

**Microencapsulación mediante secado por aspersion de aceite extraído de la microalga
Parachlorella kessleri aislada de la laguna La Cocha del Departamento de Nariño**

Daniela Martínez Montero

Asesora

Fedra Lorena Ortiz Benavides

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería de Alimentos

2023

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

Con amor incondicional dedico este sueño a mi padre, madre y hermano quienes han sido mi fortaleza en los momentos de dificultad y mi motivación en los momentos de éxito. Dedico este logro a su esfuerzo, dedicación, ejemplo y comprensión que han hecho de mi la mujer que soy. A mi familia que me ha impulsado a ser una mejor persona cada día.

Agradecimientos

Agradezco a la Doctora Fedra Lorena Ortiz por el acompañamiento constante, paciencia y enseñanzas, sin sus orientaciones y apoyo este trabajo no se habría logrado. Gracias infinitas por ser mi directora de proyecto de grado, por brindarme la oportunidad de fortalecer mis conocimientos y de forjarme como una profesional responsable e íntegra.

De igual manera agradezco al Doctor Pablo Fernández Izquierdo por contribuir a fortalecer mis capacidades en el campo de la investigación, al grupo de investigación en Biotecnología microbiana de la Universidad de Nariño por facilitar sus instalaciones y recursos para llevar a cabo los objetivos de este trabajo.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la financiación de este trabajo de grado como parte del proyecto titulado “Aprovechamiento sustentable del alga *Chlorella spp* para la obtención de aceite micro encapsulado” a través de la convocatoria 818. A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD por su formación profesional a lo largo de la carrera y a todas las personas que aportaron para la culminación de este proyecto.

Resumen

La microalga *Parachlorella kessleri* tiene un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados, especialmente omega-3 (n-3). Sin embargo, su aprovechamiento está limitado debido a su naturaleza, ya que está expuesto a la oxidación por factores externos. Por lo tanto, se ve necesario el uso de una alternativa tecnológica que proteja el aceite de la microalga. El objetivo de este estudio fue estandarizar el proceso de microencapsulación del aceite de la microalga *Parachlorella kessleri* utilizando maltodextrina y goma arábiga como materiales de pared mediante el proceso de secado por aspersión con el equipo Spray dryer modelo SD-Basic. Se realizó un diseño experimental multifactorial cuyas variables independientes fueron la temperatura de entrada y la velocidad de flujo. Las variables de respuesta fueron el porcentaje de rendimiento, tamaño de partícula, porcentaje de humedad y eficiencia de encapsulación.

Los parámetros de operación del equipo que arrojaron los mejores resultados fueron 130 °C de temperatura de entrada y 5 mL/min de velocidad de flujo. Los resultados experimentales de porcentaje de rendimiento, tamaño de partícula, porcentaje de humedad y porcentaje de eficiencia de encapsulación fueron acordes a los encontrados en resultados obtenidos por otros estudios similares.

Palabras claves: Tecnología de encapsulación, materiales de pared, microcápsulas, ácidos grasos insaturados, spray dryer, condiciones de operación.

Abstract

The microalga *Parachlorella kessleri* has a high percentage of unsaturated fatty acids, especially omega-3 (n-3). However, its utilization is limited due to its nature, as it is exposed to oxidation by external factors. Therefore, the use of a technological alternative that protects the microalga oil is necessary. The objective of this study was to standardize the microencapsulation process of *Parachlorella kessleri* microalga oil using maltodextrin and arabic gum as wall materials through the spray drying process with the Spray dryer model SD-Basic equipment. A multifactorial experimental design was carried out, where the independent variables were the inlet temperature and the flow rate, while the response variables were the yield percentage, particle size, humidity percentage, and encapsulation efficiency.

The operating parameters of the equipment that yielded the best results were an inlet temperature of 130°C and a flow rate of 5 mL/min. The experimental results for yield percentage, particle size, humidity percentage, and encapsulation efficiency were in line with those obtained from other similar studies. This microencapsulated product, due to its characteristics, could be used as an additive in food matrices formulations.

Keywords: Encapsulation technology, wall materials, microcapsules, unsaturated fattyacids, spray dryer, operating conditions.

Tabla de contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	12
Planteamiento del Problema	14
Justificación	19
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos.....	23
Marco Teórico.....	24
Microalgas con Potencialidades Biotecnológicas.....	24
Características Taxonómicas de Las Microalgas.....	25
Condiciones de Cultivo de Las Microalgas de Agua Dulce	27
Características de los Lípidos	28
Aceite extraído de la Microalga <i>Parachlorella kessleri</i>	29
Tecnología de la Microencapsulación	30
Métodos de Microencapsulado	32
Secado por Aspersión para Microencapsulación	34
Equipo para microencapsulación	36
Materiales para la Microencapsulación	39
Eficiencia de Encapsulación	42
Metodología.....	43
Homogenización de la emulsión para la microencapsulación mediante secado por aspersión del aceite de la microalga <i>Parachlorella kessleri</i>	43

Efecto de los parámetros de operación de secado por aspersión en los parámetros físicoquímicos del microencapsulado de aceite de <i>Parachlorella Kessleri</i>	46
Determinación del Máximo Porcentaje de rendimiento	47
Determinación del Mínimo porcentaje de humedad.....	48
Determinación del Máximo Porcentaje de eficiencia del microencapsulado	49
Determinación del Tamaño de partícula del microencapsulado	51
Resultados y Discusión de Resultados.....	52
Homogenización de la emulsión de aceite de <i>Parachlorella kessleri</i>	52
Máximo Porcentaje de Rendimiento.....	55
Determinación para el mínimo porcentaje de Humedad.....	58
Determinación de la mayor eficiencia de la encapsulación	61
Tamaño de partícula del microencapsulado.....	64
Conclusiones y Recomendaciones.....	67
Referencias Bibliográficas	69

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Métodos mas conocidos para cultivo de microalgas</i>	27
Tabla 2 <i>Composición de lipidos AGPI de la microalga Parachlorella kessleri</i>	30
Tabla 3 <i>Especificaciones del Spray Dryer</i>	38
Tabla 4 <i>Relación de maltodextrina y goma arabiga momento 2 de la emulsion</i>	44
Tabla 5 <i>Parámetros de operación del equipo Spray Dryer</i>	46
Tabla 6 <i>Observación de presencia de aceite externo en el microencapsulado</i>	52
Tabla 7 <i>Observación de relaciones de maltodextina y goma arabiga de la emulsion</i>	53
Tabla 8 <i>Porcentaje de rendimiento del microencapsulado</i>	55
Tabla 9 <i>Análisis de varianca para el rendimiento</i>	56
Tabla 10 <i>Porcentaje de humedad del microencapsulado</i>	58
Tabla 11 <i>Analisis de varianza para el porcentaje de humedad</i>	59
Tabla 12 <i>Determinación de eficiencia de encapsulación</i>	61
Tabla 13 <i>Análisis de varianza de la eficiencia de encapsulación</i>	62
Tabla 14 <i>Tamaño de particula de los tratamientos de microencapsulado</i>	65

Lista de figuras

Figura 1 <i>Esquema simplificado de la microencapsula de aceite</i>	32
Figura 2 <i>Proceso de secado por aspersión</i>	35
Figura 3 <i>Tipos de morfología de microencapsulado por aspersión</i>	38
Figura 4 <i>Diagrama de proceso de la emulsión</i>	45
Figura 5 <i>Diagrama de pareto para el rendimiento</i>	56
Figura 6 <i>Diagrama de pareto para humedad</i>	60
Figura 7 <i>Diagrama de pareto para eficiencia de encapsulación</i>	63
Figura 8 <i>Microencapsulado de aceite de Parachlorella kessleri</i>	66

Lista de apéndices

Apéndice 1 <i>Observación de la microalga Parachlorella kessleri de La Cocha</i>	26
Apéndice 2 <i>Componentes del equipo Spray Dryer SD-Basic</i>	36
Apéndice 3 <i>Medición del tamaño de partícula del microencapsulado</i>	51

Introducción

Los ácidos grasos esenciales son necesarios para las funciones fisiológicas del organismo humano. Sin embargo, no se producen en el metabolismo y, por lo tanto, deben consumirse a través de fuentes externas (Cuartas & Pérez, 2021). Las propiedades biológicas de los ácidos grasos insaturados se conocen en diversas funciones fisiológicas como parte integral de las células. Asimismo, la ingesta de este tipo de moléculas se les atribuye propiedades terapéuticas en el sistema cardiovascular (Fleta & Fleta, 2019; Quitral et al., 2019). Igualmente, se reconocen sus propiedades antiinflamatorias, neurológicas, visuales, dermatológicas y nutritivas (Vega et al., 2021).

Las fuentes de ácidos grasos las constituyen principalmente las plantas oleaginosas y los peces del fondo marino. Sin embargo, estas fuentes presentan varios problemas de sostenibilidad ambiental (Portillo et al., 2021). Por consiguiente, en las últimas décadas, se ha planteado la necesidad de encontrar nuevas fuentes de estos compuestos. Entre estos organismos se encuentran las microalgas, cuya composición lipídica es muy prometedora y más sustentable ambientalmente como productores de ácidos grasos.

En el Departamento de Nariño, un reservorio de diversidad en microalgas lo constituyen las lagunas de alta montaña presentes en su geografía. Entre ellas se encuentra la Laguna de la Cocha, cuya ubicación geográfica se encuentra entre las coordenadas 1°06'00" Norte y 77°09'07" Oeste. Presenta una altitud de 2800 msnm y una temperatura promedio de 11°C (Imués et al., 2018). De allí se aisló y caracterizó molecularmente el alga *Parachlorella kessleri*, a partir de la cual se extrajo el aceite (Fernández, Cerón & Ortiz, 2022).

Uno de los problemas de este tipo de aceite una vez extraído es su rápida oxidación, lo que trae como consecuencia la pérdida de sus funciones biológicas. Por consiguiente, para utilizar de manera funcional este tipo de aceites se utilizan tecnologías tales como la microencapsulación (Barón et al., 2020), con el fin de que su aprovechamiento sea perdurable a largo plazo. Sin embargo, dependiendo de las características del equipo y del aceite, se requiere estandarizar dicho proceso. Por consiguiente, este trabajo tuvo como propósito estandarizar el proceso de microencapsulación por el método de secado por aspersion del aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri* aislada de la Laguna La Cocha en el Departamento de Nariño.

Planteamiento del Problema

Los ácidos grasos poliinsaturados n-3 (AGPI n-3) son muy importantes para la salud humana, su consumo ofrece beneficios para la prevención de enfermedades cardiovasculares, las cuales son la segunda causa de muerte y discapacidad en el mundo según la Organización Mundial de la Salud. La ingesta de AGPI n-3 cumple un papel clave en la prevención de estas enfermedades crónicas no transmisibles (Cuartas & Pérez, 2021). Además, se sabe que estas macromoléculas biológicamente activas cumplen funciones vitales necesarias para el correcto funcionamiento de las células (Dextre, 2022), intervienen en el desarrollo normal de un embarazo, el crecimiento intrauterino del feto y el normal desarrollo de su sistema nervioso central (SNC) (Cuartas & Pérez, 2021).

Dentro de las fuentes de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 (n-3) se encuentran las de origen marino y de origen vegetal. En el origen marino se encuentran el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el docosahexaenoico (DHA) provenientes de algas, mariscos, salmón, atún, sardina, jurel, arenques y caballa especialmente (Aburto & Castiella, 2020). En el origen vegetal se encuentra el ácido graso poliinsaturado alfa-linolénico (ALA) y se encuentran comúnmente en semillas de chía, lino, calabaza, nueces, aceite de linaza, soja o canola (Aburto & Castiella, 2020).

Sin embargo, en el departamento de Nariño no hay una fuente primaria que permita disponer de AGPI n-3 para su aprovechamiento en el sector de la industria alimentaria, por esta razón se seleccionó como organismo de estudio la microalga *Parachlorella kessleri* aislada de la laguna la Cocha en el corregimiento del Encano, ya que según el estudio previo realizado por (Cerón, 2022) esta microalga presenta una composición lipídica caracterizada por un alto porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados particularmente omega-3 (n-3).

En este orden de ideas los ácidos grasos poliinsaturados, principalmente omega -3 como ácido Linolénico, omega-6 como el ácido Linoleico, contenidos en la microalga *Parachlorella kessleri*, pueden ser aprovechados en varias industrias especialmente en la alimentaria para producir diferentes compuestos ricos en este tipo de compuestos.

Sin embargo, se identifican limitaciones asociadas a las características sensoriales como apariencia, color, sabor, entre otros, puesto que, los aceites, por su naturaleza son susceptibles de deterioro oxidativo, esto, producto del contacto de los ácidos grasos contenidos en ellos con el oxígeno atmosférico del ambiente, ocasionando el rompimiento de los enlaces dobles que forman la estructura química (Segurondo & Cortez, 2020). Como consecuencia los aceites desprenden un sabor desagradable, una alteración que comúnmente se conoce como rancidez o enranciamiento (Segurondo & Cortez, 2020). Esta alteración afecta principalmente las características de los aceites anteriormente mencionadas, lo que dificulta el uso de este tipo de aceites como aditivos, pigmentos, preservantes, mejoradores de valor nutricional en alimentos.

Una de las alternativas tecnológicas para proteger los aceites y posteriormente incorporarlos en matrices alimentarias, es la microencapsulación a través del secado por aspersión. Esta técnica es una de las más utilizadas debido a los bajos costos en comparación con otras técnicas y a su eficiencia en la protección de los componentes de los aceites (Rios & Gil, 2021), además, interfiere para reducir su deterioro fisicoquímico y lograr su incorporación y liberación controlada en el organismo. Hasta el momento se han introducido varias estrategias de microencapsulación como, por ejemplo, el secado por aspersión (Cardona et al., 2021) en el cual es necesario el uso de componentes que brinden las características de enmascaramiento y protección de los lípidos a encapsular, a estos componentes se les denomina materiales de pared

y son determinantes en los resultados obtenidos en el microencapsulado final, por esta razón al momento de seleccionarlos se debe conocer las propiedades y ventajas que ofrecen.

