



**Microencapsulación de una mezcla de aceite de palma, palmiste y estearina
de palma (*Elaeis guineensis*) mediante el método de secado por
atomización.**

Criollo Lugmaña, Víctor Francisco

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de titulación, previo a la obtención de título de Ingeniero en Biotecnología

Ing. Paz Riofrío, Hernán Patricio

27 de enero del 2022



Trabajo de Titulación_Criollo Victor.docx

Scanned on: 16:11 January 26, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	130
Words with Minor Changes	36
Paraphrased Words	265
Ommited Words	8

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Hernán Patricio Paz Riofrío".

Ing. Hernán Patricio Paz Riofrío

C.C.: 1706686514

Director del Trabajo de titulación



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, denominado "Microencapsulación de una mezcla de aceite de palma, palmiste y estearina de palma (*Elaeis guineensis*) mediante el método de secado por atomización" fue realizado por el señor **Criollo Lugmaña, Víctor Francisco** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de enero del 2022

Firma:

Ing. Hernán Patricio Paz Riofrío

C.C.: 1706686514



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Criollo Lugmaña, Víctor Francisco**, con C.C. 1750850651, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Microencapsulación de una mezcla de aceite de palma, palmiste y estearina de palma (*Elaeis guineensis*) mediante el método de secado por atomización"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de enero del 2022

Firma:

Criollo Lugmaña, Víctor Francisco

C.C. 1750850651



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Autorización de publicación

Yo, **Criollo Lugmaña, Víctor Francisco**, con C.C. 1750850651, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**Microencapsulación de una mezcla de aceite de palma, palmiste y estearina de palma (*Elaeis guineensis*) mediante el método de secado por atomización**" en el Repositorio Institucional; cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

Sangolquí, 26 de enero del 2022

Firma:

Criollo Lugmaña, Víctor Francisco

C.C. 1750850651

Dedicatoria

A mis padres Patricio y Emma,

sin su apoyo constante e incondicional en todo ámbito de mi vida, nada de esto
fuera posible.

A mis hermanas Patty y Silvi,

por ser mi compañía y soporte a lo largo de mi vida.

Todo lo hecho es por y para ustedes. Los amo.

Agradecimiento

A mi familia, por ser lo más importante en mi vida. Su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos ha sido fundamental para mi desarrollo personal y académico.

A mis mejores amigos, Fabricio, Hitler, Tefi, Olguita, Michu Y, Michu S, Nathy, Yadi y Nicole, quienes hicieron mi camino universitario algo inolvidable. Las risas, los consejos, la paciencia y todas sus enseñanzas, estarán en mi corazón por siempre. De este grupo, quiero agradecer especialmente a Nicole, su ayuda fue fundamental en la realización de este proyecto de titulación.

A mi director, Ing. Hernán Paz, por haberme dado la oportunidad de realizar mi trabajo de titulación en Wildland Cia. Ltda, así como por haber compartido conmigo sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de este proyecto.

Índice de contenidos

Reporte de la herramienta Copyleaks.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización d e publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
Resumen.....	14
Abstract.....	15
Capítulo I.....	16
Introducción.....	16
Justificación del problema.....	17
Objetivos de la investigación.....	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
Hipótesis	19
Capítulo II.....	20
Revisión Bibliográfica	20
Palma africana.....	20

Origen	20
Descripción	20
Taxonomía	20
Aceite de palma.....	21
Aceite de palmiste	23
Estearina de palma	23
Usos e industrialización.....	23
Microencapsulación	25
Generalidades.....	25
Microencapsulación en la biotecnología	25
Procesos de microencapsulación	26
Secado por atomización.....	27
Generalidades.....	27
Pasos del proceso de microencapsulación.....	29
Condiciones de operación	30
Temperatura de secado	30
Caudal de aire de secado.....	32
Caudal de alimentación	32
Velocidad del atomizador	33
Tipo de agente portador	33
Concentración del agente portador.....	34
Material de pared o agente portador	35
Carbohidratos.....	36

	10
Gomas.....	37
Proteínas.....	37
Emulsión.....	38
Emulsionantes.....	39
Capítulo III.....	41
Materiales y Métodos	41
Selección de la grasa vegetal	41
Preparación de la emulsión.....	41
Obtención de las microcápsulas por secado por atomización	42
Eficiencia de microencapsulación	43
Contenido de aceite superficial.....	43
Eficiencia.....	44
Rendimiento.....	44
Propiedades Físicas del microencapsulado	44
Contenido de humedad	44
Densidad empacada y aparente.....	44
Índice de compresibilidad de Carr	45
Relación de Hausner	45
Higroscopicidad.....	45
Solubilidad.....	46
Propiedades organolépticas	46
Caracterización morfológica del microencapsulado por microscopía electrónica de barrido (MEB).....	46

	11
Análisis estadístico	47
Capítulo IV	49
Resultados y Discusión	49
Caracterización de la emulsión.....	49
Determinación de los parámetros óptimos del equipo de secado por atomización (<i>Spray Dryer</i>)	50
Eficiencia de microencapsulación.....	51
Contenido de humedad	56
Rendimiento	58
Optimización del proceso y verificación del modelo.....	61
Análisis de las propiedades físicas del microencapsulado optimizado	64
Densidad aparente y densidad empacada.....	64
Índice de comprensibilidad de Carr y Relación de Hausner.....	65
Higroscopicidad.....	66
Solubilidad.....	67
Propiedades organolépticas	68
Caracterización morfológica de las microcápsulas optimizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).....	68
CAPÍTULO V	71
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	72
Bibliografía	73

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación taxonómica de la palma africana</i>	21
Tabla 2 <i>Composición porcentual de ácidos grasos de aceite de palma</i>	22
Tabla 3 <i>Principales propiedades físicas del aceite de palma</i>	22
Tabla 4 <i>Composición y proporciones de la emulsión</i>	42
Tabla 5 <i>Diseño factorial 2³ con puntos centrales</i>	48
Tabla 6 <i>Corridas del proceso de secado por atomización.</i>	48
Tabla 7 <i>Porcentajes de eficiencia, rendimiento y humedad de los microencapsulados</i>	51
Tabla 8 <i>ANOVA de términos y coeficientes lineales, cuadráticos y de interacción para el modelo de predicción de polvo de grasa vegetal secado por atomización.</i>	52
Tabla 9 <i>Restricciones y criterios de optimización del proceso de spray drying</i>	62
Tabla 10 <i>Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta en condiciones óptimas para el polvo de grasa vegetal secado por atomización</i>	63
Tabla 11 <i>Propiedades físicas del microencapsulado optimizado.</i>	64
Tabla 12 <i>Especificación para el índice de compresibilidad de Carr y la relación de Hausner</i>	66
Tabla 13 <i>Propiedades organolépticas del microencapsulado optimizado</i>	68

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diagrama esquemático del proceso de secado por atomización.....</i>	30
Figura 2 <i>Secador por atomización (Spray Dryer) de la empresa Wildland Cia. Ltda</i>	43
Figura 3 <i>Emulsión preparada de grasa vegetal de palma</i>	49
Figura 4 <i>Superficie de respuesta para la eficiencia de microencapsulación.....</i>	55
Figura 5 <i>Superficie de respuesta para el contenido de humedad.....</i>	58
Figura 6 <i>Superficie de respuesta para el rendimiento</i>	60
Figura 7 <i>Perfiles de predicción para la optimización de los parámetros de secado por atomización</i>	62
Figura 8 <i>Polvo de grasa vegetal de palma (Elaeis guineensis) optimizado</i>	63
Figura 9 <i>Micrografías MEB y tamaños de partícula del microencapsulado optimizado de grasa vegetal de palma obtenida por secado por atomización</i>	69
Figura 10 <i>Micrografías MEB del microencapsulado optimizado de grasa vegetal de palma: (A) Forma esférica y superficie lisa (B) Orificios en la superficie (C) Grietas en la superficie (D) Superficie cóncava y arrugadas.....</i>	70

Resumen

El aceite y grasa vegetal de palma (*Elaeis guineensis*) tienen una gran importancia económica por ser un ingrediente principal en varios sectores de la industria alimentaria. En este trabajo se buscó microencapsular la grasa vegetal de palma mediante el método de secado por atomización para mejorar la manipulación y extender el tiempo de conservación del producto. Se realizó la optimización de los parámetros del *Spray Dryer* por el método de superficie de respuesta (MSR) y se evaluó las propiedades físicas del microencapsulado utilizando los ensayos de densidad aparente, índice de Carl, relación de Hausner e higroscopicidad. Se obtuvieron las condiciones óptimas de secado por atomización como: temperatura de entrada del aire 185°C, flujo de alimentación 44 mL/min y frecuencia del atomizador 20000 rpm. Se realizó el experimento final con las condiciones anteriores y se obtuvo el polvo optimizado con: eficiencia: 85,93%, humedad: 2,31%, rendimiento: 78,69%. La temperatura de entrada de aire y el flujo de alimentación fueron los factores que más afectaron a las variables de respuesta. La baja humedad y la buena eficiencia aseguraron un prolongado tiempo de vida útil del producto. El rendimiento estuvo dentro de lo requerido por la parte interesada. Las propiedades físicas obtenidas cumplieron con las especificaciones de calidad para el procesamiento y envasado del polvo. Finalmente, el tamaño de partícula y su morfología aseguraron buen empaquetamiento del producto y una adecuada protección de la grasa vegetal microencapsulada.

