



Microencapsulación de aceite de Sacha Inchi por secado por aspersión: variables del proceso y aplicaciones en alimentos funcionales con omega 3.

Trabajo de grado para optar por el título de especialista en alimentación y nutrición.

Jairo Antonio Chamorro Caicedo.

Asesor

Dubán Ovidio González Álvarez

Ingeniero de alimentos, MSc.

Unilasallista Corporación Universitaria
Facultad de Ingenierías
Especialización en Alimentación y Nutrición
Caldas, Antioquia
2025

Resumen

El aceite de Sancha Inchi destaca como fuente potencial de ácidos grasos omega-3 los cuales son muy susceptibles a la oxidación y tienen un gran valor nutricional debido a que previenen enfermedades cardiovasculares, diabetes, cáncer, depresión y trastornos neurológicos, sin embargo, su elevada oxidación limita su aplicación directa en alimentos. La microencapsulación mediante el secado por aspersión protege los lípidos de la degradación, mejora la estabilidad durante el almacenamiento y permite su incorporación en diversos productos alimenticios sin afectar las propiedades sensoriales. Este trabajo identificó factores críticos para optimizar el proceso de encapsulación, tales como los materiales de pared, surfactantes, antioxidantes, variables de emulsificación y las condiciones de operación del equipo secador. Además, se exploraron aplicaciones en productos como yogur, hamburguesas, bebidas funcionales y muffins. Se tuvieron en cuenta las variables eficiencia de microencapsulación, rendimiento, biodisponibilidad del omega 3, morfología, humedad y estabilidad. Esta técnica permite utilizar diversos materiales de pared que se pueden combinar y optimizar mediante surfactantes, antioxidantes y tecnologías como el ultrasonido, según el producto deseado. Por ejemplo, se identificó que el almidón modificado combinado con maltodextrina o alginato de sodio alcanza eficiencias superiores al 95%, con baja humedad (<6%) y morfología esférica uniforme (~2.4 μm), ideal para liberación controlada. La maltodextrina, al mezclarse con proteínas o goma arábica, logra hasta un 93% de eficiencia y mejora su estabilidad oxidativa con antioxidantes, mientras que la goma arábica por sí sola presenta rendimientos del 80-94%. Alternativas como HI-CAP® alcanzan una eficiencia máxima (97%), y el alginato de sodio destaca por favorecer la liberación intestinal. En cuanto a las variables de operación, las temperaturas de los flujos (entrada: 130-180°C; salida: 70-130°C) y los parámetros de emulsión influyen directamente en las propiedades del polvo. Características como baja humedad (<4.32%), porosidad controlada y menor tamaño de partícula mejoran la estabilidad y biodisponibilidad, mientras que la densidad e higroscopicidad afectan el envasado y la calidad final.

Palabras clave: Emulsión, microencapsulación, secado por aspersión, estabilidad oxidativa, omega 3.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 2 |
| Índice de tablas | 4 |
| Introducción..... | 6 |
| Planteamiento del problema..... | 8 |
| Justificación..... | 10 |
| Objetivo general..... | 12 |
| Objetivos específicos..... | 12 |
| Marco teórico..... | 13 |
| Saha Inchi..... | 13 |
| Omega 3..... | 16 |
| Beneficios para la salud..... | 17 |
| Metabolismo del omega-3ALA..... | 18 |
| Proceso de tostado..... | 20 |
| Extracción del aceite de Sacha Inchi..... | 20 |
| Secado por aspersión..... | 23 |
| Atomización..... | 25 |
| Atomizador rotatorio..... | 26 |
| Atomizadores hidráulicos..... | 26 |
| Atomizadores de doble boquillas..... | 27 |
| Sistema de calentamiento de aire..... | 27 |
| Cámara de secado..... | 27 |
| Sistema de separación..... | 28 |
| Metodología de investigación..... | 30 |
| Resultados..... | 35 |
| Conclusiones..... | 77 |
| Referencias..... | 79 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Rendimientos de métodos de extracción de aceites..... | 22 |
| Tabla 2. Materiales de pared utilizados para microencapsular aceites con elevado contenido de aceites poliinsaturados. | 36 |
| Tabla 3. Condiciones de operación del equipo secador por aspersion durante el proceso de micro encapsulación de aceites con elevado contenido de ácidos grasos poliinsaturados. | 55 |
| Tabla 4. Aplicaciones de aceite de Sacha Inchi microencapsulado | 70 |

Índice de figuras

| | |
|---|-------------------------------|
| Ilustración 1. Planta de Sacha Inchi | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 2. Mercado global de Omega 3 2028-2030 (US\$M) | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 3 Metabolismo de ácidos grasos esenciales omega 6 y omega 3..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 4. Etapas de proceso del secado por aspersión..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 5. Clúster Ecuación de búsqueda 1. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 6.Densidad de palabras clave Ecuación 1. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 7. Clúster asociado a la microencapsulación de grasas y aceites mediante secado por aspersión. | ¡Error! Marcador no definido. |

Introducción

La deficiencia del ácido graso poliinsaturado omega-3 en la dieta de los seres humanos constituye un factor importante para la obtención de enfermedades cardiovasculares, (fibrilación auricular, aterosclerosis, trombosis, inflamación y muerte súbita cardíaca, entre otras), así como también diabetes, cáncer, depresión y diversas enfermedades mentales, deterioro cognitivo relacionado con la edad, enfermedad periodontal y artritis reumatoide (Shahidi & Ambigaipalan, 2018). También se tiene evidencia del papel importante para el desarrollo del feto, función cerebral y ocular que tienen los ácidos grasos omega-3 en especial aceites DHA durante el embarazo de las mujeres y lactantes (Shahidi & Ambigaipalan, 2018), por lo tanto es de vital importancia abordar la deficiencia de este nutriente en la dieta de las personas mediante la implementación de estrategias que promuevan la disponibilidad y accesibilidad de alimentos ricos en omega-3. Una solución frente a este problema es llevar a cabo fortificaciones de alimentos con este tipo de ácido graso para enriquecer alimentos básicos como leche, pan, cereal, bebidas, jugos, leche llegando de esta forma a una gran cantidad de la población incluyendo grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas o ancianos mediante la creación de alimentos funcionales. Un alimento funcional es aquel que contiene una sustancia específica que ofrecen beneficios para la salud, que va más allá de la nutrición, es decir contienen sustancias adicionales a los nutrientes estándar (Emon et al., 2025).

Una fuente de este tipo de ácido graso es el aceite de la planta de Sacha Inchi, la cual se cultiva en Colombia y frente a este requerimiento puede convertirse en un cultivo de potencial desarrollo del sector agrícola colombiano, sin embargo, desde el punto de vista técnico uno de los principales desafíos para su utilización es su inestabilidad debido a que sus ácidos grasos son altamente propensos a sufrir oxidación cuando es expuesto al medio ambiente reduciendo de esta forma sus propiedades nutricionales y su vida útil (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2025).

La microencapsulación es un proceso mediante el cual una pequeña cantidad de ingrediente activo o funcional se retiene en una cápsula utilizando otros materiales, conocidos como encapsulantes (Emon et al., 2025), por lo tanto es una opción que permitirá proteger los

nutrientes y evitar procesos oxidativos de los compuestos sensibles del aceite de Sacha Inchi mediante la incorporación de este aceite a una matriz protectora formando de esta forma cápsulas. Estas pueden incorporarse en una matriz alimentaria, lo que facilitaría la masificación del consumo de este aceite y permitiría el desarrollo de diversos productos alimenticios enriquecidos con dicho ingrediente, incrementando su potencial comercial. Esta estrategia beneficiaría a todos los actores involucrados en la cadena de producción de esta planta. La optimización de esta técnica contribuiría a satisfacer la creciente demanda mundial de productos enriquecidos con omega-3, al tiempo que aprovecharía las condiciones ambientales favorables de Colombia para su cultivo, consolidándose como una alternativa productiva sostenible para los campesinos del país.

El secado por aspersion ofrece una alternativa para realizar la micro encapsulación porque se ha demostrado que es eficaz para micro encapsular aceites con elevado contenido de ácido graso omega -3, ofrece ventajas como la facilidad de la producción y la escalabilidad a una etapa industrial. Para aplicar y optimizar esta técnica se presenta el reto de seleccionar un material de pared adecuado para encapsular el aceite, determinar las condiciones óptimas en el equipo secador y determinar las condiciones óptimas de preparación de la emulsión. De acuerdo con lo anterior, esta revisión nos muestra alternativas de materiales pared para microencapsular aceites vegetales ricos en ácidos grasos poliinsaturados así como las variables a tener en cuenta en el momento de preparar las emulsiones y por último, las condiciones de operación del equipo secador por aspersion para producir las microcápsulas.

Planteamiento del Problema

El Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis L.*) ha emergido como una fuente prometedora de ácidos grasos esenciales, especialmente los omega-3, cruciales para la salud cardiovascular, cerebral y metabólica (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2025). Sin embargo, a pesar de su valor nutricional, existen diversas problemáticas que limitan su aprovechamiento y comercialización a gran escala, principalmente relacionadas con la estabilidad y calidad de los omega-3 presentes en su aceite.

Una de las problemáticas más significativas es la alta susceptibilidad a la oxidación del aceite, debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente debido a los ácidos grasos omega-3, omega-6, omega-9. Estos tipos de ácidos grasos son más vulnerables a la oxidación lo que puede llevar a que el aceite presente rancidez y una pérdida de su calidad nutricional y composicional (Kim & Joo, 2019). La presencia de anti nutrientes en la semilla como son los polifenoles que, aunque son antioxidantes pueden interactuar de manera no deseada durante el almacenamiento también contribuyen a su inestabilidad (Landines Vera et al., 2024). La exposición a la luz y al oxígeno aceleran la degradación del aceite, lo que produce peróxidos que generan olores y sabores desagradables, afectando la aceptación sensorial del producto final; Limitando la vida útil del aceite, lo que representa un obstáculo para su almacenamiento prolongado y su integración en formulaciones alimentarias y nutraceuticas.

Otro factor crítico es la variabilidad en la composición de los omega-3, que puede depender de las condiciones de cultivo, el tipo de cultivar y el método de extracción empleado (Jitpinit et al., 2022). Esta variabilidad dificulta la estandarización de productos a base de aceite de Sacha Inchi, afectando su competitividad en el mercado global de aceites saludables. Además, el método de extracción puede influir significativamente en el contenido de omega-3; mientras que las técnicas de extracción en frío preservan mejor los ácidos grasos esenciales, los métodos basados en solventes pueden inducir pérdidas debido al calor y a la degradación oxidativa (Samrit et al., 2024).

El fuerte olor característico del aceite de Sacha Inchi también representa un desafío. Este olor, aunque natural, puede resultar desagradable para algunos consumidores, limitando su incorporación directa en alimentos. La aceptación sensorial es crucial para el éxito comercial de cualquier producto alimenticio, y el aceite de Sacha Inchi enfrenta este obstáculo (Villamil et al., 2023).

Para abordar estas problemáticas, la microencapsulación ha surgido como una solución viable. Particularmente el secado por aspersión es una tecnología que se ha venido empleando, debido a que protege los ácidos grasos de la oxidación, mejora la estabilidad durante el almacenamiento y facilita su incorporación en diversos productos alimenticios sin afectar las propiedades sensoriales. Los estudios han demostrado que el uso de materiales como la goma arábiga, maltodextrina y proteínas en la microencapsulación del aceite de Sacha Inchi puede extender significativamente su vida útil y mantener su valor nutricional (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017; Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2023; Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022).

La necesidad de investigar y optimizar los métodos de extracción y encapsulación, junto con la búsqueda de soluciones sostenibles y rentables, es urgente para superar estas limitaciones. Solo así, el aceite de Sacha Inchi podrá consolidarse como un ingrediente esencial en la industria alimentaria y nutracéutica, aprovechando plenamente su potencial como fuente de omega-3. En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las condiciones óptimas de microencapsulación y los materiales encapsulantes más adecuados para mejorar la estabilidad, calidad y biodisponibilidad de los omega-3 del aceite de Sacha Inchi?

Justificación

El mercado de alimentos actualmente ofrece una gran oportunidad a la industria para ofertar alimentos ricos en omega 3 debido al creciente interés de la población mundial en el bienestar y la salud, así como los beneficios que estos ácidos grasos pueden proporcionar a la salud cardiovascular, el cerebro, procesos inflamatorios, cáncer y salud en general (Patted et al., 2024). El tamaño del mercado mundial de omega 3 en el año 2023 se valoró en USD 2,62 mil millones y se espera que tenga una tasa de crecimiento anual compuesta de 7,9% entre el año 2024 y 2030, adicionalmente se observa una diversificación continua de la oferta de productos ya que los consumidores buscan alternativas al aceite de pescado tradicional, lo anterior debido a la creciente presión sobre las pesquerías de anchoa y las preocupaciones de sostenibilidad (Region & Forecasts, 2024). Este estudio económico evidencia que este país tiene una excelente oportunidad en ofrecer productos ricos en omega 3 extraído de semillas de Sacha Inchi, cultivo el cual de acuerdo el Ministerio de Agricultura en el año 2022 tuvo una producción de 1966,16 toneladas, con un área cultivada de 794,47 hectáreas, ofreciendo su industrialización una gran oportunidad de mercado y alternativa rentable de cultivo a los campesinos colombianos.

La microencapsulación del aceite de Sacha Inchi ofrece la posibilidad de brindar gran variedad de productos alimenticios ricos en omega -3 debido a la amplia aplicabilidad de las microcápsulas a diferentes matrices con buena estabilidad y buena aceptación del consumidor. Esto nos permite tener un insumo clave para el desarrollo de alimentos funcionales innovadores de acuerdo a las tendencias actuales de salud, el envejecimiento de la población, los estilos de vida agitados y consumidores más consientes. Lo anterior nos permitirá tener acceso al mercado mundial de alimentos funcionales el cual en el año 2021 fue de US 280,7 mil millones y que se espera que tenga una expansión a una tasa de crecimiento del 8,5% hasta el año 2030 (Foods et al., 2022).

El ácido alfa-linolénico (ALA) como principal constituyente del aceite de Sacha Inchi actualmente está reglamentado en el etiquetado europeo con relación a las propiedades saludables aprobada por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) reglamentada bajo el reglamento (CE) No 1924/2006 de la Comisión Europea sobre declaraciones

nutricionales y de propiedades saludables alimenticios. La declaración aprobada que puede utilizarse en el etiquetado europeo es la siguiente: “el ALA contribuye al mantenimiento de niveles normales de colesterol en sangre”(Panel & Nda, 2009).Esta declaración permite que todas los productos que contenga ALA en concentraciones suficientes tengan mayor aceptación comercial en la población mundial y abrirían la puerta para que el aceite de Sacha Inchi pueda utilizarse como ingrediente funcional en la formulación de productos funcionales.

Es importante resolver los problemas de inestabilidad del aceite de Sacha Inchi porque nos permite prolongar la vida útil del producto, conservar sus propiedades nutricionales y nos permitiría ampliar las aplicaciones industriales debido al enorme potencial para ser aplicado por diversas industrias como la alimentaria, la cosmética y farmacéutica (Goyal et al., 2022). También contribuiría a fomentar el consumo de este aceite ya que se volvería más accesible para las empresas productoras generando de esta forma más demanda por la población beneficiando principalmente a productores campesinos.

Asimismo, la optimización de los materiales encapsulantes y las condiciones del proceso permitirá el desarrollo de formulaciones más estables y eficientes, facilitando la incorporación del aceite en una variedad de matrices alimentarias. Esto no solo aumentará su viabilidad comercial, sino que también contribuirá a la diversificación de su uso en el sector nutracéutico.

Por lo tanto, esta esta monografía busca recopilar información científica que respalde la implementación de tecnologías avanzadas para la estabilización y preservación de los omegas 3 en el aceite de Sacha Inchi. Además, contribuirá al desarrollo de productos alimenticios con un perfil nutricional mejorado, promoviendo una alimentación más saludable y sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Analizar las principales variables que intervienen en los procesos de microencapsulación de aceite de Sacha Inchi mediante la técnica de secado por aspersión, así como su potencial aplicación en alimentos funcionales enriquecidos con omega 3.

Objetivos Específicos

- Identificar los materiales de pared y las variables de emulsificación más adecuados para la microencapsulación del aceite de Sacha Inchi mediante secado por aspersión.
- Analizar las condiciones y variables de operación de los equipos utilizados en el secado por aspersión para la producción de microcápsulas de aceite de Sacha Inchi.
- Identificar potenciales aplicaciones del aceite de Sacha Inchi micro encapsulado en el desarrollo de alimentos funcionales enriquecidos con omega 3.

