 y 9 μm para cada pico, estos resultados mostraron cambios muy ligeros entre sí, coincidiendo con Carmona-García *et al.*, (2016), quienes mencionan que este comportamiento se debe a que el proceso de ultrasonido en el intervalo evaluado no produjo una fragmentación significativa sobre los gránulos de almidón.

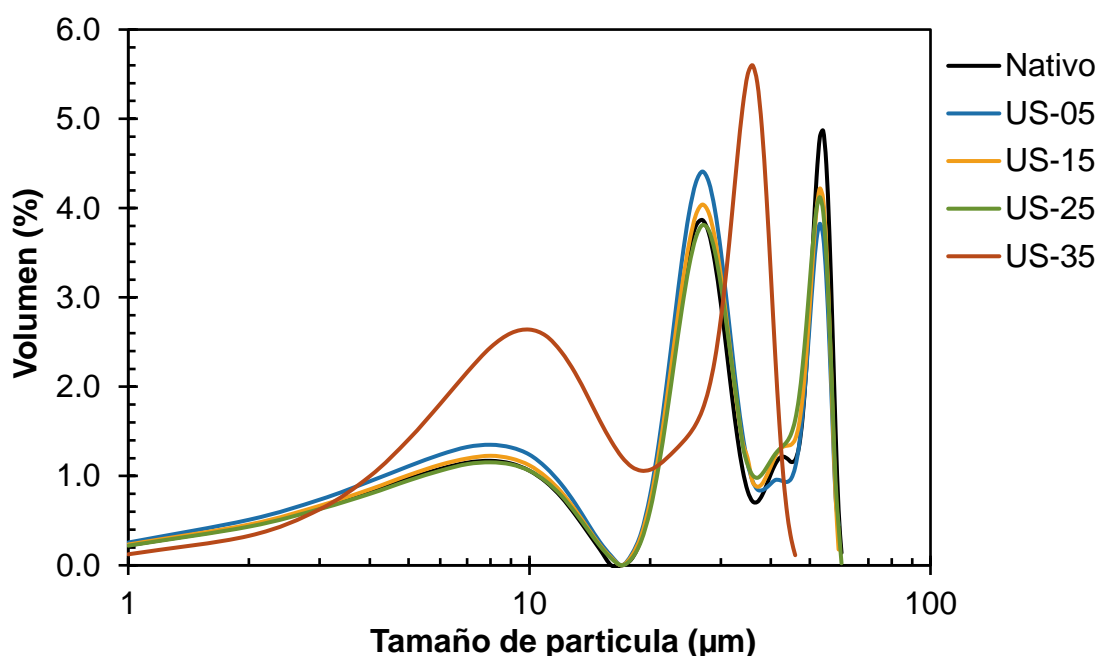


Figura 7.1 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la distribución de tamaño de partículas de almidón de malanga.

Sin embargo, la muestra de almidón de malanga modificada a 35 minutos mostró una distribución bimodal con tamaños de partículas menores (aproximadamente de 37 y 10 μm para cada pico) a los obtenidos con el nativo. Esto concuerda con lo reportado por Haaj *et al.*, (2013) y Boufi *et al.*, (2018), quienes concluyeron que mientras mayor sea el tiempo de modificación al que se someta la muestra de almidón, menor será el tamaño de partícula. Por lo tanto, el proceso de sonicación concuerda con el resultado de proteína presentado en **Tabla 7.2**. Cabe mencionar que en el intervalo de tiempo de 25-35 min de sonicación los gránulos de almidón alcanzan la energía necesaria para fragmentar el tamaño de estos.

7.2.2 DRX

La determinación del patrón de difracción de rayos X en los almidones permite obtener información sobre su estructura semicristalina (Monroy *et al.*, 2018). En la **Figura 7.2**, se observan los porcentajes de cristalinidad relativa y los patrones de difracción de rayos X del almidón nativo de malanga y sus homólogos modificados por ultrasonidos. Todas las muestras presentaron patrones con picos característicos de tipo A, y no se aprecian diferencias o alteraciones significativas después de la modificación, algo que coincide con lo reportado por Carmona-García *et al.*, (2016); Thomaz *et al.*, (2019) y Martins *et al.*, (2020), para el almidón de malanga.

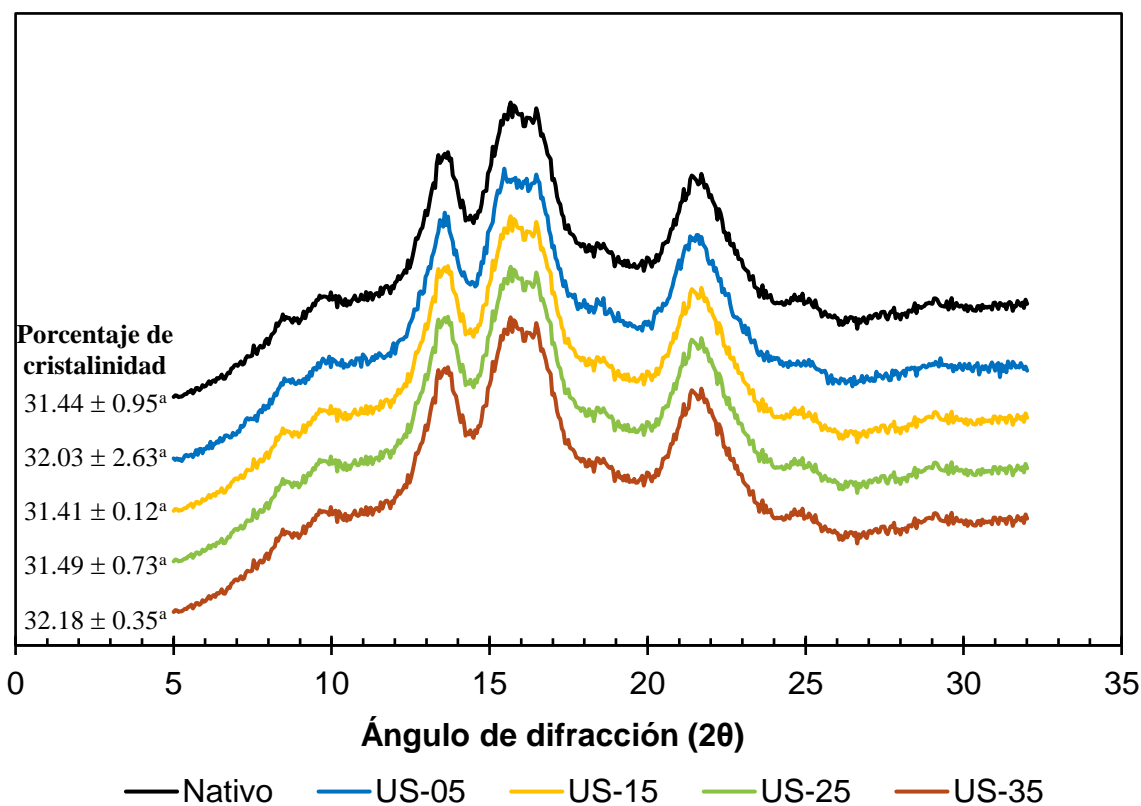


Figura 7.2 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre el patrón de difracción de rayos X y el porcentaje de cristalinidad del almidón de malanga.

El resultado del porcentaje de cristalinidad relativa en el almidón nativo fue de 31.44%, mientras que las muestras modificadas en tiempos de 5, 15, 25 y 35 min, presentaron porcentajes de 32.03, 31.41, 31.49 y 32.18%, respectivamente, sin embargo, estos resultados no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$). Esto sugiere que el tratamiento físico no alteró los patrones de difracción ni los niveles de cristalinidad, lo que implica que las propiedades estructurales cristalinas de los almidones se mantuvieron sin cambios tras la modificación por ultrasonido bajo las condiciones estudiadas (Falsafi *et al.*, 2019). El contenido de proteína pudo ser un factor importante para proteger la estructura cristalina del almidón, pues los resultados indican una remoción de proteína significativa ($p < 0.05$), y una disminución del tamaño de partícula hasta los 35 min de proceso de sonicación. Sin embargo, hay un ligero aumento de cristalinidad entre los tiempos 25 a 35 min, esto significa que la disminución de proteína favorecen la cristalinidad.