Palabras clave:

- **GRASA VEGETAL DE PALMA**
- **SPRAY DRYING**
- **OPTIMIZACIÓN**

Abstract

Palm (*Elaeis guineensis*) vegetable oil and fat are economically important as a main ingredient in several sectors of the food industry. The aim in this study, was to microencapsulate palm vegetable fat by spray drying process to improve handling and extend the shelf life of the product. Optimization parameters of Spray Dryer was performed by the response surface method (RSM) and the quality of the microencapsulated product was evaluated using bulk density, Carr's index, Hausner's ratio and hygroscopicity tests. Optimal spray drying conditions were obtained as: air inlet temperature 185°C, feed flow 44 mL/min and atomizer frequency 20000 rpm. The final experiment was carried out with these conditions and the optimized powder show an 85.93% of efficiency, 2.31% of moisture and a 78.69% of yield. Air inlet temperature and feed flow were the parameters that most affected the response variables. Low moisture and good efficiency ensured a prolonged product shelf life. The physical properties show a good quality for powder processing and packaging. The yield was within the company's expectations. Finally, the particle size and morphology ensured good product packaging and adequate protection of the microencapsulated vegetable fat.

Keywords:

- **VEGETABLE PALM FAT**
- **SPRAY DRYING**
- **OPTIMIZATION**

Capítulo I

Introducción

Los aceites y grasas han sido empleadas por los humanos desde épocas ancestrales. Su uso en la alimentación ha sido importante como fuente de energía concentrada, por su capacidad de transportar vitaminas (A, D, E y K) y para la producción de sustancias como hormonas y enzimas (Valenzuela & Morgado, 2005). El aceite de palma se extrae del mesocarpio de la semilla de palmera africana (*Elaeis guineensis*) por medios mecánicos (Rincón & Martínez, 2009). Gracias a su composición de ácidos grasos saturados e insaturados, el aceite de palma y las fracciones líquidas (oleína) y sólida (estearina), tienen importancia económica por ser un ingrediente principal en varios sectores de la industria alimentaria como la panadería, heladería, repostería, frituras, confitería, entre otras; así como, aporta a los alimentos una textura agradable y un sabor óptimo (FAO, 1997; Rincón & Martínez, 2009) Lo anterior convierte al aceite de palma una materia prima de gran interés para el desarrollo industrial.

Tras el primer uso comercial de la microencapsulación mediante secado por atomización en 1954 (Dziezak, 1988), se desarrollaron y aceptaron diferentes técnicas de encapsulación en las industrias farmacéutica, química, cosmética y alimentaria (Jafari et al., 2008). La ventaja clave de este proceso es la capacidad de deshidratar un material líquido y producir simultáneamente un material en forma de partículas micronizadas, lo cual brinda al alimento una mejor manipulación y mayor tiempo de conservación (Woo & Bhandari, 2013).

A nivel mundial, existen patentes que hablan de grasa vegetal en polvo desde 1959, donde se busca una composición de grasa en polvo que fluya libremente y un proceso para preparar la misma (Cameron et al., 1959). Otra patente habla de la invención de grasa vegetal en polvo que tenga buenas propiedades de fluidez y excelente calidad, así también, que pueda obtenerse

mediante un proceso relativamente simple y que ahorre energía (Tashiro et al., 1989). Además, hay estudios que hacen referencia a la producción de grasa vegetal en polvo para utilizarla en galletas, donde se determinaron los efectos del proceso de microencapsulación sobre su calidad y se compararon con galletas producidas con una grasa de control; así como, la sustitución de la mantequilla o margarina por grasa en polvo para determinar las propiedades de producción y las características del producto final (O'Brien et al., 2003; Wehrle et al., 1999).

En Ecuador no existen estudios sobre la producción de grasa vegetal en polvo por el método de secado por atomización; sin embargo, se hallaron investigaciones de microencapsulación de aceites vegetales. Pastuña & López (2016), realizaron la microencapsulación de aceite de sachá inchi debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados y su rápida degradación, obteniendo una eficiencia de encapsulación del 80% y el aumento de su vida útil. Solís & López (2018), microencapsularon aceite de linaza por ser una buena fuente de omega 3 y su consecuente susceptibilidad a la oxidación, obteniendo una eficiencia de encapsulación del 60%, la preservación de los ácidos grasos y el ocultamiento de olores y sabores indeseables.

Justificación del problema

Según el Banco Central del Ecuador (BCE), la industria de las grasas y aceites de origen vegetal y animal aporta al Producto Interno Bruto (PIB) \$362,8 millones de dólares, siendo las grasas vegetales la de mayor peso con un 75%, representando alrededor de \$275 millones de dólares (Sánchez et al., 2018). Por su parte, en 2015 el tamaño estimado del mercado de las grasas o mantecas vegetales fue de \$75 millones de dólares (SCRLA, 2015), con un crecimiento anual de 5,6% (Orozco & Rivadeneira, 2019). En consecuencia, el uso de la tecnología de secado por atomización para microencapsular las grasas generará

valor agregado a este sector de la industria alimentaria en continuo crecimiento económico.

Con respecto a la producción comercial, el mercado actual exige la elaboración de nuevos productos que sean seguros para el consumo humano y que tengan nuevas funcionalidades tecnológicas (Faridi, 1994). En la panadería, por ejemplo, tres de los ingredientes principales, harina, sal y azúcar, son ingredientes secos a granel fáciles de manipular, mientras que la grasa está en forma de líquido (aceite o grasa derretida) o en bloques de manteca sólida. La incorporación de grasa derretida al proceso de producción requiere tanques y tuberías calentadas; así también, la adición de grandes cubos de grasa sólida a menudo exige trabajo manual con su consecuente desperdicio (Wehrle et al., 1999). El desarrollo de polvos de grasa encapsulados mejorados, que transforman los aceites o grasas en un polvo de flujo libre, ofrece una alternativa fácil de manejar, mezclar e incorporar en cualquier proceso alimenticio, lo que permitiría un mejor control de la formulación de los alimentos.

Otra ventaja es que los polvos microencapsulados con alto contenido de grasa se pueden almacenar a temperatura ambiente por periodos de tiempo más largos. Se podría reducir la oxidación de la grasa y, por tanto, la pérdida de calidad debido a la rancidez, ya que al estar microencapsuladas se encuentran protegidas del oxígeno, luz y humedad del ambiente. El aumento de la estabilidad oxidativa es una ventaja particular cuando se utilizan grasas altamente sensibles, como los ácidos grasos insaturados que son preferibles desde el punto de vista nutricional (Wehrle et al., 1999).

Además de las ventajas de manipulación y estabilidad, la aplicación de polvos de grasa como reemplazo de la manteca libre mejoraría el sabor y, en particular, la textura del producto (Akoh, 1998).

Objetivos de la investigación

Objetivo General

Microencapsular una mezcla de aceite de palma, palmiste y estearina de palma (*Elaeis guineensis*) al 50% mediante el método de secado por atomización.

Objetivos Específicos

- Determinar los valores óptimos de la temperatura de entrada de aire, flujo de alimentación y frecuencia del atomizador en la operación del equipo de secado por atomización para la obtención del microencapsulado.
- Analizar mediante los ensayos de densidad aparente, índice de Carl, relación de Hausner, higroscopicidad y solubilidad las propiedades físicas del microencapsulado optimizado.
- Caracterizar morfológicamente las microcápsulas obtenidas del proceso de secado por atomización optimizado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

Hipótesis

El secado por atomización con temperatura de entrada de 180°C, flujo de alimentación de 50 mL/min y frecuencia de 20000 rev/min, producen microencapsulados de grasa vegetal de palma con una humedad menor a 5%, eficiencia mayor al 80% y rendimiento mayor al 80%.

Las propiedades físicas y características morfológicas del microencapsulado optimizado cumplen con las especificaciones de calidad para polvos alimenticios.

Capítulo II

Revisión Bibliográfica

Palma africana

Origen

De todas las hipótesis existentes, la predilecta es la que le atribuye procedencia africana, específicamente de la Guinea occidental. Se introdujo a la zona ecuatorial de otras partes de África, Sudeste Asiático y Latinoamérica, a partir del siglo XV (Sánchez, 2012; Cortés, 1994).

En Ecuador, la palma africana fue introducida en el año 1953 con el principal objetivo de reducir las importaciones del aceite de cocina. Las primeras plantaciones empezaron en Santo Domingo, La Concordia, Quinindé y Quevedo debido a las adecuadas precipitaciones de la zona (Potter, 2011).

Descripción

E. guineensis es una gran palmera de hojas pinnadas que tiene un tallo columnar solitario con entrenudos cortos. Los folíolos superiores e inferiores separados en el raquis le dan un aspecto desordenado característico. La palmera es normalmente monoica con inflorescencias masculinas o femeninas, pero a veces mixtas, que se desarrollan en las axilas de las hojas. Los frutos nacen en un racimo grande y compacto. La pulpa del fruto, que proporciona el aceite de palma, rodea una nuez, cuya cáscara contiene la semilla de la palma (Corley & Tinker, 2016).

Taxonomía

Actualmente se acepta que tres especies de palmeras pertenecen al género *Elaeis*. La principal palma aceitera del comercio, la palma aceitera

africana (*E. guineensis* Jacq), fue bautizada formalmente como tal por Jacquin en 1763 (Oi-Ming & Chin-Ping, 2015).