Marco Teórico

Sacha Inchi

La planta de Sacha Inchi es una especie nativa del Perú donde se cultivó inicialmente por las comunidades precolombinas debido a sus semillas las cuales son ricas en omega 3, proteínas y otros compuestos bioactivos. Es una planta trepadora y sus semillas son capsulas las cuales son ricas en aceite altamente valoradas por su contenido nutricional, propiedades antioxidantes y múltiples beneficios para la salud. Es una planta perenne y trepadora, que puede alcanzar una altura de aproximadamente 2 metros, las hojas son simples, opuestas, de forma cordada a truncada en la base, y miden entre 7 y 13 cm de largo y 5 a 12 cm de ancho. Produce flores pequeñas, que son generalmente de color verde amarillento, con cuatro a cinco sépalos y sin pétalos. Los frutos son cápsulas grandes, en forma de estrella, que contienen de 4 a 6 semillas lenticulares (Ver ilustración 1). Las cápsulas son de color verde cuando están inmaduras y se vuelven marrones al madurar, las semillas son ovaladas, con un peso que varía entre 0.74 y 1.22 g, y contienen un alto contenido de grasa (hasta un 54.7%) y proteínas (hasta un 33.30%). La planta crece mejor en climas cálidos (10–37 °C) y requiere suelos de textura media, así como una cantidad considerable de lluvia (850–1000 mm anuales) (Goyal et al., 2022).

Ilustración 1

Planta de Sacha Inchi

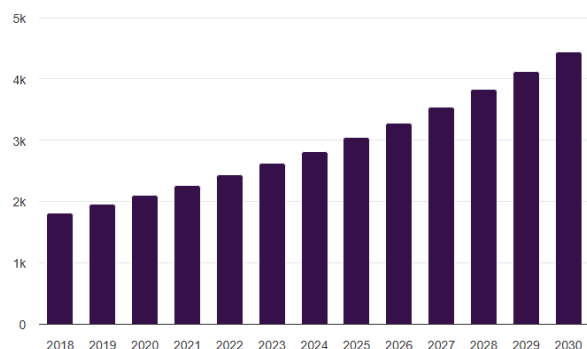


Fuente: (Istock, 2019)

Esta planta puede convertirse en un cultivo con elevado potencial económico para los campesinos colombianos (Ver ilustración 2) porque de además de su valioso aceite, la semilla tiene en su composición importantes nutrientes por lo tanto todas las partes de la semilla pueden utilizarse. Entre el 33,4% y el 54,7% del peso son grasas, las proteínas varían entre 24,20% y el 33,3%, los carbohidratos varían entre el 6,59% y el 30,9%, la fibra varía entre el 6,61% y el 11,30% y las cenizas entre el 2,70% y 6,46%. También dentro de sus constituyentes existen antinutrientes los cuales con los procesos de tostado, secado o hervido se los puede eliminar o desnaturalizar (Goyal et al., 2022).

Ilustración 2

Mercado global de Omega 3 2028-2030 (US\$M)



Fuente: (Region & Forecasts, 2024)

Las propiedades fisicoquímicas del aceite de Sacha Inchi pueden variar según su origen, sin embargo, de acuerdo a estudios de caracterización fisicoquímico en Colombia se han obtenido los siguientes resultados que pueden utilizarse como parámetros de referencia para llevar a cabo el control de calidad de esta materia prima en el momento de su recepción. Este aceite tiene una densidad de $0,9189 \pm 0,0170$ g/mL, índice de refracción a 25°C , $14791 \pm 0,0008$, viscosidad a 20°C $35,5 \pm 0,3$ cp, índice de yodo $198,1 \pm 0,7$ (g de I₂/100 g oil) (Benítez et al., 2018).

La composición química del aceite de Sacha Inchi extraído de semillas sin tostar (es decir, de semillas crudas) incluye un alto contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente el ácido alfa-linolénico, que es un ácido graso omega-3. Los principales componentes son: Ácido alfa-linoleico aproximadamente 48.2%, Ácido linoleico alrededor de 34.1%, Ácido oleico cerca de 8.9%, Ácido palmítico aproximadamente 4.7%, Ácido esteárico alrededor de 3.3%. Además, el aceite de Sacha Inchi sin tostar tiene un bajo contenido de ácidos grasos saturados, que representa aproximadamente el 8.0% de su perfil total de ácidos grasos. Este aceite también contiene compuestos fenólicos y tocoferoles, que contribuyen a su capacidad antioxidante y estabilidad oxidativa (Cisneros et al., 2014). Después de haber sido sometido a un proceso de tostado medio aunque el perfil de ácidos grasos sigue siendo predominantemente insaturado, se observan cambios en el contenido de ciertos compuestos debido al proceso de tostado: Ácido alfa-linolénico (18:3): aproximadamente 45% (puede haber una ligera disminución en comparación con el aceite crudo), ácido linoleico (18:2): alrededor de 34.1% (generalmente se

mantiene constante), ácido oleico (18:1): cerca de 8.9% (también se mantiene constante), Ácido palmítico (16:0): aproximadamente 4.7% (sin cambios significativos), ácido esteárico (18:0): alrededor de 3.3% (sin cambios significativos). Además, el aceite de Sacha Inchi tostado presenta un contenido de tocoferoles (vitamina E) que puede ser ligeramente menor, especialmente en el γ -tocoferol, aunque el δ -tocoferol puede permanecer sin cambios. El proceso de tostado puede aumentar la capacidad antioxidante del aceite debido a la formación de compuestos fenólicos y productos de reacción de Maillard, que pueden contribuir a su estabilidad oxidativa (Cisneros et al., 2014).

Omega 3

Los ácidos grasos poliinsaturados se caracterizan por tener múltiples enlaces dobles a largo de la cadena de carbono por lo tanto el omega-3 es un tipo de ácido graso poliinsaturado que se caracteriza por tener un doble enlace en el tercer carbono desde el extremo metilo de la cadena de carbono con configuración CIS. Esta nomenclatura está establecida por la IUPAC “International Union of Practical and Applied Chemistry” e identifica el carbono con el primer doble enlace cercano al grupo metilo terminal del ácido graso (Valenzuela B et al., 2014). Los omega-3 son muy importantes porque el cuerpo no puede producirlos por sí mismo, por lo tanto deben obtenerse a través de la dieta (Sheet & Professionals, n.d.). Estas características químicas contribuyen a la fluidez en las membranas celulares por ende ayudan a comprender su funcionalidad y las interacciones que tienen con estas (Patted et al., 2024).

Existen varios tipos de omega 3, sin embargo los más destacados son tres tipos de ácidos grasos. El primer ácido graso es el ácido alfa-linolénico (ALA) que es un omega -3 de cadena corta que se encuentra principalmente en semillas como por ejemplo linaza, chía y nueces. El segundo tipo de ácido graso es el Ácido eicosapentaenoico (EPA) el cual es un tipo de ácido graso omega 3 de cadena larga que se encuentra en pescados grasos como el salmón, la caballa y las sardinas y tiene propiedades antiinflamatorias y es importante para la salud cardiovascular. El tercer tipo de ácido graso es el Ácido docosahexaenoico (DHA) que también es un omega-3 de cadena larga, se encuentra presente en pescados grasos y en algas. Es crucial para la salud del cerebro y

la función visual.(Sheet & Professionals, n.d.). En los procesos del metabolismo del cuerpo humano el ALA es el precursor del EPA y DHA, es decir a partir del ALA pueden sintetizarse estos dos compuestos (Punia et al., 2019).

Beneficios Para La Salud

Los beneficios del omega 3 son muy diversos y tienen un fundamento científico muy documentado por diversos entes investigadores. La contribución para mejorar la salud vascular por parte de los ácidos grasos DHA o el EPA es muy importante debido a que mejoran la función arterial, disminuyen la presión arterial y reducen los niveles de triglicéridos en la sangre. También contribuyen a la prevención de accidentes cardiovasculares debido a que los omega 3 preservan la función arterial y neuronal por lo tanto la deficiencia en omega 3 en el cuerpo puede ser un factor que contribuye a la presencia de accidentes vasculares. Posee propiedades antiinflamatorias por lo que pueden ser útiles para el tratamiento de enfermedades inflamatorias como la artritis reumatoide, lupus, eczema y mejorar la salud en general. El DHA mejora la salud mental ya que se ha demostrado que el consumo de omega 3 puede reducir síntomas de depresión y ansiedad, así como también mejora la salud cognitiva y la salud cerebral en general debido a que mejora la integridad de las membranas neuronales por lo anterior puede ser beneficioso para el tratamiento de enfermedades como Alzheimer o la demencia. El consumo de omega 3 ayuda a prevenir el cáncer debido a que tienen efectos antineoplásicos y se ha asociado con la prevención de varios tipos de cáncer como el cáncer colorrectal y el cáncer de mama. Contribuyen a mejorar la salud ocular ya que los omega 3 regulan la inflamación de la superficie ocular y mejoran los perfiles lipídicos de las lágrimas lo que ayudan a prevenir el síndrome de ojo seco. Por ultimo ayudan a regular el metabolismo ya que los omega 3 influyen en la expresión de genes relacionados con el equilibrio energético y pueden ayudar a reducir los triglicéridos (Patted et al., 2024).

Diversos grupos poblacionales, como personas con enfermedades cardiovasculares, mujeres embarazadas, adultos mayores y niños en etapas de desarrollo, presentan una necesidad elevada de ácidos grasos omega-3 debido a sus beneficios sobre la salud cerebral, visual y cardiovascular (Swanson et al., 2012). En este contexto, resulta pertinente identificar los alimentos más comúnmente consumidos por dichas poblaciones con el fin de establecer estrategias viables de enriquecimiento. Por ejemplo, los pacientes cardiovasculares suelen seguir dietas basadas en productos integrales, lácteos bajos en grasa, pescados, frutas, vegetales y legumbres (Estruch et al., 2018; Mozaffarian et al., 2011). En consecuencia, alimentos como yogures, panes integrales, bebidas funcionales sin azúcar añadida y productos cárnicos reducidos en grasa (como hamburguesas vegetales o magras) representan matrices potenciales para la incorporación de aceite de sachá inchi microencapsulado. Esta selección no solo garantiza la viabilidad tecnológica del enriquecimiento, sino también su aceptación y consumo frecuente por parte del público objetivo.

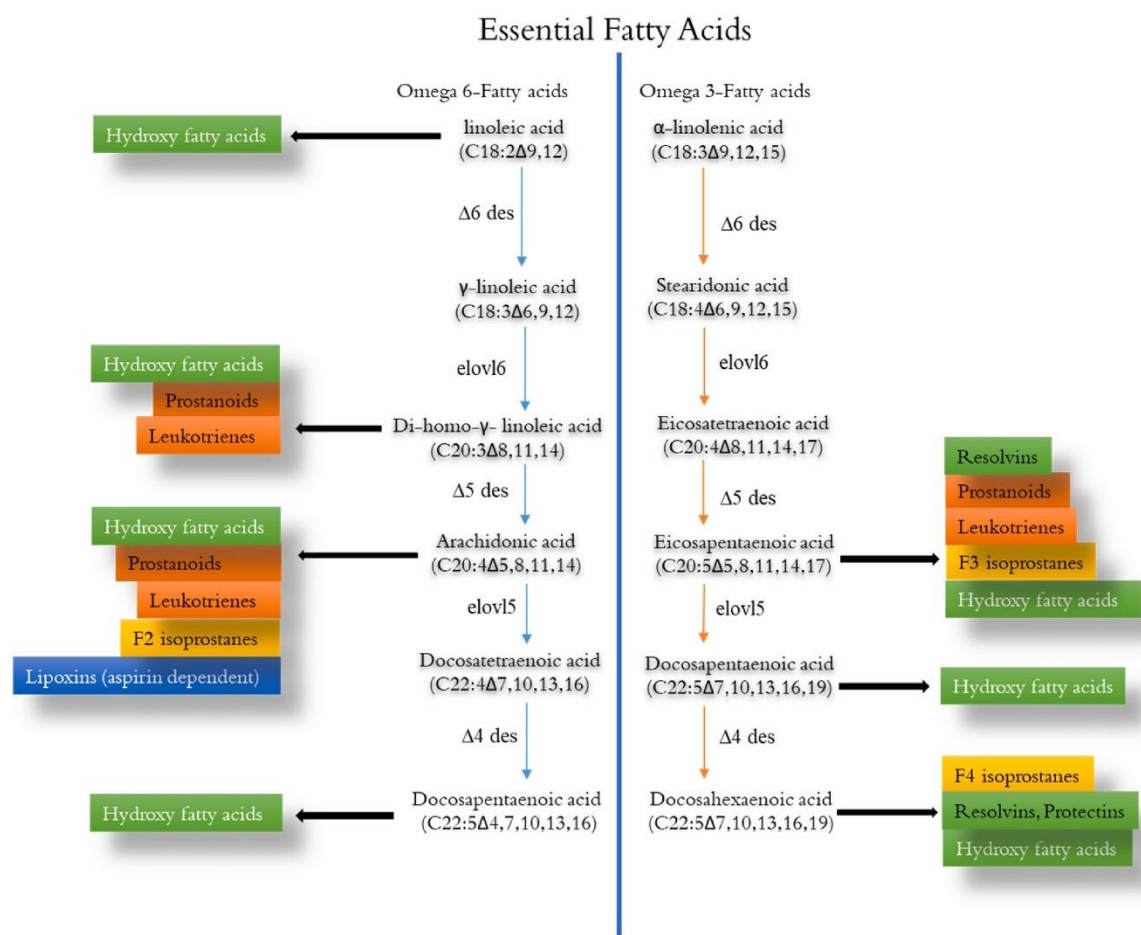
Metabolismo del Omega-3ALA

El aceite de Sachá Inchi tiene elevada concentración de ácido alfa linoléico, compuesto que es de nuestro interés encapsular y ser ingrediente funcional para la producción de alimentos ricos en omega-3. Por lo anterior el metabolismo del ácido alfa linoléico en el cuerpo humano implica varios pasos ya que este compuesto es un triglicérido. Es emulsificado por la bilis en el intestino delgado, luego se digiere y se absorbe por la mucosa intestinal siendo transportado a los tejidos del cuerpo a través del plasma. Una vez en el cuerpo el ácido alfa linoleico puede ser convertido en ácidos grasos de cadena más larga como el EPA y el DHA, compuestos que tienen muchos beneficios para el cuerpo. Esta conversión es limitada por lo que se estima que solo el 8% se convierte EPA y solo el 1% se convierte en DHA debido a una competencia de conversión con el ácido graso omega -6 ya que las mismas enzimas son usadas para convertir ambos tipos de ácidos grasos (ALA y ácidos grasos omega-6). Las principales enzimas involucradas son la $\Delta 6$ -desaturasa, $\Delta 5$ -desaturasa y las Elongasas. La $\Delta 6$ -desaturasa es fundamental para la conversión de ALA a ácido estearidónico, el cual es el primer metabolito en la vía de conversión a EPA y DHA. La $\Delta 6$ -desaturasa introduce un doble enlace en la cadena de carbono del ALA. La enzima

$\Delta 5$ -desaturasa actúa en la conversión del ácido estearidónico a EPA. Las elongasas son responsables de alargar la cadena de carbono de los ácidos grasos, permitiendo la conversión de ALA a EPA y DHA a través de la elongación de los intermediarios formados. La síntesis de APA y DHA es baja a partir de ALA sin embargo es suficiente para que el cerebro pueda funcionar correctamente (Punia et al., 2019).

Ilustración 3.

Metabolismo de ácidos grasos esenciales omega 6 y omega 3



Fuente: (Patel et al., 2022)

Proceso de Tostado

En el proceso productivo de aceite de Sacha Inchi incluye después de la cosecha una etapa de tostado de las semillas que impactan positivamente la calidad del aceite extraído y en las calidades nutricionales y sensoriales del producto final. Es importante realizar un proceso de tostado porque aumenta el rendimiento del aceite durante los proceso de extracción de la semilla, mejora las características sensoriales como el sabor y el aroma del aceite, aumenta la estabilidad oxidativa lo que será menos propenso a procesos de rancidez y a la degradación durante el almacenamiento ya que el tostado puede reducir la concentración de compuestos susceptibles a la oxidación. El proceso de tostado incrementa los compuestos bioactivos como por ejemplo los tocoferoles y los polifenoles que tienen propiedades antioxidantes y beneficios para la salud mejorando de esta forma el valor nutricional del aceite. El tostado también contribuye a reducir anti nutrientes en las semillas como por ejemplo inhibe la tripsina que puede interferir con la absorción y digestión de nutrientes (Chan et al., 2024).