7.3 Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre la temperatura de transición vítrea del almidón de malanga

La temperatura de transición vítrea (T_g), es la temperatura a la cual un material amorfo (como los polímeros) cambia de un estado rígido y frágil a un estado más flexible y viscoso (Liu *et al.*, 2010). Conocer este valor, es importante para ayudar a evitar el apelmazamiento durante la formación de agregados esféricos (Palzer, 2005) y para garantizar la estabilidad física de los mismos (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018).

Los valores de T_g obtenidos en este estudio (mostrados en la **Figura 7.3**) son similares a los reportados por Monroy *et al.*, (2018) y Wang *et al.*, (2020), para almidones de tubérculos (yuca y papa respectivamente). En los resultados, se observa que las temperaturas de transición vítrea de los almidones modificados, en comparación con su homólogo nativo, no presentaron cambios significativos ($p > 0.05$) después de ser sometidos al proceso de ultrasonidos. Este comportamiento ya se había reportado con anterioridad para el almidón de malanga modificado por ultrasonidos, pero a diferentes

condiciones. Por ejemplo, Carmona-Garcia *et al.*, (2016) realizaron la modificación de este almidón usando una amplitud al 20% y una potencia de salida de 80 W durante diferentes tiempos de sonicación (20 y 50 min), mientras que Martins *et al.*, (2020) lo modificaron durante 30 minutos a diferentes amplitudes (40, 50 y 60%). Además, este comportamiento también corresponde con lo reportado para otros tubérculos, como la papa, cuyo almidón se modificó por ultrasonido a una potencia de 300 W en un equipo con una sonda ultrasónica (VCX750, Sonics & Materials Inc, EE. UU) a diferentes tiempos (15, 20, 25 y 30 min) (Wang *et al.*, 2020); o como el almidón de yuca, que también se modificó por ultrasonidos a una potencia de 750 W y 40% de amplitud durante diferentes tiempos (5, 10 y 20 min) (Monroy *et al.*, 2018).

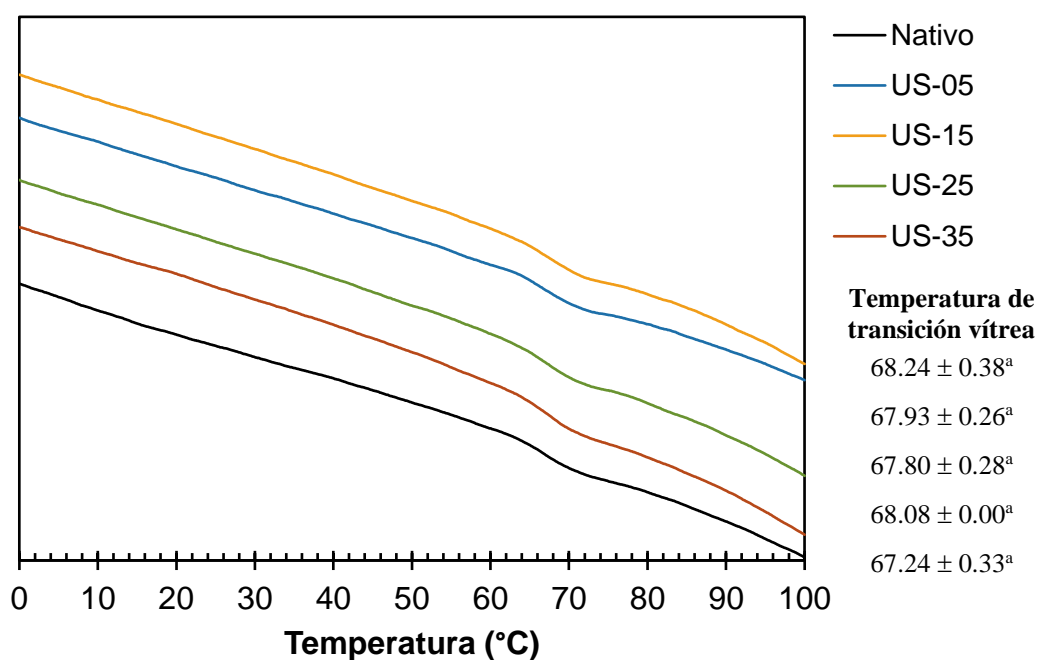


Figura 7.3 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la temperatura de transición vítrea del almidón nativo de malanga.

Hoyos-Leyva *et al.*, (2018), mencionaron que para garantizar que los agregados esféricos formados a partir de almidones sean estables, la temperatura del proceso debe ser menor a la de Tg, por tanto, se

concluyó que los valores obtenidos en Tg para los almidones de este estudio se encuentran en el límite de lo recomendado para materiales de pared basados en almidones ricos en proteínas, pues se trabajó a una temperatura de salida de 70 °C. Es importante considerar que el vaso de recolección se encuentra a una temperatura menor, pues el calor se disipa hacia el entorno. Sin embargo, para proyectos futuros se recomienda una temperatura de salida en el secador por aspersión de máximo 60 °C para estar por debajo de la Tg de estos materiales.

7.4 Efecto del tiempo de exposición a ultrasonido sobre las propiedades reológicas de dispersiones acuosas del almidón de malanga

Las propiedades reológicas de las dispersiones acuosas del almidón son relevantes para la formación de cápsulas, pues un incremento en la viscosidad conlleva a un incremento en el tamaño de gota, en consecuencia, se dificulta el proceso de secado, y podría incluso reducir el rendimiento del proceso (Fang y Bhandari, 2012; Jacobs, 2014). Por esta razón se decidió evaluar el perfil de viscosidad, la curva de flujo y las propiedades viscoelásticas de dispersiones acuosas de los almidones modificados por ultrasonido.

7.4.1 Perfil de viscosidad

El perfil de viscosidad ofrece detalles sobre el comportamiento de los gránulos de almidón al ser suspendidos en agua y expuestos a un incremento de temperatura y un esfuerzo de corte (Rincón-Londoño *et al.*, 2016). En la **Figura 7.4** se muestran los diferentes comportamientos que tiene el almidón en su forma nativa en comparación con su forma modificada por ultrasonido.

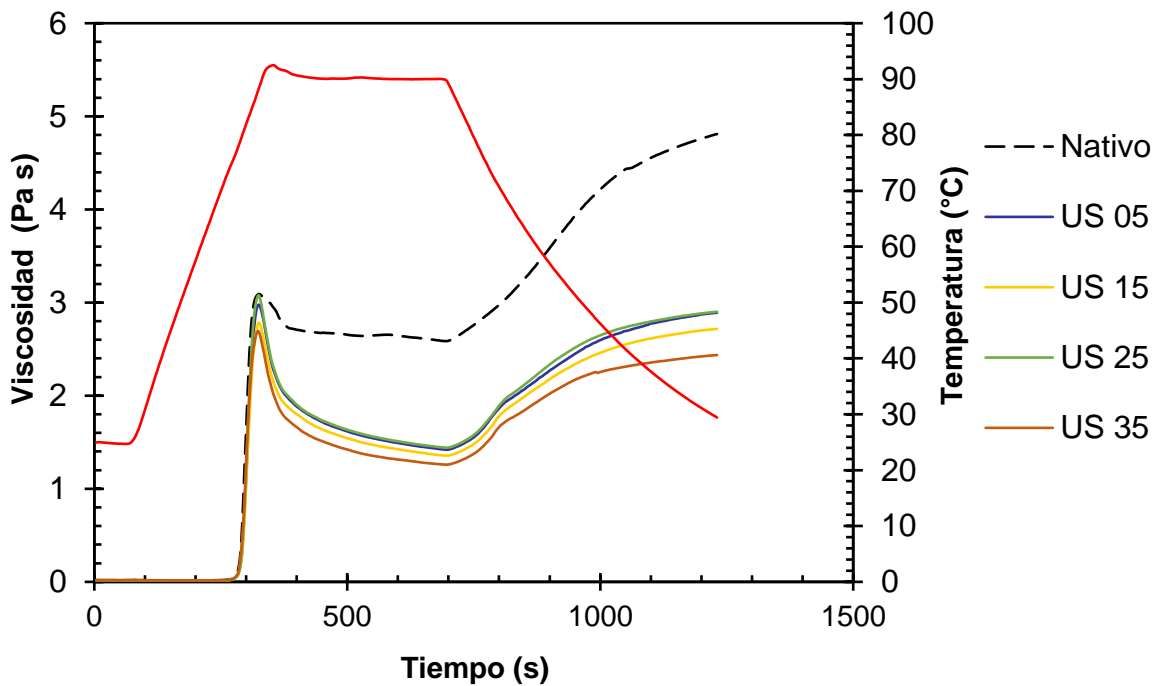


Figura 7.4 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre el perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v).