Amaya & Salcedo, (2020) mencionan que el o los materiales de pared deben tener una buena interacción química con el disolvente y con el principio que se va a encapsular. Para el caso de la encapsulación de materiales oleosos, recomiendan utilizar materiales de pared hidrofílicos, tales como la goma arábiga (GA) y maltodextrina (MD). Estos autores también comprobaron que las microcápsulas con maltodextrina como material de pared pueden retener mayor cantidad de aceite. Solís, (2018) trabajó la microencapsulación empleando goma arábiga y maltodextrina como materiales de pared en aceite de linaza con una temperatura de 150 °C y 30% de carga de aceite y obtuvo una eficiencia del 59,19% considerado como un buen resultado. También, Olgún, (2019) en su investigación con aceite de chile habanero encontraron que a temperatura de entrada de 140 °C y temperatura de salida de 70 °C el mayor rendimiento fue de $56,19 \pm 0,79\%$ siendo un resultado efectivo. De similar manera, Iglesias & Pichucho, (2022) trabajaron en extracto de cedrón (*Alousia citrodora*) con los materiales de pared anteriormente mencionados, obteniendo como condiciones óptimas de temperatura de 150 °C y velocidad de flujo de 500 mL/h y un rendimiento de 94,70%, un porcentaje de humedad de 3,845% para los cuales se consideran resultados muy buenos tomando como referencia los materiales de pared. Quintana et al., (2022) microencapsularon aceite de aguacate con los mismos materiales de pared, concluyeron que el proceso de secado por aspersion presenta ventajas ya que proporciona estabilidad a condiciones ambientales e incrementos de temperatura en la emulsión o flujo de alimentación que ingresa al equipo.

De acuerdo a los párrafos precedentes se puede decir que utilizando materiales de pared como son GA y MD, se obtienen aspectos positivos en cuanto a la protección y el

enmascaramiento de sabores y olores indeseables de los aceites, sin embargo, cada aceite tiene una fuente diferente de obtención y por esta razón se requiere una estandarización del proceso de microencapsulación que permita obtener una mejor estabilidad para su almacenamiento y posterior uso en matrices alimentarias.

En el caso particular de la microalga *Parachlorella kessleri* se conoce que tiene propiedades significantes en cuanto a su aporte como se mencionó anteriormente, y que dentro del área de investigación aún no hay información que permita establecer metodologías y datos válidos para llevar a cabo una microencapsulación del aceite de esta microalga. Por tal razón, se requiere estandarizar las condiciones operación del equipo spray dryer modelo SD-Basic para la microencapsulación por secado por aspersión del aceite obtenido de la microalga *P. kessleri* aislada de la Laguna de La cocha, con el fin de lograr conservar las características fisicoquímicas del aceite, especialmente de los ácidos grasos, lo que permitiría que se conserven y no se oxiden al contacto con las condiciones externas de su entorno.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por las investigaciones mencionadas se tomaron como punto de partida los parámetros de operación con mejores resultados, es decir, que de acuerdo a la información recolectada se determinaron rangos de temperatura de entrada y velocidad con el fin de acercarse a los parámetros óptimos con respecto al material a encapsular y el equipo utilizado. Los rangos seleccionados se determinaron con el fin obtener los mejores resultados en la microencapsulación de la microalga *Parachlorella kessleri* esperando obtener el mejor rendimiento, tamaño de partícula, porcentaje de humedad y eficiencia de encapsulación.

Con base en la anterior información y con el propósito de resolver el problema identificado, surge la siguiente pregunta de investigación:

*¿Cómo influyen las condiciones operativas, como la temperatura de entrada y la velocidad de flujo en el proceso de secado por aspersión en el rendimiento, tamaño de partícula, porcentaje de humedad y eficiencia del microencapsulado extraído de aceite de la microalga *Parachlorella kessleri*?*

Es así como esta investigación se propone realizar la microencapsulación del aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri*, en pro de su protección de condiciones ambientales adversas y adicionalmente enmascarar olores y sabores desagradables característicos de los aceites con el fin de enriquecer matrices alimentarias.

Justificación

El presente proyecto de investigación hace parte de uno de los objetivos del macro proyecto financiado por Minciencias en la convocatoria 818 de 2020, ejecutado por el grupo de Biotecnología Microbiana de la Universidad de Nariño en alianza con el grupo Biotics de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD. Durante esta investigación se trabajó sobre el tercer objetivo específico del macroproyecto, en el cual se propuso: “Estandarizar el proceso de microencapsulación del aceite obtenido de la microalga aislada de un lago de alta montaña”. En el proceso de ejecución de esta propuesta de trabajo de grado, es lograr la microencapsulación el aceite extraído de la microalga *Parachlorella Kessleri* aislada de la laguna de La Cocha del departamento de Nariño utilizando la técnica de secado por aspersion con el fin de evaluar el rendimiento, porcentaje de humedad y eficiencia de encapsulación del aceite lo que aportará información para próximas investigaciones.

Con el desarrollo de este trabajo se espera generar nuevo conocimiento en el área de ingeniería en alimentos y aplicación de biomateriales para la conservación del aceite obtenido a partir de la microalga *Parachlorella kessleri*, lo que corresponde a una de las líneas de investigación de la cadena de formación de ingeniería de alimentos de la UNAD.

La presente investigación aporta desde la línea de investigación de la cadena de alimentos de la UNAD, con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por las Naciones Unidas en 2015, ya que con su ejecución permitirá fortalecer los objetivos como son; hambre cero, mediante las acciones que contribuirán a poner fin al hambre extrema y la desnutrición. Para el cuarto objetivo de educación de calidad, se aportará en la meta de educación para la ciudadanía global promoviendo conocimientos técnicos y prácticos necesarios para el desarrollo sostenible.

A nivel Nacional de acuerdo con el Consejo Nacional de Política Económica y Social mediante la Política Nacional de Seguridad alimentaria y Nutricional (PSAN) presentada en el documento Conpes Social 113 (Gobierno de Colombia, 2008); el proyecto aportará para que se desarrolle el objetivo general enfocado en garantizar que toda la población colombiana disponga, acceda y consuma alimentos de manera permanente y oportuna en suficiente cantidad, variedad, calidad e inocuidad, mediante la línea de política de promoción y protección de la salud y la nutrición, y, fomento de estilos de vida saludable la cual está orientada a la estrategia para prevenir y controlar las deficiencias de micronutrientes (suplementación, fortificación, educación) para diversificación de la dieta, todo esto teniendo en cuenta los resultados de estudios e investigaciones, así mismo, aportará información para el fortalecimiento del sistema de garantía de la calidad de los alimentos fortificados con micronutrientes.

Es importante que esta propuesta va de la mano con la Política Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación 2022-2031 Conpes 4069 (Departamento Nacional de Planeación, 2021); contemplando dos objetivos principalmente del documento en el que menciona mejorar la capacidad de generación de conocimiento científico y tecnológico; la infraestructura científica y tecnológica, y las capacidades de las Instituciones Generadoras de Conocimiento (IGC) y de las entidades de soporte, para aumentar la calidad e impacto en la sociedad colombiana del conocimiento; y un objetivo importante que es mejorar las capacidades y condiciones para innovar y emprender; la transferencia de conocimiento y tecnología hacia el sector productivo y la sociedad en general, así como las condiciones para favorecer la adopción de tecnologías e incrementar los niveles de innovación y productividad del país. Estos objetivos se verán beneficiados de alguna manera con el desarrollo de esta propuesta de proyecto porque contribuirá en el cumplimiento de los objetivos planteados.

En cuanto a la Política para el desarrollo comercial de la biotecnología a partir del uso sostenible de la biodiversidad Conpes 3697 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2011), ésta propuesta aportará información para el desarrollo de estrategias en pro de mejorar la capacidad institucional para el desarrollo comercial de la biotecnología a partir del uso sostenible de la biodiversidad específicamente de los recursos biológicos, genéticos y sus derivados. Con lo anterior se puede decir que la propuesta brindará conocimiento para enriquecer información relacionada con la microalga *Parachlorella kessleri* y con esto fortalecer y ampliar el uso sostenible como parte de la biodiversidad de la región. Para la Política de Crecimiento Verde Conpes 3934 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2018), el tema de interés de la propuesta estará orientada a la estrategia para fortalecer los mecanismos y los instrumentos para optimizar el uso de recursos naturales y energía en la producción y en el consumo y también las capacidades en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI), para el crecimiento verde específicamente de la microalga *Parachlorella kessleri*.

Los planes anteriormente mencionados van de la mano con el Plan Institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, especialmente en los ejes que se enlazan con el desarrollo de este proyecto como son el eje de innovación Unadista 4.0, eje de investigación 4.0 y eje de sostenibilidad holística e integral 4.0. Estos ejes están inspirados en los desafíos de la sociedad del conocimiento para la globalidad, en la creación de impactos a nivel regional y también, en el desarrollo de alternativas para favorecer la gestión institucional ante la infraestructura a nivel nacional e internacional. Desde la Universidad Nacional Abierta y a Distancia se enriquecerá el área del conocimiento en los ámbitos de bioprocesos y biotecnología que permitirán aportar de manera positiva nuevo conocimiento que promueva la economía, la

preservación ambiental y la solución de problemas locales y regionales que generen como resultado un desarrollo sostenible, integral y armónico de la región.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto de las condiciones de operación como temperatura y velocidad de flujo del proceso de secado por aspersión en el microencapsulado del aceite de *Parachlorella kessleri* aislada de la laguna La Cocha del departamento de Nariño.

Objetivos Específicos

Desarrollar una formulación de emulsión estable para la microencapsulación del aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri* mediante el proceso de secado por aspersión.

Determinar el efecto de los parámetros de operación como temperatura y velocidad de flujo en el rendimiento del microencapsulado y tamaño de partícula del aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri*.

Establecer el efecto de los parámetros de operación como temperatura y velocidad de flujo en el porcentaje de humedad y eficiencia de encapsulación del microencapsulado del aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri*.

Marco Teórico

Microalgas con Potencialidades Biotecnológicas

Las microalgas ofrecen fuentes comerciales de varios bioproductos de alto valor, la producción de estos bioproductos varía de una especie a otra e incluso en una misma especie de alga. La producción de bioproductos depende en factores como las condiciones ambientales, las estaciones, las ubicaciones geográficas y la etapa del ciclo de vida, etc. (Mobin et al., 2019). Las microalgas pueden producir diversas sustancias de interés comercial como nutrientes, pigmentos, fármacos, minerales, etc. (Nagappan & Kumar, 2021). Los componentes lipídicos de las microalgas sirven de base para diferentes usos bioenergéticos como el biodiesel, el bioetanol, el biogás y el biohidrogeno. Los lípidos neutros acumulados durante la fotosíntesis por las células de microalgas se almacenan como TAG (triacilgliceroles). Estas grasas neutras están formadas por una triple cadena de ésteres, unidos a una molécula de glicerol (Baldiris et al., 2022). En la industria de productos alimenticios o nutracéuticos, las microalgas permiten obtener alimentos funcionales debido a que contienen compuestos como lípidos, proteínas, polifenoles entre otros.

Para que las algas se consideren como nuevas fuentes potenciales de alimento, un factor crucial es su composición y contenido nutricional (Torres et al., 2020). Dentro del campo de la biotecnología actual, las microalgas están consideradas como organismos muy interesantes para la obtención de productos naturales, desde la aplicación comercial se buscan obtener productos de alto valor añadido con aplicaciones en la nutrición y salud humana (García et al., 2017). El interés alimentario de la biomasa de microalgas reside no solamente en su riqueza proteica, sino también en su contenido en lípidos esenciales, pigmentos, carbohidratos, vitaminas, minerales, etc., siendo la concentración de ácidos nucleicos (5-10 %) de las más bajas encontradas en microorganismos (García et al., 2017).

El alimento funcional se puede obtener mediante la adición de uno o más componentes ingredientes que no están presentes en el alimento convencional o están presentes en concentraciones más bajas. Los ingredientes funcionales, que son principalmente micronutrientes, como los ácidos grasos ω -3, ácidos linoleicos, fitoesteroles, prebióticos, probióticos, carotenoides, polifenoles, vitaminas, etc., pueden ejercer una acción saludable específica en el organismo (Mobin et al., 2019).

Características Taxonómicas de Las Microalgas

Las algas marinas son un grupo diverso de organismos autótrofos, unicelulares o pluricelulares. Se clasifican taxonómicamente en: algas pardas (*phaeophyta*), rojas (*rhodophyta*), verdes (*chlorophyta*) y azul-verde (*cyanophyta*). En las algas pardas predominan las xantofilas, específicamente fucoxantinas, que les otorgan el color característico. En las algas rojas, pigmentos ficoeritrina y ficocianina enmascaran otros pigmentos como clorofila y beta-caroteno. Las algas verdes deben su coloración a la presencia mayoritaria de clorofila a y b, beta-caroteno (pigmento amarillo) y diversas xantófilas (pigmentos con tonalidades amarillo o pardo) (Quitral et al., 2019).

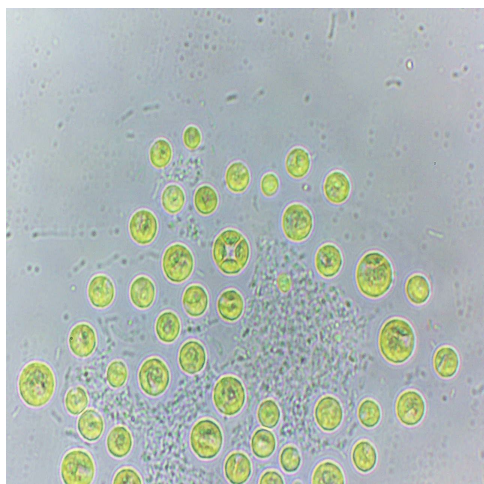
Parachlorella kessleri pertenece al filo Chlorophyta que agrupa las llamadas algas verdes, las cuales están estrechamente relacionadas con las plantas superiores porque poseen los mismos tipos de clorofila: a y b (Latorre, 2020). *Parachlorella* es hasta hoy el género de algas verdes mejor estudiado, la microalga *Parachlorella kessleri* se clasificó bajo éste género porque se caracterizan por ser eucariotas, con forma esférica o elipsoides, la forma del pirenoide, y el organelo asociado al almacenamiento de la enzima RuBisCO (fijadora de dióxido de carbono) es en “forma de manto”. La reproducción de la microalga es asexual por liberación de autosporas, y

el almidón se forma como uno de los principales productos de reserva dentro del cloroplasto y no en el citoplasma, característica que la diferencia del resto de algas eucariotas (Latorre, 2020).