El mejor tipo de tostado del aceite de Sacha Inchi depende de varios factores que contribuyan en buscar un equilibrio óptimo entre la extracción de compuestos beneficiosos y la minimización de la oxidación. De acuerdo con estudios se recomienda utilizar una temperatura moderada de 80°C la cual ha mostrado resultado favorable en términos de rendimiento y calidad. Se recomienda utilizar tiempos de tostado entre 20 y 30 minutos el cual es un rango que ha mostrado ser capaz de maximizar la extracción de compuestos bioactivos sin comprometer la calidad del aceite (Producir un aceite con baja acidez y un valor de peróxido bajo). Las temperaturas altas entre 100°C y 120°C aumentan la extracción de ciertos compuestos, pero pueden llevar a una mayor oxidación y degradación de los ácidos grasos insaturados. Finalmente evitar un tostado excesivo es fundamental para disminuir los valores de peróxido y panisidina. (Chan et al., 2024).

Extracción del Aceite de Sacha Inchi

El método de extracción del aceite depende de varios factores a tener en cuenta como la calidad del aceite deseada, la eficiencia del proceso y los costos de producción. La extracción soxhlet requiere el uso de solventes y energía para lograr evaporar el solvente por lo tanto la

desventaja de este método es que se requiere el uso de solventes que pueden ser tóxicos para el alimento, el medio ambiente y se requiere tiempo y energía para lograr el objetivo de extracción (Norhazlindah et al., 2023). La ventaja de esta técnica es que se obtienen buenos rendimientos o al alta eficiencia de extracción (Lu et al., 2023). La extracción utilizando el prensado en frío emplea la fuerza mecánica para llevar a cabo la operación, la ventaja de este método es que no utiliza calor ni solventes químicos por lo que permite conservar las propiedades nutricionales del aceite. La desventaja de este método es que el nivel de eficiencia es más bajo que otros métodos de extracción (Lu et al., 2023). La extracción enzimática utiliza enzimas específicas para promover la liberación del aceite de las estructuras celulares de las semillas como proteasas y celulasas. Estas enzimas son capaces de romper las paredes celulares y otros componentes que retienen el aceite dentro de las semillas. En este tipo de extracción la mezcla se incuba a condiciones óptimas de temperatura, pH, relación agua –enzima y tiempo para incrementar la actividad enzimática. Posteriormente el aceite se libera y se extrae mediante el uso de centrifugación o decantación. Este método posee dos ventajas principales: La utilización de enzimas puede aumentar el rendimiento de extracción al facilitar la ruptura de las estructuras celulares y tiende a preservar mejor las propiedades nutricionales y organolépticas del aceite en comparación con métodos que utilizan calor o solventes químicos.

La desventaja es que este método puede ser más costoso y requerir condiciones específicas para la actividad enzimática (Norhazlindah et al., 2023). La extracción mediante el uso de fluidos supercríticos utiliza generalmente dióxido de carbono el cual es llevado a condiciones de temperatura y presión críticas hasta convertirlo en estado súper crítico, de tal forma que en este estado pueda extraer el aceite ya que se presenta una penetración del fluido en la muestra. Un fluido se considera supercrítico cuando se encuentra a una temperatura y presión superiores a su punto crítico. En este estado, el fluido exhibe propiedades intermedias entre un gas y un líquido, lo que le permite disolver compuestos de manera más efectiva que en sus estados normales. Como ventajas este método utiliza solventes no tóxicos (como el CO₂), lo que reduce el riesgo de residuos tóxicos en el producto final. Permite la extracción selectiva de compuestos específicos, lo que es útil para obtener extractos de alta pureza y el impacto ambiental es menor. Las desventajas de este método son: requiere equipos costosos y condiciones específicas de presión y temperatura (Norhazlindah et al., 2023).

En las tablas 1 y 2 se establecen los rendimientos del aceite extraído y los rendimientos de cada uno de los ácidos grasos que componen el aceite por cada uno de los métodos de extracción y sus respectivas condiciones de operación (Norhazlindah et al., 2023).

Tabla 1

Rendimientos de métodos de extracción de aceites

| Métodos de extracción | Condiciones operacionales | Porcentaje de rendimiento |
|------------------------------|---|--|
| Soxhlet | Tiempo 5 horas. Disolvente: Hexano. Relación solido-disolvente 1/7 (m/V) | 41,40% |
| Enzimática Acuosa | Semillas incubadas con una relación 1/1 en peso con diferentes enzimas. Cuatro horas de agitación (600 rpm) a 40 °C | Papaina 26,47% Bromelina 23,64%. Campazima FP22,48%. Celasa 20,9%. |
| Prensado frio | Semillas descascaradas y semillas enteras. Prensa de cilindro de pistón con diámetro 15,2 cm a 200 bar. Temperatura inferior a 30°C | Semilla descascarada 40,15% Semilla entera 20,2% |
| Uso de fluidos supercríticos | Uso de dióxido de carbono con pureza del 99%. Tiempo: 20 minutos. Temperatura 40°C, 50°C y 60°C. Presión 300-400 bar | 40 °C, 300 bar: 43.6% 50 °C, 300 bar: 41.9% 60 °C, 300 bar: 44.7% 40 °C, 400 bar: 45.7% 50 °C, 400 bar: 46.4% 60 °C, 400 bar: 50.1% |

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se establecen las principales desventajas por cada uno de los métodos relacionados en la tabla 1.

- Método Soxhlet. Uso de disolventes tóxicos.
- Método Enzimático Acuoso. Proceso lento, establecer condiciones óptimas de incubación especiales, uso de enzimas costosas, bajo rendimiento.
- Prensado frio. Bajo rendimiento con respecto a los métodos de extracción con disolventes.
- Método de fluidos supercríticos. Elevados costos de operación y equipos caros.

De acuerdo con lo anterior se selecciona el método de extracción de prensado en frio para llevar a cabo el proceso de extracción de este aceite teniendo en cuenta que es un método accesible en cuanto a costos de operación, costos de mantenimiento y costos de equipos. Adicionalmente este proceso nos permitirá obtener un aceite grado alimenticio y libre de sustancias toxicas como solventes.

Secado por Aspersión

El objetivo del secado por aspersión es la obtención de un polvo a partir de un material liquido concentrado el cual se pulveriza mediante el uso de una corriente de aire caliente el cual actúa como medio calefactor y medio de transporte. El secado por aspersión consta de 4 fases principales, la atomización del líquido que se introduce a la cámara, el contacto entre el aire caliente y las gotitas producidas por la atomización, la evaporación de la humedad contenida en las gotitas y la respectiva separación del material deshidratado. La atomización del líquido se refiere a la generación de pequeñas gotas con el fin de crear la máxima superficie posible y las gotas lo más homogéneas a partir del fluido que se requiere deshidratar, una vez se generan las gotitas estas entran en contacto con aire caliente el cual actúa como medio de secado para evaporar el agua. El aire caliente provoca un rápido y repentino cambio de temperatura de la gota de tal forma el proceso de secado ocurre de manera rápida y las gotitas llegan a secarse incluso antes de que estas toquen la pared de la cámara de secado. El resultado de este proceso de secado son partículas sólidas suspendidas en la corriente de aire las cuales fluyen a etapa de separación donde son separadas del aire y empacadas mediante el uso de ciclones (Orrego Alzate, 2003).

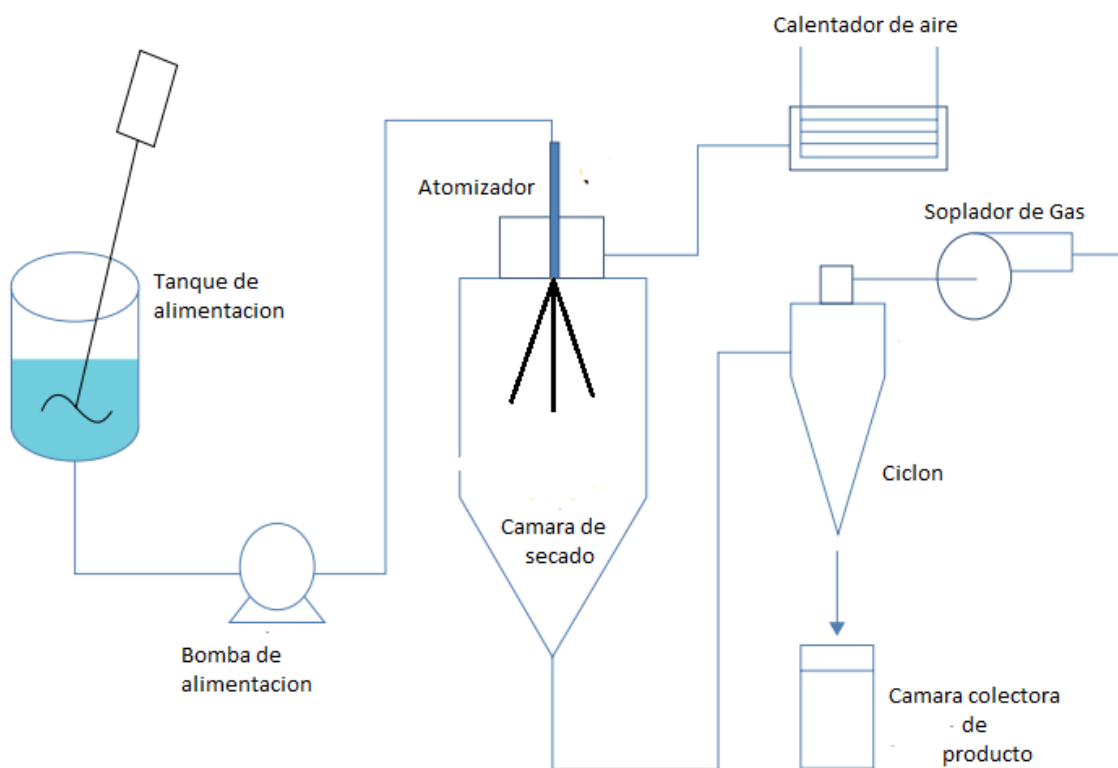
El secado por aspersión puede sacar diferentes tipos de polvos de acuerdo con los requerimientos del cliente con características que se puede controlar como granulometría, morfología y densidad. Lo anterior nos permite obtener un producto con características similares o consistentes. Tiene aplicabilidad en el secado de diferentes tipos de matrices como emulsiones o suspensiones siempre y cuando estén líquidas y se puedan atomizar. Para garantizar la bioactividad de algunos compuestos de interés este proceso es capaz de controlar temperatura y tiempos de contacto entre el aire caliente y las sustancias de interés para preservar su bioactividad. Lo anterior es viable porque los proceso de secado con este método son relativamente cortos. Debido a las elevadas temperaturas a la que se someten a las materias primas y a la baja actividad de agua del producto nos permite obtener un producto inocuo, estable y con una amplia vida útil. Lo anterior también nos permite obtener un producto que a lo largo de su vida útil sufra pocos cambios bioquímicos como pardeamiento y oxidación.

Entre las principales desventajas de este proceso es que requiere mucha energía, de hecho, este proceso no es eficiente térmicamente debido a que la mayoría del calor se pierde durante la descarga de gases. Los costos iniciales de instalación son elevados y se debe tomar precauciones para bajar el riesgo con respecto a incendios o explosiones. Debido a que los equipos industriales de este proceso tienen grandes tamaños, los esfuerzos por realizar un proceso adecuado de limpieza son elevados. En cuanto a la operación los principales desafíos de este proceso son producir un producto que no tenga pegajosidad, que el producto no se apelmace y no se incruste en las paredes de la cámara de secado. Esto da como resultado polvos con poca fluidez y un polvo que tiende a pegarse y formar grumos. Estos desafíos se pueden superar ajustando parámetros de secado por aspersión que incluyen la composición de la alimentación y el posible uso de coadyuvantes de secado por aspersión. Otras técnicas como el uso de ultrasonido, el secado por aspersión al vacío y el uso de aire deshumidificado ha contribuido a solucionar los problemas anteriormente descritos (Selvamuthukumarán, 2019).

De acuerdo con lo anterior el esquema que describe el proceso se presenta en la ilustración 4.

Ilustración 4

Etapas de proceso del secado por aspersión



Fuente: Elaboración propia

Atomización

La atomización se considera el corazón del proceso por aspersión ya que de esta operación depende gran parte la calidad del polvo y la eficiencia energética. El atomizador es un equipo que es capaz de producir gotas de tal forma que se incremente el área de superficie de contacto entre el aire caliente y la sustancia a deshidratar. La selección del atomizador depende la viscosidad del fluido, la escala de producción, los requisitos del producto por lo tanto el tamaño de las gotas depende del tipo de atomizador o los parámetros de atomización entre ellos el caudal de alimentación (Selvamuthukumar, 2019).

Las gotas se producen debido a la pérdida de la tensión superficial a medida que el chorro del líquido cae verticalmente y alcanza el valor crítico de fragmentación perdiendo de esta forma la forma cilíndrica del chorro del líquido (Anandharamakrishnan & Padma Ishwarya, 2015).

A continuación, se presentan los diferentes tipos de atomizadores que existen actualmente en la industria.

Atomizador Rotatorio.

Este tipo de atomizador introduce el fluido a deshidratar en el centro del atomizador para que luego mediante la fuerza centrífuga lleve el fluido al borde del disco y lo arroje fuera del borde. El líquido forma filamentos que luego se rompen en gotitas esféricas las cuales siguen una trayectoria helicoidal de acuerdo con la fuerza centrífuga. El tamaño de las gotas se controla de acuerdo a las revoluciones de giro del atomizador y el caudal de alimentación (Selvamuthukumaran, 2019). A continuación, se presentan las características de este tipo de atomizador. Este instrumento utiliza energía centrífuga, el parámetro de atomización es la velocidad de rotación (RPM), produce tres tipos de spray (Fino, grueso, medio), el tamaño de las gotas producidas se encuentra entre 30-120 μm , el tamaño de la gota es directamente proporcional al caudal de alimentación y a la viscosidad del fluido y a la vez es inversamente proporcional a la velocidad de rotación y al diámetro de la rueda (Anandharamakrishnan & Padma Ishwarya, 2015). Entre las desventajas de este tipo de atomizador es que se le dificulta operar con alimentos viscosos y la gran cantidad de polvo producido puede llevar a contaminación ambiental (Anandharamakrishnan & Padma Ishwarya, 2015).

Atomizadores Hidráulicos.

Los atomizadores hidráulicos utilizan elevadas presiones para forzar al fluido a pasar a través de un pequeño orificio generando de esta forma fricción entre el fluido y la corriente de aire caliente produciendo de esta forma gotitas (Selvamuthukumaran, 2019). Estos atomizadores utilizan la presión como fuente de energía, el parámetro de atomización es la presión de la boquilla, operan en un rango de presión entre 250 y 10000 PSI. El spray producido es grueso y no tan homogéneo y el tamaño de las gotas producidas tienen un tamaño entre 120 y 250 μm . El tamaño de las gotas producidas es directamente proporcional al caudal de alimentación y la viscosidad e inversamente proporcional a la presión de atomización. Las ventajas de este atomizador es que produce partículas con menos aire ocluido por lo tanto produce polvos más densos con buenas características de flujo. La principal desventaja de este tipo de atomizadores

es que las gotas producidas no son homogéneas y son más gruesas que las gotas producidas por atomizadores rotativos (Anandharamakrishnan & Padma Ishwarya, 2015).

Atomizadores de Doble Boquillas.

Los atomizadores de dos fluidos se caracterizan por la fragmentación del líquido debido al impacto del líquido con aire comprimido produciendo de esta forma gota con una amplia gama de tamaños, especialmente una fina pulverización del fluido. La calidad final del producto final está estrechamente relacionada con las propiedades reológicas del aire y la alimentación (Por ejemplo viscosidad, tensión superficial y densidad). La principal ventaja de este tipo de atomizador es que es capaz de atomizar fluidos altamente viscosos y producir polvos de tamaño de partículas muy pequeños. Las principales desventajas es que el caudal de proceso es bajo debido a que requieren una alimentación baja y la sobre pulverización que se refiere a la producción de gotas tan pequeñas que pueden irse en la corriente de aire caliente y no sedimentarse en los equipos de separación (Selvamuthukumaran, 2019).