Como se observa, los almidones modificados muestran una leve disminución en el pico máximo de viscosidad en comparación con el nativo (3.09 Pa s a 87 °C), lo cual concuerda con lo reportado por Carmona *et al.* (2016), quienes mencionan que los tratamientos cortos de ultrasonidos no varían significativamente el perfil de viscosidad en comparación con el nativo. Las dispersiones con almidón modificado por 35 min son las que presentan menor pico máximo de viscosidad, lo cual concuerda con los resultados de DTP y contenido de proteínas, los cuales sugieren que tiempos prolongados de proceso (en este caso de 35 min) son los que afectan a la estructura granular del almidón de malanga, esto bajo las condiciones de ultrasonido estudiadas.

7.4.2 Curva de flujo

El efecto del esfuerzo de corte sobre la viscosidad del almidón de malanga en su forma nativa y modificada por ultrasonidos se presenta en la **Figura 7.5**. Se observó que en todas las muestras la

viscosidad disminuyó al aumentar el esfuerzo de corte, mostrando un comportamiento de flujo de adelgazamiento por cizallamiento, característico de los fluidos no newtonianos, similar a lo reportado por Paramo-Calderón *et al.*, (2023) y Wang *et al.*, (2020), para dispersiones acuosas de almidones.

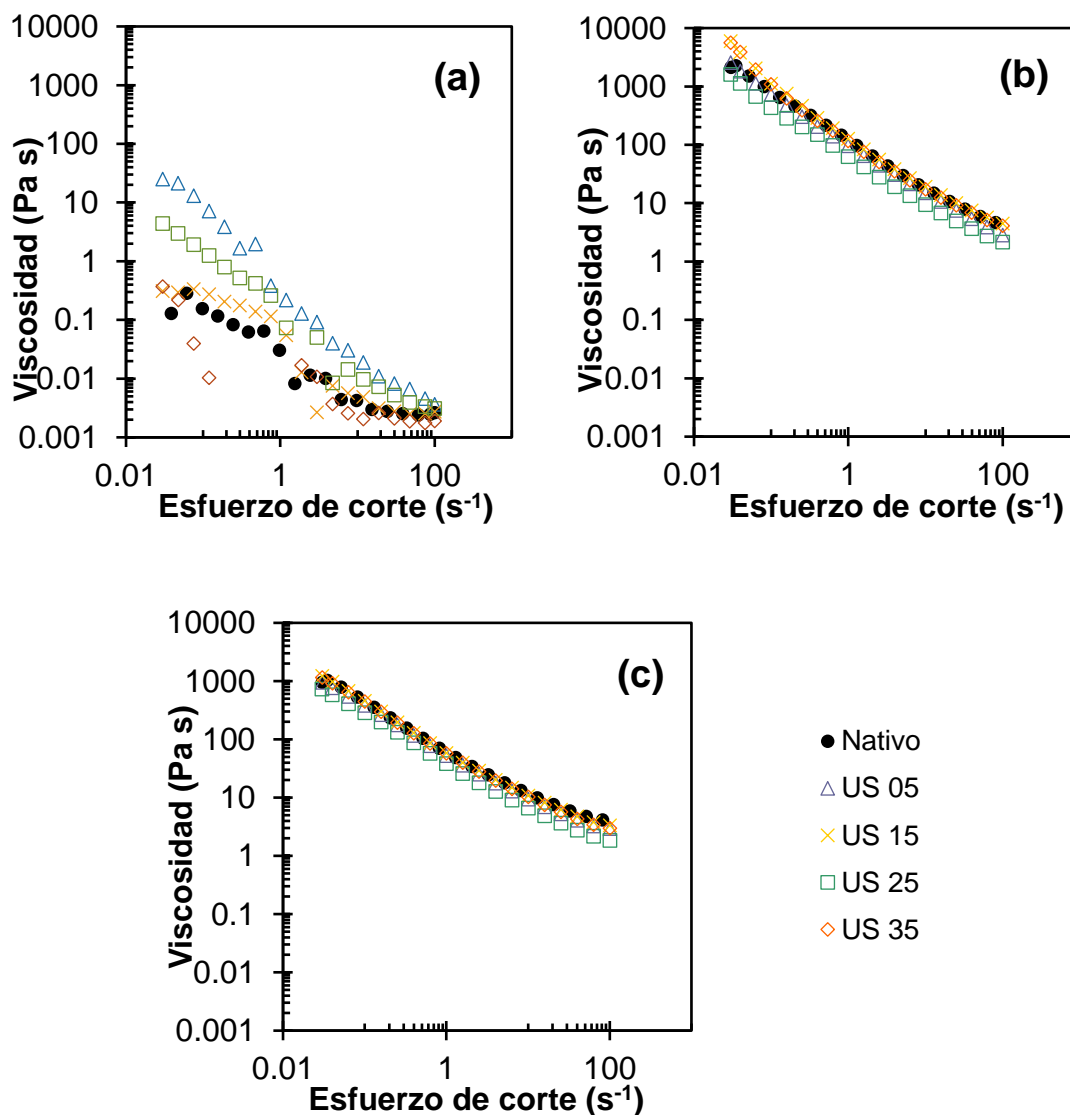


Figura 7.5 Efecto del tiempo de exposición a ondas de ultrasonido sobre la curva de flujo de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) a 25 °C (a), cocción a 90 °C (b), y enfriamiento a 25 °C posterior a la cocción (c).

Estudios han mencionado que existe una relación entre la viscosidad y la cantidad de amilosa (Wang *et al.*, 2020), por lo que se puede concluir que no se presentaron cambios en la viscosidad porque el contenido de amilosa en las muestras no cambió durante la modificación.

En la **Figura 7.5c**, se observa que el comportamiento de los almidones durante el enfriamiento fue igual al comportamiento que tuvo durante la cocción, donde no hubo cambios entre las muestras modificadas y el almidón nativo. Paramo-Calderón *et al.*, (2023), mencionan que durante el enfriamiento se forman estructuras más rígidas a causa del reordenamiento de las cadenas (retrogradación); por tanto, se esperaría que durante esta etapa los valores de viscosidad fueran mayores en comparación a los obtenidos durante la etapa de cocción. Sin embargo, los resultados de este estudio demuestran un comportamiento contrario a lo que se esperaría. Los valores de la viscosidad durante la etapa de enfriamiento disminuyeron con respecto a la cocción, lo cual, puede atribuirse a que las fuerzas entre las cadenas disminuyeron debido a cambios en la estructura del almidón (ruptura del gránulo). Wang *et al.*, (2020) mencionan que la composición, las propiedades fisicoquímicas, el tamaño del peso molecular y la distribución de la longitud de las cadenas del almidón son factores que influyen en la viscosidad.

7.4.3 Viscoelasticidad

Los resultados obtenidos de las pruebas de viscoelasticidad realizadas se caracterizaron por G' y G'' . Donde, G' corresponde al módulo elástico o de almacenamiento, relacionado con la respuesta del material como un sólido y G'' corresponde al módulo viscoso o de pérdida, relacionado con la respuesta del material como un fluido. De acuerdo con los barridos de deformación realizados a 90 °C (cocción) y 25 °C (enfriamiento posterior a la cocción) del módulo elástico G' y del módulo viscoso G'' de las dispersiones acuosas de almidón de malanga modificadas por ultrasonido, se observó que a un porcentaje de deformación mayor a 1.0 % la red tiende a destruirse (datos no reportados), es decir, por debajo de ese valor se mantiene la región viscoelástica lineal, por lo que se consideró 0.5% de deformación para realizar los barridos de frecuencia. En la **Figura 7.6** se presentan los barridos de

frecuencia del módulo elástico G' y del módulo viscoso G'' de las dispersiones acuosas de almidón de malanga modificado por ultrasonido, sometidas a cocción (90 °C), seguido de un enfriamiento a 25 °C.