Tabla 1

Clasificación taxonómica de la palma africana

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Arecales
Familia	Arecaceae
Subfamilia	Arecoideae
Género	<i>Elaeis</i>
Especie	<i>Guineensis</i>

Fuente: Tomado de Oi-Ming & Chin-Ping (2015).

Aceite de palma

El aceite de palma es un aceite comestible al que el Codex Alimentarius de la FAO/OMS se refiere como derivado del mesocarpio del fruto de la palma aceitera. En la forma sin procesar, el aceite de palma es de color marrón rojizo y tiene una consistencia semisólida a temperatura ambiente (Bailey, 2005).

El aceite de palma contiene un 99% de triglicéridos. Sus otros componentes importantes son los carotenoides, principalmente caroteno α y β , tocoferoles α y γ , y en pequeñas cantidades de fitoesteroles como el sitosterol β , estigmasterol, campesterol y colesterol. Además, cuenta con ácidos grasos saturados y ácidos grasos insaturados casi en la misma proporción (Gottenbosy & Vles, 1985; Gesteiro et al., 2020). La Tabla 2 se muestra la composición de ácidos grasos del aceite de palma.

Tabla 2*Composición porcentual de ácidos grasos del aceite de palma*

Ácido graso	Átomos de carbono:N° de enlaces dobles	Rango (%)
Láurico	12:0	0,1
Mirístico	14:0	0,6 – 1,1
Palmítico	16:0	47 – 52
Esteárico	18:0	1,8 – 4,0
Araquídico	20:0	0,1 – 0,4
Palmitoléico	16:1	0,2
Oléico	18:1	34 – 41
Linoléinico	18:2	6 – 9
Linolénico	18:3	0,05 – 0,2

Fuente: Tomado de Gottenbosy & Vles (1985).

La Tabla 3 muestra algunas de las propiedades físicas del aceite de palma.

Tabla 3*Principales propiedades físicas del aceite de palma*

Propiedad	Promedio	Rango
Densidad aparente a 50°C (g/mL)	0,889	0,888 – 0,889
Índice de refracción a 50°C	1,455	1,455 – 1,456
Contenido de grasa sólida		
5°C	60,5	50,7 – 68,0
10°C	49,6	40,0 – 55,2
15°C	34,7	27,2 – 39,7
20°C	22,5	14,7 – 27,9
25°C	13,5	6,5 – 18,5
30°C	9,2	4,5 – 14,1
35°C	6,6	1,8 – 11,7
40°C	4,0	0,0 – 7,5
45°C	0,7	
Punto de fusión de deslizamiento (°C)	34,2	31,1 – 37,6

Fuente: Tomado de Bailey (2005).

Aceite de palmiste

El aceite de palmiste se extrae de las semillas (nueces) de la palma de aceite, se solidifica entre 20 y 24°C. El porcentaje de ácidos grasos saturados es >80%, de los cuales el más el más destacado el ácido láurico; por lo tanto, el aceite de palmiste pertenece al grupo de los aceites láuricos. El restante 20% pertenece a los ácidos grasos insaturados. En adición, los ácidos grasos minoritarios incluyen hasta un 1,9% de ácido aráquico y <0,6% de ácido palmitoleico (Bockisch, 1998).

Estearina de palma

La estearina de palma es la fracción más dura del aceite de palma que contiene una mayor proporción de ácidos grasos saturados y triglicéridos con un punto de fusión más alto (48–50°C). El contenido de ácido palmítico oscila entre el 49 y el 68% y el contenido de oleico entre el 24 y el 34% (Sue, 2009). Las variaciones en la composición, propiedades físicas y contenido de grasa sólida dan como resultado diferentes tipos de estearina de palma, lo que permite a los fabricantes de alimentos una amplia variedad de materiales para sus formulaciones (Pande et al., 2012).

Usos e industrialización

Algunas de las características del aceite de palma como el alto contenido de grasas sólidas (evitando la hidrogenación), alta estabilidad a la oxidación (larga vida útil), triglicéridos de bajo y alto punto de fusión, suministro constante, precio competitivo, propiedades de cristalización lenta, dureza estructural, y una tendencia a recristalizarse, permiten que el aceite se utilice en diversas aplicaciones alimentarias como las siguientes: (Edem, 2002).

Manteca vegetal. A diferencia de la margarina, que es una emulsión de aproximadamente un 80% de aceite y un 20% de agua, la manteca vegetal es

aceite y grasa puros (100%). Se puede obtener una manteca con consistencia, textura y estructura sin necesidad de hidrogenación utilizando el aceite de palma y sus fracciones como la estearina. Las mantecas de hoy son ingredientes esenciales en prácticamente todos los tipos de productos alimenticios preparados, ya que afectan la estructura, la estabilidad, el sabor, la calidad del almacenamiento, las características para comer y el atractivo visual de los alimentos preparados (Bailey, 2005; Pande et al., 2012).

Grasa para freír. El aceite de palma es la grasa industrial para freír más utilizada porque no tiene un olor ambiental desagradable, tiene una gran resistencia a la oxidación, no polimeriza en gomas y tiene una composición de ácidos grasos nutricionalmente buena (50% de insaturados y sin ácidos trans) (Bailey, 2005).

Mantecas o grasas vegetales en polvo. Actualmente se producen dos tipos de mantecas en polvo: (1) emulsiones de grasa secadas por atomización con un vehículo y (2) mezclas de grasas duras enfriadas por pulverización o en forma de perlas. Las mantecas en polvo secadas por atomización son grasas parcialmente hidrogenadas encapsuladas en un material soluble en agua. Las grasas se pueden homogeneizar en solución con una variedad de vehículos como: leche desnatada, sólidos de jarabe de maíz, aislado de proteína de soja, caseinato de sodio y otros. Se pueden incluir emulsionantes con la grasa para la funcionalidad del producto terminado. Los contenidos de grasa oscilan entre el 50% y el 82% dependiendo de la composición de la emulsión original (Bailey, 2005).

Microencapsulación

Generalidades

La microencapsulación consiste en contener un componente activo, sea líquido, sólido o gaseoso en una partícula sólida pequeña de 1 a 1000 μm aproximadamente (Ghosh, 2006).

Los objetivos principales de la microencapsulación son atrapar ingredientes sensibles en vehículos sólidos (también conocido como materiales de pared) para brindar protección, evitar cambios adversos, ocultar propiedades sensoriales que no son apreciadas por los consumidores, reducir la evaporación, promover un manejo más fácil y controlar la liberación del ingrediente durante el almacenamiento y en la aplicación (Bringas et al., 2011; Rodrigues et al., 2018).

La microencapsulación ha sido usada en la industria alimenticia por más de 70 años (Desai & Park, 2012). Durante los últimos años ha ido en aumento el número de compuestos alimenticios que son microencapsulados o sometidos a otras técnicas de liberación controlada, por ejemplo: sabores, colorantes, estabilizadores, antioxidantes, enzimas, probióticos, lípidos, sales minerales y vitaminas, entre otros (Estevinho et al., 2013).

Microencapsulación en la biotecnología

En la ciencia de los alimentos y la biotecnología, la microencapsulación implica la incorporación de ingredientes naturales, polifenoles, aditivos volátiles, enzimas y bacterias, en pequeñas cápsulas, lo que les otorga la capacidad de estabilizar, proteger y contrarrestar la pérdida de nutrientes, y poder actuar como agentes antimicrobianos (Nazzaro et al., 2012).

Por ejemplo, la microencapsulación se puede aplicar con éxito para atrapar compuestos naturales, como aceites esenciales o extractos de plantas que contienen polifenoles con conocidas propiedades antimicrobianas. Este

aspecto representa punto de partida importante para las industrias que pueden probar nuevos materiales o sistemas de envasado naturales y seguros que puedan extender la vida útil de los alimentos, como los alimentos frescos muy perecederos (verduras, frutas, carnes, etc.), sin perder sus características de calidad e higiene (De Martino et al., 2009).

En la biotecnología alimentaria, la microencapsulación también se puede utilizar para atrapar o encerrar microorganismos segregándolos del entorno externo con una capa de hidrocoloides, de modo que las células se liberen en el compartimento intestinal apropiado en el momento adecuado. Así mismo, esta tecnología protege las bacterias del ácido láctico (BAL) en los alimentos y en su paso por el tracto gastrointestinal para permitir que se liberen en un estado viable y metabólicamente activo en el intestino. Otras ventajas incluyen la prevención de la inactivación interfacial, la estimulación de la producción y excreción de metabolitos secundarios, y la utilización continua (Mohammadi et al., 2011).

Procesos de microencapsulación

Entre las tecnologías disponibles para la microencapsulación las más usadas en la industria alimentaria son: coacervación, el lecho fluidizado y el secado por atomización (Estevinho et al., 2013). De los métodos mencionados, el secado por atomización es el más usado en aplicaciones alimenticias (Guevara & Quispe, 2019).

Coacervación. Esta técnica involucra agregados macromoleculares que forman un sistema coloidal con dos fases existentes: una rica en coloides (coacervado) y otra pobre en coloides (sobrenadante). El método se realiza depositando el agente encapsulante alrededor del compuesto activo mediante cambios fisicoquímicos, como temperatura, polaridad, pH o fuerza iónica (Rodrigues et al., 2018).