Sistema de Calentamiento de Aire

El aire se toma del ambiente mediante un ventilador y se filtra para luego ser enviado a la zona de calentamiento que opera con intercambiadores de calor el cual se hace por métodos indirectos como gas, vapor, aceite o medios directos como gas y electricidad (Orrego Alzate, 2003).

Cámara de Secado

En la cámara de secado ocurre el contacto íntimo entre las gotas del líquido y el aire caliente y ocurre el proceso de transferencia de masa para producir el secado del producto mediante convección. Este proceso ocurre rápidamente y el vapor de agua es transportado por el aire caliente. Inicialmente la velocidad de secado es rápida y la temperatura del aire cae rápidamente sin embargo esta se vuelve lenta cuando se empiezan a formar en las superficies de las gotas una costra lo que reduce la actividad del agua en la superficie por lo tanto la tasa de evaporación únicamente depende de la velocidad de difusión del vapor de agua a través de la capa exterior seca. Durante este periodo se pueden formar burbujas al interior de la gotita lo que

puede llevar a producir polvos con tamaños irregulares y de baja densidad aparente. El ajuste de temperatura del aire es fundamental para lograr que las gotitas de aire se sequen antes de tocar las paredes de la cámara de secado o lo contrario de no quemar las gotitas más pequeñas. El tamaño de las partículas dependen de muchos parámetros entre ellos la composición de la alimentación, la concentración de sólidos, la viscosidad, la alimentación y parámetros de atomización (Selvamuthukumaran, 2019).

La cámara de secado más común es de tipo es un cilindro que posee un cono en la parte inferior con un ángulo entre 40° y 60° para que pueda ser retirado allí el polvo por gravedad, esta unidad está aislada térmicamente para evitar pérdidas de energía. Su tamaño puede variar hasta un tamaño de 30 m para los cilindros más grandes sin embargo su tamaño depende del tiempo de residencia deseado para el producto y el sistema de pulverización elegido (Orrego Alzate, 2003). El contacto entre las gotas y el aire caliente pueden estar en paralelo o contracorriente dependiendo del diseño del proceso y el compuesto activo que deseemos encapsular. En los diseños donde se utiliza un contacto en paralelo se produce un menor estrés térmico (Orrego Alzate, 2003).

Sistema de Separación

La cámara de secado tiene un fondo cónico para facilitar la separación del polvo y emplean dos sistemas, una separación primaria y una separación secundaria. En la separación primaria se recoge el polvo en la base del secador y se transporta mediante tornillos o un sistema neumático con un separador ciclónico. El gas húmedo se extrae del centro de la cámara de secado y se expulsa por la parte superior del fondo cónico. Debido a la eficiencia baja de separación en la recolección se debe instalar un sistema adicional de recogida de partículas que comprende colectores secos que incluyen ciclones, un filtro de mangas seguidos de depuradores húmedos y un precipitador electrostático. Los ciclones son equipos en forma de cono que utilizan la fuerza centrífuga para separar sólidos de una corriente de gas Las partículas sólidas caen en la cámara de recolección unida a la parte inferior del ciclón. El filtro de mangas es una carcasa metálica por donde pasa el aire y en su superficie retiene el polvo lo cual hace que estos sólidos se acumulen en los filtros de este dispositivo. Lo anterior causa que se incremente la presión de las mangas a medida que se acumulan los sólidos por lo tanto se realiza una inyección de aire

comprimido con una frecuencia determinada para destapar los filtros y disminuir la presión de los filtros de mangas. Los métodos de separación por separación electrostática también pueden mejorar la eficiencia de separación, esta tecnología utiliza campos eléctricos para ionizar el gas y cargar electrostáticamente las partículas para que estas se precipiten en las placas colectoras y se purifique el aire (Anandharamakrishnan & Padma Ishwarya, 2015).

Metodología de Investigación

Se utilizó la base de datos de artículos Scopus mediante el uso de la siguiente ecuación de búsqueda la cual encontró 87 documentos.

Ecuación de Búsqueda Scopus

sacha AND inchi AND microencapsulation AND spray AND drying AND oil AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Sacha Inchi Oil") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Sacha Inchi") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Emulsification") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Spray Drying") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Microcapsules") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Oils And Fats") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Spray-drying") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Microstructure") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Encapsulation") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Fourier Transform Infrared Spectroscopy") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Nonhuman") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Human") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Drug Delivery System") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Drug Compounding") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Thermogravimetric Analysis") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "X Ray Diffraction") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "In Vitro Study") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Animal") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Animals") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Complex Coacervation") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Complex Coacervates") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Microencapsulation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Emulsions") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wall Materials")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "SOCI")).

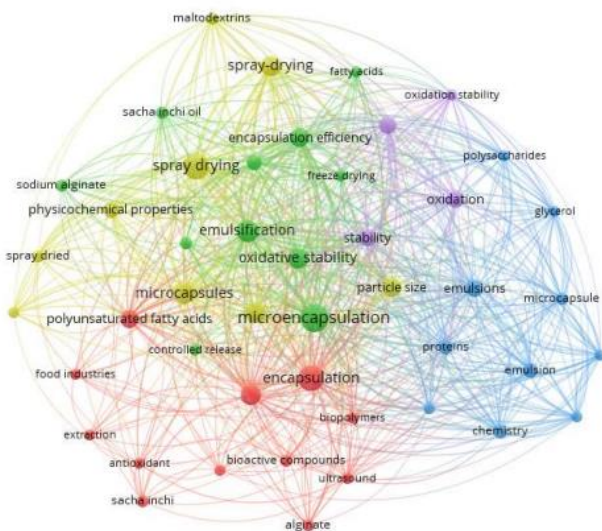
Para lograr estos resultados se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos en el filtrado de artículos. Artículos publicados desde el 2018, se excluyeron las áreas ciencias sociales, genética y bioquímica y biología molecular. Dentro de las palabras claves se limitó la búsqueda a las palabras spray dryng, encapsulation, emulsification, microcapsules, oils and fats, Sacha Inchi oil, Sacha Inchi, microencapsulation, wall materials. Se excluyeron palabras claves asociadas a estudios en animales, coacervation, animals, in vitro study, drugs.

Utilizando la herramienta VOSviewer se sometieron los artículos de búsqueda a un análisis bibliométrico en el cual se analizó específicamente las palabras clave. Como resultado se obtuvieron 5 clústers asociados a las palabras clave que tuvieron mayor densidad en los 87 documentos. El primer clúster estuvo conformado por tres palabras las cuales tuvieron mayor densidad: Encapsulación, aceites y grasas y ácidos grasos poliinsaturados. El segundo clúster estuvo conformado por las siguientes palabras las cuales tuvieron mayor repetición: microencapsulación, estabilidad oxidativa, emulsificación y eficiencia en la encapsulación. El tercer clúster estuvo conformado por las palabras secado por aspersión, microcápsulas, maltodextrinas y microestructura. El cuarto clúster estuvo conformado por las palabras emulsión, microcápsulas, polisacáridos, glicerol y proteínas. Finalmente, el quinto clúster estuvo conformado por las palabras clave oxidación, eficiencia, estabilidad.

Frente a nuestro compuesto de interés, la palabra clave Sacha Inchi observamos que tiene una gran conexión con la palabra secado por aspersión, microencapsulación, estabilidad oxidativa, microestructura, biopolímeros, tamaño de partícula y ultrasonido. Con esta observación evidenciamos las principales variables de estudio que actualmente se están estudiando asociadas a la microencapsulación de aceites poliinsaturados con el uso del secado por aspersión.

Ilustración 5

Clúster Ecuación de búsqueda 1



Fuente: (Elaboración propia con datos presentados en la revisión documental de Scopus).

AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2026 AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "COMP"
) OR EXCLUDE (SUBJAREA , "NURS")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))
AND (EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Nonhuman"))

Resultados

La encapsulación de compuestos activos es un proceso donde se envuelven ingredientes activos (nucleó) dentro de un material secundario (material de pared) para formar microcapsulas con el objetivo de proteger, controlar la liberación y mejorar la estabilidad de los ingredientes liberados (Jafari et al., 2008). Las microcapsulas se clasifican de acuerdo a su tamaño bajo los siguientes parámetros, las macro ($>5000\mu\text{m}$), micro ($1-5000\mu\text{m}$) y nano ($<1\mu\text{m}$). (Jafari et al., 2008). Encapsular el aceite de Sacha Inchi sería una excelente tecnología para preservar sus propiedades funcionales y que sea liberado de manera controlada como ingrediente en la producción de un alimento funcional debido a que este producto es altamente reactivo a la luz y procesos de oxidación por lo tanto lo hacen altamente susceptible a que pierda sus propiedades beneficiosas y sus características sensoriales (Goyal et al., 2022). Para realizar procesos de microencapsulación por secado por aspersión requiere de materiales de pared que sean estables debido a las altas temperaturas que se requieren para secar las gotas atomizadas (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022).

El material de pared para encapsular aceites puede estar compuesto por carbohidratos, proteínas o biopolímeros emergentes, cada uno con propiedades específicas. Entre los más apropiados tenemos los carbohidratos que incluyen los almidones hidrolizados que proporcionan una buena estabilización de emulsiones y son económicos, la goma arábica que ofrece una buena retención de volátiles y estabilidad de la emulsión y las ciclodextrinas que ofrecen una excelente barrera al oxígeno y son efectivas para la inclusión de volátiles aunque son un poco más costosas (Jafari et al., 2008). Entre las proteínas tenemos las proteínas del suero que se utilizan por su capacidad emulsificante aunque su desempeño puede depender del pH y la temperatura y también tenemos los caseinatos que también tienen propiedades emulsionantes favorables (Jafari et al., 2008). Por último una opción alternativa son los materiales combinados con proteínas y carbohidratos como mezclas de proteína de suero y maltodextrina los cuales han mostrado aumentar la retención de volátiles durante el proceso de secado por aspersión (Jafari et al., 2008). Para este estudio se tendrán en cuenta aceites micro encapsulados para fines funcionales, es decir ricos en omega-3 ya que tienen estructuras similares a nuestro aceite de interés y su proceso de micro encapsulación puede aplicarse al aceite de Sacha Inchi. Algunos ejemplos de materiales de pared se mencionan a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. *Materiales de pared utilizados para microencapsular aceites con elevado contenido de aceites poliinsaturados.*

| Material Pared | Ingrediente a encapsular | Composición de la emulsión | Procedimiento | Referencias |
|------------------------------------|--------------------------|--|---|-------------------------------------|
| Lactosa y Caseinato de sodio | Aceite de pescado | <p>*Lactosa: 100 g.</p> <p>*Caseinato de sodio: 100 g.</p> <p>*Agua destilada:400mL para la emulsión y 200 mL para el aceite</p> <p>*Aceite de pescado:50 g.</p> | Se preparó una emulsión estable a partir de 100 g de lactosa, 100 g de caseinato de sodio disueltos en 400 mL de agua destilada. A esta mezcla se le realizó agitación con ultraturrax a 1200 rpm durante 10 min. Posteriormente se adiciono el aceite junto con 250 mL de agua destilada y se sometió a agitación continua hasta obtener emulsión homogénea. | (Vargas-Ramella et al., 2022) |
| Almidón modificado y maltodextrina | Aceite de Sacha Inchi | <p>*Relación de almidón modificado HC-100 y maltodextrina(75:25).</p> <p>*Agua destilada: La necesaria para alcanzar una concentración de</p> | Se prepararon emulsiones (20-30% en peso de sólidos del material de pared) disolviendo el HC-100 y MD en agua destilada, en una proporción constante de 75:25 en masa. Se disuelven los agentes en agua destilada hasta alcanzar una concentración del 30% (w/w). Se adiciona | (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017) |

| | | | | |
|---|------------------------------|--|--|--|
| | | <p>solidos del 30%.(w/w)</p> <p>*Aceite de Sacha Inchi:10% (w/w).</p> <p>*Lecitina de soya: 1%(w/w)</p> | <p>lentamente el aceite de Sacha Inchi a una concentración del 10% junto a la lecitina de soya. Las mezclas de emulsión se homogeneizaron a 15,600 rpm durante 5 min, utilizando un ULTRA-TURRAX T18 básico</p> | |
| <p>Almidón modificado hidrofóbicamente (OSA starch y maltodextrina.</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>*Maltodextrina: 9,25 g por cada 100 g de emulsión.</p> <p>*Almidón modificado:5,75 g por cada 100 g de emulsión</p> <p>*Aceite de Sacha Inchi: se mezclaron 2 g con una solución surfactante y 20 ml de solución de zeína.</p> <p>La solución surfactante se preparó con la siguiente composición.</p> <p>Tween 80: 0.067 g por cada 100 mL de solución.</p> | <p>La solución surfactante se preparó disolviendo los componentes en agua destilada y ajustando el pH a 10.0 antes de mezclarla con las soluciones de zeína y el aceite de Sacha Inchi para formar la emulsión.</p> <p>El procedimiento se realizó en un volumen total de 100 mL de agua destilada a 25 ± 3 °C, donde se mezclaron estos ingredientes y se homogeneizaron a 15,000 rpm durante 5 min para asegurar una emulsión adecuada antes del proceso de secado por aspersión. Se utilizó un equipo Ultra-Turrax (modelo T25, Ika Works Inc.</p> | <p>(Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022)</p> |

| | | | | |
|--|------------------|--|---|-----------------------|
| | | <p>Lecitina: 0.033 g por cada 100 mL de solución.</p> <p>Citrato de sodio: 0.01 mol/L, que se utilizó como parte de la solución.</p> <p>Ácido cítrico: 79,6 μmol/L, también incluido en la solución.</p> | | |
| Maltodextrina y aislado de proteína de suero | Aceite de linaza | <p>Solución aceite de linaza y antioxidante: 500 mL de esteres de ácido sinapico en 1 litro de aceite de linaza.</p> <p>Maltodextrina y aislado de proteína de suero en una relación 4:1 en peso.</p> <p>Agua destilada para que la</p> | <p>Se agregó 10 g de aceite de linaza enriquecido con el fenolípido o con BHT a 240 mL de la solución portadora y se agitó durante 30 min adicionales. Luego, esta mezcla se homogeneizó a 15,000 rpm durante 5 min usando un homogeneizador rotor-estator.</p> | (Arslan et al., 2024) |

| | | | | |
|--|-------------------|--|---|----------------------|
| | | solución del material de pared esté a una concentración del 20% | | |
| Maltodextrina y leche en polvo descremada. | Aceite de cáñamo. | <p>Relación entre leche en polvo descremada y maltodextrina: 1:1.</p> <p>Contenido de aceite (20%)</p> <p>Sólidos (30%)</p> <p>Agua destilada 50%</p> | <p>Los materiales de recubrimiento se disolvieron en agua destilada y se almacenaron a 4 °C durante 10–12 h para permitir una hidratación completa. Se añadió el aceite (20 %, p/p) a la mezcla (materiales de recubrimiento y agua destilada) y, posteriormente, todas las emulsiones se homogeneizaron a 24 000 rpm durante 7 min utilizando un homogeneizador (IKA, T-25, Alemania).</p> | (Cevik et al., 2024) |

| | | | | |
|--|-----------------------|---|--|-----------------------------|
| <p>Polvo de arroz para bebe-Infant rice Powder-(IRP)</p> <p>Maltodextrina.(MD)</p> <p>Concentrado de proteína de suero (WPC)</p> | <p>Aceite de alga</p> | <p>Proporción de 1:3:1 (IRP:MD:WPC):25%</p> <p>Emulsionante:octenil succinato de almidón sódico (SSOS): 1,75%.</p> <p>Monoglicèrido: 1,75%</p> <p>Agua destilada: 41.5% de la solución de materiales de pared.</p> <p>Aceite de alga: 25%</p> | <p>Hidratación de materiales pared: Se mezclaron los materiales de pared (infant rice powder, maltodextrina y concentrado de proteína de suero) junto con el emulsificador (octenil succinato de almidón sódico, SSOS) en agua destilada que se había calentado a 60 °C. Esta mezcla se mantuvo bajo agitación mecánica (1500 rpm) durante 2 h para permitir la hidratación.</p> <p>Preparación de la fase acuosa: El aceite de algas rico en DHA se calentó a 90 °C, y se añadió un emulsificador adicional (monoacylglyceride, MAC) a esta fase oleosa mientras se agitaba.</p> <p>Formación de la emulsión: Luego, la fase oleosa se incorporó gota a gota a la fase acuosa bajo agitación mecánica continua a 1500 rpm, manteniendo la temperatura entre 50 y 60 °C. Esta emulsión se mantuvo bajo agitación vigorosa durante 2 a 3 h para asegurar una adecuada encapsulación del aceite dentro de los materiales de pared.</p> | <p>(Zhang et al., 2024)</p> |
|--|-----------------------|---|--|-----------------------------|