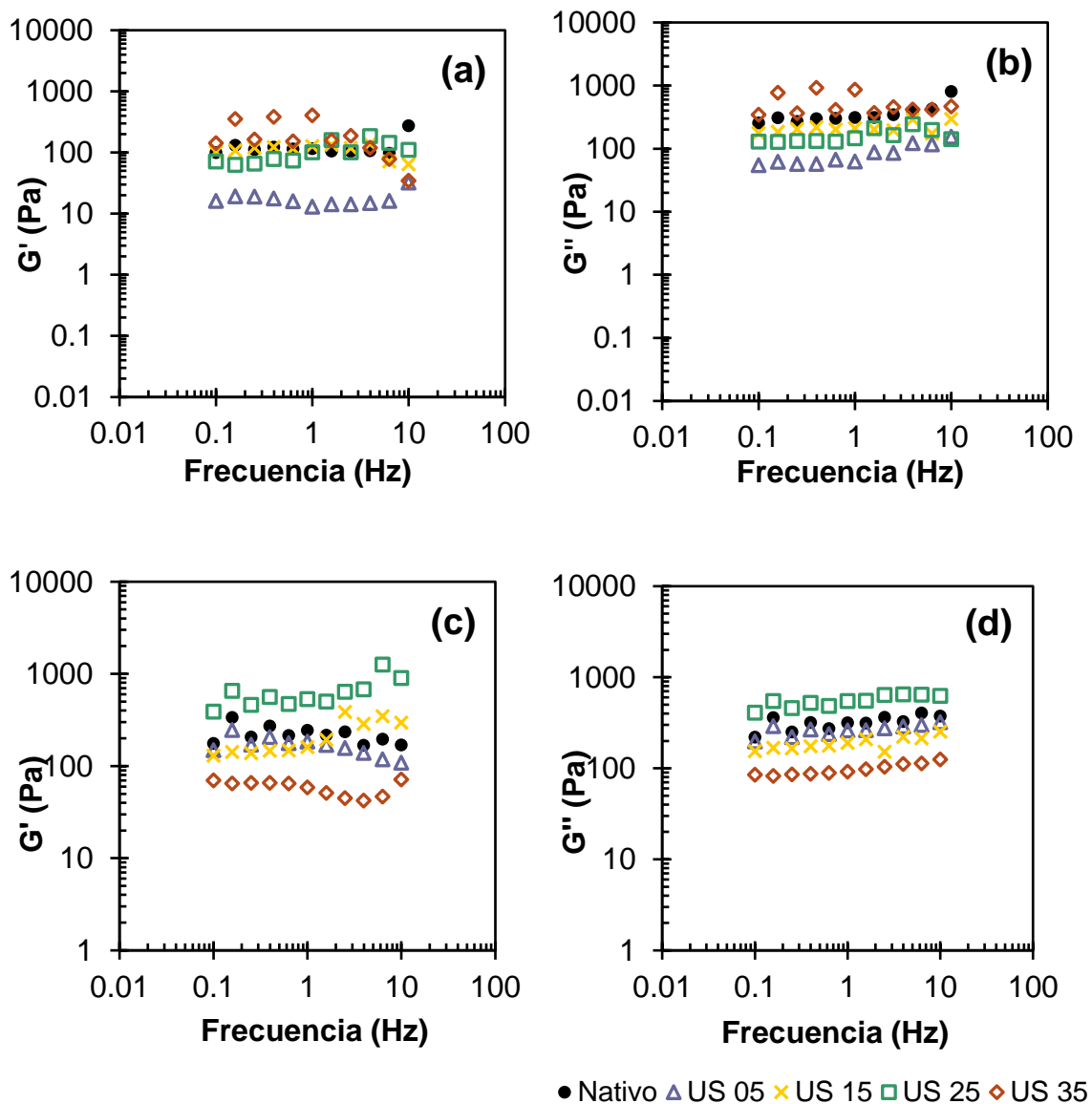


Figura 7.6 Barridos de frecuencia de dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) modificado a diferentes tiempos de sonicación, sometidas a cocción a 90 °C [G' , (a); G'' , (b)], y enfriamiento a 25 °C posterior a la cocción [G' , (c); G'' , (d)].

Los resultados obtenidos demostraron que el almidón de malanga presenta un comportamiento viscoso debido a que el módulo G'' presentó valores ligeramente más altos en comparación con G' , sin

embargo, la diferencia de estos valores no es tan significativa como lo reportado por Xiao *et al.*, (2021); además, los resultados de las muestras entre sí, para G' y G'' respectivamente, tampoco presentaron diferencias significativas, lo cual puede ser debido a que, durante esta etapa, la cocción es tan extensa que los almidones alcanzaron su máxima desorganización, dando como resultado una resistencia similar (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2006).

Por otro lado, durante la etapa de cocción a 90°C (**Figura 7.6 a y b**), se aprecia una disminución en los valores de ambos módulos para las muestras de almidón modificado, a diferencia del nativo, lo cual concuerda con lo reportado por Paramo-Calderón *et al.*, (2023), quienes también mencionan que este comportamiento puede deberse al tamaño y forma de los gránulos dañados ya que esto afecta al hinchamiento de los gránulos de almidón reduciendo la rigidez del sistema.

En la fase de enfriamiento (**Figura 7.6 c y d**), se observa un incremento en los valores de ambos módulos en comparación con los barridos de frecuencia de la etapa previa (cocción). Este aumento se debe a que, durante el calentamiento, las moléculas de amilosa se dispersan en el agua, formando una red que, al enfriarse se cristaliza, generando un gel con una estructura más sólida y resistente (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2006).

En la **Figura 7.7 a y b**, se muestran los resultados de $\text{Tan } \delta (G''/G')$ a 90 y 25°C para el almidón nativo y modificado de malanga. Todas las muestras presentaron valores de $\text{Tan } \delta$ mayores a 1 durante la etapa de cocción, lo que indica que los geles de almidón presentan un comportamiento viscoso, sin embargo, en los almidones modificados se observa una disminución de estos valores en comparación con el almidón nativo, lo que indica la exposición prolongada a ultrasonidos si afecta las propiedades estructurales del almidón. Estos resultados concuerdan con lo reportado para almidones de maíz, papa y guisantes (Xiao *et al.*, 2021) y para el almidón de arroz (Vela *et al.*, 2023).