Liofilización. En este proceso, la solución que contiene el componente activo y el material de pared se congela a unas temperaturas de -90 a -40°C y luego se pasa por el liofilizador, donde el agua congelada se evapora mediante el proceso de sublimación a presión de vacío. La liofilización tiene algunas desventajas como el elevado consumo energético, el tiempo de procesamiento y un costo de 30 a 50 veces más caro que el secado por atomización (Cuaspu, 2015).

Lecho fluidizado. En la encapsulación en lecho fluidizado, mientras las partículas del material del núcleo están suspendidas, el material de la pared se atomiza en la cámara y se deposita en el núcleo. Cuando las partículas alcanzan la parte superior de la columna ascendente, se liberan en una columna de aire descendente que las devuelve al lecho fluidizado, donde nuevamente se recubren, secan y endurecen, asegurando un recubrimiento uniforme (Rodrigues et al., 2018).

Secado por atomización. Durante el secado por atomización, una mezcla homogénea del material activo y el material de la pared en solución acuosa u orgánica se somete a una corriente de aire caliente que favorece la evaporación del disolvente que seca las microcápsulas. Por tanto, la técnica no genera residuos de disolvente y no requiere un proceso de lavado. Sin embargo, el uso de altas temperaturas puede comprometer la integridad de los materiales del núcleo y las paredes (Rodrigues et al., 2018).

Secado por atomización

Generalidades

El secado por atomización es una operación unitaria en la que se atomiza un producto líquido en una corriente de gas caliente para obtener instantáneamente un polvo. El gas generalmente utilizado es aire o, más

raramente, un gas inerte como el nitrógeno. El líquido inicial que alimenta el atomizador puede ser una solución, una emulsión o una suspensión. El secado por atomización produce, según el material de alimentación inicial y las condiciones de funcionamiento, polvos muy finos (10–50 μm) o partículas grandes (2–3 mm) (Gharsallaoui et al., 2007).

El secado por atomización se considera la técnica de secado más económica debido a sus bajos costos operativos. Según una comparación a escala industrial, se ha mostrado que el secado por atomización es alrededor de 4 a 5 veces más económico que la liofilización debido a su menor consumo de electricidad y al corto tiempo de secado (Hammami & René, 1997). Además, el secado por atomización tiene la ventaja de un tiempo de contacto de secado relativamente corto (5-100 s) y, por lo tanto, tiende a preservar atributos de calidad sensibles como nutrientes, color y sabor. El producto secado por atomización es muy estable, debido a su bajo contenido de humedad y actividad de agua. En estas condiciones, los productos en polvo son bastante resistentes a la degradación microbiológica y oxidativa, es decir, reacciones de pardeamiento e hidrolíticas, oxidación de lípidos, autooxidación y otras actividades enzimáticas (Shishir & Chen, 2017).

Aunque el secado por aspersión tiene un tiempo de contacto de secado corto, implica temperaturas de secado relativamente altas, típicamente entre 150 y 220°C de temperatura del aire de entrada y entre 50 y 80°C de temperatura del aire de salida, que pueden dañar los compuestos sensibles, por ejemplo, licopeno, β caroteno, antocianinas, vitamina C, colores y sabores (Phisut et al., 2012). Además, los materiales ricos en azúcar, como los jugos de frutas y verduras, son difíciles de secar por atomización directamente sin un agente portador debido a su comportamiento pegajoso y a la baja temperatura de

transición vítrea, lo que genera problemas de deposición en la pared y dificultades de secado (Bhandari et al., 1997).

La eficacia térmica del secado por pulverización es comparativamente baja, porque el aire caliente circula en un gran volumen de la cámara de secado por pulverización sin contacto con las gotas de pulverización. Así también, el control del tamaño de las gotas en el secado por aspersión es limitado, lo que genera partículas de amplia distribución de tamaño y, a veces, microestructura irregular (Dalmoro et al., 2013).

Pasos del proceso de microencapsulación

El proceso de secado por atomización consta principalmente de cinco pasos (Patel et al., 2009):

Concentración: la materia prima se concentra normalmente antes de introducirla en el secador por atomización.

Atomización: la etapa de atomización crea las condiciones óptimas para la evaporación a un producto seco que tiene las características deseadas.

Contacto gota-aire: en la cámara, el líquido atomizado se pone en contacto con el gas caliente, lo que resulta en la evaporación de más del 95% del agua contenida en las gotas en cuestión de unos pocos segundos.

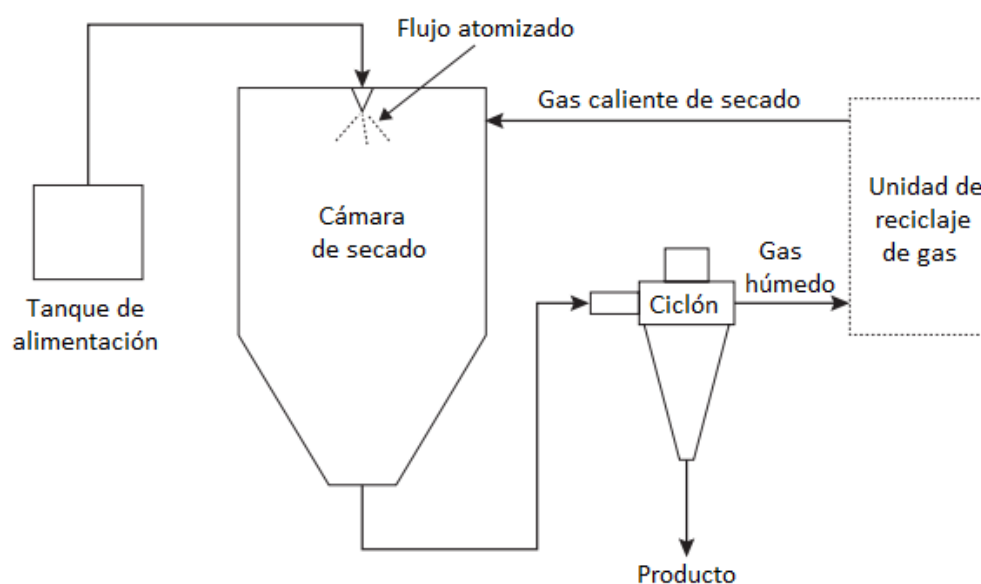
Secado de gotas: la evaporación de la humedad tiene lugar en dos etapas: 1) durante la primera etapa, hay suficiente humedad en la gota para reemplazar el líquido evaporado en la superficie y la evaporación tiene lugar a una velocidad relativamente constante y 2) la segunda etapa comienza cuando ya no hay suficiente humedad para mantener las condiciones de saturación en la superficie de la gota, lo que hace que se forme una cáscara seca en la superficie. La evaporación depende entonces de la difusión de la humedad a través de la cáscara, que aumenta de espesor.

Separación: se pueden utilizar ciclones, filtros de mangas y precipitadores electrostáticos para la etapa final de separación.

En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de secado por atomización.

Figura 1

Diagrama esquemático del proceso de secado por atomización.



Nota: Adaptado de Miller et al. (2016).

Condiciones de operación

Los principales factores del secado por atomización son la temperatura de secado, el caudal de aire de secado, el caudal de alimentación, la velocidad del atomizador, el tipo de agente portador y la concentración del agente portador (Shishir & Chen, 2017; Gharsallaoui et al., 2007; Patel et al., 2009).

Temperatura de secado

La temperatura de secado es el factor más importante que afecta a las propiedades fisicoquímicas del polvo secado por atomización. Una mayor temperatura suministra más calor a la cámara de secado, lo que aumenta la velocidad de secado y reduce el contenido de humedad del producto final. El

tamaño de las partículas del producto secado por atomización también depende de la temperatura de entrada. Un aumento de la temperatura de secado provoca una evaporación más rápida del agua, lo que desarrolla más rápidamente las microesferas sin permitir una contracción adecuada de las mismas, lo que da lugar a partículas más grandes (Shishir & Chen, 2017).

En cuanto a la densidad aparente del polvo secado, esta se redujo con el aumento de la temperatura de entrada debido a que el agua es más densa que la mayoría de los sólidos alimentarios secos. Además, la temperatura afecta la fluidez del polvo, en el sentido del índice de Carr (CI) y la relación de Hausner (HR). El CI y el HR aumentan con el incremento de la temperatura, lo que conduce a una menor fluidez (Tze et al., 2012).

La solubilidad es también una importante propiedad de calidad de los productos en polvo que puede influir directamente en el comportamiento de la reconstitución de los productos alimenticios secados por aspersion. (Daza et al., 2016).

Los pigmentos y otros compuestos sensibles al calor también se ven afectados por la temperatura de secado por pulverización. En general, el contenido de los compuestos sensibles al calor disminuye al aumentar la temperatura debido a la descomposición térmica y la oxidación. Esto se ha demostrado en diferentes compuestos sensibles al calor, el licopeno, el β -caroteno, las antocianinas, la vitamina C, contenido fenólico total, entre otras (Shishir & Chen, 2017).

La temperatura del ciclón, donde las partículas de polvo se separan del aire húmedo y se depositan en el fondo del ciclón, se reconoce como temperatura del aire de salida. La temperatura de salida aumenta con el incremento de la temperatura del aire de entrada y con el caudal de aire de secado, y disminuye

con el aumento del caudal de alimentación y del caudal de aire de atomización (Gallo et al., 2011). Asimismo, la temperatura de salida tiene un efecto significativo en las propiedades del polvo. Una mayor temperatura de salida reduce el contenido de humedad y aumenta el rendimiento del proceso. (Maury et al., 2005).