| | | | | |
|--|------------------------------|---|---|--|
| <p>Maltodextrina (MD)</p> <p>Almidón modificado.(MS)</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Maltodextrina: 7,5%</p> <p>Almidón Modificado :7,5%</p> <p>Aceite de Sacha Inchi: 30% de la masa total de los materiales de pared.</p> <p>Agua destilada necesaria para completar el 100%.</p> | <p>Inicialmente se mezclaron los ingredientes utilizados para preparar el material de pared con agua destilada mediante agitación a una temperatura de 25 ± 3 °C por 12 h. Des pues se adicionó el aceite de Sacha Inchi y la mezcla fue homogenizada a 15000 rpm por 5 min en un baño de enfriamiento a 5 °C usando un homogenizador ultra turrax T25 Ika Works.</p> | <p>(Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022)</p> |
| <p>Almidón modificado HI-CAP®-100 (H)</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Almidón modificado: 240 g.</p> <p>Aceite Sacha Inchi: 60 g</p> <p>Agua destilada:700 g</p> | <p>La preparación del almidón modificado se preparó mediante la adición de agua destilada de acuerdo con las instrucciones establecidas por el fabricante Ingredion. Las gotas de aceite de Sacha Inchi se agregaron por goteo al recipiente donde se encontraba la emulsión utilizando un homogenizador modelo Silverson L5M marca Silverson Machines a 9000 rpm por 10 min a una temperatura menor de 10°C.</p> | <p>(Landoni et al., 2020)</p> |
| | | | | |

| | | | | |
|---|------------------------------|---|---|--|
| <p>Maltodextrina Caseinato de sodio</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Aceite de semilla de Sacha Inchi (SIO): 5% (w/w) .</p> <p>Material de pared (maltodextrina:sodium caseína): 10% (w/w) en una proporción de 85:15</p> <p>Surfactantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tween 20: 1% (w/w) • Span 80: 0.5% (w/w) <p>Agua: hasta completar el 100% (w/w)</p> | <p>Las emulsiones se prepararon en dos etapas, la pre-homogenización y la homogenización. En la pre homogenización se disolvieron por separado los materiales de pared (maltodextrina y caseinato de sodio) en agua destilada bajo agitación constante durante 3 min. En la homogenización se mezclaron las soluciones de materiales de pared con el surfactante Twen20. Luego se añadió aceite de Sacha Inchi que previamente había sido mezclado con el span 80. Las emulsiones fueron obtenidas bajo diferentes técnicas de homogenización.</p> <p>Homogeneización de alta velocidad: Se utilizó un mezclador a 18,000 rpm durante 10 min.</p> <p>Homogeneización convencional: Se utilizó un batidor de inmersión a velocidad turbo durante 5 min.</p> <p>Homogeneización con ultrasonido: Se utilizó un procesador ultrasónico con una amplitud del 35%, 750 W, aplicando un pulso de 20 s encendido y 40 s apagado durante 30 min.</p> | <p>(Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2023)</p> |
|---|------------------------------|---|---|--|

| | | | | |
|---|--------------------|---|---|------------------------|
| | | | . | |
| Almidón modificado Alginato de sodio. | Aceite de Chía. | Lecitina de soja: 0,06 g. Agua destilada: 346,39 g. Aceite de chía: 1,4 g. Almidón modificado: 7,54 g. Alginato de sodio: 7 g. Agua destilada para SA: 343 g. | <p>Preparación de la emulsión de aceite en agua.(Fase interna)</p> <p>Se dispersaron 0,06 g de lecitina de soja (SL) en 3,39 g de agua destilada a 40 °C, agitando a 500 rpm durante 20 min.</p> <p>Esta dispersión se añadió a 1,4 g de aceite de chía (PCO) y se homogeneizó a 20,000 rpm durante 2 min utilizando un homogeneizador (Polytron PT-2100).</p> <p>Posteriormente, se disolvieron 7.54 g de Capsul (un almidón modificado) en 22,56 g de agua destilada y se mezcló con la emulsión de PCO para formar la fase interna (PCO-Capsul).</p> <p>Preparación de la fase externa.</p> <p>Se dispersaron 7 g de alginato de sodio (SA) en 343 g de agua destilada bajo agitación magnética durante 2 h.</p> <p>Relación de alimentación. Se utilizó una relación de alimentación interior: exterior de 1:10 para elaborar la</p> | (Alvarez et al., 2024) |

| | | | | |
|--|--------------------------|---|---|--------------------------|
| | | | <p>capa externa, en concordancia con las condiciones óptimas de micro encapsulación.</p> <p>Esta emulsión se sometió a un proceso de secado por pulverización utilizando un nozzle de tres fluidos (3-N), que permitió obtener las macropartículas encapsuladas.</p> | |
| <p>Proteína de guisante</p> <p>Maltodextrina</p> | <p>Aceite de camelia</p> | <p>Proteína de guisante y maltodextrina en una proporción 1:2.</p> <p>Material pared: 5%. (w/V)</p> <p>La relación de alimentación entre el material de pared y núcleo es de 1.5:1 en el secador por aspersión.</p> | <p>Se utilizó una mezcla de proteína de guisante y maltodextrina, que fue disuelta a una concentración del 5% (w/v) en agua destilada. La mezcla fue agitada a una temperatura de 80 °C y un pH de 8.5 durante un periodo de 30 min. Después de la mezcla inicial, se añadió el aceite de semilla de camelia (CSO) a la solución. La mezcla se agitó durante 20 min, y luego se procesó en un mezclador de alta velocidad a 12,000 rpm durante 2 min para formar una emulsión. Se llevaron a cabo dos ciclos de homogenización en un homogeneizador de alta presión a 50 MPa para asegurar una emulsión porosa y estable.</p> | <p>(Hu et al., 2024)</p> |
| | | | | |

| | | | | |
|--|------------------------------|---|---|-------------------------------------|
| <p>Goma arábiga</p> <p>Inulina</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>100 g de Goma arábiga e inulina en una proporción (0,854:0,146).</p> <p>100 mL de agua destilada.</p> <p>1,5 g de polisorbato 80 como agente emulsionante</p> <p>30 gr de aceite de Sacha Inchi.</p> | <p>La solución emulsión se preparó sometiendo a la mezcla de goma arábiga, agua destilada e inulina a una agitación constante por 12 h. Una vez realizado este proceso se adicionó el polisorbato y el aceite de Sacha Inchi y sometió la solución a un proceso de homogenización utilizando un homogenizador ultra Turrax modelo WT-500 por 3 min a 18000 rpm.</p> | <p>(Rengifo et al., 2024)</p> |
| <p>Goma arábiga.(GA)</p> <p>Maltodextrina.(MD)</p> <p>Aislado de proteína de suero.(WPI)</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>La relación de agentes encapsulantes (GA:MD:WPI) para la preparación fue de: (3:13:3).</p> <p>Concentración de sólidos:</p> | <p>Luego de ajustar la emulsión con las concentraciones adecuadas se sometió la mezcla a un proceso de homogenización con un equipo marca Silverson (modelo L5M-A) a 9000 rpm por un tiempo de 10 min. La temperatura de la mezcla se la tuvo controlada durante este proceso asegurando que no supere los 25°C</p> | <p>(N. Chasquibol et al., 2023)</p> |

| | | | | |
|---------------|-----------------------|---|--|------------------------------|
| | | <p>30%.</p> <p>Aceite de Sacha Inchi: 1 g de aceite por cada 3 g de agente encapsulante.</p> <p>Extracto de piel de camu camu como agente antioxidante: 200 ppm.</p> <p>Agua destilada.</p> | mediante el uso de baño refrigerado. | |
| Goma arábica. | Aceite de Sacha Inchi | <p>Aceite de sachá inhci: 18% de los sólidos de la emulsión.</p> <p>Goma arábica: El artículo no especifica la cantidad exacta.</p> <p>Agua destilada: El artículo</p> | Para obtener una emulsión homogénea se utilizó un homogenizador marca silverson L5M-A-England el cual se sometió a 9000 rpm por 10 min | (N. Chasquibol et al., 2022) |

| | | | | |
|--|------------------------------|--|---|--|
| | | <p>no especifica la cantidad exacta.</p> <p>Extractos de cascara de mango y camu camu: 110 ppm por cada uno de los extractos.</p> | | |
| <p>Hi- cap Ingredion</p> <p>Capsul Ingredion</p> <p>Goma arábiga.</p> <p>Maltodextrina</p> <p>Aislado de proteína de suero</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Concentración de solidos: 27%</p> <p>Agua destilada:73%</p> <p>Aceite de Sacha Inchi: 20% de los sólidos totales utilizados en la emulsión.</p> | <p>El prepararon emulsiones con cada uno de los materiales de recubrimiento, también con la combinación binaria goma arabiga y maltodextrina y una combinación ternaria de goma arábiga, maltodextrica y proteína aislada de suero.</p> <p>La maltodextrina , capsul y hi-cap se mantuvieron a una temperatura controlada de 25°C hasta su completa dilución. La goma arábiga para diluirla se mantuvo en agitación constante durante 12 h hasta completar dilución. El aislado de proteína de suero se calentó a 80°C para desnaturalizar parcialmente la proteína y abrir</p> | <p>(N. A. Chasquibol et al., 2019)</p> |

| | | | | |
|--|------------------------------|---|---|--------------------------------|
| | | | <p>las cadenas globulares lo que facilita como material de recubrimiento. Las emulsiones se formaron a una temperatura baja para evitar degradación del aceite y asegurar una emulsión estable, utilizando un homogenizador Silverson LSM-A operado a 9000 rpm por 10 min.</p> | |
| <p>Caseinato de sodio</p> <p>Maltodextrina</p> | <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Relación 1:1 Maltodextrina –caseinato de sodio.</p> <p>Relación 3:1. Maltodextrina –caseinato de sodio.</p> <p>Relación 8,5:1. Maltodextrina –caseinato de sodio.</p> <p>Concentración de la emulsión 20 %W/V.</p> | <p>Los materiales pared se disolvieron en agua destilada y se agitaron mediante el uso de un agitador magnético, se dejaron reposar a una temperatura de 6°C durante 12 h para asegurar una hidratación completa. Posteriormente se adiciono el aceite de Sacha Inchi y se homogenizo a 6600 rppm utilizando un equipo ultra Turrax T25</p> <p>La mejor formulación, según los resultados corresponden a la relación 8,5:1 de maltodextrina y caseína de sodio ya que resulto superior e cuanto a estabilidad oxidativa del aceite de Sacha Inchi microencapsulado.</p> | <p>(Avendaño et al., 2024)</p> |

| | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|---|---|---------------------|
| | | Aceite de Sacha Inchi:10%V/V | | |
| Maltodextrina Caseinato de sodio | Aceite de Sacha Inchi | Aceite de Sacha Inchi: 5%. Relación Maltodextrina: Caseinato de sodio:80:20 Material pared: 10%. Agua destilada:83,5% Tween 20: 1%. Span 80:0,5% | <p>La maltodextrina y el caseinato de sodio se mezclaron mediante la adición de agua destilada bajo agitación constante en una placa calefactora a 25°C durante 30 min. Una vez disueltos los materiales se adiciono el emulsificante Tween 20 para formar una solución homogénea. El emulsificante span 80 se mezcló con el aceite de Sacha Inchi de manera preliminar, posteriormente se mezcló la fase acuosa y la fase oleica para formar la emulsión.</p> <p>La homogenización de la emulsión se llevó a mediante dos maneras.</p> <p>Homogenización convencional. Se utilizó una batidora de mano Quick Chef modelo KML-IM50N01, Kalley a dos velocidades, 20 y turbo.</p> | (Rodr & Rodr, 2022) |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | <p>Homogeneización con sonda de ultrasonido. Se utilizó un homogeneizador por ultrasonido Sonics Materials VCX 750 (Sonics & Materials) con una amplitud del 35%, 750 W de potencia y un pulso de 20 segundos encendido y 40 segundos apagado. El tiempo de homogeneización fue de 15 y 30 mi.</p> <p>La homogeneización con ultrasonidos redujo significativamente el tamaño de las gotas de aceite, lo que contribuyó a una mayor estabilidad de la emulsión.</p> | |
|--|--|--|--|--|

Fuente: (Elaboración propia)

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 2 podemos evidenciar que existen alternativas de materiales pared que pueden ser usados para llevar a cabo procesos de micro encapsulación por secado de aspersión de aceites ricos en ácidos grasos omega 3 y ácidos grasos poliinsaturados.

Como primera alternativa tenemos al almidón modificado que puede ser versátil en combinación con otros materiales de pared como por ejemplo el alginato de sodio, goma arábica y la maltodextrina. En términos de eficiencia podemos decir que el almidón cuando se utiliza mezclado con maltodextrina o alginato de sodio es una alternativa adecuada ya que pueden tener eficiencias de micro encapsulación elevadas que superan el 95% en algunos experimentos, esta eficiencia se ve incrementada cuando la concentración de solidos se aumenta (30%) y se disminuyó la concentración aceite (10%) en la en la preparación de la emulsión (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017). En términos de humedad todas microcápsulas tuvieron una humedad inferior al 6% sin embargo las combinaciones con maltodextrina obtuvieron humedades más bajas (Max 2,7%) lo que sugieren que este tipo de microcápsulas tendrían una mayor estabilidad durante el almacenamiento ya que una baja humedad reduce el riesgo de degradación oxidativa del aceite encapsulado (Alvarez et al., 2024). Con respecto a la morfología las microcápsulas producidas con maltodextrina y almidón modificado tuvieron una morfología más uniforme y esférica, lo que es ideal para una liberación controlada con diámetros de partículas desde 2,4 μm . En términos de estabilidad oxidativa las combinaciones que usaron almidón modificado y maltodextrina mostraron una excelente protección contra la oxidación, especialmente en formas hidrofóbicas como el OSA starch o el HI-CAP®-100 (Landoni et al., 2020)(Suwannasang, Zhong, Thumtharuk, Uttapap, et al., 2022). Por ultimo en términos de liberación la mejor combinación estuvo conformada entre el almidón y el polímero alginato de sodio porque se demostró que es un polímero que permanece intacto en el estómago (pH ácido) pero se hincha y/o desintegra en el intestino delgado (pH alcalino), liberando los compuestos activos (Alvarez et al., 2024).

La segunda alternativa es la maltodextrina siendo el material de pared que tiene mayor aplicabilidad para la microencapsulación de este tipo de aceites mediante secado por

aspersión. La maltodextrina ha sido utilizada como material pared en conjunto con otras sustancias como almidón modificado, proteína aislada de suero, leche en polvo descremada, polvo de arroz para bebe, caseinato de sodio, proteína de guisante, goma arábica, y Hi capsul Ingredient. En términos de eficiencia la combinación más adecuada es mediante el uso de almidón modificado ya que se alcanzan eficiencias mayores al 93% (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017) (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022)(N. Chasquibol et al., 2022) (Landoni et al., 2020), posteriormente la combinación con leche en polvo descremada también es una alternativa para alcanzar rendimientos mayores al 82% (Cevik et al., 2024) y por último la combinación con aislado de proteína de suero y goma arábica alcanzan rendimientos mayores al 80% (N. Chasquibol et al., 2023). En términos de estabilidad oxidativa las combinaciones que incluyen almidón modificado y maltodextrina proporcionan una excelente protección contra la oxidación, especialmente en formas hidrofóbicas como el OSA starch o el HI-CAP®-100 (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022; Landoni et al., 2020).

Con el fin de mejorar la estabilidad oxidativa se encontraron propuestas en las que se adicionó antioxidantes a las emulsiones en las cuales se utilizó maltodextrina obteniendo excelentes resultados de estabilidad con respecto a las emulsiones que nos las usaron, por ejemplo se utilizaron agentes antioxidantes con excelentes resultados como ácido sinápico (Arslan et al., 2024), el extracto de piel de camu camu o antioxidante sintético Butilhidroxitolueno BHT (N. Chasquibol et al., 2023). Con respecto a la morfología las microcapsulas obtenidas a partir de maltodextrina tienen una forma esférica, tamaño uniforme con diámetros de partícula que varían de acuerdo a la combinación utilizada. Por último el perfil de liberación no fue tenido en cuenta en todos las investigaciones sin embargo, se obtuvieron buenos resultados en simulaciones de digestión *in vitro* en las combinaciones con caseinato de sodio (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2023), proteína de guisante (Hu et al., 2024).