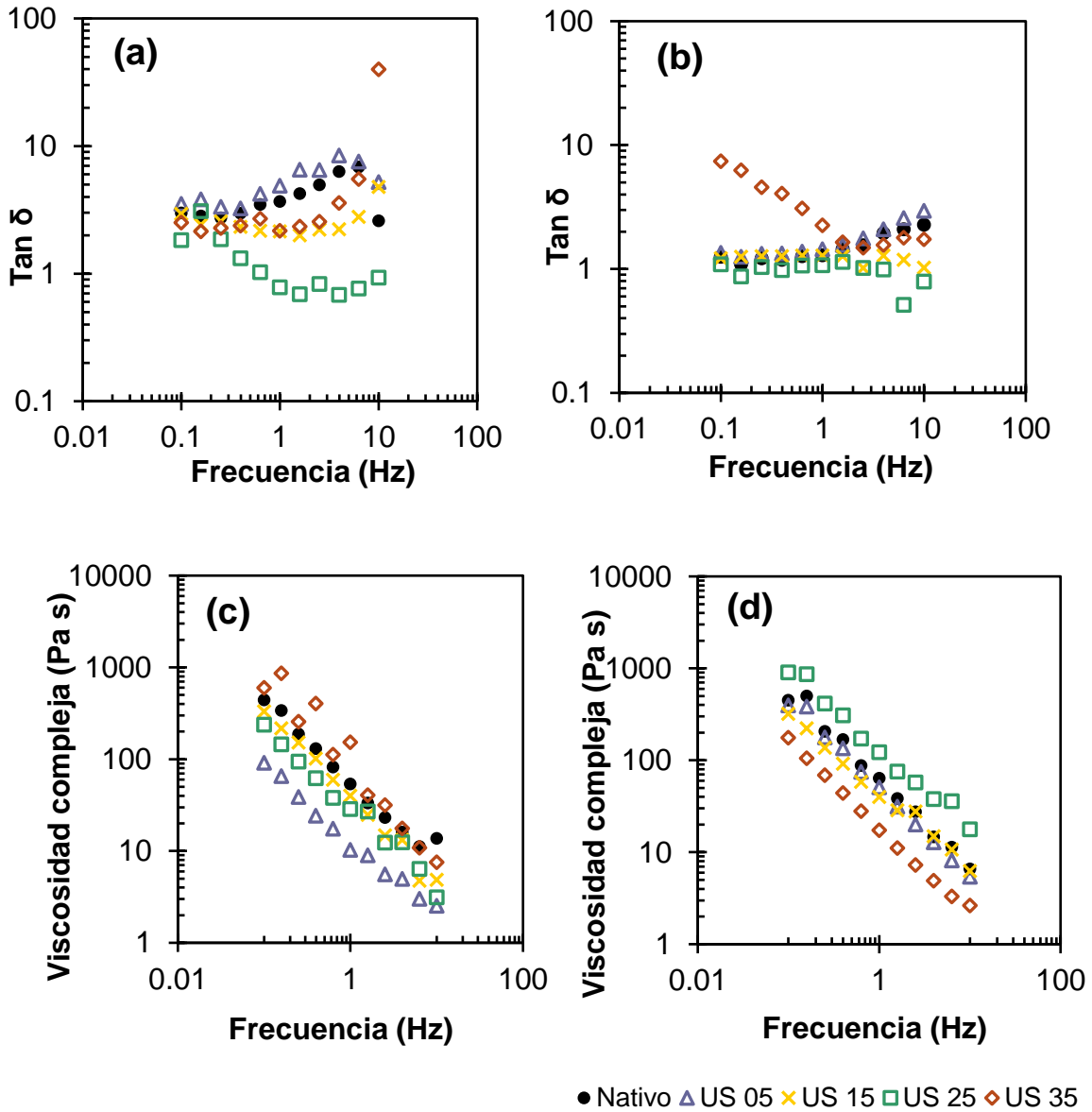


Figura 7.7 Dispersiones acuosas de almidón de malanga (10 % m/v) modificado a diferentes tiempos de sonicación, sometidas a tratamientos de cocción-enfriamiento (90 °C - 25 °): Tan δ a 90 °C (a) y 25 °C (b), y viscosidad compleja a 90 °C (c) y 25 °C (d)

Un comportamiento similar se presenta durante la etapa de enfriamiento a 25°C (**Figura 7.7b**); todos los almidones mostraron valores de Tan δ mayor a 1, pero en comparación con la etapa pasada los valores disminuyeron ligeramente, lo que indica que el almidón exhibe un comportamiento menos

viscoso. Se observa que el valor más alto de $\text{Tan } \delta$, se obtuvo en la muestra sometida a mayor tiempo de modificación.

La viscosidad compleja del almidón de malanga nativo y modificado durante la etapa de calentamiento a 90°C se observa en la **Figura 7.7c**. Estos resultados demuestran que los almidones modificados presentaron valores iguales o menores a su contraparte nativa.

Durante la etapa de enfriamiento la actividad del almidón modificado fue diferente a la actividad durante la etapa de cocción, debido a que la viscosidad compleja disminuyó a tiempos de modificación mayores.

7.5 Encapsulación de ácido ascórbico con almidón de malanga modificado por ultrasonido

Posterior a la caracterización de los materiales modificados por ultrasonido se procedió a encapsular ácido ascórbico con cada uno de ellos, evaluando actividad de agua, distribución de tamaño de partícula, rendimiento y eficiencia de encapsulación. A continuación, se discuten los resultados obtenidos.

7.5.1 Actividad de agua de las partículas obtenidas

La actividad de agua (a_w) juega un papel crucial para entender mejor las propiedades de las microcápsulas y la estabilidad de las micropartículas secadas por aspersión; debido a que es un parámetro que puede afectar de manera significativa en la vida útil de las microcápsulas, dado que valores bajos de a_w favorecen una mayor estabilidad microbiológica y previenen la aglomeración de partículas (Alfaro-Galarza *et al.*, 2020 y Nizori *et al.*, 2020).

En la **Tabla 7.3**, se muestran los resultados del análisis de la a_w de los agregados esféricos de almidón de malanga. Se observa que entre las microcápsulas obtenidas no hay diferencias significativas ($p > 0.05$), presentando valores 0.42 a 0.50. Hoyos-Leyva *et al.*, (2018), reportaron un valor de a_w de

0.35 para agregados esféricos de almidón de malanga nativo y que también encapsulaban ácido ascórbico. Ese valor resulta ser menor en comparación a los valores obtenidos en este estudio, sin embargo, los resultados indican que el proceso de secado por aspersion fue eficaz dado que, mientras los valores de aw se mantengan por debajo de 0.6 los factores químicos, físicos y microbiológicos tendrán menor efecto sobre las cápsulas (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018). Las diferencias observadas con otros reportes podrían estar relacionadas a las condiciones de proceso y a las propiedades psicrométricas del aire utilizado como agente de secado.

Tabla 7.3. Actividad de agua (aw) de las microcápsulas (Cap) obtenidas mediante secado por aspersion, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).

Muestra	aw*
Cap-AN	0.50 ± 0.06 ^a
Cap-05	0.43 ± 0.00 ^a
Cap-15	0.43 ± 0.05 ^a
Cap-25	0.45 ± 0.01 ^a
Cap-35	0.42 ± 0.02 ^a

* Los valores corresponden a la media de dos repeticiones ± desviación estándar. Los valores que no comparten letra presentan diferencia significativa ($p < 0.05$).

7.5.2 Distribución de tamaño de las partículas obtenidas

La distribución del tamaño de partícula de los agregados esféricos de almidón de malanga nativo y modificados se presentan en la **Figura 7.8**, donde se aprecia un comportamiento granulométrico bimodal y uniforme en todas las muestras, lo cual se atribuye al atomizador del secador por aspersion, dado que su función es producir un tamaño uniforme (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018).

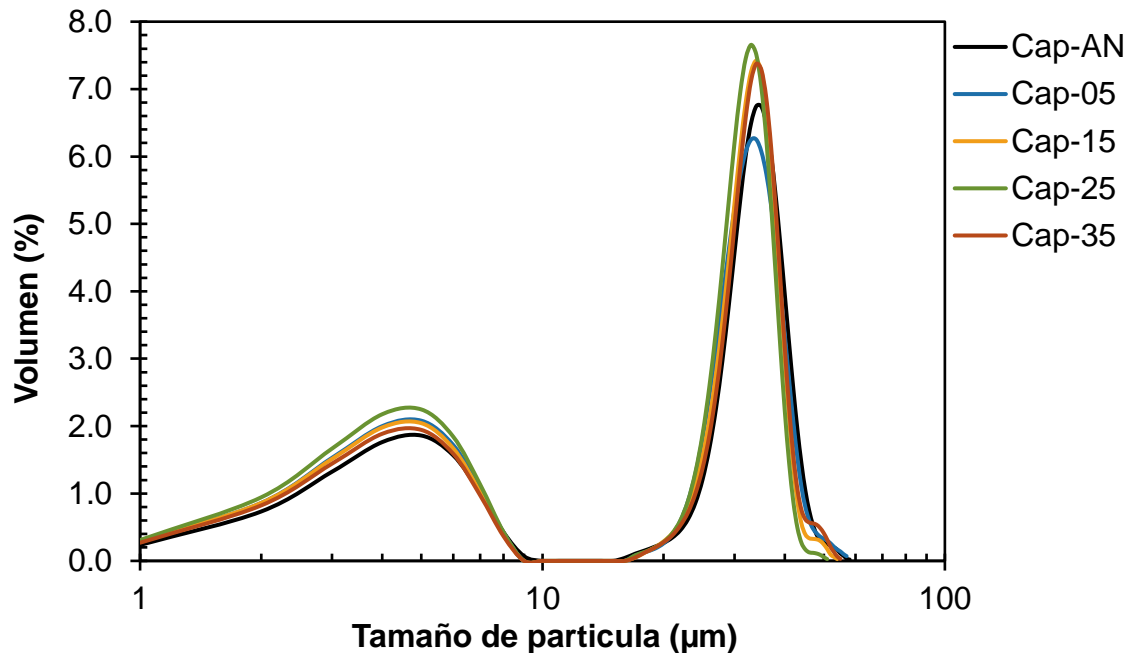


Figura 7.8 Distribución del tamaño de las microcápsulas (Cap) obtenidas mediante secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).