Caudal de aire de secado

El caudal de aire de secado también es un factor importante en el secado por atomización, ya que la energía necesaria para la evaporación cambia en función del suministro de aire de secado en la cámara de secado. El caudal de aire de secado influye en la velocidad de evaporación del agua. Un menor caudal de aire de secado aumenta el tiempo de secado de las gotas. El mayor tiempo de secado provoca un mayor grado de evaporación del agua. Del mismo modo, un mayor caudal de aire de secado provoca un menor tiempo de secado, un secado insuficiente y, por consiguiente, un mayor contenido de humedad en el producto final (Goula et al., 2004; Shishir & Chen, 2017).

Caudal de alimentación

El caudal de alimentación depende básicamente de la velocidad del atomizador. Una mayor velocidad de la bomba provoca un mayor caudal de alimentación. La alimentación con un mayor caudal exige más energía para evaporar la misma cantidad de humedad de las gotas de alimentación (Shishir & Chen, 2017). Tonon et al. (2008) informaron que un mayor flujo de alimentación no permite un tiempo de interacción adecuado entre las gotas de alimentación y el aire caliente; por lo tanto, el menor tiempo de contacto hace que la transferencia de calor y masa sea menos efectiva y conduce a un mayor contenido de humedad en el producto final.

Velocidad del atomizador

La atomización es la característica principal de un secador por atomización y la elección del atomizador adecuado es la clave para lograr una producción económica y un secado exitoso. La función básica del atomizador es maximizar el área superficial de la alimentación líquida para un secado eficiente y efectivo. Las propiedades del producto final dependen del diseño del atomizador y de su rendimiento.

El tipo de atomizador es también de gran importancia. Existen varios tipos de atomizadores, los más comunes son el atomizador rotativo, las boquillas hidráulicas (de presión), las boquillas neumáticas y las boquillas ultrasónicas. El atomizador de rueda centrífuga generalmente crea partículas más grandes en comparación con la atomización por boquilla, y el atomizador de boquilla de dos fluidos produce las partículas más pequeñas (León et al., 2010).

La velocidad del atomizador desempeña un papel importante en las características del producto final. Santos et al. (2009) informaron que aumentar la velocidad de atomización descompondría las gotas de líquido en pequeñas partículas, creando una amplia superficie y promoviendo un secado más rápido y dando lugar a una disminución del contenido de humedad. Asimismo, aumentar la velocidad de atomización mejorará el porcentaje de rendimiento al igual que lo hace la presión de atomización.

Tipo de agente portador

Los agentes portadores se encuentran comúnmente en el secado por atomización porque aumentan la temperatura de transición vítrea y el porcentaje de rendimiento, y reducen la pegajosidad y la higroscopicidad de los productos en polvo (Desai & Park, 2012). La elección del agente portador depende del objetivo del proceso y de las propiedades fisicoquímicas del material de elaboración.

Los agentes portadores deben ser materiales certificados como "generalmente reconocidos como seguros" (GRAS) para la aplicación alimentaria y biodegradables. Deben ser altamente solubles en el disolvente del proceso, tener una capacidad adecuada de formación de película y producir una solución poco viscosa incluso a altas concentraciones. Para el secado por atomización, los portadores deben tener un alto peso molecular y una alta temperatura de transición vítrea para mejorar las propiedades antiadherentes del producto final y deben ser capaces de proteger los compuestos sensibles al calor, el oxígeno, la luz y la humedad (Desai & Park, 2012).

Concentración del agente portador

La adición de un agente portador al alimento líquido mejora el secado de los productos pegajosos, aumenta el rendimiento y reduce el contenido de humedad del producto secado. Una mayor concentración de maltodextrina disminuye el contenido de humedad debido al aumento del contenido total de sólidos en la solución de alimentación y a la disminución del contenido de agua para la evaporación. Por el contrario, el contenido de humedad aumenta cuando se utiliza cantidades excesivas de maltodextrina, que ralentizan la difusión de las moléculas de agua (Goula et al., 2004).

En cuanto al rendimiento del secado, una mayor concentración de maltodextrina redujo la deposición en la pared y aumentó los porcentajes de rendimiento al aumentar la temperatura de transición vítrea. Sin embargo, existen casos en que el porcentaje de rendimiento del polvo secado se reduce con el incremento de la concentración de maltodextrina. Esto se explica por la mayor viscosidad de la alimentación que provoca gotas de alimentación más altas que se secan lentamente, lo que da lugar a la formación de polvo húmedo que se adhiere a la cámara de secado (Shishir & Chen, 2017).

En conclusión, no se puede recomendar ninguna concentración de agentes portadores aplicable de forma general para el secado por atomización. La concentración óptima depende del objetivo del secado, de la muestra y del tipo de agente portador. Normalmente, el rango adecuado de un agente portador particular para el secado por atomización se identifica mediante un procedimiento de prueba y error basado en las características deseadas del producto final.

Material de pared o agente portador

Los materiales de pared, agentes portadores o encapsulantes son aquellos que se convierten en materiales de cobertura para proteger el núcleo de los elementos que pueden causar su deterioro, para evitar la interacción anticipada entre los materiales del núcleo y otros componentes, para limitar las pérdidas de volátiles y también para permitir la liberación controlada en condiciones deseables (Shahidi & Han, 1993).

La elección del material de pared para las microcápsulas obtenidas de *Spray Drying* es muy importante para la eficacia y la estabilidad de microencapsulación. Los criterios para la selección de los materiales de pared se basan principalmente en las propiedades físico-químicas, como la solubilidad, el peso molecular, la cristalinidad, la difusividad, la formación de película, las propiedades de emulsificación, la compatibilidad con los productos alimenticios y los costos (Gharsallaoui et al., 2007).

Los principales materiales encapsulantes utilizados en esta técnica son: carbohidratos (maltodextrina, almidón y sus derivados, jarabe de maíz, carboximetilcelulosa); gomas (arábica, alginato de sodio, mezquite); lípidos (ceras, grasas, parafinas, ácido esteárico) y proteínas (caseinatos, suero de leche, proteína de soya, gluten); cada uno de estos elementos debe tener

capacidad de formar emulsión y tener buenas cualidades para la formación de la película (López, 2010).

Carbohidratos

Los agentes encapsulantes más utilizados habitualmente son los carbohidratos, como los almidones, los sólidos de jarabe de maíz y las maltodextrinas. Estos materiales son considerados buenos agentes encapsulantes porque presentan viscosidades bajas a altos contenidos de sólidos y buena solubilidad, sin embargo, la mayoría de ellos no tienen las propiedades interfaciales que se necesita para una alta eficiencia de microencapsulación y generalmente se asocian con otros materiales encapsulantes como proteínas o gomas (Gharsallaoui et al., 2007).

Maltodextrina. La maltodextrina $(C_6H_{12}O_5)_nH_2O$ es un polímero de sacárido nutritivo no dulces que están formados por unidades de D-glucosa unidas principalmente por enlaces alfa-1-4 y con un equivalencia de dextrosa (DE) inferior a 20. Para su uso como material de pared una equivalencia de dextrosa entre 10 y 20 son adecuadas (Kenyon, 1995). Se obtienen a partir del almidón del maíz por un proceso de hidrólisis; químicamente con ácido clorhídrico, enzimático utilizando enzimas amilolíticas, o bien, por una combinación de ambos métodos (Medina, 2013).

Las maltodextrinas brindan una buena estabilidad a la oxidación del aceite encapsulado, pero una emulsificación y una estabilidad de la emulsión deficiente y una capacidad baja de retención de aceite. Sin embargo, estas características también dependen de la concentración de maltodextrina y del tipo de emulsionante. Por otro lado, existe una fuerte dependencia de la estabilidad asociada con la DE. El producto con la DE más alta es extremadamente estable y

tendrá una vida útil de varios años sin utilizar un antioxidante debido a que son menos permeables al oxígeno (Kenyon, 1995).

Gomas

En la microencapsulación se utilizan las gomas por sus propiedades de formación de películas y estabilización de emulsiones. La goma arábiga es un polímero formado por ácido D-glucurónico, L-ramnosa, D-galactosa y L-arabinosa, con aproximadamente un 2% de proteínas. Entre sus cualidades están las excelentes propiedades de emulsión debido a la presencia de la fracción proteica; además, es un producto ideal para la microencapsulación de lípidos, debido a sus propiedades tensoactivas, formadoras de película y la producción de emulsiones estables en un amplio rango de pH (Dickinson, 1992).

Sin embargo, las cápsulas con base de goma arábiga muestran una resistencia limitada a la oxidación porque actúan como membranas semipermeables y la permeabilidad al oxígeno es un factor importante en la vida útil del principio activo. Asimismo, el alto costo, el limitado suministro y las diferencias de calidad han limitado el uso de la goma arábiga para fines de encapsulación y han llevado a los investigadores a buscar otras alternativas (Gharsallaoui et al., 2007).

Proteínas

Las excelentes propiedades funcionales de las proteínas les permiten ser un buen material de recubrimiento para la microencapsulación por secado en spray. Las proteínas más utilizadas para encapsular ingredientes alimentarios mediante secado por atomización son las proteínas lácteas (o del suero) y la gelatina (Rosenberg & Sheu, 1996).