En tercer lugar tenemos la goma arábica que se ha estudiado en combinación con almidón modificado, maltodextrina, inulina, aislado de proteína de suero y Hicapsul de ingredient. En términos de eficiencia este material también presenta buenos resultados, como por ejemplo 80% cuando se combina con maltodextrina y aislado de proteína de

suero (Chasquibol et al., 2023), 80% cuando se combina con inulina (Rengifo et al., 2024), 94 % cuando se utiliza sin combinarse (Chasquibol et al., 2022). En términos de estabilidad oxidativa este material tuvo mejores resultados cuando se le adiciono antioxidantes como por ejemplo extracto de piel de mango y Antioxidante Butilhidroxitolueno (Chasquibol et al., 2022) o cuando se trabajó con el material pared HI Capsul Ingredient (Landoni et al., 2020).

La combinación entre lactosa y caseinato de sodio obtuvo una eficiencia de microencapsulación del 77%, la morfología de las microcapsulas fue adecuada ya que estas no presentaron fisuras, y de forma esférica lo que contribuye a que sean estables en el tiempo. Con respecto al perfil de liberación, dado que las macropartículas mostraron una morfología esférica con una superficie continua y sin fisuras, es probable que la liberación del aceite de pescado esté controlada por la degradación del material de pared o por la difusión a través de la matriz de la macropartícula. Esto sugiere que la liberación podría ser lenta y gradual, lo que es beneficioso para aplicaciones en alimentos, donde se busca una liberación sostenida de los ácidos grasos omega-3 (Vargas-Ramella et al., 2022). Se debe hacer una especial mención al material de pared almidón comercial marca Hi capsul de la empresa ingredient el cual obtuvo excelentes resultados en cuando a eficiencia de microencapsulación 97% y una estabilidad oxidativa superior en comparación con la goma arábica y la maltodextrina (Chasquibol et al., 2019).

Para mejorar la bioaccesibilidad del aceite de sachá inchi puede ser usado el alginato de sodio como un agente de recubrimiento externo en las macropartículas de aceite microencapsuladas. Su papel principal es mejorar la eficiencia de encapsulación y controlar la liberación del aceite en el intestino, esto debido a que es un polímero que permanece estable en condiciones ácidas (como en el estómago) pero se hincha y/o se desintegra en condiciones alcalinas (como en el intestino), lo que permite una liberación controlada del aceite en el intestino delgado por lo tanto resulta en una mayor bioaccesibilidad de los ácidos grasos omega-3 durante la digestión (Alvarez et al., 2024).

Si se requiere mejorar la estabilidad de las emulsiones, obtener una mejor eficiencia de microencapsulación y proteger al aceite de la oxidación es posible usar materiales surfactantes los cuales se adiciona en el momento de preparación de la emulsión. Un ejemplo es la lecitina de soya que se utiliza como agente emulsionante en el proceso de microencapsulación del aceite de Sacha Inchi. Su función principal es estabilizar la emulsión, es decir, ayudar a mezclar y mantener homogéneamente dispersas las gotas de aceite en la fase acuosa durante la formación de la emulsión antes del secado (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017). El surfactante Tween 80: también puede ser usado emulsionante, estabilizando la emulsión al reducir la tensión superficial entre el aceite y el agua así como también el Citrato de sodio el cual regula el pH y actúa como agente secuestrante, mejorando la estabilidad de la emulsión y protegiendo el aceite de la oxidación (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022). El surfactante octenil succinato de almidón sódico (SSOS) que es un derivado del almidón modificado puede utilizarse en conjunto con el tensoactivo Monoglicerol y también ayuda a reducir la tensión superficial entre el aceite y el agua, lo que facilita la formación de una emulsión estable (Zhang et al., 2024). Por último los surfactantes Span 80 (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2023), Polisorbato 80 (Rengifo et al., 2024) y Caseinato de sodio (Rodr & Rodr, 2022) también son opciones que pueden utilizarse como sustancias estabilizadoras.

Tabla 3. Condiciones de operación del equipo secador por aspersión durante el proceso de micro encapsulación de aceites con elevado contenido de ácidos grasos poliinsaturados.

| Ingrediente a encapsular | Tipo de secador por aspersión | Condiciones de operación | Resultados. | Referencias |
|--------------------------|-------------------------------------|---|---|---|
| Aceite de pescado | Modelo B 290 Buchi | *Tasa de alimentación: 9 mL/min (30%) *Temperatura de entrada: 145°C±2 *Aspiración: 80%(32 m ³ /hr) | *Rendimiento de microencapsulacion:77,04±1,80%. *Tamaño de partícula: 10µm. | (Vargas-Ramella et al., 2022) |
| Aceite de Sacha Inchi | BÜCHI mini spray dryer, modelo B191 | *Temperatura de entrada :150 °C *Tasa de alimentación : 0.8 L/h * Flujo de aire: 35 L/min | *Eficiencia de Encapsulación (EE): 88,87% * Rendimiento del Proceso (PY): 53,27% * Tamaño de Partícula (d4,3): 11,91 µm * Higroscopicidad: 5,56% | (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022) |
| Aceite de Sacha Inchi | Modelo Mini Spray Dryer Büchi B-290 | *Temperatura de entrada:170°C. *Presion:6 bar. *Tasa de alimentación: 3 mL/min. *Caudal volumétrico aire de secado: 35 m ³ /hr Caudal volumétrico de aire de | *Eficiencia de microencapsulacion:96,3%±0,3%. *Eficiencia del proceso:50,5%±1,4. *Humedad:1,7% *Actividad del agua:0,278±0,005 *Porosidad 36.82% ± 1.28 | (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017) |

| | | | | |
|-----------------------|---|---|--|---|
| | | atomización: 357 Lt/hr | | |
| Aceite de Sacha Inchi | Mini secador por aspersión (modelo B191, BÜCHI Corp | *Temperatura de Entrada: 150 °C. * Temperatura de Salida: 90 °C. * Tasa de Alimentación: 0.8 L/h. * Flujo de Aire Atomizador: 35 L/min. | No informa | (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022) |
| Aceite de linaza | Secador por aspersión de laboratorio marca Unopex. | * Temperatura de entrada: 180 °C * Temperatura de salida: 80 °C *Caudal de alimentación: 12 mL/min | Eficiencia de la microencapsulacion:67,2%-71% | (Arslan et al., 2024) |
| Aceite de alga | Secador por aspersión modelo JN-10HC | * Temperatura de entrada: 180 °C *Temperatura de salida: 80 °C. * Velocidad de la bomba de alimentación: 25 mL/min. * Velocidad de atomización: 50 rpm | *Eficiencia de microencapsulacion:(85.20 ± 6.03%) *contenido de aceite en la superficie (4.85 ± 1.64%) para solución emulsificante M9. *Tamaño de partícula 0,6-1,0 µm. *Higroscopicidad 4.93 ± 0.29%. | (Zhang et al., 2024) |
| | | | | |

| | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|--|---|------------------------|
| Aceite de Sacha Inchi | Equipo de Laboratorio Büchi B-290 | <p>Boquilla de atomización: 0,7 mm</p> <p>Caudal de aire: $31,5 \frac{m^3}{hr}$</p> <p>Presión del compresor: 50 mBar.</p> <p>Temperatura de entrada: 170 °C</p> <p>Temperatura de salida: 70 °C</p> <p>Caudal de alimentación: 0,5 L/h (litros por hora)</p> | <p>Para el aceite de Sacha Inchi de la especie <i>Plukenetia huayllabambana</i> (SIHO), la eficiencia de microencapsulación fue del $93.3 \pm 0.5\%$.</p> <p>Para el aceite de la especie <i>Plukenetia volubilis</i> (SIVO), la eficiencia de microencapsulación fue del $96.5 \pm 0.7\%$</p> <p>Tamaño de partícula: (diámetro medio de DeBroukere, D4,3): 2,7(0,3) μm para la especie <i>Plukenetia huayllabambana</i>.</p> <p>Tamaño de partícula: (diámetro medio de DeBroukere, D4,3): 2,6(1,9) μm para la especie <i>Plukenetia volubilis</i>.</p> <p>Para <i>Plukenetia huayllabambana</i> (SIHO), el contenido de humedad fue de $3.20 \pm 0.03\%$.</p> <p>Para <i>Plukenetia volubilis</i> (SIVO), el contenido de humedad fue de $2.40 \pm 0.28\%$</p> | (Landoni et al., 2020) |
| | | Se tuvieron dos condiciones de | La condición que tuvo mejor resultado fue el uso | |

| | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---|--|---|
| Aceite de Sacha Inchi | Equipo de Laboratorio Büchi B-290 | <p>operación:</p> <p>Temperatura de entrada 1:150 °C Temperatura de entrada 2:170°C Temperatura de salida 1:120°C Temperatura de salida 2:130°C. Porcentaje de succion:90% (35 m³/hr) Tasa nominal de bombeo peristáltico:10%(3 mL/min)</p> | <p>de una temperatura de entrada de 170 °C y una homogenización con ultrasonido en la preparación de la emulsión. Las microcapsulas mostraron menores valores de humedad, menor actividad de agua, higroscopicidad y tiempos de solubilidad más cortos lo que traduce en un producto más estable en el almacenamiento y mayor vida útil. Por ultimo las microcapsulas producidas bajo estas condiciones tuvieron una mejor absorción de omega -3 en estudios in vitro.</p> | (Rodríguez-Cortina & Hernández-Carrión, 2023) |
| | | <p>Fase interna (PCO-Capsul): 0.12 mL/min Fase externa (SA): 1.2 mL/min. Flujo de aire: 600 L/h. Presión de atomización: 20 psi. Temperatura del aire de entrada: 114 °C Para la alimentación de las dos fases</p> | <p>Actividad el agua (aw) en el sistema PCO-Capsul/SA de 0.136</p> <p>*Eficiencia de la microencasulaciòn: 95.2 ± 2.5%.</p> | |

| | | | | |
|----------------|--------------------------------------|---|---|------------------------|
| Aceite de chía | Secador por aspersión B-290 de Büchi | de manera separada, se utilizó una boquilla de tres fluidos (3-N). Este tipo de boquilla permite la atomización simultánea de dos soluciones diferentes, donde la fase interna (emulsión de aceite de chía) se introduce a través de un nozzle central, mientras que la fase externa (solución de alginato de sodio) se aplica desde los nozzles periféricos. Esta configuración es ventajosa porque permite cubrir adecuadamente la emulsión central con el recubrimiento externo durante el proceso de atomización, mejorando así la formación de macropartículas y la encapsulación de los compuestos. | <p>*Diámetro de partícula bajo condiciones óptimas: $6.86 \pm 3.01 \mu\text{m}$.</p> <p>*Diámetro de partícula las macropartículas de PCO-Capsul con recubrimiento de alginato de sodio (SA): $8.41 \pm 3.04 \mu\text{m}$</p> <p>*Higroscopicidad fue de $50.0 \pm 2.8\%$.</p> | (Alvarez et al., 2024) |
| | | Tamaño de boquilla: se utilizó una boquilla de 2.8 mm de diámetro. | *Eficiencia de Microencapsulación: Se alcanzó máxima eficiencia del 92.16% en la combinación | |

| | | | | |
|------------------|-----------------------------------|---|---|----------------------|
| Aceite de cáñamo | Secador por aspersión Buchi B-290 | <p>Temperatura de entrada: aproximadamente 180 °C.</p> <p>Tasa de flujo de alimentación: 8 mL/min</p> <p>Flujo de aire: se controló a una tasa de 600 L/h</p> | <p>de leche en polvo descremada y maltodextrina.</p> <p>*Rendimiento de Microencapsulación: con combinación leche en polvo descremada y maltodextrina :50,58%.</p> <p>Estabilidad Oxidativa: Las microcapsulas SMP:MD mostraron una mayor estabilidad oxidativa en comparación con otras combinaciones.</p> <p>Propiedades Fisicoquímicas: Las microcapsulas resultantes de esta combinación mostraron características fisicoquímicas favorables, incluyendo una mejor estabilidad térmica, lo que sugiere que esta combinación de recubrimiento no solo es eficiente en la protección del aceite, sino que también mejora la estabilidad general del producto.</p> | (Cevik et al., 2024) |
| | | Boquilla de fluido doble de 0,5 mm. | Eficiencia de encapsulación:79,69% | |

| | | | | |
|-------------------|---|---|--|----------------------|
| Aceite de camelia | Secador por aspersión BUCHI modelo B-290. | <p>La relación de alimentación entre el material de pared y núcleo fue de 1.5:1.</p> <p>Temperatura de entrada: 180 °C,</p> <p>Caudal de bomba peristáltica:10 mL/min</p> <p>Presión de aire del compresor: 0,1 MPa</p> | <p>Tamaño de partícula: <600 nm.</p> <p>Morfología: Las microcápsulas fueron descritas como esféricas, con superficies lisas y sin rupturas, lo que sugiere una encapsulación efectiva y una buena integridad estructural.</p> <p>Se observó que la microencapsulación no alteró significativamente la composición de ácidos grasos del aceite, manteniéndose el contenido de ácidos grasos insaturados en aproximadamente el 90% .</p> | (Afzal et al., 2022) |
| | | <p>La emulsión fue alimentada al equipo bajo las siguientes condiciones de operación.</p> <p>Diámetro de la boquilla:1.0 mm</p> <p>Temperatura de entrada: 163°C .</p> | <p>Eficiencia de encapsulación del 80,96%. Temperaturas más altas mejoran la eficiencia de microencapsulación.</p> <p>Morfología: Microcápsulas con formas esféricas, cóncavas, agrietamiento mínimo y tenían la presencia de poros en la superficie. Estos</p> | |

| | | | | |
|-----------------------|--|---------------------------------|--|------------------------|
| Aceite de Sacha Inchi | Secador por aspersión LabPlant SD-Basic | Caudal del aire : $73m^3/h$ | <p>resultados indican que las microcapsulas son capaces de proteger el aceite de Sacha Inchi de las condiciones ambientales.</p> <p>El indicador de oxidación se midió con el valor de peróxido el cual se midió por cuatro semanas. Este valor reportó un incremento más lento en el valor de peróxido en comparación con el aceite no encapsulado, sugiriendo que el proceso de microencapsulación a través del secado por aspersión mejoró significativamente la estabilidad oxidativa del aceite en comparación con el SIO no encapsulado.</p> | (Rengifo et al., 2024) |
| Aceite de | Secador por | Temperatura de entrada de aire: | <p>El contenido de humedad: Entre 3,74% y 4,32%. Las mayores humedades se presentaron en las microcapsulas que se les adicione extractos antioxidantes naturales.</p> <p>Eficiencia de la microencapsulación: entre el</p> | (Alarcón et al., |

| | | | | |
|------------------------|---|--|---|------------------------------|
| Sacha Inchi | aspersión Büchi, modelo B- 290. | 140°C. Temperatura de salida: 70°C Cauda de alimentación: 55mL/min. | 90,25% y el 98,28%. Diámetros de las microcapsulas: entre 1,6 y 20,9 µm. Morfología: La distribución de las microcapsulas estuvo monodispersa, presentaron formas redondeadas y cóncavas. | 2020) |
| Aceite de Sacha Inchi. | Secador por aspersión Büchi, modelo B- 290. | Temperatura de entrada de aire: 140°C. Temperatura de salida: 70°C Cauda de alimentación: 55mL/min. Diámetro de boquilla 0,7 mm El caudal de aire de secado fue de 55 | Eficiencia de Microencapsulacion: Entre el 94,17% y 95% para las formulaciones evaluadas a las cuales se les adicionó diferentes concentración de extractos de cascaras de mango y camu y camu. Contenido de humedad: entre 3,79% y el 4,24%. Contenido de omega -3: Entre 56,56% y 57,90% y una reducción del 1% con respecto al aceite de Sacha Inchi original. | (N. Chasquibol et al., 2022) |