Dado que se utilizaron las mismas condiciones de secado por aspersión, se asume que la modificación del material no tuvo un impacto significativo sobre el tamaño final de las partículas obtenidas. Como se observa en la Figura 7.8, el grupo principal de partículas está alrededor de 35 µm, y el grupo secundario se encuentra cerca de 5 µm; valores que son menores a los obtenidos en los materiales previo al secado por aspersión. Se reporta que el secado por aspersión es una estrategia de micronización, es decir, se utiliza para disminuir el tamaño de partículas, e incluso para homogenizar los tamaños.

Durante el proceso de encapsulación de compuestos, dentro de agregados esféricos de almidón, la variación en el tamaño de partícula es un factor importante a considerar. Debido a que las disparidades pueden incidir en la estabilidad de la microcápsula, la capacidad de retención del material del núcleo y

su liberación controlada (Hoyos-Leyva et al., 2018). Por lo tanto, se recomienda evaluar la tasa de liberación del ácido ascórbico encapsulado en esta matriz.

Además, se recomienda realizar micrografías por microscopía de barrido electrónico con la finalidad de verificar la formación de agregados esféricos, y la prevalencia de poros en dicha estructura, cuya presencia llevaría a la inestabilidad del material encapsulado durante su almacenamiento.

7.5.3 Rendimiento de proceso

De acuerdo con Tontul y Topuz, (2017), la eficiencia del proceso es un factor crucial en las industrias, ya que un rendimiento más alto se traduce en mayores beneficios. En la **Tabla 7.4** se muestran los rendimientos del proceso obtenidos durante la encapsulación por secado por aspersión del ácido ascórbico con almidón de malanga nativo, y modificado por ultrasonidos. Los resultados demuestran que la modificación por ultrasonidos si mejoró las propiedades encapsulantes del almidón de malanga, pues se muestran mayores rendimientos que en su contraparte nativa.

Tabla 7.4. Rendimiento de proceso de secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).

Muestra	Rendimientos*
Cap-AN	10.65 ± 3.46 ^b
Cap-05	23.54 ± 4.35 ^a
Cap-15	31.07 ± 2.51 ^a
Cap-25	22.86 ± 0.51 ^a
Cap-35	30.55 ± 0.31 ^a

*Los valores corresponden a la media de dos repeticiones ± desviación estándar. Los valores que no comparten letra presentan diferencia significativa ($p < 0.05$).

Esta mejora en el rendimiento puede estar asociada a la disminución de proteína en el gránulo de almidón, como se comentó en la caracterización química proximal de los materiales utilizados como formadores de pared (**Tabla 7.2**). Se ha reportado que el uso de proteínas favorece el rendimiento del secado por aspersión, sin embargo, existe un límite técnico que dependerá de la complejidad de la mezcla. Una vez superado dicho límite se presentan obstrucciones en la tobera y precipitaciones en el tanque de alimentación que comprometen el rendimiento del proceso (Tontul y Topuz, 2017, Vázquez-León et al., 2022).

Sin embargo, los rendimientos obtenidos en todas las muestras no son viables, puesto que un proceso de secado por aspersión debe alcanzar un rendimiento superior al 50% para ser considerado eficaz (Tontul y Topuz, 2017). Como se ha mencionado, la existencia de una fracción proteica significativa puede causar la formación de floculación, lo que dificulta no solo el funcionamiento de la boquilla, sino también la estructura y formación de los agregados esféricos (Vázquez-León *et al.*, 2022), esto permitiría la exposición del compuesto de bajo peso molecular (en este caso ácido ascórbico) al entorno caliente y con ello a la adherencia de este a las paredes del secador debido a su baja temperatura de transición vítrea (Vázquez-León et al., 2020).

Además, como se demostró en la caracterización de los materiales, la temperatura de transición vítrea de dichos materiales está alrededor de 68 °C, y el secador se utilizó a 70 °C como temperatura de salida. Por lo tanto, se recomienda utilizar una temperatura de salida no mayor a 60 °C y evaluar el rendimiento del proceso. Es importante considerar también una disminución en la temperatura de salida, puesto que mantenerla a 140 °C como en la presente propuesta obligaría a aumentar el flujo de alimentación, y entonces las pérdidas de producto estarían asociadas a una sobrecarga de masa por evaporar (Vázquez-León et al., 2020).

Además de evaluar otras condiciones de proceso, otra estrategia para aumentar el rendimiento del proceso sería mezclar los materiales con reguladores de flujo o acarreadores comerciales (Vázquez-León *et al.*, 2022).

7.5.4 Eficiencia de encapsulación

Los valores de la eficiencia de encapsulación del ácido ascórbico (AA) con almidón de malanga se muestran en la **Tabla 7.5**. Se puede observar que la eficiencia alcanzada con el almidón nativo (CAP-AN) es mayor a lo reportado por Vázquez-León *et al.*, (2022) quienes también encapsularon AA pero usando almidón de frijol negro (36.88%); además, el valor es similar al obtenido por Hoyos-Leyva *et al.*, (2019), quienes si usaron el almidón de malanga pero encapsularon una concentración al 10% de aceite de almendras (37.5%).

Tabla 7.5. Eficiencia de encapsulación de ácido mediante secado por aspersión, utilizando almidón de malanga nativo (AN) y almidones de malanga modificados a diferentes tiempos de exposición a ultrasonido (05, 15, 15 y 35 min).

Muestra	Eficiencia de encapsulación*
Cap-AN	38.62 ± 0.62 ^b
Cap-05	37.86 ± 1.52 ^b
Cap-15	40.95 ± 0.03 ^b
Cap-25	48.12 ± 0.79 ^a
Cap-35	50.78 ± 0.21 ^a

* Los valores corresponden a la media de dos repeticiones ± desviación estándar. Los valores que no comparten letra presentan diferencia significativa ($p < 0.05$).

Los resultados también demostraron que la aplicación de ultrasonidos sobre el almidón de malanga si logró un aumento en la eficiencia de encapsulación. Siendo las muestras sometidas a 25 y 35 min de sonicación las que presentaron mayores eficiencias de encapsulación (48.12-50.78%). Esto podría

sugerir que los poros formados en los agregados esféricos si redujeron en tamaño debido a la ruptura de los gránulos. Se recomienda verificar esto mediante microscopía de barrido electrónico.

Sin embargo, los valores son relativamente bajos y puede deberse a que la estructura de los agregados esféricos que forma el almidón de malanga todavía conserva poros, ya que los poros con un tamaño considerablemente grande no limitan el paso de los compuestos bioactivos a través de las microcápsulas (Hoyos-Leyva *et al.*, 2018). Una estrategia prometedora sería utilizar adicionalmente almidón pregelatinizado para sellar los poros presentes, o mezclar el material con maltodextrina, que ha demostrado formar cápsulas bien definidas.

Conclusiones

La caracterización del almidón nativo de malanga demostró que este almidón puede ser idóneo para diversas aplicaciones alimentarias e industriales, incluyendo su uso como material de pared para la encapsulación de compuestos bioactivos. Además, el perfil de viscosidad demostró que puede ser utilizado en tratamientos donde la temperatura sea hasta de 85°C y no se requiera la gelatinización del almidón.

El tratamiento de ultrasonido bajo los parámetros evaluados no alteró los patrones de difracción ni los niveles de cristalinidad, así como tampoco se generaron cambios en la temperatura de transición vítrea. No obstante, la exposición prolongada a las ondas de ultrasonido demostró una reducción notable del tamaño de partícula, el contenido proteico y la viscosidad. Esta última propiedad es importante durante la producción de partículas, ya que una viscosidad elevada puede complicar el proceso de secado por aspersión.

Esto quiere decir que los gránulos de almidón si sufrieron una ruptura, mejorando así sus propiedades como material de pared, lo cual se demostró con el aumento significativo en el rendimiento del proceso y en la eficiencia de encapsulación dado que, al disminuir el tamaño del gránulo (debido a la ruptura), durante la formación de agregados esféricos también se disminuyó el tamaño de los poros.

Finalmente, se concluye que la modificación por ultrasonido si generó cambios en el almidón de malanga reduciendo el tamaño de los gránulos y por ende mejorando sus propiedades encapsulantes.