En la imagen 1 se puede observar la microalga *Parachlorella kessleri* a microscopio con un objeto de 40x. En esta imagen se evidencia el color característico debido a la clorofila de las microalgas.

Apéndice 1

Observación de la microalga Parachlorella kessleri de la laguna de La Cocha



Fuente. (Cerón, 2022)

De esta manera se puede decir que la microalga que se trabajó en este proyecto pertenece al género *Chlorella*; en cuanto a la familia a la que pertenecen se logra definir que dentro de las dos ramas o clados en los que se divide esta familia, la microalga de interés para este trabajo está contemplada en el clado de *Parachlorella* y más específicamente de la especie *Parachlorella kessleri* (Latorre, 2020). A diferencia de los microorganismos heterótrofos, que requieren varios compuestos orgánicos para crecer, los organismos fotosintéticos unicelulares producen biomasa a partir de sustancias inorgánicas y elementos minerales completamente oxidados debido a la

energía luminosa convertida durante la fotosíntesis (Dolganyuk et al., 2020) este aspecto se puede atribuir a la microalga *Parachlorella kessleri*.

Condiciones de Cultivo de Las Microalgas de Agua Dulce

Las microalgas como microorganismos unicelulares tienen características únicas como la tasa de crecimiento rápido, la conversión de la energía de la luz a la bioquímica compuestos, biofijación de CO₂ y consumo de orgánicos e inorgánicos, macro y micronutrientes (Zarrinmehr et al., 2020). Se pueden cultivar en una amplia gama de ambientes acuáticos con diferentes niveles de salinidad, desde agua dulce hasta agua marina, así como diferentes tipos de aguas residuales. Su uso depende de la tasa de crecimiento, composición bioquímica, y las características especiales de las microalgas y se pueden utilizar como fuente de nutrientes en la alimentación humana, animal y en acuicultura (Zarrinmehr et al., 2020).

Los principales factores que afectan el cultivo de microalgas incluyen condiciones ambientales (luz, temperatura, pH, suministro de nutrientes y salinidad) y físicas (agitación), parámetros biológicos, especies de algas y la forma del recipiente de cultivo (Daneshvar et al., 2018). Latorre, (2020) en su investigación clasificó varios tipos de cultivo según las fuentes y requerimientos de las microalgas, (tabla 1).

Tabla 1

Métodos más conocidos para cultivo de microalgas

Modo de crecimiento	Fuente de energía	Fuente de carbono	Disponibilidad de luz
Fotoautotrófico o autotrófico	Luz	Inorgánica	Obligatoria
Heterotrófico	Orgánica	Orgánica	No obligatoria
Fotoheterotrófico	Luz	Orgánica	Obligatoria

Mixotrófico

Orgánica

Inorgánica y
orgánica

No obligatoria

Fuente. Latorre Hernández, (2020).

El cultivo de algas en modo de cultivo heterótrofo ofrece una mayor productividad de biomasa, proteínas y sustancias bioactivas enriquecidas con antioxidantes en comparación con el modo de cultivo autótrofo (Sharma, 2019). Aunque, el cultivo de microalgas puede ser una combinación de ambos, es decir, mixotrófico, en esta condición, el organismo asimila simultáneamente CO₂ del medio de cultivo para realizar la fotosíntesis y utiliza fuentes de carbono orgánico del medio para producir también metabolitos para la supervivencia y la reproducción (Baldiris et al., 2022). Gao et al., (2021) encontraron que para *P. kessleri* TY en condiciones de crecimiento deficientes en nitrógeno y mixotróficas (+ glucosa), los contenidos de lípidos neutros y lípidos totales y la productividad de lípidos fueron significativamente más altos que los de otros grupos.

Características de los Lípidos

Los lípidos son un grupo muy heterogéneo de moléculas orgánicas; e incluyen grasas, aceites, esteroides, ceras y otros compuestos relacionados más por sus propiedades físicas que por sus propiedades químicas. Los lípidos se pueden clasificar en dos grupos o clases principales. Un grupo, que consta de compuestos de cadena abierta con cabezas o grupos polares y largas colas hidrocarbonadas no polares, que incluye a los ácidos grasos, los triacilglicéridos o triglicéridos, los esfingolípidos, los fosfoacilgliceroles y los glucolípidos; y otro grupo que consta de compuestos con anillos fusionados, conocidos como esteroides (Carvajal, 2019).

Otra clasificación divide a los lípidos en:

1. Lípidos simples: ésteres de ácidos grasos con diversos alcoholes (grasas y ceras).

2. Lípidos complejos: ésteres de ácidos grasos que contienen otros grupos además de un alcohol y un ácido graso (fosfolípidos, glucolípidos y otros lípidos complejos).
3. Lípidos precursores y derivados: comprenden ácidos grasos, glicerol, esteroides, cuerpos cetónicos, hidrocarburos, vitaminas liposolubles y hormonas liposolubles (Carvajal, 2019).

Aceite extraído de la Microalga *Parachlorella kessleri*

Hasta el momento según la FDA, el aceite extraído de microalgas, ha sido declarado como un aceite seguro y biodisponible (que el cuerpo humano puede absorber y utilizar), para ser adicionado a otros alimentos (Gómez et al., 2020).

En cuanto a la composición del aceite de las algas, (García et al., 2017), menciona que los lípidos de las algas se clasifican en neutros (triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, esteroides, ceras, ésteres de esteroides e hidrocarburos) y líquidos polares (principalmente fosfolípidos, glicolípidos, carotenoides y clorofilas). La complejidad de éstos lípidos algales requiere métodos específicos para el fraccionamiento, purificación y determinación de clases individuales y de especies moleculares de lípidos más específicamente en cuanto al contenido de ácidos grasos omega-3 que se encuentra en mayor contenido en especies marinas como microalgas, peces y krill (Padial, 2021). Los componentes mayoritarios de los lípidos son los TAG y fosfolípidos que están constituidos por ácidos grasos, que son biomoléculas formadas por una cadena alifática de átomos de carbono con un grupo carboxilo terminal. Los ácidos grasos se pueden clasificar en función de la longitud de su cadena (de cadena corta: de 4 a 6 átomos de carbono; media: con 8 a 12 átomos de carbono; y larga: de 14 a 24 átomos de carbono) y, el número y localización de sus dobles enlaces. Esto permite agruparlos en ácidos grasos saturados (AGS), aquellos que no

presentan ningún doble enlace, monoinsaturados (AGMI) los que tienen un solo enlace doble, y poliinsaturados (AGPI), con dos o más enlaces dobles (Solomando, 2022).

Para esta investigación se tuvo en cuenta la composición de la microalga *Parachlorella kessleri*, ya que en su composición se resaltan principalmente los ácidos grasos linolénico, linoleico, los cuales son objeto de esta investigación por su importancia. En la tabla 2 se puede observar la composición de la microalga aislada de la laguna de La Cocha en cuanto a sus ácidos grasos.

Tabla 2

Composición de lípidos de AGPI de la microalga Parachlorella kessleri aislada de la laguna de La Cocha

Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos (FAMES)	Área (%)
2-hexil-ciclopropanoico	-
Araquidónico	-
Hexadecadienoico	1,01
Palmitoleico	-
Linoleico	10,91
Linolénico	9,62
Oleico	3,39
Estearico	36,49
Palmítico	36,52
Margárico	-
Mirístico	1,25
Pentadecanoico	0,81
%Área AG Insaturados	24,93
%Área AG Saturados	75,07

Fuente: Cerón, (2022)

Tecnología de la Microencapsulación

La encapsulación es el proceso de construir una barrera funcional entre un encapsulado y un material de pared para evitar reacciones químicas y físicas, así como mantener las

propiedades biológicas, funcionales y fisicoquímicas del núcleo. Esta técnica consiste en atrapar una sustancia bioactiva mediante el uso de una barrera física o una matriz compatible con el fin de producir pequeñas cápsulas (núcleo + soporte) en nanómetros (nanoencapsulación), micrómetros (microencapsulación) o escala milimétrica, por diferentes métodos (Rodríguez et al., 2022). En la industria alimentaria y farmacéutica, el secado por aspersión figura entre las metodologías de microencapsulación más aplicadas, debido a su bajo costo, continuidad de proceso y versatilidad (Rivera et al., 2020). La microencapsulación por secado por aspersión ha sido objeto de estudio durante varias décadas y se ha encontrado en constante innovación, convirtiéndose en una de las tendencias más importantes para la industria de alimentos, cosmética, farmacéutica, textil, entre otras (Rios & Gil, 2021).

La microencapsulación utilizando secado por aspersión comienza con la preparación de la solución (emulsión o suspensión) de alimentación (solución de encapsulante más el principio activo), en donde el componente a encapsular es rodeado por la matriz protectora. Posteriormente, la solución es alimentada a un secador y atomizada por una boquilla. Durante la atomización, la muestra entra en contacto con una corriente de aire caliente que ocasiona la evaporación del agua presente en la muestra. Finalmente, se obtiene un producto seco en forma de polvo o gránulos (microencapsulado) con un tamaño de partícula que oscila entre 1-100 μm . El tiempo de contacto entre la muestra atomizada y el aire caliente es muy corto y en consecuencia el daño debido al calor es mínimo

El proceso consta de las siguientes etapas: (1) preparación de una emulsión estable, (2) homogeneización de la dispersión, (3) aspersión de la emulsión y (4) deshidratación de las partículas asperjadas. La etapa de secado consta a su vez de cuatro pasos: (1) atomización de la matriz de alimentación, (2) secado del medio, (3) secado de la matriz de alimentación y la

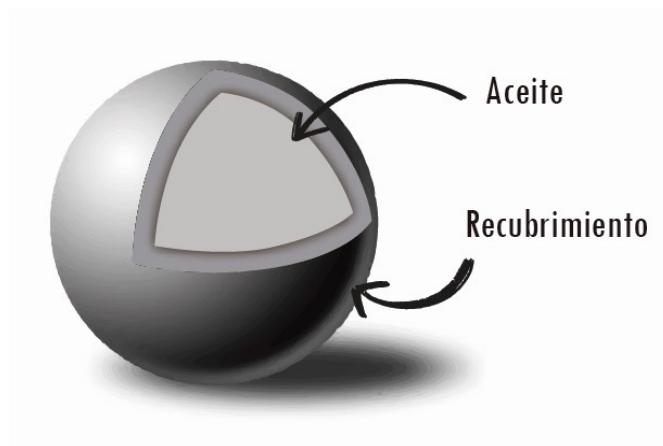
superficie de contacto, y (4) separación de los productos del aire (Rodríguez et al., 2022). Las microcápsulas pueden tomar diferentes formas dependiendo de varios factores como los materiales empleados, el manejo de las variables de secado, entre otras. Como se muestra en la figura 1, existen diferentes tipos de partículas formadas a partir de la microencapsulación que pueden ser: esfera simple la cual se caracteriza por tener un recubrimiento de espesor uniforme, partícula que contiene un núcleo de forma irregular; varias partículas del núcleo incrustadas en una matriz continua de material de pared; varios núcleos distintos dentro de la misma cápsula; y microcápsulas de paredes múltiples (Rios & Gil, 2021).

Métodos de Microencapsulado

La microencapsulación es el proceso de contener o envolver cualquier ingrediente activo, como pueden ser aceites ricos en ácidos grasos Omega-3, dentro de otra sustancia de recubrimiento formando microcápsulas (Padial, 2021). En la Figura 1 se puede observar el esquema simplificado de la microcápsula de aceite:

Figura 1

Esquema simplificado de la microcápsula de aceite



Fuente. Padial, 2021, p. 83

Para microencapsular compuestos activos, se pueden describir varios métodos, entre ellos los más utilizados son:

Disco Giratorio: Típicamente, el activo se suspende en el material que formará la matriz de encapsulamiento, la cual se deja caer sobre un disco giratorio. Posteriormente, el líquido se desplaza por acción de la fuerza centrífuga, generando así microgotas las cuales solidifican por secado o enfriamiento (Hernández, 2020).

Extrusión y coextrusión: En este caso, el ingrediente activo se dispersa en el material de pared fundido, donde dicha mezcla es extruida para formar un filamento sólido mientras el material se enfría con aire o utilizando un líquido; posteriormente, el filamento es peletizado. En el caso de la coextrusión el ingrediente activo se bombea a través del interior de un dado mientras que la pared de encapsulamiento se bombea por la parte exterior del dado. Las matrices más utilizadas en esta técnica son matrices de carbohidratos en estado vítreo (Hernández, 2020).

Lecho fluidizado: Consiste en la atomización de una solución de matriz de encapsulamiento (polímero en solución o estado fundido) sobre partículas sólidas del ingrediente activo. Sin embargo, con este proceso se dificulta obtener gránulos con un tamaño menor a 20 micras. Esta técnica utiliza como matriz encapsulante ceras fundidas, gomas, polímeros sintéticos y maltodextrinas (Hernández, 2020).

Coacervación: Este proceso involucra la segregación de un polímero en solución, donde se forman pequeñas gotas inmiscibles que se adsorben en la superficie de las partículas dispersas en el medio, formando un encapsulamiento de tipo núcleo coraza al endurecer la capa

polimérica. Principalmente se utilizan polímeros como matrices encapsulantes (Hernández, 2020).