| | | | | |
|------------------------------|---|--|---|--|
| | | <p>m³/h</p> <p>Presión del compresor del aire: 0,06 Mpa</p> | <p>Actividad antioxidante de las microcapsulas: entre 75,29% y 91,76%.</p> <p>Diámetro volumétrico de las microcapsulas: entre 1,6 y 20,9 μm. y su distribución fue monodispersa</p> | |
| <p>Aceite de Sacha Inchi</p> | <p>Secador por aspersión spray-dryer Büchi, B-290</p> | <p>Temperatura de entrada de aire: 150°C.</p> <p>Temperatura de salida del aire: 80°C</p> <p>Tasa de flujo de aire: 55mL/min.</p> <p>Tasa de flujo de la bomba peristaltica: 12 mL/min</p> | <p>Perdida de ácidos grasos omega 3: 6,2% utilizando aceite de Sacha Inchi utilizando la combinación de maltodextrina, goma arábica y proteína de suero.</p> <p>Perdida de ácidos grasos omega 3: 3% utilizando encapsulante Capsul de ingredion</p> <p>No se detectó la formación de ácidos grasos trans.</p> <p>Después de la microencapsulación se detectaron se detectaron polímeros triglicéridos lo que indica que el secado por aspersión indujo la producción</p> | <p>(N. A. Chasquibol et al., 2019)</p> |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | <p>Diámetro de la boquilla de atomización: 0,7 mm.</p> | <p>de estos compuestos.</p> <p>Se presentó una pérdida de tocoferoles entre el 15% y 30% en el aceite total. Las pérdidas fueron mayores para el γ-tocoferol en comparación con el δ-tocoferol, lo que sugiere que el γ-tocoferol es menos estable bajo las condiciones del proceso.</p> <p>Las concentraciones de fitoesteroles se mantuvieron constantes.</p> <p>La eficiencia de microencapsulación: 93,3% y 96,7% para los materiales Hi-cap y Capsul respectivamente.</p> <p>La eficiencia de microencapsulación: entre 61,1% y 61,7%. para la combinación ternaria maltrodextrina, proteína de suero y gorma arábica</p> | |
| | | | <p>Composición fisicoquímica. No se evidenció la presencia de interacciones químicas indeseables entre el aceite de Sacha Inchi y los materiales</p> | |

| | | | | |
|-----------------------|---|---|---|-------------------------|
| Aceite de Sacha Inchi | Secador por aspersión modelo SD-06 marca LabPlant | <p>Diámetro de boquilla: 0,5 mm.</p> <p>Presión: 30 bar.</p> <p>Temperatura de entrada del aire: 130°C.</p> <p>Temperatura de salida del aire: 80°C</p> | <p>pared, indicando que el aceite mantuvo su valor nutricional dentro de las capsulas.</p> <p>Eficiencia de encapsulación: Valores entre 66% y 71% para las formulaciones evaluadas.</p> <p>Contenido de humedad: Valores entre 2,7% y el 3.03% para las pruebas evaluadas.</p> <p>Morfología. Todas las capsulas mostraron partículas esféricas irregulares con encogimientos. Esta característica está asociada a la temperatura utilizada en el secado, lo anterior debido a que temperaturas elevadas conducen una evaporación rápida. Esta forma puede facilitar la dispersabilidad y la rehidratación</p> | (Avendaño et al., 2024) |
| | | | Humedad: 1,64%. Es un excelente valor para | |

| | | | | |
|-----------------------|--|--|--|---------------------|
| Aceite de Sacha Inchi | Secador por aspersión spray-dryer Büchi, B-290 | <p>Temperatura de entrada del aire: 150°C.</p> <p>Temperatura de salida del aire: 120°C</p> <p>Caudal de aire: 35 m³/h</p> <p>Tasa de bombeo peristáltico: 10%(3mL/min)</p> | <p>garantizar una mayor estabilidad y vida útil.</p> <p>Actividad del agua: 0,07 muy por debajo del límite recomendado para polvos secos.</p> <p>Densidad aparente: 0,45 gr/cm³, tienen una estructura compacta.</p> <p>Eficiencia de encapsulación: 70,18%</p> <p>Morfología: las microcapsulas presentaron forma esférica y diámetro uniforme.</p> <p>Diámetro de partícula:3,11 um.</p> <p>Higroscopicidad: 2,32%. Baja tendencia a absorber humedad del ambiente.</p> <p>Solubilidad: 73,5 seg.</p> <p>Concentración de omega liberado. 1,75 M.</p> | (Rodr & Rodr, 2022) |
|-----------------------|--|--|--|---------------------|

Fuente: (Elaboración propia)

Las condiciones de operación del equipo de secado por aspersión junto con las variables de la preparación de la emulsión inciden directamente en las propiedades fisicoquímicas de los polvos obtenidos. El contenido del agua y la actividad del agua es un factor que determina el tiempo de vida útil del polvo de aceite porque afecta su manipulación, almacenamiento, fluidez y procesamiento, además de promover reacciones de lípidos lo que induce a la producción de sabores indeseables (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017).

La densidad aparente de las partículas define las características funcionales y costos de almacenamiento de estos productos. Estas pueden utilizarse para determinar el tamaño de los envases que se utilizarán para envasar este producto ya que polvos más densos utilizarían envases más pequeños debido a la alta aglomeración de los polvos, en comparación con los polvos de baja densidad aparente (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017).

La higroscopicidad es la capacidad de una sustancia para absorber y retener humedad del ambiente y es importante en los polvos porque afecta su estabilidad, calidad y funcionalidad. Un alto nivel de higroscopicidad puede llevar a la aglomeración, cambios en la textura y pérdida de propiedades organolépticas, lo que puede comprometer la calidad del producto final (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022).

La porosidad aparente se define como el volumen de los vacíos dentro de una muestra, dividido por el volumen total de la muestra (Barbosa-Canovas et al., 2005). Es importante que los polvos de aceite tengan baja porosidad aparente porque permite una acumulación mínima de oxígeno dentro de la microcapsula que podría promover una oxidación lipídica (Sanchez-Reinoso & Gutiérrez, 2017).

El tamaño de partícula de las microcápsulas debe ser lo más pequeñas posibles porque mejora la biodisponibilidad y la absorción de los compuestos encapsulados en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas. Partículas más pequeñas permiten una mejor dispersión en matrices, lo que facilita la liberación controlada de los ingredientes activos.

Además, un tamaño de partícula reducido puede mejorar la estabilidad y la textura del producto final, contribuyendo a una mejor experiencia del consumidor (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Uttapap, et al., 2022).

La temperatura de entrada del aire al equipo secador de acuerdo a las investigaciones presentadas en la tabla 3 variaron entre 130°C y 180°C y las temperaturas de salida entre 70°C y 130°C. Temperaturas demasiado altas pueden degradar compuestos sensibles al calor, como los ácidos grasos omega-3 presentes en los aceites. La tasa de alimentación de la emulsión al secador se encontró en unos caudales entre 3 mL/min y 12 mL/min. Una tasa de alimentación más baja puede permitir una mejor evaporación del solvente y una mayor eficiencia de encapsulación, pero también puede reducir la productividad del proceso. El caudal de aire de secado de acuerdo a los estudios encontrados varió entre 35 m³/h y 73 m³/h, un mayor caudal de aire puede mejorar la eficiencia del secado, pero también puede aumentar el riesgo de pérdida de material debido a la atomización excesiva. El contenido de humedad de las microcápsulas estuvo entre 1.64% y 4.32%. Un contenido de humedad más bajo (alrededor de 1.64%) es preferible, ya que indica una mayor estabilidad del producto y una menor probabilidad de degradación de los compuestos encapsulados.

Tabla 4. *Aplicaciones de aceite de Sacha Inchi microencapsulado*

| Producto final | Cantidad suplementada optima. | Hallazgos/conclusiones | Referencias |
|----------------|---------------------------------------|---|---|
| Yogurt | 1 g de polvo por cada 100 g de yogurt | <p>El yogurt fortificado con aceite de Sacha Inchi micro encapsulado utilizando el proceso de secado por aspersión (SDSOM) evidenció una liberación de ácidos grasos más completa durante simulaciones de digestión gastrointestinal, alcanzando un 103.29% de liberación en comparación con el 89.20% obtenido con el uso de Sacha Inchi no encapsulado. Esto indica que la microencapsulación mejora la biodisponibilidad del aceite.</p> <p>La adición de SDSOM permitió una distribución homogénea del aceite, lo cual evitó la aparición de grandes gotas de aceite en el yogurt, un problema que se observó en las muestras con aceite no encapsulado.</p> <p>El yogurt que contenía (SDSOM) presentó menor sinéresis (el drenaje de líquido), lo cual indica una mejora en la textura y estabilidad del producto. La buena distribución de las microcápsulas en el yogurt permite una mejor interacción con la matriz del yogurt, resultando en una estructura más</p> | (Suwannasang, Zhong, Thumthanaruk, Vatanyoopaisarn, et al., 2022) |

| | | | |
|--|--|--|-------------------------------|
| | | <p>homogénea, lo cual también sugiere posibles beneficios en la textura y apariencia del yogurt fortificado con SDSOM.</p> <p>Durante el almacenamiento, el pH del yogurt que contenía SDSOM se mantuvo dentro del rango deseable, lo que es fundamental para la estabilidad del producto.</p> <p>El aceite de Sacha Inchi presentó una buena estabilidad oxidativa ya que presentaron un valor menor de peróxido (menor a 10 mEq/kg de aceite) durante 30 días de almacenamiento a 28°C.</p> | |
| | | <p>La formulación con mejor resultado estuvo conformado por los siguientes ingredientes: Filete de pescado (70 g), grasa de cerdo(17g), aceite de saha inchi microencapsulado (3 g), sal (1,5 g), agua helada (7 g), glutamato monosódico (0,29 g), orégano en polvo (0,2 g), pimienta en polvo (0,2 g), ajo (0,4 g), cebolla en polvo (0,4 g), eritorbato sódico (0,4 g). Una vez la mezcla estuvo homogénea se moldearon las hamburguesas para luego ser cocinadas a una temperatura de 150°C en una parrilla eléctrica.</p> <p>Esta formulación obtuvo una mejor evaluación sensorial, los consumidores</p> | <p>(Rengifo et al., 2024)</p> |

| | | | |
|--------------------------------|---|--|--|
| <p>Hamburguesas de pescado</p> | <p>Adición de aceite microencapsulado al 3% a la mezcla de hamburguesa.</p> | <p>la describieron como tierna, sabrosa y jugosa lo que sugiere que la adición del aceite microencapsulado no solo mejoro sino también su perfil sensorial.</p> <p>La hamburguesa en la mejor formulación obtuvo un aumento en el contenido de ácidos grasos poliinsaturados aportando de este forma beneficios a la salud cardiovascular y propiedades antiinflamatorias. Se obtuvo un contenido de 640 mg/100 g de ácidos grasos omega -3. La relación n-6/n-3 en esta formulación mejoró significativamente, disminuyendo de 7.0 a 3.3. Esto es relevante porque una relación más baja se asocia con beneficios para la salud, incluyendo reducciones en el riesgo de enfermedades cardíaca</p> <p>La adición de Sacha Inchi microencapsulado no afecto la carga microbiológica de las hamburguesas.</p> <p>Un indicador de oxidación lipídica son los niveles de los compuestos reactivos al ácido tiobarbitúrico (TBARS). Específicamente, se observó que los niveles de TBARS para las hamburguesas con la formulación optima aumentaron durante el almacenamiento, pero el incremento fue menos pronunciado que en las hamburguesas no fortificadas o en aquellas aceite de Sacha Inchi no microencapsulado. Esto sugiere que la microencapsulación del aceite ayudó a estabilizar los ácidos grasos poliinsaturados, reduciendo su</p> | |
|--------------------------------|---|--|--|

| | | | |
|---------------------------|---|---|---------------------------|
| | | susceptibilidad a la oxidación en comparación con los aceites no micro encapsulados. | |
| Bebida funcional en polvo | No se especifican las cantidades de cada uno de los ingredientes, sin embargo, se utilizó pulpa de mango deshidratada y microcapsulas de aceite de Sacha Inchi. | <p>El polvo de mango se mezcló con polvo de aceite microencapsulado. La pulpa de mango se deshidrato con un secador por infrarrojos (IRC D18, Irconfort, Sevilla, España) a 40 °C durante 12 h, posteriormente fue molida en un triturador de alimentos (Grindomix GM200, Restch, Haan, Alemania) utilizando una mezcladora planetaria</p> <p>Los resultados obtenidos del producto fueron los siguientes.</p> <p>La evaluación sensorial evaluó la aceptabilidad de la mejor formulación de la bebida en polvo. Un total del 97 % de los panelistas reconoció el sabor de la bebida, se obtuvo una aceptabilidad del 88 %, y las características de sabor, color, olor y textura tuvieron un valor promedio de 7, 9, 7 y 8, respectivamente, en una escala de 1 a 10.</p> <p>La humedad del producto estuvo entre el 3,28% y el 3,15% para las formulaciones evaluadas, la eficiencia de la encapsulación entre el 96,27% y el 97,94%.</p> | (Chasquibol et al., 2022) |

| | | | |
|--------|--|---|---------------------------|
| | | El polvo de bebida funcional tuvo un contenido de ácido ω 3-linolénico entre 50.88 % y el 56.12 %, lo que puede expresar que 3 g de las microcápsulas contienen 300 mg de omega 3, representando el 33.33 % de la ingesta adecuada recomendada para niños, según el Food and Nutrition Board del Institute of Medicine | |
| Muffin | <ul style="list-style-type: none"> • Harina de trigo: 25.9 g/100 g • Huevos: 20.7 g/100 g • Leche entera: 16.6 g/100 g • Aceite: 16.6 g/100 g • Azúcar moreno: 18.6 g/100 g • Esencia de vainilla: 1.36 g/100 g • Sal: 0.2 g/100 g • Bicarbonato de sodio: 0.04 g/100 g. | <p>Los ingredientes se mezclaron en un orden específico utilizando una batidora.</p> <p>Primero, se batieron los huevos a máxima velocidad durante 3 minutos. Luego, se adicionó el azúcar y se continuó batiendo durante 2 minutos más. Posteriormente, se incorporaron la leche, el aceite y la esencia de vainilla, mezclando a alta velocidad durante 3 minutos. Finalmente, se añadieron los ingredientes secos (harina, sal, bicarbonato de sodio y las microcápsulas de SIO), y se mezclaron a baja velocidad durante 3 minutos para obtener una masa homogénea</p> <p>La mezcla de masa se vertió en un molde para muffins y se horneó en un horno de gas precalentado a 180 °C durante 15 minutos.</p> <p>Los muffins con microcapsulas de aceite de sachá inchi mostraron menor</p> | (Hernández-carrión, 2018) |

| | | | |
|--|---|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> •6 g de microcápsulas de sachá ichi | <p>firmeza y presentaron mayor suavidad en comparación con el muffin control al cual no se le adicionó capsulas de sachá inchi. En el análisis sensorial, el muffin con la mayor proporción de microcápsulas (6%) fue el más preferido por los panelistas, alcanzando un 48% de aceptación. Los muffins que contenían 3% y 4.5% también obtuvieron buena aceptación (46% y 34% respectivamente), mientras que el muffin de control fue el menos preferido (28%). En cuanto a la bioaccesibilidad los muffins elaborados con microcápsulas mostraron que la liberación de los ácidos grasos, especialmente del ácido alfa-linolénico (omega-3), fue más alta en las muestras secadas por spray, indicando que el proceso de microencapsulación protegía estos compuestos durante la digestión, lo que mejora su disponibilidad para ser utilizados por el cuerpo humano. El contenido de ácidos grasos omega -3 fue de 0,6 g por cada 100 g de muffin, lo que destaca su valor nutricional.</p> | |
|--|---|--|--|

Fuente:(Elaboración propia)

En la tabla 4 se presentan aplicaciones de aceite micro encapsulado de sachá inchi adicionados a diferentes matrices alimenticias por la cual podemos realizar las siguientes apreciaciones.

La microencapsulación de aceite de sachá inchi tuvo un gran impacto con respecto a la estabilidad y a la biodisponibilidad del omega 3 ya que se observó en todos productos (Yogurt, hamburguesa, bebida en polvo y muffins) mejoró la biodisponibilidad y estabilidad del omega-3. La microencapsulación también permitió una mejor distribución del aceite y evitó problemas como la separación de fases o cambios no deseados en la textura.

Con respecto a las mejoras en la calidad sensorial de los productos es claro que la adición de las microcápsulas presentó un gran impacto que favoreció esta característica. El yogurt con microcápsulas presentó una mejor estabilidad, es decir hubo menos sinéresis y una textura más homogénea. Las hamburguesas con adición de las microcápsulas fueron descritas como más jugosas y sabrosas y los muffins con microcápsulas tuvieron una mayor aceptación debido a su suavidad.