Perspectivas

Los trabajos por realizar son la microscopia electrónica de barrido (MEB) para el almidón nativo, el modificado y para las microcápsulas obtenidas del proceso de secado por aspersión para evaluar cómo cambia la estructura del almidón al ser modificado y para ver la formación de las cápsulas formadas; así como también se deberá realizar el perfil de viscosidad, la viscoelasticidad y curva de flujo para las microcápsulas, con la finalidad de ver si el proceso de secado por aspersión no modificó las propiedades de dichas cápsulas, que finalmente se utilizarán como aditivos en el desarrollo de alimentos funcionales.

REFERENCIAS

AACC. (2000). Approved Methods of Analysis (10th ed.). St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists International

Alfaro-Galarza, O., López-Villegas, E. O., Rivero-Pérez, N., Tapia-Maruri, D., Jiménez-Aparicio, A. R., Palma-Rodríguez, H. M., y Vargas-Torres, A. (2020). Protective effects of the use of taro and rice starch as wall material on the viability of encapsulated *Lactobacillus paracasei* subsp. *Paracasei*. LWT, 117, 108686. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108686>

Andrade, L. A., Barbosa, N. A., y Pereira, J. (2017). Extraction and properties of starches from the non-traditional vegetables Yam and Taro. *Polimeros-ciencia E Tecnologia*, 27(2), 151-157. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.04216>

Antonio-Estrada, C., Bello-Pérez, L. A., Martínez-Sánchez, C. E., Montañez-Soto, J. L., Jiménez-Hernández, J. y Vivar-Vera, M. A. (2009) Producción enzimática de maltodextrinas a partir de almidón de malanga (*Colocasia.esculenta*) Enzymatic production of maltodextrins from taro (*Colocasia esculenta*) starch, *CyTA - Journal of Food*, 7:3, 233-241, DOI: 10.1080/19476330903091300

Aparicio-Saguilán, A., Méndez-Montealvo, G., Solorza-Feria, J., y Bello-Pérez, L. A. (2006). Thermal and viscoelastic properties of starch gels from maize varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(7), 1078–1086. doi:10.1002/jsfa.2461

Aparicio-Saguilán, A., Vázquez-León, L. A., Martínez-Cigarroa, A. S., Carpintero-Tepole, V., Barbero, G. F., Acosta-Osorio, A., y Páramo-Calderón, D. E. (2024). Characterization of Starch from Jinicuil (*Inga jinicuil*) Seeds and Its Evaluation as Wall Material in Spray Drying. *Agronomy (Basel)*, 14(2), 272. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020272>

Bello Pérez, L.A., González Soto, R.A., Sánchez Rivero, M.M., Gutiérrez Meraz, F. y Vargas Torres, A. (2006). Extrusión de almidones de fuentes no convencionales para la producción de almidón resistente. *Agrociencia*, 40 (4),441-448. [fecha de Consulta 3 de abril de 2022]. ISSN: 1405-3195. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30240403>

BeMiller, J.N. (1993). Starch-based gums. In R.L. Whistler y J.N. BeMiller (Eds.), *Industrial gums* (pp. 579–600). USA: Academic Press

Betancur, AD y Chel, GL (1997). Hidrólisis ácida y caracterización del almidón de *Canavalia ensiformis*. *Revista de química agrícola y alimentaria*, 45 (11), 4237-4241. DOI: 10.1021/jf970388q.

Bernal Bustos, C. R., Guarnizo Sánchez, J. P., Guevara, A., Suarez, D., Lozano, N., y Castillo, S. (2017). Propiedades, modificaciones y usos de los almidones, con miras a la obtención de Películas biodegradables. artículo de revisión. *Revista de Investigación*, 10(2), 135–152.

Bertoft, E. (2018). Análisis de la estructura molecular del almidón. *Almidón en los alimentos*, 97–149. doi:10.1016/b978-0-08-100868-3.00002-0

Brignone, S. G., Ravetti, S., y Palma, S. D. (2020). Microencapsulación/ recubrimiento de sistemas particulados de uso farmacéutico. *Pharmaceutical Technology Sudamérica*, 165, 34-43.

Boufi, S., Haaj, S. B., Magnin, A., Pignon, F., Impéror-Clerc, M., y Mortha, G. (2018). Ultrasonic assisted production of starch nanoparticles: Structural characterization and mechanism of disintegration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.033>

Büchi. (2002). *Training Papers Spray Drying*. Order code 97758.

Campo-Vera, Y., Gélvez-Ordoñez, V. M., y Ayala-Aponte, A. (2018). Ultrasonido en el procesamiento (homogenización, extracción y secado) de alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1), 1. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.628>

Carmona-García, R., Bello-Pérez, L. A., Aguirre-Cruz, A., Aparicio-Saguilán, A., Hernández-Torres, J., y Álvarez-Ramírez, J. (2016). Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with different granule size. *Stärke/Starch*, 68(9-10), 972-979. <https://doi.org/10.1002/star.201600019>

Chávez-Salazar, A., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Castellanos-Galeano, F. J., Álvarez-Barreto, C. I., y Pacheco-Vargas, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 240–246. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.024.

Cornejo-Ramírez, Y. I., Martínez-Cruz, O., Toro-Sánchez, C.L., Wong-Corral, F.J., Borboa-Flores, J. y Cinco-Moroyoqui, F.J. (2018) The structural characteristics of starches and their functional properties, *CyTA - Journal of Food*, 16:1, 1003-1017, DOI: 10.1080/19476337.2018.1518343

Cui, R., y Zhu, F. (2020). Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications. *Trends in Food Science & Technology*. [doi:10.1016/j.tifs.2020.11.018](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.018)

Dendy, D. A. 2001. Composite and alternative flours. In *Cereal Products*. Eds. Dendy D.A. y Dobraszczyk B.J. Aspen Publisher Inc. Pp. 263-275.

Dyvelkov, K. y Sloth, J. (2014). Nuevos avances en procesos de secado por atomización. *Microencapsulación en la Industria Alimentaria*, 57–63. [doi:10.1016/b978-0-12-404568-2.00006-6](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404568-2.00006-6)

Falsafi, S. R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M. M., Hamed, H., y Hosseini, S. M. H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. *Food Hydrocolloids*, 89, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046>

Fang, Z., y Bhandari, B. (2012). Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation. En *Elsevier eBooks* (pp. 73-109). <https://doi.org/10.1533/9780857095909.2.73>

FAO. 2024. FAOSTAT: Producción: Productos agrícolas y ganaderos. Consultado el 28 de abril de 2024. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

Flores-Gorosquera E., García-Suárez F.J., Flores-Huicochea E., Núñez-Santiago M.C, González-Soto R.A y Bello-Pérez L.A. (2004). Rendimiento del proceso de extracción de almidón de frutos de plátano (*Musa paradisiaca* L.). Estudio en planta piloto. *Acta Científica Venezolana*. 55(1), 86-90

Guo, Y., Qiao, D., Zhao, S., Zhang, B., y Xie, F. (2021). Starch-based materials encapsulating food ingredients: Recent advances in fabrication methods and applications. *Carbohydrate Polymers*, 270, 118358. doi:10.1016/j.carbpol.2021.118358

Haaj, S. B., Magnin, A., Pétrier, C., y Boufi, S. (2013). Starch nanoparticles formation via high power ultrasonication. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1625-1632. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.022>

Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., y Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28(3), 718–726. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>

Hoover, R., y Ratnayake, W. S. (2002). Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. *Food Chemistry*, 78(4), 489–498. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00163-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00163-2).

Hoyos-Leyva, J., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., y Alvarez-Ramirez, J. (2018). Potential of taro starch spherical aggregates as wall material for spray drying microencapsulation: Functional, physical and thermal properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 237–244. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.08.093

Hoyos-Leyva, J. D., Chávez-Salazar, A., Galeano, F. J. C., Bello-Pérez, L. A., y Alvarez-Ramírez, J. (2018). Physical and chemical stability of l-ascorbic acid microencapsulated into taro starch spherical aggregates by spray drying. *Food Hydrocolloids*, 83, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.002>

Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, J., Álvarez-Ramírez, J., y Jaramillo-Echeverry, L. (2019). Characterization of spray drying microencapsulation of almond oil into taro starch spherical aggregates. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*, 101, 526-533. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.079>

Jacobs, I. C. (2014). Atomization and Spray-Drying Processes. En Elsevier eBooks (pp. 47-56). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404568-2.00005-4>

Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J. A., y Ramos-Ramírez, E. G. (2007). Physical, chemical and microscopic characterization of a new starch from chayote (*Sechium edule*) tuber and its comparison with potato and maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 68(4), 679–686. doi:10.1016/j.carbpol.2006.07.035

Jin, Y., Li, JZ y Malaki Nik, A. (2018). Microencapsulación a base de almidón. *Almidón en Alimentos*, 661–690. doi:10.1016/b978-0-08-100868-3.00017-2

Martínez-Cigarroa A. S. (En curso). Desarrollo y caracterización de un agente encapsulante a partir de almidón de malanga mediante modificación dual para mantener la bioactividad de los extractos etanólicos de *Moringa oleifera* secados por aspersión. Tesis de Doctorado. Doctorado en Ciencias en Alimentos. Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos (UNIDA), Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México.