Sin embargo, a veces puede haber algunos problemas en el uso de las proteínas como agentes encapsulantes. Por ejemplo, las pérdidas del

componente de sabor basado en el aldehído, la alergia y la precipitación cuando se añaden microcápsulas basadas en proteínas a productos alimentarios que tienen un pH cercano a su punto isoeléctrico (Gharsallaoui et al., 2007).

Caseinato de sodio. El caseinato de sodio es una forma aislada de caseína. Se obtiene precipitando las caseínas de la leche y su neutralizándolas con hidróxido de sodio (Noboa & Herrera, 2015). Es alto en proteínas con alrededor del 90% en peso. Contiene todos los aminoácidos esenciales por lo que tiene un alto valor biológico y una excelente calidad nutricional. Entre sus propiedades podemos distinguir su capacidad de retención de agua, su capacidad de gelificación, emulsificación y estabilización (FAO, 2000).

La tensión superficial tiene una reducción significativa debido a la naturaleza anfifílica de las caseínas (Casanova & Cardona, 2004). Esto permite un importante ahorro energético durante la fabricación de productos como emulsiones, suspensiones y espumas (Dickinson, 1992).

Emulsión

Una emulsión es una dispersión coloidal líquida dentro de otra, en la que normalmente es inmisible (Badui, 2006). Un sistema que consta de gotas de aceite dispersas en una fase acuosa se denomina emulsión de aceite en agua (o/w), mientras que un sistema que consta de gotas de agua dispersas en una fase oleosa se denomina agua en aceite (w/o). El material dentro de las gotitas de emulsión se suele denominar fase dispersa o interna, mientras que el material que forma el líquido circundante se suele denominar fase continua o externa. Por lo general, los diámetros de las gotitas en las emulsiones alimentarias se encuentran entre 0,1 y 100 μm (Bailey, 2005).

Solo si se agrega una tercera sustancia, llamada emulsionante, que actúa en la interfase de los líquidos se produce la estabilidad de una emulsión. Por lo

tanto, toda emulsión estable debe estar formada por dos líquidos inmiscibles entre sí y un agente emulsionante adecuado que se agrega a una de las fases antes de la formación de la emulsión (Badui, 2006).

Emulsionantes

También conocidos como emulsificantes, estabilizan una mezcla inmiscible de líquidos evitando la separación de fases. Estos aditivos incluyen una molécula anfifílica que tiende a migrar y adsorberse rápidamente en la interfase aceite-agua, promoviendo la formación de gotas pequeñas que consumen menos energía, reducen la tensión superficial y estabilizan las dos fases por contacto cercano (Muñoz & Alfaro, 2007; Badui, 2006).

Existen distintos tipos de emulsionantes:

- Los de origen natural, pueden ser de carácter iónico como sales biliares, lecitina, proteínas y gomas; y los no iónicos como colesterol y saponinas.
- Los sintéticos, de carácter iónico son el estearoíl-2-lactilato de sodio y las sales de ácidos grasos como el oleato de sodio; los no iónicos como los mono y diglicéridos, ésteres de propilenglicol, ésteres poliglicéridos de ácidos grasos, etc.

De todos ellos, la lecitina es el agente que más se emplea (Badui, 2006).

Lecitina de Soya. La lecitina es un subproducto del procesamiento del aceite de soja crudo; es la "goma" que se elimina durante la etapa de desgomado del refinado del aceite. La goma cruda se trata y purifica para obtener los diversos productos comerciales de lecitina que están disponibles para el procesamiento de alimentos en la actualidad (Bailey, 2005). La lecitina de soja comercial de calidad estándar es una mezcla compleja que comprende fosfolípidos, triglicéridos y cantidades menores de otros componentes (fitoglicolípidos, fitoesteroles, tocoferoles y ácidos grasos) (Dashiell, 1989).

Una de las principales funciones de las lecitinas comerciales es emulsionar las grasas. En un sistema aceite/agua, los componentes fosfolípidos se concentran en la interfaz aceite/agua. Las partes hidrófilas polares de las moléculas se dirigen hacia la fase acuosa y las partes hidrófobas (o lipófilas) no polares se dirigen hacia la fase oleosa. Una vez formada la emulsión, las moléculas de fosfolípidos en la superficie del aceite o las gotas de agua actúan como barreras que evitan que las gotas se unan, estabilizando así la emulsión. Las lecitinas comerciales se utilizan tanto en emulsiones de agua en aceite (w/o) como de aceite en agua (o/w) (Bailey, 2005).

Metodología de superficie de respuesta (MSR)

El método de superficie de respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas donde la respuesta de interés está influenciada por muchas variables y el objetivo es optimizar esa respuesta (Montgomery, 2016). El objetivo inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta, para luego determinar el modelo matemático que mejor se ajuste a los datos obtenidos. Por su parte, el objetivo final es establecer el valor de los factores que optimizan el valor de la variable de respuesta (Paulo & Santos, 2017).

La diferencia entre (MSR) y un diseño de prueba convencional es que un diseño de prueba está destinado únicamente a determinar el tratamiento "ganador" entre todos los probados. En cambio, MSR tiene como objetivo determinar las condiciones operativas óptimas para el proceso. Esto es un desafío para el investigador, requiere una estrategia más holística e incluye la capacidad de realizar múltiples experimentos secuencialmente y utilizar técnicas matemáticas más avanzadas (Yepes, 2019).

Capítulo III

Materiales y Métodos

Participantes

El trabajo de titulación fue realizado por Víctor Francisco Criollo Lugmaña, con la tutoría del Ing. Hernán Paz.

Trabajo de laboratorio

El trabajo de titulación se realizó en los laboratorios de la empresa Wildland Cia. Ltda., ubicada en la Loma de Puengasí, Calle K No.204 entre calles M y N, cantón Quito, provincia de Pichincha.

Periodo de investigación

El presente trabajo de titulación se ejecutó durante los meses de julio de 2021 y enero de 2022.

Selección de la grasa vegetal

Se utilizó grasa comercial 100% vegetal, mezcla de aceites de palma, palmiste y estearina de palma. La grasa fue obtenida de productores nacionales.

Preparación de la emulsión

La composición de la emulsión y sus proporciones se tomaron de Young (2014) y se muestran en la Tabla 4. Estos datos permanecerán constantes en todas las corridas para optimizar los parámetros de operación del *Spray Dryer*.

Las emulsiones fueron diseñadas para contener un alto contenido de sólidos O/W (50% p/p) y un contenido de grasa vegetal del 50% p/p en el polvo seco final. Se realizaron lotes de 3 Kg de emulsión para cada corrida.

Se inició la preparación de la fase acuosa mezclando la maltodextrina 19 DE y la proteína láctea (caseinato de sodio) en agua hasta que estuvieran

completamente solubilizados utilizando una licuadora industrial marca Montero LAR-25PMB. La temperatura de mezclado fue de aproximadamente 60°C.

Tabla 4

Composición y proporciones de la emulsión

Componente	Proporción (%)
Grasa vegetal	25
Emulsionante (Lecitina de soya)	5
Maltodextrina 19 DE	15
Proteína láctea (Caseinato de sodio)	5
Agua	50

Se inició la preparación de la fase acuosa mezclando la maltodextrina 19 DE y la proteína láctea (caseinato de sodio) en agua hasta que estuvieran completamente solubilizados utilizando una licuadora industrial marca Montero LAR-25PMB. La temperatura de mezclado fue de aproximadamente 60°C.

En otro recipiente se fundió la grasa vegetal a 50 °C a baño maría y se agregó el emulsificante (lecitina de soya) con agitación manual.

A continuación, se obtuvieron emulsiones de aceite en agua (O/W) agregando la mezcla de grasa y el emulsificante a la fase acuosa de encapsulantes y se agitó utilizando una licuadora industrial Montero LAR-25PMB.

Finalmente, la emulsificación se realizó con un homogeneizador Ultra-Turrax T45 a 10000 r.p.m. por 15 minutos aproximadamente. La emulsión fue secada en el *Spray Dryer* inmediatamente luego de su preparación.

Obtención de las microcápsulas por secado por atomización

Las emulsiones preparadas se secaron con un secador por atomización (*Spray Dryer*) marca PharmaO de procedencia china con una capacidad de 10L/h equipado con un atomizador rotatorio. Las dimensiones del *Spray Dryer* fueron de

2,5m de altura y 1,5m de diámetro. Para mantener la homogeneidad mientras se alimentaba al *Spray Dryer*, las emulsiones se agitaron suavemente con una pala.

Figura 2

Secador por atomización (*Spray Dryer*) de la empresa Wildland Cia. Ltda.



Se emplearon dos temperaturas de entrada de aire de secado 175 y 185°C; el flujo de alimentación de 45 y 55 mL/min; y la frecuencia o el número de revoluciones del atomizado de 20 000 y 25 000 rev/min. Estos valores fueron definidos a partir de los estudios previos en la empresa.