Atrapamiento en Liposomas: Los liposomas son partículas microscópicas constituidas principalmente de lípidos y agua. Son estructuras compuestas de una bicapa de lípidos que engloban un volumen acuoso contenido el agente activo (Hernández, 2020).

Secado por atomización (Spray Drying): La tecnología del secado por atomización (spray drying), es ampliamente conocida y utilizada para transformar líquidos a polvos sólidos. Dichos líquidos abarcan desde soluciones, emulsiones, suspensiones, lodos, pastas e incluso fundidos (Hernández, 2020).

Secado por Aspersión para Microencapsulación

El secado por aspersión es una de las técnicas más antiguas de encapsulación, con un inicio que se remonta a los años 30, donde las primeras aplicaciones se enfocaron en la microencapsulación de sabores, utilizando goma arábica como material de pared o encapsulante (Rios & Gil, 2021).

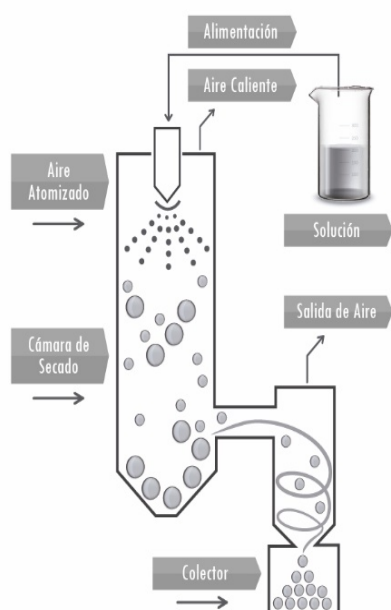
Para lograr una microencapsulación eficiente de aceite rico en ácidos grasos Omega-3 mediante secado por atomización, se deben tener en cuenta factores como la formulación de la emulsión previa en cuanto a la selección del agente encapsulante, emulsificante y antioxidante adecuados, sus concentraciones, el tipo de aceite y concentración y, las condiciones del proceso como la temperatura de entrada y salida del aire, temperatura de entrada de la alimentación, caudal de alimentación y presión proporcionada por el compresor al inyector.

Principio del secado por aspersión

El principio de trabajo es la eliminación de la humedad por medio de la aplicación de calor y el control de la humedad del medio de secado. La eliminación de la humedad se promueve mediante la extracción de agua del producto (emulsión de alimentación) en una atmósfera de aire caliente. Este principio se puede entender mejor con la representación gráfica de la figura 2 que se muestra a continuación.

Figura 2

Proceso de secado por aspersión (Spray Drying)



La eficiencia en la encapsulación viene determinada por el porcentaje de aceite encapsulado y la estabilidad física y oxidativa de las microcápsulas a lo largo del tiempo. Un porcentaje elevado en las microcápsulas de aceite no encapsulado es un catalizador de oxidación

de las propias capsulas y de la matriz alimentaria a la que se incorporen (Padial, 2021). Uno de los equipos más utilizados por costo y facilidad de manejo es el equipo spray dryer.

Equipo para microencapsulación

Spray Dryer SD-Basic

Apéndice 2

Componentes del equipo spray dryer SD-Basic



Nota. En la imagen 1 se indican las piezas que componen el secador spray dryer modelo SD-Basic, este equipo realiza el proceso de secado básicamente en cuatro etapas. 1. Atomización del fluido; 2. Secado del medio; 3. Secado y pulverización del fluido; y 4. Separación de polvo y aire.

Técnica del Secador Spray Dryer SD-Basic

Como se indica en la figura 1 el proceso secado por aspersion inicia con el encendido del equipo controlado por el botón de encendido y apagado (componente 18), la mezcla (componente 1) objetivo de microencapsulación es absorbida por una manguera de alimentación

(componente 2) fabricada en silicona especial para productos alimenticios. Esta manguera pasa por una bomba peristáltica (componente 3) la cual entrega la muestra a través de un chorro de pequeño producido por un atomizador (componente 4) hacia la cámara de secado (componente 7), al mismo tiempo, el aire comprimido generado por un compresor (componente 6) entra por la manguera de aire (componente 5), lo que hace que la mezcla se transporte hacia atomizador y seguidamente a la cámara de secado, la cual está asegurada por una abrazadera (componente 8). La cámara de secado sopla aire caliente regulada por el panel de control de temperatura de entrada y salida del aire (componente 19), soplador (componente 20) y calentador (componente 21) y realizan la función de evaporar el contenido cuando están encendidos. Al pasar la mezcla pueden quedar residuos los cuales caen al tubo de recolección de residuos (componente 9) asegurada con un adaptador SVL (componente 10). Las partículas sólidas de la mezcla se separan del flujo de aire y llegan a un ciclón (componente 11) fijado con una abrazadera cámara-ciclón (componente 12) que evita fugas de aire y filtraciones. Las partículas se recolectan en el recolector (componente 13) igualmente asegurados con una abrazadera ciclón-recolector (componente 14). El flujo de aire de escape sale por un tubo de escape (componente 15) el cual está asegurado por un anillo de escape (componente 16), posteriormente el aire se dirige a una manguera de gases (componente 17) dirigida directamente a la atmósfera o a un sistema de extracción existente.

En la tabla 3 se pueden observar las especificaciones técnicas del spray dryer modelo SD-Basic, equipo que se utilizó en el proceso de microencapsulación. El producto resultante normalmente presenta un aspecto macroscópico en forma de polvo y un diámetro interno inferior a 1 μm (micrómetro) y usualmente es denominado como “microcápsula”, “microesfera” o

“micropartícula”. Como se observa en la figura 3 existen diferentes tipos de morfologías que se obtienen del secado por aspersión.

Tabla 3

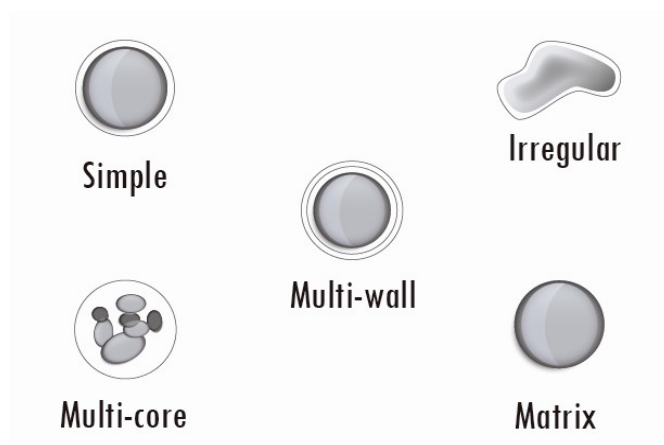
Especificaciones del Spray Dryer SD-Basic

Dimensiones	1100 mm x 500 mm x 500 mm (HWD)
Peso aprox.	60 kg
Calentador	3000 watts
Configuración del operador	Entrada de aire: Max. 200 °C Volumen de alimentación: 0 a 1500 ml/hr
Requerimientos de energía	Flujo de aire fijo: 70 m ³ /h aprox. 220/240 v 50/60 Hz 1 pH

Fuente. Labplant, (2023).

Figura 3

Tipos de morfologías de microencapsulados secados por aspersión



Fuente: Rios & Gil, 2021, p 7.

Los emulsificantes son moléculas anfifílicas con actividad superficial, es decir poseen tanto grupos polares como apolares que les permiten ubicarse en la interfase de las emulsiones y

reducir la tensión interfacial, mejorando la interacción y el tamaño de las partículas en la emulsión, además, los emulsificantes una vez adsorbidos en la superficie de la gota crean una barrera contra la coalescencia y la floculación durante el almacenamiento (Acevedo, 2017). Las principales características de un emulsificante son:

Capacidad de emulsificación (EC): máxima cantidad de aceite que puede ser dispersado en una solución acuosa que contiene una cantidad específica de emulsificante, sin que la emulsión se rompa o invierta (Acevedo, 2017).

Índice de estabilidad de la emulsión (ESI): mide el cambio del tamaño de partícula de una emulsión después de un tiempo específico de almacenamiento, o estrés ambiental (calentar, enfriar, agitar). Entre menos se incremente el tamaño de partícula, mejor es el emulsificante (Acevedo, 2017).

Balance Hidofílico - Lipofílico (HLB): Se mide en una escala entre 0 y 20, y expresa numéricamente la fuerza y tamaño entre una porción polar y una no polar en un surfactante. Este número indica la solubilidad de un surfactante en la fase oleosa o acuosa. Los valores HLB de emulsiones W/O van de 3.5 a 6, mientras que para emulsiones O/W van de 8 a 18 (Acevedo, 2017).

Materiales para la Microencapsulación

Los microencapsulantes toman gran importancia para la microencapsulación, ya que como se ha mencionado anteriormente el aceite debe protegerse para conservar sus propiedades y posteriormente en la encapsulación proporcionar estabilidad al producto obtenido.

El sistema de encapsulamiento se emplea con la finalidad de darle protección a los compuestos a encapsular de factores que pueden causar su deterioro, evitar una interacción

prematura entre el material del núcleo y otros ingredientes, limitar las pérdidas volátiles y facilitar una liberación controlada o sostenida de manera dirigida de acuerdo a la aplicación que se desea realizar (Rios & Gil, 2021).

Un material encapsulante se define como un componente que forma un recubrimiento de capa delgada sobre una superficie. Esta capa puede ser de naturaleza orgánica, inorgánica o una combinación de ambas. Las cubiertas orgánicas, frecuentemente, presentan pigmentos, extensores y otros aditivos como catalizadores, absorbente, modificadores y antioxidantes (Rios & Gil, 2021). Los aceites ricos en ácidos grasos poliinsaturados Omega-3 son líquidos a temperatura ambiente e inmiscibles en agua, de esta manera, cuando se mezclan en una matriz alimentaria acuosa tienden a desestabilizarse. Por ese motivo, es necesaria la presencia de algún componente con propiedades anfífilas que pueda interactuar en la interfase aceite- agua y reducir la tensión superficial (Padial, 2021).

La lecitina se emplea como emulsificador, antioxidante, mejorador de textura y protector del sabor en la elaboración de ciertos alimentos, así como en las industrias cosmética, química y farmacéutica, entre otras (Issn et al., 2021).

Materiales de Pared para Microencapsulación

El propósito de los materiales de pared es actuar como una barrera entre los materiales del núcleo y cualquier factor externo que puedan causar su deterioro, para inhibir las interacciones prematuras entre el núcleo, material y otros ingredientes, para reducir la reactividad del material del núcleo con respecto al externo medio ambiente, para limitar las pérdidas volátiles, y también para permitir la liberación controlada o sostenida bajo deseadas condiciones (Zarrinmehr et al., 2020).

Bastida, (2019) menciona que la eficiencia de encapsulación depende en gran parte del agente encapsulante, estos materiales de barrera son seleccionados dependiendo de la naturaleza química de los componentes del sabor, del proceso de encapsulación y del uso de a las microcápsulas, de ahí que como requisito fundamental es que el material de pared sea comestible, no tóxico y libre de olores fuertes.

Goma Arábica.

Es un exudado de los árboles de *Acacia seyal* o *Acacia Senegal*, está compuesta por complejos polisacáridos, glicoproteínas y oligosacáridos

La goma arábica es un polisacárido conformado por la polimerización de varios monómeros (L-arabinosa, ácido D-glucurónico y D-galactosa), el cual, durante la digestión, se degrada parcialmente en el intestino grueso y es ampliamente utilizada como encapsulante, ya que presenta unas propiedades de formación de película para sabores, colores y vitaminas, además que posee buenas cualidades emulsionantes, alta solubilidad, baja viscosidad y alta eficiencia a la hora de encapsular, esto tiene relación con la estructura de la goma arábica, ya que es un heteropolímero de azúcar altamente ramificado, que tiene una pequeña cantidad de proteína unida covalentemente a la cadena de carbohidratos, el cual actúa como un excelente agente de formación de película, facilitando la encapsulación efectiva de moléculas (Rios & Gil, 2021). La estructura de la goma arábica es un complejo polisacárido ramificado, ácido o ligeramente ácido, que se obtiene por una mezcla de sales de calcio, magnesio y potasio 11. La cadena lineal de galactosa, está unida a ramificaciones de arabinosa, ramnosa y ácido glucorónico⁸. Se separa en tres fracciones: arabinogalactano-peptido, arabinogalactano proteínas y una fracción de glicoproteína (Alcocer et al., 2017).

Maltodextrina.

La maltodextrina es obtenida por hidrólisis enzimática o ácida del almidón y generalmente muestra una alta solubilidad en agua, sabor neutro, bajo costo, baja viscosidad a altas concentraciones y capacidad de proteger el material encapsulado de la oxidación. Su baja capacidad emulsionante puede superarse mediante el uso de almidones modificados o gomas. Las maltodextrinas se han usado ampliamente para la microencapsulación de alimentos debido a su bajo costo, alta solubilidad y baja viscosidad a altas concentraciones. Sin embargo, la mayor desventaja de este agente de encapsulación es su falta de propiedades emulsionantes debido a su afinidad limitada por los componentes hidrófobos, por lo tanto, el uso de goma arábica combinada con maltodextrina puede ofrecer un buen compromiso entre costo y efectividad (Rios & Gil, 2021).

Eficiencia de Encapsulación

La eficiencia de encapsulación (EE) define la cantidad del compuesto que fue cargado, relacionada con la concentración inicial utilizada (Suárez & Brito, 2020). La eficiencia por secado por aspersión es relativamente alta en comparación con otros métodos, aunque no es 100 % efectiva, de allí la importancia de su cuantificación, para su determinación se debe tener en cuenta la concentración del compuesto bioactivo inicial y la concentración del resultante en el núcleo de la microcápsula; también es necesario determinar la cantidad del principio activo que queda en la parte externa interactuando con el material encapsulante (Rios & Gil, 2021).

Metodología

El aceite del alga *Parachlorella kessleri* fue donado por el grupo de Biotecnología microbiana de la Universidad de Nariño para esta investigación dentro del marco de colaboración del proyecto de investigación financiado por Colciencias denominado “Aprovechamiento sustentable del alga *Chlorella spp* para la obtención de aceite micro encapsulado”.