La adición de sachá inchi micro encapsulado permitió aumentar significativamente el contenido de ácidos grasos omega-3 en todos los productos como por ejemplo la relación n6/n3 en las hamburguesas mejoró pasando de 7 a 3,3 y los muffins fortificados aportaron 0,6 g de omega 3 por cada 100 gr.

La estabilidad del producto adicionado con aceite de sachá inchi también se vio favorecida por la adición de este insumo, como por ejemplo el pH del yogurt se mantuvo constante, la hamburguesa presentó menor oxidación lipídica

El aceite de sachá inchi tiene un amplio potencial de aplicación en diversas industrias, desde alimentos funcionales, cosméticos, y suplementos nutricionales. La capacidad de la microencapsulación de proteger a los ácidos grasos omega-3 de proteger, mejorar su biodisponibilidad con vierten a este producto en materia prima con elevado potencial para el desarrollo de productos innovadores.

Conclusiones

La planta de aceite de Sacha Inchi en un cultivo viable para obtener ácidos grasos poliinsaturados omega-3 a través de su aceite, que puede ser utilizado como materia prima para crear una gran variedad de alimentos funcionales, cosméticos y suplementos nutricionales y poder satisfacer la demanda creciente del mercado de productos fortificados con omega -3. Debido a la inestabilidad oxidativa de este aceite, su manipulación es complicada porque es vulnerable frente a las condiciones ambientales. La microencapsulación del aceite por secado por aspersión es una técnica que nos ofrece obtener microcápsulas estables de aceite, de fácil manipulación y almacenamiento, dándonos facilidad para que esta materia prima pueda ser añadida a una gran variedad de productos.

Esta técnica permite la viabilidad de utilizar distintos tipos de materiales de pared, los cuales pueden combinarse y optimizarse en su preparación mediante el uso de surfactantes, antioxidantes y tecnologías como el ultrasonido, en función del objetivo establecido y del tipo de producto que se desee desarrollar. Para optimizar las variables de interés, también es fundamental considerar los parámetros operativos del equipo de secado, tales como la temperatura de entrada del aire, el caudal de aire, la potencia de la bomba, la temperatura de salida del aire y el tipo de boquilla utilizada, entre otros. Estos factores permiten obtener microcápsulas con bajos porcentajes de humedad, óptimos niveles de higroscopicidad, perfiles de liberación adecuados que garanticen calidad farmacéutica, morfología uniforme con tamaños de partícula mínimos o ajustados a los requerimientos del cliente, y una estabilidad oxidativa que asegure una prolongada vida útil del producto. Finalmente, las variables mencionadas influyen directamente en la eficiencia de microencapsulación y en la eficiencia global del proceso, aspectos clave que determinan los costos operativos del equipo y del proceso productivo.

Los productos innovadores que pueden desarrollarse a partir de esta tecnología son diversos, ya que este ingrediente no solo incrementa las concentraciones de omega-3 en el producto final, sino que también mejora la estabilidad y las propiedades sensoriales de las matrices alimentarias a las que se incorporan las microcápsulas. Estas cualidades hacen de este aceite una materia prima con alto potencial, apta para ser aprovechada por productores rurales, contribuyendo así al fortalecimiento del desarrollo agroindustrial y al progreso sostenible del campo colombiano.

La microencapsulación del aceite de Sacha Inchi representa una estrategia eficaz para mejorar la biodisponibilidad, la estabilidad y la calidad sensorial de diversos productos alimenticios. Su aplicación contribuye a optimizar la textura, la distribución de los ingredientes y el perfil nutricional, lo que permite desarrollar alternativas más saludables y funcionales para los consumidores.

Referencias

- Afzal, M. F., Khalid, W., Armghan Khalid, M., Zubair, M., Akram, S., Kauser, S., Noreen, S., Jamal, A., Kamran Khan, M., & Al-Farga, A. (2022). Recent industrial extraction of plants seeds oil used in the development of functional food products: A Review. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2530–2550. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2144882>
- Alarcón, R., Gonzales, B., Sotelo, A., Gallardo, G., Pérez-Camino, M. del C., & Chasquibol, N. (2020). *Microencapsulation of Sacha Inchi (Plukenetia huayllabambana) Oil by Spray Drying with Camu Camu (Myrciaria dubia (H.B.K.) Mc Vaugh) and Mango (Mangifera indica) Skins*. 3, 11. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020053011>
- Alvarez, R., Robert, P., Quintriqueo, A., Oyarzún-Ampuero, F., Mackie, A., & Torcello-Gómez, A. (2024). Characterization and in vitro bioaccessibility of optimized chia oil-Capsul-sodium alginate microparticles obtained by 3 nozzle spray-drying. *Food and Bioprocess Technology*, 148(September), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.012>
- Anandharamakrishnan, C., & Padma Ishwarya, S. (2015). Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation. In *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*. <https://doi.org/10.1002/9781118863985>
- Arslan, D., Tontul, İ., Polak, T., & Ulrih, N. P. (2024). Use of Sinapic Acid Alkyl Esters as Antioxidants in Microencapsulated Flaxseed Oil. *Food and Bioprocess Technology*, 449–459. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03469-y>
- Avendaño, N., Peña, M. S., Daza, L. D., Váquiro, H. A., & Chaves, M. O. (2024). Physicochemical characterization and oxidation stability of Sacha inchi oil encapsulated by spray drying. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1302–1312. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-03041-4>
- Barbosa-Canovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2005). Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality. In *Food Engineering Series* (Issue 1).
- Benítez, R., Coronell, C., & Martin, J. (2018). Chemical Characterization Sacha Inchi (Plukenetia Volubilis) Seed : Oleaginosa Promising From the Colombian Amazon International Journal of Current Science Research and Review. *International Journal of Current Science Research and Review*, 01(01), 11–22.
- Cevik, K., Yalcin, H., & Konca, Y. (2024). Elucidating the Influence of Coating Materials in the Microencapsulation Process of Hempseed Oil Via Spray Drying: A Comprehensive Analysis of Physicochemical Attributes, Oxidation Stability, and Thermal Properties. *Food Biophysics*, 19(3), 795–805. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09859-1>
- Chan, Y. J., Chiu, C. S., Li, P. H., & Lu, W. C. (2024). Evaluation of different roasting condition on yield, physico-chemical characteristics, and antioxidant activity of cold-pressed sacha inchi (Plukenetia volubilis) oil. *Lwt*, 203(February), 116343. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116343>

- Chasquibol, N. A., Gallardo, G., Gómez-Coca, R. B., Trujillo, D., Moreda, W., & Pérez-Camino, M. C. (2019). Glyceridic and Unsaponifiable Components of Microencapsulated Sacha Inchi (*Plukenetia huayllabambana* L. And *Plukenetia volubilis* L.) Edible Oils. *Foods*, *8*(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120671>
- Chasquibol, N., Alarcón, R., Gonzales, B. F., Sotelo, A., Landoni, L., Gallardo, G., García, B., & Pérez-Camino, M. C. (2022). Design of Functional Powdered Beverages Containing Co-Microcapsules of Sacha Inchi *P. huayllabambana* Oil and Antioxidant Extracts of Camu Camu and Mango Skins. *Antioxidants*, *11*(8). <https://doi.org/10.3390/antiox11081420>
- Chasquibol, N., Gonzales, B. F., Alarcón, R., Sotelo, A., Gallardo, G., García, B., & Pérez-Camino, M. del C. (2023). Co-Microencapsulation of Sacha Inchi (*Plukenetia huayllabambana*) Oil with Natural Antioxidants Extracts. *Foods*, *12*(11). <https://doi.org/10.3390/foods12112126>
- Cisneros, F. H., Paredes, D., Arana, A., & Cisneros-Zevallos, L. (2014). Chemical composition, oxidative stability and antioxidant capacity of oil extracted from roasted seeds of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(22), 5191–5197. <https://doi.org/10.1021/jf500936j>
- Emon, D. Das, Islam, M. S., Mazumder, M. A. R., Aziz, M. G., & Rahman, M. S. (2025). Recent applications of microencapsulation techniques for delivery of functional ingredient in food products: A comprehensive review. *Food Chemistry Advances*, *6*(February), 100923. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100923>
- Estruch, R., Ros, E., Salas-Salvadó, J., Covas, M.-I., Corella, D., Arós, F., Gómez-Gracia, E., Ruiz-Gutiérrez, V., Fiol, M., Lapetra, J., Lamuela-Raventós, R. M., Serra-Majem, L., Pintó, X., Basora, J., Muñoz, M. A., Sorlí, J. V., Martínez, J. A., Fitó, M., Gea, A., ... Martínez-González, M. A. (2018). Primary Prevention of Cardiovascular Disease with a Mediterranean Diet Supplemented with Extra-Virgin Olive Oil or Nuts. *New England Journal of Medicine*, *378*(25), 1–14. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1800389>
- Foods, F., Size, M., Acids, F., Product, B., Application, B., Region, B., & Forecasts, S. (2022). *Report Overview*. 1–9.
- Goyal, A., Tanwar, B., Kumar Sihag, M., & Sharma, V. (2022). Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): An emerging source of nutrients, omega-3 fatty acid and phytochemicals. *Food Chemistry*, *373*(PB), 131459. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131459>
- Hernández-carrión. (2018). *Sacha Inchi seed oil encapsulation as a strategy for the development of new functional foods*. 1–38.
- Hu, Y., Tu, J., Li, C., Peng, J., Xiao, Z., Wen, L., Chen, Y., Xie, S., Liu, S., & Xiao, J. (2024). Microencapsulation of camellia seed oil by spray drying with pea protein and maltodextrin. *Lwt*, *203*(May), 116348. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116348>
- Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying Technology*, *26*(7), 816–835. <https://doi.org/10.1080/07373930802135972>

- Jitpinit, S., Siraworakun, C., Sookklay, Y., & Nuithitikul, K. (2022). Enhancement of omega-3 content in sacha inchi seed oil extracted with supercritical carbon dioxide in semi-continuous process. *Heliyon*, 8(1), e08780. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08780>
- Landoni, L., Alarcon, R., Vilca, L., Chasquibol, N., Pérez-Camino, M. C., & Gallardo, G. (2020). Physicochemical characterization and oxidative stability of microencapsulated edible sacha inchi seed oil by spray drying. *Grasas y Aceites*, 71(4), 1–10. <https://doi.org/10.3989/gya.1028192>
- Lu, W. C., Chiu, C. S., Chan, Y. J., Mulio, A. T., & Li, P. H. (2023). New perspectives on different Sacha inchi seed oil extractions and its applications in the food and cosmetic industries. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 0(0), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2276882>
- Mozaffarian, D., Appel, L. J., & Van Horn, L. (2011). Components of a cardioprotective diet: New insights. *Circulation*, 123(24), 2870–2891. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.110.968735>
- Norhazlindah, M. F., Jahurul, M. H. A., Norliza, M., Shihabul, A., Islam, S., Nyam, K. L., & Zaidul, I. S. M. (2023). Techniques for extraction, characterization, and application of oil from sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 904–915. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01663-0>
- Orrego Alzate, C. E. (2003). Procesamiento De Alimentos. In *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales* (Issue 1). https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Orrego-4/publication/288824547_PROCESAMIENTO_DE_ALIMENTOS/links/56840cf808ae197583937736/PROCESAMIENTO-DE-ALIMENTOS.pdf
- Panel, E., & Nda, A. (2009). Opinion on the substantiation of health claims related to alpha linolenic acid and maintenance of normal blood cholesterol concentrations (ID 493) and maintenance of normal blood pressure (ID 625) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 7(10), 1–17. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1252>
- Patel, A., Desai, S. S., Mane, V. K., Enman, J., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2022). Futuristic food fortification with a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of lifestyle diseases. *Trends in Food Science and Technology*, 120(December 2021), 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.006>
- Patted, P. G., Masareddy, R. S., Patil, A. S., Kanabargi, R. R., & Bhat, C. T. (2024). Omega-3 fatty acids: a comprehensive scientific review of their sources, functions and health benefits. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s43094-024-00667-5>
- Punia, S., Singh, K., Kumar, A., & Bala, S. (2019). Omega 3-Metabolism , Absorption , Bioavailability and health benefits- A review PharmaNutrition Omega 3-metabolism , absorption , bioavailability and health bene fi ts – A review. *PharmaNutrition*, 10(July 2020), 100162. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2019.100162>
- Region, B., & Forecasts, S. (2024). *Omega 3 Market Overview Market Concentration &*

Characteristics. 1–9.

- Rengifo, E., Rios-Mera, J. D., Huamaní, P., Vela-Paredes, R., Vásquez, J., Saldaña, E., Siche, R., & Tello, F. (2024). Fish Burgers Fortified with Microencapsulated Sacha Inchi Oil: Effects on Technological and Sensory Properties. *Foods*, *13*(7).
<https://doi.org/10.3390/foods13071004>
- Rodr, A., & Rodr, J. (2022). Obtention of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) Seed Oil Fruits : Physicochemical , Morphological , and Controlled. *Foods*, *7*, 3950.
- Rodríguez-Cortina, A., & Hernández-Carrión, M. (2023). Microcapsules of Sacha Inchi seed oil (*Plukenetia volubilis* L.) obtained by spray drying as a potential ingredient to formulate functional foods. *Food Research International*, *170*(February).
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113014>
- Rodríguez-Cortina, A., & Hernández-Carrión, M. (2025). Amazonian fruits in Colombia: Exploring bioactive compounds and their promising role in functional food innovation. *Journal of Food Composition and Analysis*, *137*(June 2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106878>
- Samrit, T., Osotprasit, S., Chaiwichien, A., Suksomboon, P., Chansap, S., Athipornchai, A., Changklungmoa, N., & Kueakhai, P. (2024). Cold-Pressed Sacha Inchi Oil: High in Omega-3 and Prevents Fat Accumulation in the Liver. *Pharmaceuticals*, *17*(2).
<https://doi.org/10.3390/ph17020220>
- Sanchez-Reinoso, Z., & Gutiérrez, L. F. (2017). Effects of the Emulsion Composition on the Physical Properties and Oxidative Stability of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Oil Microcapsules Produced by Spray Drying. *Food and Bioprocess Technology*, *10*(7), 1354–1366. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1906-3>
- Selvamuthukumar, M. (2019). Handbook on spray drying applications for food industries. *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*, 1–348.
<https://doi.org/10.1201/9780429055133>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Their Health Benefits. *Annual Review of Food Science and Technology*, *9*, 345–381.
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850>
- Sheet, F., & Professionals, H. (n.d.). *Omega-3 Fatty Acids*.
- Suwannasang, S., Zhong, Q., Thumthanaruk, B., Uttapap, D., Puttanlek, C., Vatanyoopaisarn, S., & Rungsardthong, V. (2022). Optimization of Wall Material Composition for Production of Spray-dried Sacha Inchi Oil Microcapsules with Desirable Physicochemical Properties. *Food and Bioprocess Technology*, *15*(11), 2499–2514.
<https://doi.org/10.1007/s11947-022-02893-2>
- Suwannasang, S., Zhong, Q., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Uttapap, D., Puttanlek, C., & Rungsardthong, V. (2022). Physicochemical properties of yogurt fortified with microencapsulated Sacha Inchi oil. *Lwt*, *161*(March), 113375.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113375>

- Swanson, D., Block, R., & Mousa, S. A. (2012). Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life. *Advances in Nutrition*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.3945/an.111.000893>
- Valenzuela B, R., Barrera R, C., González-Astorga, M., Sanhueza C, J., & Valenzuela B, A. (2014). Alpha linolenic acid (ALA) from Rosa canina, sacha inchi and chia oils may increase ALA accretion and its conversion into n-3 LCPUFA in diverse tissues of the rat. *Food and Function*, 5(7), 1564–1572. <https://doi.org/10.1039/c3fo60688k>
- Vargas-Ramella, M., Lorenzo, J. M., Zamuz, S., Montes, L., Santos López, E. M., Moreira, R., & Franco, D. (2022). Influence of pork backfat replacement by microencapsulated fish oil on physicochemical, rheological, nutritional, and sensory features of pork liver pâtés. *Lwt*, 163(March). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113522>
- Villamil, R. A., Cortés, L. Y., & Gutiérrez, L. F. (2023). Physicochemical and sensory properties of Sacha Inchi oil-functionalised stirred yogurt. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 3681–3692. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16470>
- Zhang, Y., Xie, Z., Zhang, S., Li, J., & Luo, T. (2024). Preparation of Low-Fishy Microencapsulated DHA-Rich Algal Oil Powder Using Infant Rice Powder. *Foods*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/foods13233827>