Eficiencia de microencapsulación

Contenido de aceite superficial

El contenido de aceite superficial se calculó mediante el método descrito por Hee et al. (2015). Se pesaron 2 gramos de microcápsulas a las cuales se les añadió 15 mL de hexano y se agitó lentamente por 30 segundos con un agitador magnético (cuidando de que las microcápsulas no se rompan). La mezcla disolvente se filtró a través de un papel filtro Whatman N° 1. Las microcápsulas

obtenidas en el papel filtro se secaron en una estufa a 70°C hasta peso constante para eliminar el disolvente residual. El contenido de aceite superficial se calculó por diferencia de peso de las microcápsulas antes y después del lavado con hexano. Este ensayo se realizó por triplicado.

Eficiencia

La eficiencia de microencapsulación se determinó basándose con el contenido de aceite total teórico y aceite superficial presente en la microcápsula, mediante la Ecuación 1.

$$EM(\%) = \frac{\text{Aceite total teórico (g)} - \text{Aceite superficial (g)}}{\text{Aceite total (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Rendimiento

El rendimiento de microencapsulación se determinó con base al contenido de sólidos de la emulsión y el peso de microcápsulas obtenidas después del secado (Roccia, 2014). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$R(\%) = \frac{\text{Masa de microcápsulas (g)}}{\text{Sólidos totales de la emulsión (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Propiedades Físicas del microencapsulado

Contenido de humedad

Se evaluó el contenido humedad de la grasa microencapsulada empleando 1 g de muestra en una balanza de humedad marca Denver Instrument Company 115 VAC. Este ensayo se realizó por triplicado.

Densidad empacada y aparente

Los siguientes métodos fueron tomados de Pugliese (2017) con pequeñas modificaciones.

La densidad aparente se midió transfiriendo 10 g de microcápsulas a una probeta y el volumen ocupado por las microcápsulas dio el volumen aparente.

La densidad empacada se midió golpeando mecánicamente la probeta que contuvo las microcápsulas hasta que se observó un volumen constante. La densidad aparente o empacada se calculó como el cociente de la masa de las microcápsulas y el volumen total o compactado respectivamente. Estos ensayos se realizaron por triplicado.

$$\rho_{aparente} = \frac{Masa (g)}{Volumen aparente (cm^3)} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\rho_{empacada} = \frac{Masa (g)}{Volumen empacado (cm^3)} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Índice de compresibilidad de Carr

El índice de compresibilidad de las microcápsulas se determinó de acuerdo con el porcentaje del índice de compresibilidad de Carr (Pugliese, 2017).

$$\text{Índice de Carr} = \frac{\rho_{empacada} - \rho_{aparente}}{\rho_{empacada}} * 100 \quad \text{Ecuación 5.}$$

Relación de Hausner

La relación de Hausner se determinó por la relación de la densidad empacada y la densidad aparente (Pugliese, 2017).

$$\text{Radio de Hausner} = \frac{\rho_{empacada}}{\rho_{aparente}} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Higroscopicidad

Se colocó 2 g de muestra de polvo microencapsulado en un vidrio reloj previamente pesado y se colocó en un desecador que contiene una solución

salina saturada de cloruro de sodio (humedad relativa del 75,09%) manteniendo a una temperatura ambiente durante 7 días. Terminado este tiempo, se pesó la muestra restante y se determinó la higroscopicidad expresada en porcentaje (Samsu et al., 2020).

$$Higroscopicidad(\%) = \frac{(Peso\ saturado - Peso\ seco)(g)}{Peso\ seco\ (g)} * 100 \quad \text{Ecuación 8.}$$

Solubilidad

Se tomó 2 g de muestra del polvo optimizado y se agitó vigorosamente en 20 g de agua destilada a temperatura ambiente durante una hora (la proporción fue de 1:10 p/v). Luego se incubó en baño de agua a 37°C durante 30 min y luego se centrifugó durante 40 min a 5000 rpm en una centrífuga. El sobrenadante se recolectó cuidadosamente en un vaso de precipitados previamente pesado y se secó en estufa a una temperatura de 103°C (Kha et al., 2014). La solubilidad (%) se calculó como:

$$Solubilidad(\%) = \frac{Masa\ de\ sobrenadante\ seco\ (g)}{Masa\ de\ la\ muestra\ (g)} * 100 \quad \text{Ecuación 8.}$$

Propiedades organolépticas

Las propiedades organolépticas evaluadas en el microencapsulado optimizado fueron el olor, sabor y color. La evaluación de las propiedades fue cualitativa y de referencia propia.

Caracterización morfológica del microencapsulado por microscopía electrónica de barrido (MEB)

Las características morfológicas del microencapsulado optimizado secado por atomización se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

La muestra fue colocada sobre una cinta de carbono doble faz en un portamuestra para MEB. A continuación, la muestra fue revestida con una fina capa de oro utilizando un evaporizador de vacío con un revestidor por pulverización catódica Sputter Coating Quorum Q105R bajo las siguientes condiciones: 15mA y 80mTorr por 60 s. Las observaciones se realizaron en el SEM TESCAN MIRA 3 empleando el detector de electrones secundarios (SE) más el de retrodispersados (BSE) a 5kV. Las micrografías del MEB donde se muestran las microestructuras del polvo se tomaron con un software instalado en una PC conectada al sistema.

Una vez obtenido las micrografías, se procedió a medir las micropartículas de polvo utilizando el software ImageJ-Fiji 1.53f51.

Análisis estadístico

Para la optimización de los parámetros de operación del *Spray Dryer* se usó el método de superficie de respuesta (MSR) partiendo de un diseño factorial 2^3 con puntos centrales. Los puntos centrales replicados (n_c) fueron 4, de acuerdo a lo mencionado por Montgomery (2016).

Los parámetros experimentales se definieron de la siguiente manera:

- Parámetros fijos del proceso

El contenido de sólidos totales en la emulsión es de 50%.

Proporción de ingredientes: 25% de grasa 100% vegetal, 5% de emulsionante (lecitina de soya), 15% de maltodextrina, 5% de caseinato de sodio y 50% de agua.

- Variables del proceso

Se tiene tres factores: Temperatura de entrada de aire (A), Flujo de alimentación (B) y Frecuencia del atomizador (C).

Tabla 5*Diseño factorial 2³ con puntos centrales.*

Factores	Código del factor	Nivel del factor			Variable de respuesta (Y _i)
		-1	0	+1	
Temperatura de entrada del aire (°C)	A	175	180	185	Eficiencia (%)
Flujo de alimentación (mL/min)	B	40	45	50	Humedad (%)
Frecuencia del atomizador (rev/min)	C	20 000	22500	25 000	Rendimiento (%)

El diseño experimental y las corridas para el secado por atomización se muestra en la Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Tabla 6*Corridas del proceso de secado por atomización.*

Corrida	A	B	C	T entrada (°C)	Flujo (mL/min)	Frecuencia (rev/min)
1	-1	-1	-1	175	40	20000
2	1	-1	-1	185	40	20000
3	-1	1	-1	175	50	20000
4	1	1	-1	185	50	20000
5	-1	-1	1	175	40	25000
6	1	-1	1	185	40	25000
7	-1	1	1	175	50	25000
8	1	1	1	185	50	25000
9	0	0	0	180	45	22500
10	0	0	0	180	45	22500
11	0	0	0	180	45	22500
12	0	0	0	180	45	22500

- Las variables de respuesta será la Eficiencia (%), Humedad (%) y Rendimiento (%).
- Luego de encontrar las condiciones óptimas de operación del *Spray Dryer* con el método de superficie de respuesta se hizo una corrida final y se analizaron nuevamente las variables de respuesta y las propiedades físicas.
- El análisis estadístico se realizó en el programa Minitab 19 Statistical Software.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Caracterización de la emulsión

La emulsión preparada de grasa vegetal (Figura 3) se mantuvo estable y sin separación de fases luego de 24h después de su homogeneización. La buena estabilidad de la emulsión en este estudio se debe a la utilización de caseinato de sodio y, principalmente, lecitina de soya. El caseinato de sodio tiene la naturaleza anfifílica de las caseínas lo que genera una reducción significativa de la tensión superficial y le brinda capacidad emulsificante (Casanova & Cardona, 2004); por su parte, la lecitina de soya es el emulsionante más utilizado en la industria alimentaria, formado mayoritariamente por moléculas anfifílicas como los fosfolípidos que genera su buena capacidad emulsificante (Bailey, 2005). Así pues, la emulsión permanece estable durante todo el proceso de secado por atomización, lo que según Bae & Lee (2008) es importante ya que la estabilidad de la emulsión influye en la eficiencia de microencapsulación y las propiedades finales de los polvos de aceites secados por atomización.

Figura 3

Emulsión preparada de grasa vegetal de palma



Determinación de los parámetros óptimos del equipo de secado por atomización (*Spray Dryer*)

Los resultados experimentales del polvo de grasa vegetal en términos de rendimiento, eficiencia y humedad, se enumeran en la Tabla 7. Estos valores experimentales se utilizaron en el programa Minitab 19 aplicando la metodología de superficie de respuesta (MSR) para generar el mejor modelo predicho y su análisis estadístico.

La adecuación del modelo de predicción final se consideró a partir del análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 8). Los efectos lineales, cuadráticos y de interacción de la temperatura del aire de entrada (A), el flujo de alimentación (B) y la frecuencia del atomizador (C) en cada variable de respuesta (Y_i) del polvo encapsulado, así como los coeficientes de regresión estimados para Y_i con su correspondiente R^2 , el valor P de regresión y el valor P de falta de ajuste también se muestran en la Tabla 8. Según los resultados, el ANOVA indicó que los modelos de superficie de respuesta fueron significativos ($p < 0,05$) y en cada uno de los modelos no hubo significancia en la falta de ajuste ($p > 0,05$). Por su parte, el valor de R^2 y $Adj-R^2$ fueron mayores que 0,90 lo que indica que los modelos

fueron adecuados para explicar el efecto de las variables independientes (A,B,C) sobre las variables de respuesta (Tabla 8).