El tipo de investigación del proyecto es cuantitativo puesto que pretende determinar los mejores parámetros de operación mediante método de secado para aspersión utilizando el equipo spray dryer modelo SD-Basic para obtener el mejor rendimiento, porcentaje de humedad y eficiencia de encapsulación de microencapsulado de aceite del alga *P. kessleri*. El enfoque es de tipo experimental puesto que se controlaron las variables independientes (parámetros de operación) y es de nivel predictivo puesto que se midieron los efectos en las variables independientes antes mencionadas. El proyecto se ejecutó en el laboratorio 504 del grupo de biotecnología microbiana de la Universidad de Nariño. Todos los recursos, materiales y equipos necesarios para la investigación fueron financiados por el macro proyecto financiado por Minciencias en la convocatoria 818 como se mencionó anteriormente.

Para llevar a cabo los objetivos específicos del proyecto se presenta la metodología de cada uno a continuación:

Homogenización de la emulsión para la microencapsulación mediante secado por aspersión del aceite de la microalga *Parachlorella kessleri*.

La emulsión se llevó a cabo en dos momentos, el primer momento fue en el que se emulsificó el aceite y se generaron las burbujas para la posterior encapsulación, la fase dispersa fue el aceite extraído de la microalga *Parachlorella kessleri* (6 g) y la fase continua se conformó

por agua destilada (23,5 g) y emulgente lecitina de soja (0, 5g). Las cantidades fueron obtenidas de una base de cálculo de 50 g de emulsión final. Cabe aclarar que la lecitina se escogió como mejor emulgente para este proyecto ya que presenta cualidades óptimas para realizar este experimento, como lo corrobora Álvarez et al., (2018) quien menciona en su investigación que la lecitina es un emulsionante muy necesario para aumentar la estabilidad coloidal y proporcionar interacciones interraciales entre los componentes alimentarios, que son factores importantes para mejorar aún más la estabilidad de la emulsión y la vida útil en muchos alimentos. . Con el fin de emulsificar la emulsión se utilizó un Ultra turrax D-160 scilogex.

Para llevar a cabo el momento 2, el cual consiste en encapsular la solución antes preparada, con el fin de determinar la mejor relación de materiales de pared para la microencapsulación del aceite de la microalga *Parachlorella kessleri*. se realizó un experimento con tres proporciones diferentes entre MD (Maltodextrina), GA (Goma Arabiga) y solución encapsulaste. Como variables de respuesta se determinaron, la ausencia de aceite externo en la emulsión y morfología de la microcápsula. Las relaciones evaluadas para la mezcla de los materiales de pared se categorizaron como nivel máximo, central y mínimo (3 :1, 2:1 y 1:1) para cada nivel se realizaron tres replicas. En la tabla 4 se pueden observar los niveles en cuanto a la relación de los materiales de pared utilizados para la micro encapsulación del aceite.

Tabla 4.

Relación de maltodextrina y goma arábica para el momento 2 de la emulsión

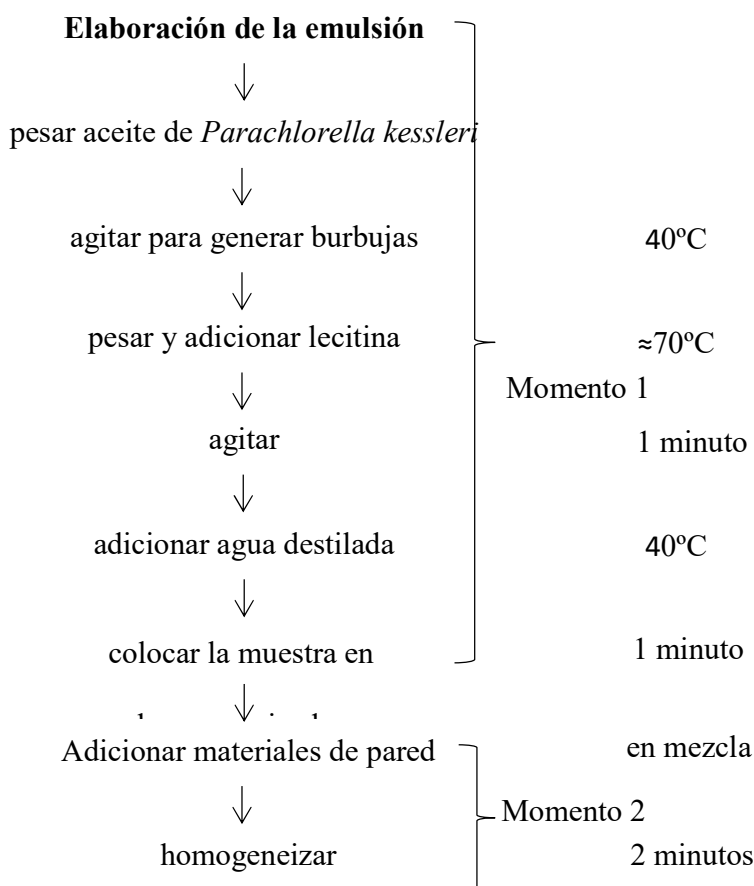
Relación MD/GA	Cantidad (g)
3:1	15/5
2:1	13,33/6,66
1:1	10/10

La incorporación de los materiales de pared se realizó en mezcla y gradualmente, de tal manera que al adicionarse presenten mejores características para la emulsión final. Cardona et al., (2021) y Karrar et al., (2021) mencionan en sus investigaciones acerca del efecto de la combinación de maltodextrina con goma arabiga sobre la encapsulación de aceite utilizando un método de secado por aspersión, donde el aceite estuvo bien encapsulado en las microcápsulas.

Una vez realizadas las dos fases de la emulsión se procedió a homogeneizar la mezcla con ayuda del ultraturrax modelo D-160 scilogex durante dos minutos. En la Figura 4 se puede observar el diagrama de proceso de elaboración de los dos momentos de la emulsión.

Figura 4

Diagrama de proceso de la emulsión



Para evaluar la presencia/ausencia de aceite en la microencapsulación se prepararon placas de cada muestra, las cuales se tiñeron con colorante *sudan schwarz B rojo* con el fin de evidenciar la presencia o ausencia de los mismos dentro de las partículas formadas en la emulsión. Posteriormente, se observaron las placas en microscopio *Prime Star Zeiss*. Se determinó el tratamiento con mejor resultado en cuanto a la microencapsulación de aceite, es decir, teniendo como variable de respuesta la ausencia de aceite externo y morfología homogénea de las micro cápsulas, la emulsión con mejor resultado se utilizó para la obtención de las micro partículas por el método de secado por aspersión.

Efecto de los parámetros de operación de secado por aspersión en los parámetros fisicoquímicos del microencapsulado de aceite de *Parachlorella Kessleri*

Planteamiento del Diseño experimental

Se planteó un diseño factorial donde se contemplaron 2 factores (Temperatura de entrada de aire de secado y velocidad de entrada de aire) y dos niveles con punto central y tres réplicas de cada tratamiento. Para un total de 21 experimentos como se observa en la Tabla 5.

Como variables de respuesta se midió: el porcentaje de rendimiento, porcentaje de mínimo humedad, eficiencia de encapsulación, el tamaño de partícula del microencapsulado, con una base de cálculo inicial 50 g de emulsión.

Tabla 5

Diseño experimental para evaluar el efecto de los parámetros de operación del equipo spray dryer modelo SD-Basic en el producto final.

Variables independientes	Niveles		
	-1	0	+1

Temperatura de entrada (°C)	115	122,5	130
Velocidad de flujo (mL/min)	6	5	7

Obtención de las microcapsulas por secado por aspersión.

Una vez identificados los componentes del equipo se procedió a realizar una estabilización del proceso de secado que consistió en dejar pasar por el equipo agua destilada en constante agitación por aproximadamente 5 minutos, esto a razón de estabilizar las condiciones del equipo para cada tratamiento y de esta manera evitar supuestos en los resultados.

Cada tratamiento se corrió en el spray dryer con un tiempo de secado de quince minutos y después de cada tratamiento se realizó la respectiva limpieza del equipo. Para recolectar las muestras se utilizaron herramientas como pinceles finos previamente sonetizados para manipular el material, evitando su contaminación. Posteriormente, el polvo obtenido en cada corrida se envasó en falcón de 50 ml para evitar el contacto con la humedad del ambiente que pueden afectar para futuras pruebas.

Determinación del Máximo Porcentaje de rendimiento

El rendimiento del proceso de secado por aspersión se calculó por medio de la técnica gravimétrica que relaciona la cantidad de solidos alimentados en el secador respecto a los sólidos recuperados a la salida (Clavijo et al., 2018), el mejor tratamiento será el que tenga mayor porcentaje de rendimiento. para determinar el porcentaje de rendimiento se aplicará la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$\%R = \frac{P}{ST} * 100$$

Donde,

% R es el porcentaje de rendimiento

P es el peso obtenido de cada tratamiento (g)

ST son los sólidos totales de la emulsión (g)

Determinación del Mínimo porcentaje de humedad

Para determinar el porcentaje de humedad de cada una de las muestras obtenidas del secado por aspersión se aplicó el método termo gravimétrico que consiste en tomar una muestra de un gramo de cada tratamiento con ayuda de una balanza analítica y se realizaron pesajes del papel aluminio en el cual estuvieron empacados los tratamientos. Posteriormente, las muestras se sometieron a calentamiento en un horno de secado a una temperatura de 105°C durante cuatro horas, una vez transcurrido este tiempo se llevaron las muestras a una campana de desecación para mantenerlas limpias y deshidratadas durante doce horas. Después de cumplido el tiempo se midieron las masas de las muestras secas con el peso del aluminio, y se aplicó la siguiente ecuación para determinar el porcentaje de humedad de cada tratamiento:

Ecuación 2

$$\%H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100$$

Donde,

%H es el porcentaje de humedad

m_1 es el peso del papel aluminio (g)

m_2 es el peso del papel aluminio y en micro encapsulado antes del secado (g)

m_3 es el peso del papel aluminio y en micro encapsulado después del secado (g)

Determinación del Máximo Porcentaje de eficiencia del microencapsulado

La determinación del contenido de lípidos en el microencapsulado de aceite de *Parachlorella kessleri* se llevó a cabo con la metodología propuesta por Mishra et al., (2014), Anschau et al., (2017) que consiste en la cuantificación de producción de lípidos por metodo colorimétrico en biomasa humedad bajo la reacción de la sulfo-fosfo-vainillina (SPV).

Para el procedimiento se tomaron muestras de 1.5 g de cada tratamiento de microencapsulado y se adicionó al reactivo de fosfovainillina, para la preparación de este reactivo se disolvieron 0,6 g de vainillina en 10 ml de etanol absoluto y 90 ml de agua desionizada, se agitó continuamente y se añadieron 400 ml de ácido fosfórico concentrado a la mezcla, la solución resultante se almacenó en la oscuridad hasta su uso. Seguidamente, se preparó una solución patrón con 10 mg de aceite de la microalga *Parachlorella kessleri* con 10 ml de cloroformo (concentración final 2 mg/ml), y se almacenó en oscuridad a 20 °C hasta su uso; a partir de esta solución se tomaron de 100 a 1000 μ L en tubos de vidrio que se colocaron en un horno a 60 °C hasta evaporar el disolvente para posteriormente correr la reacción. Para la reacción SPV del cultivo de *Parachlorella kessleri*, se utilizó la cantidad de biomasa obtenida por centrifugación a 5000 rpm durante 5 minutos, a las muestras obtenidas se les añadió 2 ml de ácido sulfúrico concentrado (98%), se calentaron durante 10 minutos a 100°C, se enfriaron durante 5 minutos en un baño de hielo, se les añadió 5 ml del reactivo de Fosfo-Vainillina recién preparado y se incubaron durante 15 minutos en un agitador a 37 °C y 200 rpm, finalmente se

realizó la lectura de absorbancia a 530 nm para cuantificar los lípidos totales presentes en cada una de las muestras (Mishra et al., 2014)(Anschau et al., 2017).

Este método se aplicó en los tratamientos obtenidos de la microencapsulación. Una vez obtenidas las absorbancias se aplicó el modelo matemático de acuerdo con lo realizado por Cerón, (2022) que permite cuantificar los lípidos en este caso del aceite de *Parachlorella kessleri*, a partir de la cual se obtuvieron las cantidades de aceite encapsulado, lo que permitirá calcular la eficiencia de encapsulación con la ecuación 4 adaptada de (Cuevas et al., 2019).

Ecuación 3

Modelo matemático

$$Y = 0,008x + 0,0656$$

Donde, x corresponde al valor de las absorbancias obtenidos de los tratamientos, cabe aclarar que es necesario incluir los datos exactos de absorbancia en el caso de hacer diluciones.

La EE se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación 4

$$MME\% = \frac{APK_t(mg) - APK_e(mg)}{APK_t(mg)} * 100$$

Donde, APK_t es el contenido total de aceite de *Parachlorella kessleri* y APK_e es el contenido superficial del aceite extraíble de *Parachlorella kessleri*.

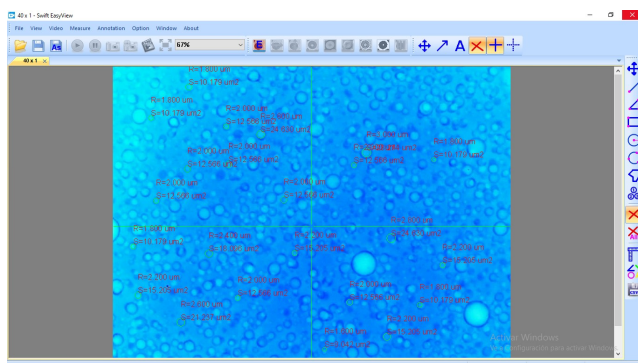
Para el análisis de los resultados obtenidos, Una vez comprobada la normalidad de los datos de cada prueba se llevó a cabo un análisis de varianza utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurión XVI. Los análisis de los resultados obtenidos se evaluaron a partir de un análisis multivariado contrastando resultados obtenidos de otras investigaciones a través de la revisión sistemática de la microencapsulación de aceite extraído de la microalga *Parachlorella Kessleri* encontrada en bases de datos de revistas indexadas y documentos científicos recientes.