Martínez-Alvarado, C. O., Muñozcano- Ruiz, M., y Santoyo-Juárez, J. A. (2012). Paquete tecnológico para el establecimiento de malanga. Recuperado de: <https://www.fps.org.mx/portal/index.php/publicaciones/106-otros/1237-paquete-tecnologico-para-el-establecimiento-de-malanga>

Martins, A., Beninca, C., Bet, C. D., Bisinella, R. Z. B., de Oliveira, C. S., Hornung, P. S., y Schnitzler, E. (2020). Ultrasonic modification of purple taro starch (*Colocasia esculenta* B. Tini): structural, psychochemical and thermal properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. doi:10.1007/s10973-020-09298-3

Mazariegos-Sánchez, A., Águila-González, J. M., Milla-Sánchez, A. I., Espinosa-Zaragoza, S., Martínez-Chávez, J., y López-Sánchez, C. (2017). CULTIVO DE MALANGA (*Colocasia esculenta* Schott) EN TUXTLA CHICO, CHIAPAS, MÉXICO. *Agroproductividad*, 10(3), 75–80.

McDonagh, P. (2012). Native, modified and clean label starches in foods and beverages. *Natural Food Additives, Ingredients and Flavourings*, 162–174. doi:10.1533/9780857095725.1.162

Monroy, Y., Rivero, S. y García, M. (2018). Microstructural and techno-functional properties of cassava starch modified by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 795–804. doi:10.1016/j.ultsonch.2017.12.048

Nagar, C. K., Dash, S. K., Rayuguru, K., Pal, U.S. (2021). Isolation, characterization, modification and uses of taro starch: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 574-589.

Nizori, A., Bui, L., Jie, F., y Small, D. M. (2020). Spray-drying microencapsulation of ascorbic acid: impact of varying loading content on physicochemical properties of microencapsulated powders. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4165-4171. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10455>

Páramo-Calderón, D. E., Vázquez-León, L. A., Palma-Rodríguez, H. M., Utrilla-Coello, R. G., Vargas-Torres, A., Meza-Nieto, M. A., Romero-Cortés, T., y Aparicio-Saguilán, A. (2023). Effect of high-energy mechanical milling on the physicochemical and rheological properties of chayotextle (*Sechium edule* Sw.) starch. *Food Chemistry*, 427, 136720. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136720>

Paredes-López, O., Bello-Pérez, L. A., y López, M. G. (1994). Amylopectin: Structural, gelatinisation and retrogradation studies. *Food Chemistry*, 50(4), 411–417. doi:10.1016/0308-8146(94)90215-1.

Pérez-Pacheco, E., Moo-Huchin, V. M., Estrada-León, R. J., Ortiz-Fernández, A., May-Hernández, L. H., Ríos-Soberanis, C. R., y Betancur-Ancona, D. (2014). Isolation and characterization of starch obtained from *Brosimum alicastrum* Swarts Seeds. *Carbohydrate Polymers*, 101, 920–927. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.10.012.

Ramos-García, M. L. (2018). Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas frescas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(1). <https://www.redalyc.org/journal/813/81355612003/html/>

Rincón-Londoño, N., Vega-Rojas, L. J., Contreras-Padilla, M., Acosta-Osorio, A. A., y Rodríguez-García, M. E. (2016). Analysis of the pasting profile in corn starch: Structural, morphological, and thermal transformations, Part I. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 106–114. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.05.070

Ríos-Romero, E. A., Ochoa-Martínez, L. A., y Morales-Castro, J. (2016). Efecto del tratamiento con ultrasonido sobre las propiedades funcionales y estructurales de almidón procedente de diversas fuentes: una revisión. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 18(2), 16–23.

Rodríguez-Miranda, J., Rivadeneyra-Rodríguez, J. M., Ramírez-Rivera, E. J., Juárez-Barrientos, J. M., Herrera-Torres, E., Navarro-Cortez, R. O., y Hernández-Santos, B. (2011). Caracterización fisicoquímica, funcional y contenido fenólico de harina de malanga (*Colocasia esculenta*) cultivada en la región de Tuxtepec, Oaxaca, México. *Ciencia y Mar*, 15(43), 37–47.

Ruiz-Ruiz V. R. (en curso). Elaboración y caracterización de películas de Almidón/Hule/Acrílico. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Ciencias Químicas. Universidad del Papaloapan (UNPA). Oaxaca, México.

Schmiele, M., Sampaio, U. M., Gomes, P. T. G., y Clerici, M. T. P. S. (2019). Modificaciones físicas del almidón. *Aplicación de almidones para alimentos*, 223–269. doi:10.1016/b978-0-12-809440-2.00006-x

Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X. y Chen, W. (2018). Avances en micro y nanoencapsulación de compuestos bioactivos utilizando biopolímeros y transportadores a base de lípidos. *Tendencias en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 78, 34 – 60. doi: 10.1016 / j.tifs.2018.05.018

SIAP. 2024. Cierre de la producción agrícola. Consultado el 28 de abril de 2024. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Sobel, R., Versic, R. y Gaonkar, A. G. (2014). Introducción a la Microencapsulación y Entrega Controlada en Alimentos. *Microencapsulación en la industria alimentaria*, 3–12. doi:10.1016/b978-0-12-404568-2.00001-7

Tadini, C. (2017). Bio-Based Materials from Traditional and Nonconventional Native and Modified Starches. *Starch-Based Materials in Food Packaging*, 19–36. doi:10.1016/b978-0-12-809439-6.00002-9

Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: manufacture and applications. *Starch in Food*, 363–392. doi:10.1533/9781855739093.3.363

Tattiyakul, J., Pradipasena, P., y Asavasaksakul, S. (2007). Taro *Colocasia esculenta* (L.) Schott Amylopectin Structure and Its Effect on Starch Functional Properties. *Starch - Stärke*, 59(7), 342–347. doi:10.1002/star.200700620

Thomaz, L., Ito, V. C., Malucelli, L. C., Da Silva Carvalho Filho, M. A., Demiate, I. M., Bet, C. D., Marinho, M. T., Schnitzler, E., y Lacerda, L. G. (2019). Effects of dual modification on thermal, structural and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta* L.) starch. *Journal of Thermal Analysis And Calorimetry*, 139(5), 3123-3132. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08728-1>

Tontul, Í., y Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends In Food Science & Technology*, 63, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>

Torres Becerril, M., Carmona García, R., y Aguirre Cruz, A. (2015). Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(4), 905-912.

Torres Rapelo, A., Montero Castillo, P. y Duran Lengua, M. (2013). Propiedades fisicoquímicas, morfológicas y funcionales del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*). Revista Lasallista de Investigación, 10(2),52-61[fecha de Consulta 5 de abril de 2022]. ISSN: 1794-4449. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69529816007>

Vázquez-León, L. A., Aparicio-Saguilán, A., Martínez-Medinilla, R. M., Utrilla-Coello, R. G., Torruco-Uco, J. G., Carpintero-Tepole, V., y Páramo-Calderón, D. E. (2021). Physicochemical and morphological characterization of black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) starch and potential application in nano-encapsulation by spray drying. Journal of Food Measurement and Characterization, 16(1), 547-560. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01181-5>

Vela, A. J., Villanueva, M., y Ronda, F. (2023). Physical modification caused by acoustic cavitation improves rice flour bread-making performance. Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology, 183, 114950. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114950>

Xiao, Y., Wu, X., Zhang, B., Luo, F., Lin, Q., y Ding, Y. (2021). Understanding the aggregation structure, digestive and rheological properties of corn, potato, and pea starches modified by ultrasonic frequency. International Journal of Biological Macromolecules, 189, 1008-1019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.163>