Determinación del Tamaño de partícula del microencapsulado

Para medir el tamaño de la partícula, se observó el microencapsulado con el mejor porcentaje de rendimiento. Se utilizó un microscopio con cámara 5.0M-2 USB2.0 camera Swift Easy View, con la cual se puede medir el área de las partículas. Se observaron tres placas con el polvo del microencapsulado, el cual se coloreo con azul de metileno. A su vez cada placa se dividió en cuatro campos de observación y se procedió a medir las partículas del microencapsulado y a determinar su morfología, como se indica en la imagen 3. Al finalizar se realizaron pruebas estadísticas de tendencia central como media y moda.

Apéndice 3

Medición de las partículas utilizando la cámara de tipo 5.0M-2 USB2.0 camera Swift Easy View



Resultados y Discusión de Resultados

Homogenización de la emulsión de aceite de *Parachlorella kessleri*

En la incorporación de materiales pared se encontró que la mejor relación en cuanto a la estabilidad y la ausencia de aceite externo en la emulsión fue la relación 3:1 cantidad 15 g de maltodextrina y 5 g de goma arabiga para una emulsión total de 50 g teniendo como parámetro la presencia de *aceite* externo del microencapsulado al revisar las placas.

En la evaluación de la presencia de aceite externo en cada placa se determinó el área de observación en cuatro cuartos, cada cuarto corresponde cada uno a un veinticinco por ciento de la placa observada. Estos resultados se pueden evidenciar en la tabla 6.

Tabla 6

Observación de presencia de aceite externo en los tratamientos del microencapsulado

Tratamiento	Replica	Presencia de aceite externo			
		25%	50%	75%	100%
3:1	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
2:1	1	+	-	-	-
	2	-	+	-	-
	3	-	+	-	-
1:1	1	-	+	-	-
	2	-	-	+	-
	3	-	-	+	-

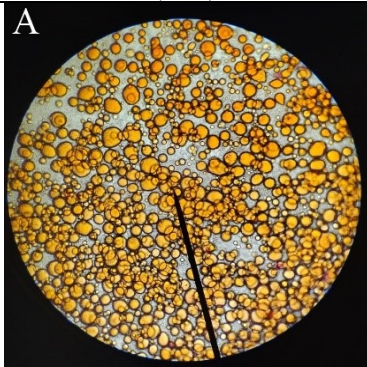
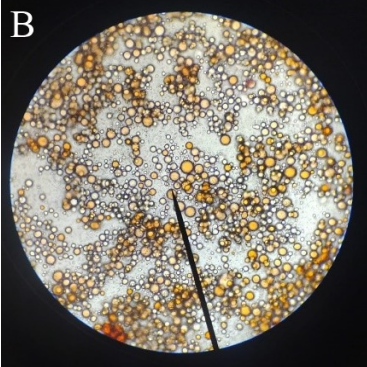
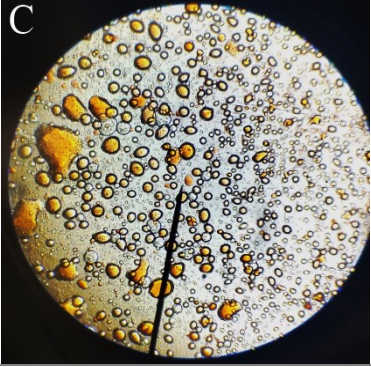
Nota. El símbolo positivo (+) representa presencia de aceite externo y el símbolo negativo (-) representa la no presencia de aceite externo, es decir aceite encapsulado. Cómo se pudo observar el tratamiento 3:1(MD/GA), resultó más eficiente para la encapsulación del aceite.

En la tabla 7 se pueden observar las microparticulas obtenidas, observadas a microscopio con un objetivo de 40x. En el tratamiento seleccionado con el mejor resultado se encontró que las macropartículas son más resistentes y en el transcurso de aproximadamente una hora en

donde las macropartículas se mantienen si reventarse, tiempo en el que se estimó el proceso de secado por aspersión de la emulsión.

Tabla 7

Observación de relaciones MD y GA en la emulsión

Tratamiento	Relación MD/GA	Presencia de aceite externo	Morfología	Observación a microscopio (40x)
R1	3:1	No	Simple e irregular	
R2	2:1	Si	Simple e irregular	
R3	1:1	Si	Simple e irregular	

Nota. En la imagen A se pueden observar micropartículas y un alto porcentaje de aceite encapsulado, lo que no se observa en las imágenes B y C en las cuales se observa la presencia de aceite externo.

Es pertinente mencionar la función que cumple la lecitina en la formación de la emulsión como menciona (Torres & Pataquiva, 2020), en cuanto a la lecitina de soja la cual fue elegida como surfactante principalmente por ser un emulsificante de origen natural, según el Codex Alimentarius, no tiene límite de uso y, además, estabiliza y emulsifica sistemas aceite en agua, presentando buena sinergia entre las diferentes fases de una emulsión. De igual manera Mohammed et al., (2020) menciona que la lecitina de soja se ha utilizado con éxito para la producción de varios aceites encapsulados como agente emulsionante para asegurar la estabilidad de las emulsiones de alimentación antes del secado por aspersión. García et al., (2018) menciona también que al utilizar la lecitina como emulgente en conjunto con maltodextrina como material de pared, mejora la eficiencia de encapsulación y la estabilidad oxidativas de la emulsión.

Los resultados obtenidos se asemejan a lo mencionado por Ariza et al., (2021) en su revisión, donde se aclara que la adición de los materiales de pared como maltodextrina y goma arábica en conjunto tiene mejores resultados en cuanto a la micro encapsulación evitando que quede aceite externo y protegiendo el mismo. Rios & Gil, (2021) indican que la goma arábica es considerada un encapsulante ampliamente utilizado por su capacidad en la formación de películas para sabores, colores y vitaminas, además se caracteriza por la alta eficiencia en el encapsulamiento. Estos autores también mencionan que la maltodextrina se caracteriza por su capacidad de proteger el material encapsulado de la oxidación; en este orden de ideas los materiales de pared utilizados se adicionaron en mezcla con el fin de complementar sus funciones ya que esta última no tiene propiedades emulsionantes, función que la goma arábica si tiene por excelencia. Caso contrario ocurrió con las relaciones 2:1 (tabla 7; imagen B) y 1:1 (tabla 7; imagen C), en las cuales se encontró presencia de aceite externo en la emulsión, lo que

fue un factor determinante para ser descartadas incluso presentando en la morfología unas microcápsulas esféricas.

Máximo Porcentaje de Rendimiento

En la tabla 8 se pueden observar los promedios de los resultados de los pesos obtenidos de cada una de las muestras antes y después del procedimiento de secado por aspersion por cada uno de los tiramientos de acuerdo al diseño experimental explicado anteriormente. Se recuerda que por cada tratamiento se corrieron tres replicas.

Tabla 8

Porcentaje de rendimiento de la microencapsulación

Niveles T/V*	\bar{X} Peso ST (g)	\bar{X} Peso T (g)	R (%)
+1 +1	23,7	4,364	18,414
+1 -1	23,7	11,058	46,661
-1 +1	23,7	6,725	28,375
-1 -1	23,7	5,867	24,755
0 0	23,7	5,857	24,714
0 0	23,7	5,814	24,533
0 0	23,7	5,902	24,905

Los datos estadísticos analizados se llevaron a un análisis de varianza el cual al transformar los datos y al realizar la prueba de W Shapiro Wilk se obtuvo que $p > 0,05$, con un valor estadístico de 0,9195 y un $p = 0,0816$, por lo que se acepta que los datos obtenidos de la operación arco tangente provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Con el fin de tener certeza sobre el efecto de las condiciones de operación en el porcentaje de rendimiento de microencapsulado se realizó un análisis multivariado. Para ello se establecieron las siguientes

hipótesis estadísticas. Los resultados obtenidos en la prueba de significancia se resumen en la Tabla 9.

Hipótesis alternativa (H_1): Hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el rendimiento del microencapsulado.

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el rendimiento de microencapsulado.

Tabla 9

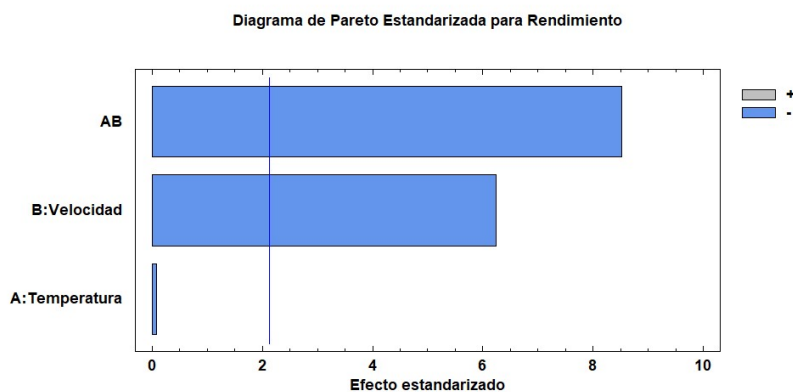
Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento del microencapsulado

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Temperatura	0,000279993	1	0,000279993	0,01	0,9412
B: Velocidad	1,93948	1	1,93948	38,98	0,0000
AB	3,61283	1	3,61283	72,61	0,0000
bloques	0,229083	2	0,114542	2,30	0,1343
Error total	0,746311	15	0,0497541		
Total (corr.)	6,52798	20			

En la tabla 9 se muestra que para el factor A: Temperatura, $p=0,9412 > 0,05$; mientras que para el factor B: Velocidad y la combinación de los factores AB Temperatura y Velocidad presenta un valor de $p=0,000 < 0,05$. Por tanto, se puede inferir que la temperatura no tiene un efecto significativo en el rendimiento final del micro encapsulado, pero la velocidad y la combinación de los dos factores tienen un efecto positivo. En la figura de Pareto (Figura 5), se puede observar como el efecto de la interacción entre Temperatura y Velocidad influye en un mayor rendimiento para la obtención final del polvo de microencapsulado.

Figura 5

Diagrama de Pareto para Rendimiento



Los resultados indican que para un rendimiento más alto de 46,66% del microencapsulado en el proceso de secado por aspersión es necesario que la temperatura de aireación sea elevada (130°C) y el nivel de velocidad sea bajo (5 mL/min). Se podría decir que la emulsión inicial al ser inducida a secado por aspersión tiene un resultado positivo debido a que la temperatura incide en la máxima eliminación de la humedad sumándole a esto que el flujo del aire al ser más bajo permite que el paso de la mezcla hacia el ciclón se prologue el tiempo necesario para secarse efectivamente y pase al recolector sin pegarse. El problema de las emulsiones de aceite es que si las partículas no tienen un buen secado se apelmazan en la campana. En cambio, si la temperatura es elevada al igual que la velocidad de aireación, la mezcla choca fuertemente contra la pared de la campana haciendo que las partículas se revienten y la mezcla se pegue a la campana disminuyendo el rendimiento del polvo final. Rivera et al., (2020) obtuvieron un porcentaje de rendimiento similar en la microencapsulación de astaxantina (53,5%) utilizando los mismos materiales de pared a una temperatura de 155 °C y una velocidad de flujo de 7.5 mL/min. Saavedra, (2017) obtuvo un rendimiento de 35,2% en microencapsulación de aceite de pescado a una temperatura de entrada de 200 °C, un resultado

cercano al obtenido en esta investigación. Teniendo en cuenta estos resultados es importante mencionar que en esta investigación se encontró que la interacción de los factores temperatura y velocidad tiene efectos positivos en el resultado del rendimiento, demostrando así, que los factores en conjunto permiten obtener mejores resultados en cuanto a rendimiento, como se observa en el estudio de Rivera, en caso contrario, se puede mencionar que Saavedra en su estudio obtuvo un rendimiento menor aun con temperaturas mas altas.

Determinación para el mínimo porcentaje de Humedad

Los resultados obtenidos para la determinación del porcentaje de humedad se muestran en la tabla 10 teniendo en cuenta el diseño factorial planteado anteriormente.

Tabla 10

Determinación de porcentaje de humedad del microencapsulado

Tratamiento	Niveles T/V*	$\bar{X}m_1$ (g)	$\bar{X}m_2$ (g)	$\bar{X}m_3$ (g)	$\bar{X}H$ (%)
A	+1+1	0,270	1,271	1,219	5,189
B	+1-1	0,267	1,267	1,228	3,889
C	-1+1	0,282	1,282	1,237	4,510
D	-1-1	0,274	1,275	1,231	4,379
E	0 0	0,286	1,283	1,235	4,789

Nota. *T corresponde al factor temperatura (° C), V al factor velocidad (ml/min), $m_{1,2,3}$ valores de los pesos de papel aluminio, antes y después del secado respectivamente, H es el valor de la humedad. Esta tabla muestra los pesos de los tratamientos con micro encapsulado y de papel aluminio antes y después del secado por horno a 105°C por 4 horas.

El porcentaje de humedad se corrobora en distribución normal de los datos con la prueba de W de Shapiro Wilk se obtuvo que $p > 0,05$ dando un valor estadístico de 0,935553 y un valor $p = 0,174166$.

Con el fin de tener certeza sobre el efecto de las condiciones de operación en el porcentaje de humedad del microencapsulado se realizó un análisis multivariado. Para ello se establecieron las siguientes hipótesis estadísticas. Los resultados obtenidos en la prueba de significancia se resumen en la Tabla 11.

Hipótesis alternativa (H_i): Hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el porcentaje de humedad del microencapsulado.

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el porcentaje de humedad del microencapsulado

Tabla 11

Análisis de Varianza de Porcentaje de Humedad del Microencapsulado

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	0,0863603	1	0,0863603	0,49	0,4926
B: Velocidad	2,67152	1	2,67152	15,30	0,0014
AB	0,966736	1	0,966736	5,54	0,0327
Bloques	0,0305104	2	0,0152552	0,9	0,98
Error total	2,61843	15	0,174562		
Total (corr.)	6,37356	20			

En la tabla 11 se muestra que para el factor A: Temperatura, $p=0,4926>0,05$; mientras que para el factor B. Velocidad, $p=0,0014<0,05$ y la combinación de los factores AB Temperatura y Velocidad presenta un valor de $p=0,0327<0,05$. Por tanto, se puede inferir que la combinación de los dos factores temperatura y aireación tienen un efecto positivo. En el diagrama de Pareto (figura 6), se puede observar que a medida que aumenta la temperatura y disminuye la velocidad de aireación entonces el porcentaje de humedad en el polvo de micro

encapsulado disminuye. Esto se puede explicar porque la interacción entre la temperatura del aire (T_a) y la velocidad de la muestra líquida (V_m) puede afectar la humedad del polvo microencapsulado debido a su efecto sobre la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado por aspersión.

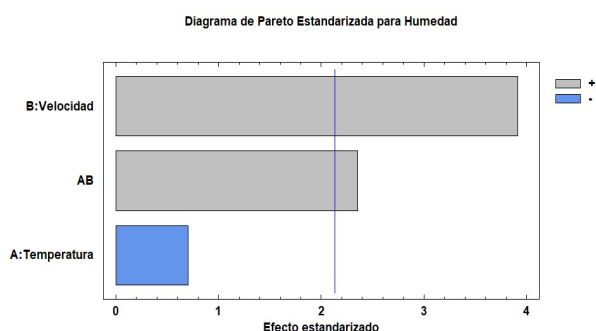
Cuando la velocidad de la muestra líquida es alta, la superficie de las gotas se renueva constantemente, lo que resulta en una mayor tasa de evaporación y, por lo tanto, una menor humedad del polvo. A medida que aumenta la velocidad de la muestra líquida, la transferencia de masa se acelera y se reduce el tiempo de residencia del líquido en el aire, lo que disminuye la humedad del polvo microencapsulado

Por otro lado, cuando la temperatura del aire es alta, se aumenta la capacidad del aire para contener vapor de agua, lo que resulta en una mayor tasa de evaporación. Sin embargo, si la velocidad de la muestra líquida es muy alta, la transferencia de calor y masa no será suficiente para permitir que el agua se evapore en la medida necesaria para reducir la humedad del polvo.

Por lo tanto, la interacción entre la temperatura del aire y la velocidad de la muestra líquida puede reducir la humedad del polvo microencapsulado debido a una disminución en la transferencia de masa y una tasa de evaporación insuficiente. La selección adecuada de las condiciones de temperatura y velocidad de la muestra líquida es esencial para garantizar un proceso de secado por aspersión eficiente y un polvo microencapsulado con la humedad adecuada.

Figura 6

Diagrama de Pareto para Humedad



Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por Padial, (2021) en su investigación, en la cual menciona que el contenido de humedad para polvos secos estables en la industria alimentaria es aproximadamente del 3 al 4%. De igual manera Rojas, (2019) y Zhang et al., (2020) en sus investigaciones obtuvieron valores por debajo del máximo contenido de humedad de 4 al 5% de polvos secos en la industria alimentaria. En el estudio de micro encapsulación con aceite de linaza Solís, (2018) encontraron que la humedad promedio del micro encapsulado es de 3,85%, datos que son similares al resultado obtenido en esta investigación Cardona et al., (2021), mencionan en su revisión que los productos en polvo obtenidos mediante secado por aspersion varían entre 1,50 y 9,55%; resultado similar al obtenido en esta investigación. Además, mencionan que los contenidos bajos de humedad evitan la aglomeración entre partículas y esto mejorará la dispersión del polvo obtenido; en caso contrario, cuando los contenidos de humedad son altos, la estabilidad del polvo será menor.

Determinación de la mayor eficiencia de la encapsulación

En la Tabla 12 se observa los resultados de los porcentajes de la Eficiencia del microencapsulado de acuerdo al diseño experimental.

Tabla 12

Determinación de las cantidades de aceite para la obtención de eficiencia de encapsulación

Tratamiento	\bar{X} Ai (mg)	\bar{X} Ae (mg)	\bar{X} At (mg)	\bar{X} EE (%)
A	742,163	187,183	933,289	79,521
B	2112,034	198,372	2311,737	91,361
C	2026,119	178,897	2206,628	91,819
D	1448,951	161,577	1613,339	89,810
E	1904,024	183,564	2087,703	91,201

Nota. Ai. Corresponde al aceite interno de las capsulas, Ae. Corresponde al aceite externo del microencapsulado, At corresponde al aceite total, EE% corresponde al porcentaje de eficiencia de encapsulación. Los resultados de EE% fueron transformados por medio de la fórmula de RECODE para aplicar en análisis paramétrico.

Los datos estadísticos analizados se llevaron a un análisis de varianza el cual al transformar los datos y al realizar la prueba de W Shapiro Wilk se obtuvo que $p > 0,05$, con un valor estadístico de 0,960619 y un $p = 0,518345$.

Con el fin de tener certeza sobre el efecto de las condiciones de operación en el porcentaje de Eficiencia del microencapsulado se realizó un análisis multivariado. Para ello se establecieron las siguientes hipótesis estadísticas. Los resultados obtenidos en la prueba de significancia se resumen en la Tabla 13.

Hipótesis alternativa (H_1): Hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el porcentaje de Eficiencia de encapsulación del aceite.

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas entre los tratamientos con relación a los parámetros de operación (temperatura y velocidad) en el porcentaje de Eficiencia de encapsulación del aceite.

Tabla 13

Análisis de Varianza de la Eficiencia de Encapsulación del microencapsulado

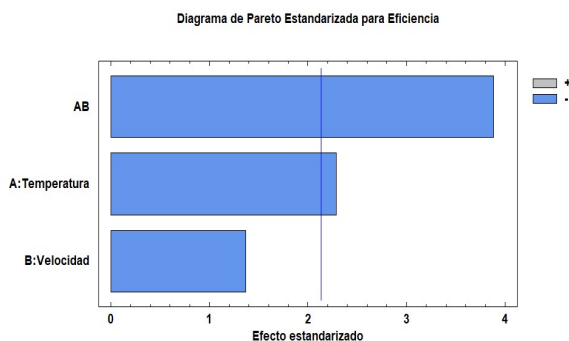
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	85,6056	1	85,6056	14,27	0,0018
B: Velocidad	71,6239	1	71,6239	11,94	0,0035
AB	141,983	1	141,983	23,66	0,0002
Bloques	16,4354	2	8,21768	1,37	0,2842
Error total	90,0042	15	6,00028		
Total (corr.)	405,652	20			

En la Tabla 13 se muestra que para el factor A: Temperatura, $p=0,0022 < 0,05$; para el factor B. Velocidad, $p=0,0043 < 0,05$ y la combinación de los factores AB Temperatura y Velocidad presenta un valor de $p=0,0003 < 0,05$. En este caso, 3 efectos tienen un valor $p < 0,05$, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

En el diagrama de Pareto (Figura 7), se puede observar la interacción entre Temperatura y Velocidad tiene un efecto más grande en la eficiencia de la encapsulación.

Figura 7

Diagrama de Pareto para Eficiencia de encapsulación



En el diagrama de Pareto se puede observar que la interacción entre los factores temperatura y velocidad presentan mayor incidencia en el porcentaje de encapsulación. Se puede decir que, si se analiza el efecto que tienen los factores en conjunto se observa que presentan una influencia positiva, mientras que si los factores se analizan por separado el efecto en la

encapsulación es menor. En este orden de ideas, es posible inferir que se obtendrán porcentajes de encapsulación más altos en la interacción de los factores temperatura y velocidad.

El tratamiento con mayor porcentaje de encapsulación fue el tratamiento C correspondiente al nivel mínimo de temperatura y nivel máximo de velocidad, esto se puede explicar porque la temperatura es un factor que incide en el rompimiento de las micropartículas, por lo que la menor temperatura evitara que esas micro cápsulas colapsen y mantenga el aceite en el recubrimiento. En cuanto a la velocidad de flujo con nivel alto se puede explicar porque la emulsión al pasar por el secador permite que no reciban el calor por mucho tiempo lo que permite que las micropartículas se conserven sin colapsar.

La eficiencia de la encapsulación presenta un resultado similar al obtenido por (Pastuña et al., 2016) donde obtuvieron EE de 82,10 y 93,90% empleando MD y GA como materiales de pared en la microencapsulación de aceite de sacha inchi (*Plukenetia volubilis L*). También se puede contrastar el estudio de Zhang et al., (2020) quienes obtuvieron una EE en el rango de 89,6 a 94,3% empleando el secado por aspersion de aceites ricos en omega-3, siendo un rango que comprende el resultado obtenido en esta investigación.

Tamaño de partícula del microencapsulado

Se determinó que el tamaño de partícula con mayor repetición según el rango establecido para el microencapsulado fueron las que se encontraron entre 1 a 3,9 micras, estos tamaños se pueden evidenciar en la tabla 14. La medición que se llevó a cabo con la observación al microscopio y con la ayuda del software Swift Easy View permitiendo obtener los diámetros de las micropartículas para poder determinar las cantidades aproximadas de microparticulas en cada rango tamaño.

Tabla 14*Tamaño de partícula de los tratamientos del microencapsulado*

Placa	Campo de observación	Rango de tamaño de partícula (μ)				TOTAL	%
		1 a 3,9	4 a 6,9	7 a 9,9	>10		
	1	85	21	2,88	0	108,88	78,0675974
1	2	78	14	5	1	98	79,5918367
	3	86	5	0	1	92	93,4782609
	1	86	6	5	0	97	88,6597938
2	2	79	12	2	0	93	84,9462366
	3	111	3	0	0	114	97,3684211
	1	9	5	2	0	96	92,7083333
3	2	98	7	0	2	107	91,588785
	3	77	13	3	2	95	81,0526316
Media		87,22	13,3	2,88	0,66		87,49%
Mediana		86	9,5	2	0		
Moda		86	5	0	0		



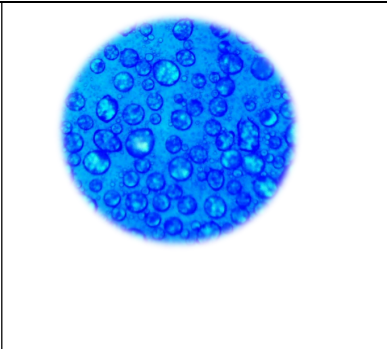
Cómo se puede observar en la Tabla 14, la mayor cantidad de partículas se encuentra en un rango de 1 a 3,9 μ, con un porcentaje de 87.22% del total de las partículas contabilizadas cuyo resultado concuerda con los estudios realizados Soto, (2018) en cuyo trabajo encontró que las microcapsulas del polvo de aceite de palta se encontraron entre el rango de 0.1 y 0.9 μm,

Al respecto algunos autores como Padial, (2021) menciona que un tamaño de gota muy pequeño conforma un área interfacial grande que puede aumentar la tasa de oxidación, ya que, hay más superficie de contacto para los antioxidantes, pero a su vez un tamaño de gota grande puede interferir en la absorción del emulsificante y en su efectividad como lo reportó Amaya &

Salcedo, (2020) quienes mencionan que obtuvieron microcapsulas con gran tamaño lo que explicaría la inestabilidad y el colapso de las capsulas logradas. En los resultados obtenidos en esta investigación se puede observar que el tamaño está dentro del tamaño esperado para evitar complicaciones y obtener una mayor estabilidad a largo plazo del microencapsulado obtenido. En la figura 8, se puede observar el polvo de aceite de *Parachlorella Kessleri* obtenido por el método de Secado por Aspersión.

Figura 8

Microencapsulado de Aceite de Parachlorella Kessleri

		
<p>Microencapsulado de aceite en el recolector del Spray Dryer</p>	<p>Microencapsulado de aceite de microalga <i>Parachlorella Kessleri</i> en tubos falcón</p>	<p>Polvo de microencapsulado visto en 40X. Tinción. Azul de vainillina.</p>

Conclusiones y Recomendaciones

En general, se pudo obtener una emulsión estable para la microencapsulación del aceite de la microalga *Parachlorella Kessleri*, utilizando una combinación de maltodextrina y goma arábica en una relación de 3:1 como materiales de pared. Esta emulsión mostró un mayor porcentaje de encapsulación previo al proceso de secado por aspersión, lo que permitió que los procesos posteriores se llevaran a cabo con resultados positivos.

De los parámetros de operación evaluados, se encontró que el tratamiento B, con una temperatura máxima de 130 °C y una velocidad de flujo mínima de 5 mL/min, resultó ser el más efectivo en términos de rendimiento, con un porcentaje de 46,66%, este tratamiento también presentó el menor porcentaje de humedad, con un valor de 3,889%. En cuanto al tamaño de partícula se o tuvo que el mayor porcentaje se encuentra en el rango entre 1 y 3,9 micras siendo 87,22%, acorde a lo esperado. El mayor porcentaje de eficiencia de encapsulación fue el tratamiento C con una temperatura mínima de 115°C y una velocidad máxima de 7 mL/min con un porcentaje de 91,819%, lo que indica que se logró encapsular un alto porcentaje del aceite de la microalga *Parachlorella kessleri*.

En futuras investigaciones relacionadas con la microencapsulación del aceite de microalga *Parachlorella kessleri*, se sugiere realizar una optimización del proceso con el fin de mejorar los resultados obtenidos en este estudio.

Se identifica la necesidad de llevar a cabo un estudio de la actividad oxidativa del microencapsulado de aceite de *Parachlorella kessleri* en un lapso de tiempo determinado, utilizando equipos y técnicas sofisticadas que permitan evaluar las posibles potencialidades para la protección de los ácidos grasos.

Se recomienda evaluar el microencapsulado obtenido en matrices alimentarias, con el fin de determinar su potencial como ingrediente funcional en la elaboración de alimentos saludables.

Referencias Bibliográficas

- Aburto, A. M., & Castiella, E. (2020). Ácidos Grasos Omega-3. *Ediciones Mayo*, 588, 36–40.
- Acevedo, M. V. (2017). *Secretaría de Educación Pública Instituto Tecnológico de Veracruz*.
- Alcocer, J., Paz, N., Cruz, V., Goncalvez de Oliveira, E., Villalva, F., Curti, C., Rivas, M., & Ramon, A. (2017). *Artículo de Revisión GOMA ARÁBIGA, UN INGREDIENTE FUNCIONAL PARA LA FORMULACIÓN DE PRODUCTOS SALUDABLES GUM ARABIC, A FUNCTIONAL INGREDIENT TO FORMULATE HEALTHY PRODUCTS*.
- Álvarez, M., Ciro, H., & Arango, J. (2018). Caracterización fisicoquímica de oleogel de aceite de aguacate (*Persea americana*) y sachá inchi (*Plukenetia volubilis*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(1). <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V21.N1.2018.666>
- Amaya, J. S., & Salcedo, F. (2020). Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*. *Revista ION*, 33(1), 7–16. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020001>
- Anschau, A., Caruso, C. S., Kuhn, R. C., & Franco, T. T. (2017). Validation of the sulfo-phosphovanillin (SPV) method for the determination of lipid content in oleaginous microorganisms. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 19–27. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20140222>
- Ariza, V., Garzón, M., & Camacho, J. (2021). Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*. *Revista Mutis*, 11(2), 32–43. <https://doi.org/10.21789/22561498.1755>
- Baldiris, I., Pérez, J., Cafiel, A., Fajardo, J., Correa, R., & Castro, I. (2022). Total Lipid Production of

Microalgae *Chlorella* sp. and *Chlorella Vulgaris* under Mixotrophic Culture Conditions. *Teknos Revista Científica*, 22(1900–7388), 22–30.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8617405>

Barón, M., Ros, M., Martínez, G., & López, A. (2020). Extra virgin olive oil microencapsulation . Effect on quality and shelf life of breaded foods Microencapsulación del aceite de oliva virgen extra . Efecto sobre la calidad y vida útil de alimentos empanados. *9th Workshop on Agri-Food, July*, 154–156.

Bastida, O. M. (2019). *POLISACÁRIDO-PROTEÍNA COMO AGENTES Presenta : MIGUEL ANGEL BASTIDA OCAMPO Dirigido por : Universidad Autónoma del Estado de México Facultad de Química*. 6. [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104754/Tesis Miguel Angel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104754/Tesis%20Miguel%20Angel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Cardona, D., Patiño, L., & Ormaza, A. (2021a). Technological aspects of the microencapsulation bioactive food compounds by spray-drying. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 22(1), 1–21. https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL22_NUM1_ART:1899

Carvajal, C. (2019). *Lípidos, lipoproteínas y aterogénesis-2* (Editorial).

Cerón, L. (2022). *Evaluación del efecto de la aplicación secuencial de factores fisicoquímicos en la producción de lípidos insaturados de la microalga Parachlorella kessleri en un biorreactor de columna de burbujeo*. Universidad de Nariño.

Clavijo, E., Montalescot, V., Viau, M., Drouin, D., Bourseau, P., Frappart, M., Monteux, C., & Couallier, E. (2018). Mechanical cell disruption of *Parachlorella kessleri* microalgae: Impact on lipid fraction composition. *Bioresource Technology*, 256, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.148>

- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2011). CONPES 3697. Política para el desarrollo comercial de la biotecnología a partir del uso sostenible de la biodiversidad. *Consejo Nacional de Política Económica y Social*, 33.
https://minciencias.gov.co/sites/default/files/conpes_3697_de_2011_politia_desarrollo_comercia1_de_la_biotecnologia_a_partir_uso_biodiversidad.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2018). Política De Crecimiento Verde. *Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES*, 1–114.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3934.pdf>
- Cuartas, S., & Pérez, M. (2021). *Metabolismo e importancia de los ácidos grasos poliinsaturados*.
<https://orcid.org/0000-0003-1618-7896>
- Cuevas, J. C., Pérez, C., Nieto, R., & Aguirre, E. (2019). Microencapsulation of grape seed oil by spray drying using whey protein and hawthorn pectin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(2), 127–145. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2019.01.005>
- Daneshvar, E., Zarrinmehr, M. J., Hashtjin, A. M., Farhadian, O., & Bhatnagar, A. (2018). Versatile applications of freshwater and marine water microalgae in dairy wastewater treatment, lipid extraction and tetracycline biosorption. *Bioresource Technology*, 268, 523–530.
10.1016/J.BIORTECH.2018.08.032
- Departamento Nacional de Planeación. (2021). Documento Conpes 4069: Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022-2031. *Repositorio DNP*, 108.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3582.pdf>
- Dextre, H. (2022). *Revisión crítica : efectos de la suplementacion de acidos grasos poliinsaturados omega 3 en pacientes con cancer hematologicos Trabajo académico para optar el título de*

especialista en. 0–1.

- Dolganyuk, V., Belova, D., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Katserov, D., Patyukov, N., & Sukhikh, S. (2020). Microalgae: A promising source of valuable bioproducts. *Biomolecules*, *10*(8), 1–24. <https://doi.org/10.3390/biom10081153>
- Fleta, J., & Fleta, J. (2019). *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*; NIPO: 003190814 (papel); NIPO: 00319082X (línea); ISSN 1575-1198 (papel); ISSN: 2605-0323 (línea). 253.
- Gao, Y., Ji, L., Feng, J., Lv, J., & Xie, S. (2021). *Effects of Combined Nitrogen Deficient and Mixotrophic (+Glucose) Culture on the Lipid Accumulation of Parachlorella kessleri TY*. <https://doi.org/10.3390/w13213066>
- García, C. M., Fernández, M., López, O. D., Castiñeira, M., Martínez, B., Nogueira, A., & Turiño, L. (2018). MICROENCAPSULATION OF SHARK LIVER OIL POOL BY SPRAY DRYING. *Latin American Applied Research*. <https://www.researchgate.net/publication/326381460>
- García, J., Pavía, M., García, T., Chirivella, J., & Serrano, A. (2017). Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas. *Nereis*, *9*, 115–130. <https://revistas.ucv.es/nereis/index.php/Nereis/article/view/100/80>
- Gobierno de Colombia. (2008). Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional. In *Documento Conpes Social*. http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/conpes_0113_2008.pdf%5Cnhttp://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/conpes_113_08.pdf
- Gómez, B., Sepúlveda, J., Alzate, A., Herrera, J., & Rojano, B. (2020). Evaluación oxidativa, microbiológica, sensorial y perfil de ácidos grasos de un yogur con ácido docosahexaenoico

(DHA) extraído de aceite de microalgas. *Nutr, Rev Chil*, 47(4), 568–579.

Hernández, A. (2020). *Aplicación Potencial como Sistemas de Liberación Lenta de Atrayentes Director General del CIQA*.

Iglesias, D., & Pichucho, P. (2022). Microencapsulación del extracto acuoso de cedrón (*Aloysia citrodora*) mediante secado por aspersión. *UTCiencia*, 9(2), 99–112.

<http://investigacion.utc.edu.ec/revistasutc/index.php/utciencia/article/view/458>

Imués, M., Gonzalez, E., Duque, G., Burbano, E., & Guerrero, C. (2018). Efecto De La Producción Acuícola Sobre Las Variables De Calidad Del Agua Del Lago Guamuez. *Revista Investigación Pecuaria*, 5(1), 33–43. <https://doi.org/10.22267/revip.1851.4>

Issn, E., Uímica, L. E. Q., Uso, B. Y., La, E. N., Pino, J. A., Investigaciones, I. De, & Alimenticia, I. (2021). *Tecnología de Alimentos*. 68–77.

Karrar, E., Mohamed Ahmed, I. A., Manzoor, M. F., AL-Farga, A., Wei, W., Albakry, Z., Sarpong, F., & Wang, X. (2021). Effect of roasting pretreatment on fatty acids, oxidative stability, tocopherols, and antioxidant activity of gurum seeds oil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 34, 102022. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2021.102022>

Labplant. (2023). *SD-Basic Laboratory Scale Spray Dryer*. www.keison.co.uk

Latorre, C. (2020). *Evaluación del efecto de la fuente de carbono sobre el crecimiento y la composición bioquímica de la microalga Parachlorella kessleri*. 36–116.

Mishra, S. K., Suh, W. I., Farooq, W., Moon, M., Shrivastav, A., Park, M. S., & Yang, J. W. (2014). Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method. *Bioresource Technology*, 155, 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077>

- Mobin, S., Chowdhury, H., & Alam, F. (2019). Commercially important bioproducts from microalgae and their current applications-A review. *Energy Procedia*, 160(2018), 752–760.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.183>
- Mohammed, N. K., Tan, C. P., Manap, Y. A., Muhialdin, B. J., & Hussin, A. S. M. (2020). Spray Drying for the Encapsulation of Oils—A Review / N. K. Mohammed, C. P. Tan, Y. A. Manap. *Molecules*, 25 (17), 1–16.
- Nagappan, S., & Kumar, G. (2021). Investigation of four microalgae in nitrogen deficient synthetic wastewater for biorefinery based biofuel production. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101572. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101572>
- Olgún, J. (2019). *Microencapsulación de extractos de chile habanero (capsicum chinense) empleando secado por aspersión y co2 supercritico*. 1–177.
- Padial, M. (2021). *Diseño Y Estabilización De Lípidos Funcionales*.
<https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/68160/75321.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Pastuña, A., López, O., Debut, A., Vaca, A., Rodríguez, E., Vicente, R., Gonzalez, V., González, M., & Tapia, F. (2016). Microencapsulación de aceite de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) mediante secado por aspersión. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 45(3), 422–437.
<https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v45n3.62029>
- Portillo, D., Rúales, K., Burgos, M., López, J., & Ríos, L. (2021). Estrategias de Planeación para la Valorización Sostenible de Residuos Truchícolas y Camaroneros en Nariño. *PRODUCCIÓN + LIMPIA*, 16. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n1a3>
- Quintana, L., Calvo, F., & Alvarez, O. (2022). *Análisis comparativo de la microencapsulación de aceite*

de aguacate entre el método de coacervación compleja y el secado por atomización.

Quitral, V., Jofre, M., Rojas, N., Romero, N., & Valdéz, I. (2019). Artículo ReviAlgas marinas como ingrediente funcional en productos cárnicos / Review Article. *Revista de Nutrición Chilena*, 46(2), 181–189.

Rios, S., & Gil, M. A. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), e1836–e1836.

<https://doi.org/10.22430/22565337.1836>

Rivera, M., Gutiérrez, R., Parra, M., Basilio, J., Caro, J., Contreras, L., Emus, A., García, E., & Castillo-López, R. I. (2020). *Optimización del proceso de microencapsulación de astaxantina con maltodextrina y goma arábiga mediante secado por aspersión*. 5, 277–282.

Rodríguez, L., Aragüez, Y., & Pinoa, J. (2022). Microencapsulation of vegetable oils by spray drying. *Afinidad*, 79(596), 4–15. <https://doi.org/10.55815/400725>

Rojas, J. (2019). *Microencapsulación de extractos de chile habanero (capsicum chinense) empleando secado por aspersión y co2 supercritico*. 1–177.

Saavedra, C. (2017). *Microencapsulación de aceite de pescado mediante secado por atomización convencional y libre de agua: optimización y caracterización*. 53.

Segurondo, R., & Cortez, V. (2020). Determinación de la rancidez en aceites usados en el proceso de frituras en establecimientos de expendio de comida rápida. *Revista CON-CIENCIA*, 8(2), 115–128. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-02652020000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Sharma, A. K. (2019). Variation of both chemical composition and antioxidant properties of newly

isolated *Parachlorella kessleri* GB1, by growing in different culture conditions. *LWT*, 112.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.103>

Solís, M. (2018). Extracción y microencapsulación de aceite de linaza (*Linum Usitatissimum*) para la adición en una matriz alimenticia. *Para Obtar Grado de Maestro*, 49.

Solomando, C. (2022). *Avances en la microencapsulación y biodisponibilidad de ácidos grasos omega-3 en derivados cárnicos*. Universidad de extremadura.

Soto, M. (2018). *Microencapsulación de licopeno en mezclas de goma xantana, pectina y sacarosa mediante secado por aspersión*. 22–30.

[https://repositorio.itesm.mx/bitstream/handle/11285/632730/TESIS Mayra Cristina Soto Caballero.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.itesm.mx/bitstream/handle/11285/632730/TESIS%20Mayra%20Cristina%20Soto%20Caballero.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Suárez, M., & Brito, C. (2020). EFICIENCIA DE ENCAPSULACION Y CAPACIDAD DE CARGA DE ANTOCIANINAS DE *Vaccinium floribundum* Kunt EN NANOPARTICULAS DE ZEINA. *InfoANALÍTICA*, 8(1), 83–97. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.98>

Torres, M., & Pataquiva, A. (2020). *FORMULACIÓN DE UNA NANOEMULSIÓN ESTABLE PARA ENCAPSULACIÓN DE UN SABORIZANTE CON APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS*. 21(1), 1–9. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>

Torres, Y., Fields, F., & Mayfield, S. (2020). Microalgae as a future food source. *Biotechnology Advances*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107536>

Vega, L., Garay, I., Diéguez, A., & Ganado, E. (2021). Beneficios de los ácidos grasos esenciales. *El Farmaceutico*.

Zarrinmehr, M., Farhadian, O., Heyrati, F., Keramat, J., Koutra, E., Kornaros, M., & Daneshvar, E.

(2020). Effect of nitrogen concentration on the growth rate and biochemical composition of the microalga, *Isochrysis galbana*. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(2), 153–158.

<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.11.003>

Zhang, Y., Pang, X., Zhang, S., Liu, L., Ma, C., Lu, J., & Lyu, J. (2020). Buttermilk as a wall material for microencapsulation of omega-3 oils by spray drying. *Lwt*, 127(January), 109320.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109320>