Tabla 7

Porcentajes de eficiencia, rendimiento y humedad de los microencapsulados.

Corrida	Eficiencia (%)	Humedad (%)	Rendimiento (%)
1	82,05±1,29	3,75±0,02	75,33
2	84,34±0,88	2,53±0,05	78,01
3	82,66±1,28	3,81±0,14	70,12
4	86,92±0,67	2,71±0,04	77,21
5	80,61±0,97	3,66±0,05	73,84
6	84,72±0,66	2,07±0,07	76,62
7	81,94±0,24	3,87±0,02	73,11
8	84,94±0,60	2,52±0,10	74,92
9	84,92±0,34	3,22±0,12	75,56
10	85,03±0,36	3,17±0,09	75,87
11	84,88±0,15	3,27±0,02	75,21
12	84,98±0,89	3,24±0,11	75,39

Eficiencia de microencapsulación

Uno de los parámetros importantes de calidad en la encapsulación de aceites o lípidos mediante *Spray Drying* es la eficiencia de microencapsulación, es decir, el porcentaje de aceite que quedó atrapado con éxito en los materiales de recubrimiento en relación con el aceite inicial que se agregó a la emulsión de alimentación (Bae & Lee, 2008). Los valores de eficiencia de microencapsulación (%) dan una indicación de cuánto tuvo éxito el material de pared en prevenir la pérdida y volatilización del aceite durante el proceso de microencapsulación y durante el almacenamiento (Burhan et al., 2019). Por el contrario, una baja eficiencia de microencapsulación influye negativamente en las propiedades físicas de los polvos, como la fluidez, la densidad aparente, e induce una oxidación de lípidos más rápida (Aghbashlo, 2012).

Tabla 8

ANOVA de términos y coeficientes lineales, cuadráticos y de interacción para el modelo de predicción de polvo de grasa vegetal secado por atomización.

Fuente de varianza	gl	Eficiencia			Humedad			Rendimiento		
		Coeficientes regresión	Suma de cuadrados	p-valor	Coeficientes regresión	Suma de cuadrados	p-valor	Coeficientes regresión	Suma de cuadrados	p-valor
Modelo	7	84,953	33,6838	0,010	3,2250	3,7360	0,000	75,507	42,7793	0,048
Lineal	3		27,5869	0,004		3,6175	0,000		35,4812	0,018
A	1	1,695	22,9842	0,001	-0,6575	3,4584	0,000	1,800	25,9200	0,007
B	1	0,605	2,9282	0,039	0,1125	0,1012	0,002	-1,060	8,9888	0,039
C	1	-0,457	1,6744	0,084	-0,0850	0,0578	0,005	-0,268	0,5724	0,487
Interacciones	3		0,5481	0,663		0,0863	0,011		6,3139	0,236
AB	1	0,120	0,1152	0,580	0,0450	0,0162	0,039	0,425	1,4450	0,291
AC	1	0,082	0,0544	0,701	-0,0775	0,0480	0,007	-0,643	3,3025	0,140
BC	1	-0,218	0,3785	0,337	-0,0525	0,0220	0,024	0,443	1,5665	0,274
Cuadrado	1		5,5488	0,014		0,0322	0,013		0,9841	0,372
A ²	1	-1,443	5,5488	0,014	-0,1100	0,0322	0,013	-0,607	0,9841	0,372
B ²		-1,443	5,5488	0,014	-0,1100	0,0322	0,013	-0,607	0,9841	0,372
C ²		-1,443	5,5488	0,014	-0,1100	0,0322	0,013	-0,607	0,9841	0,372
Error	4		1,2771			0,0071			3,9085	
Falta de ajuste	1		1,2641	0,081		0,0018	0,387		3,6720	0,052
Error puro	3		0,0131			0,0053			0,2365	
Total	11		34,9609			3,7431			46,6878	
R ²			0,9635			0,9981			0,9163	
Adj-R ²			0,8995			0,9948			0,7698	

La Tabla 7 muestra los resultados de eficiencia de microencapsulación (%) en el rango de $80,61 \pm 0,97\%$ a $86,92 \pm 0,67\%$, lo que puede considerarse un nivel adecuado para aceites o lípidos secados por atomización (Roccia, 2014). Estos resultados tienen similitud con las eficiencias de microencapsulación obtenidas por Hee (2015), Carneiro (2013), Aghbashlo (2012), Roccia (2014) y Lavanya (2019), los cuales microencapsularon aceite de coco, aceite de linaza, aceite de pescado, aceite de girasol y aceite de chía, respectivamente.

La eficiencia de microencapsulación mostrada en el estudio se debe a la naturaleza de los materiales de pared y sus mezclas, a la calidad y estabilidad de la emulsión, y a los parámetros del secado por atomización. Hee et al. (2015) obtuvieron un resultado similar en la encapsulación de aceite de coco con maltodextrina y caseinato de sodio como materiales de pared. Se utilizó principalmente la maltodextrina porque proporciona una buena estabilidad oxidativa al aceite encapsulado y es fácilmente soluble proporcionando poca viscosidad a la mezcla (Roccia, 2014); por su parte el caseinato de sodio tiene una buena capacidad emulsionante y no muestra desnaturalización por calor durante el secado. En consecuencia, la combinación de la maltodextrina y el caseinato de sodio ayudaron a mejorar las propiedades de secado al potenciar la formación de una costra seca alrededor del aceite (Calvo et al., 2012). Además, el uso de lecitina de soya en la formulación asegura la estabilidad de la emulsión antes del proceso de secado lo que incrementa la eficiencia de microencapsulación (Roccia, 2014). Así también, el alto contenido total de sólidos en la emulsión, en este caso del 50%, pudo haber afectado positivamente a la eficiencia ya que se reduce el tiempo necesario para formar la membrana semipermeable en la superficie de la partícula (Jafari et al., 2008).

Los efectos de los factores se observan en la Tabla 8. Solo el efecto lineal de la temperatura de entrada (A) y el flujo de alimentación (B) tuvo un efecto

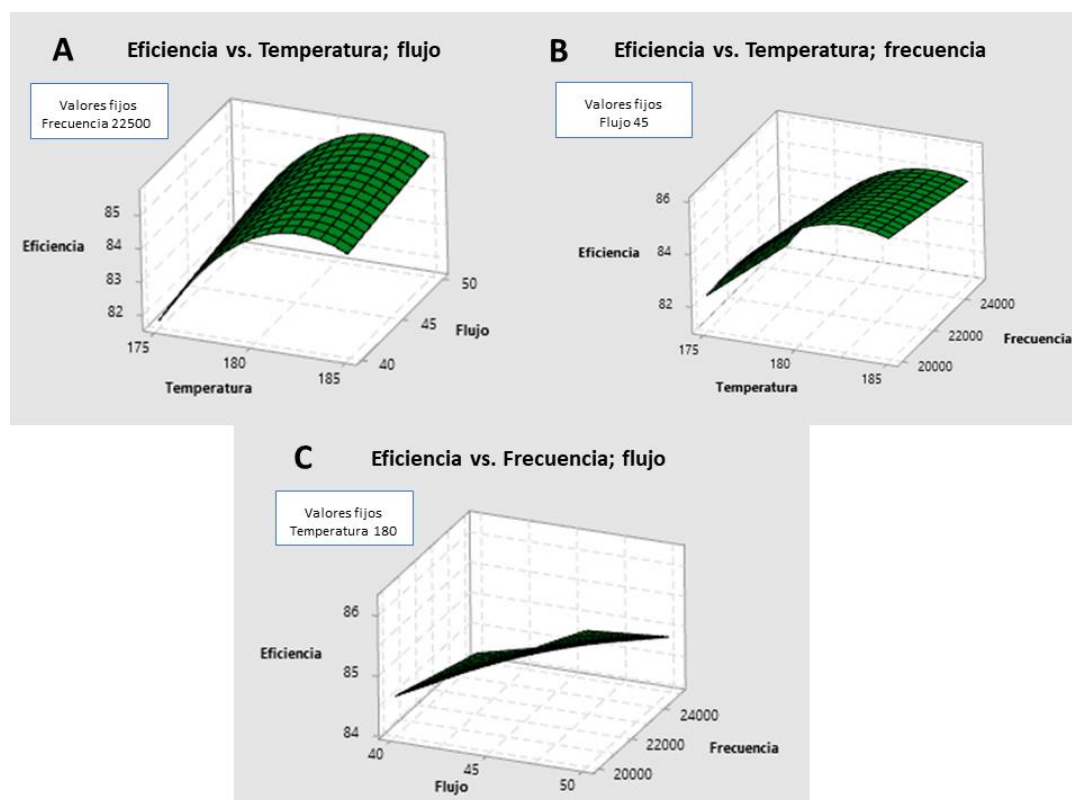
significativo sobre la eficiencia de microencapsulación ($p < 0,05$), como también el efecto cuadrático de los factores ($p < 0,05$). La interacción entre los factores no fue estadísticamente significativa ($p > 0,05$). Con respecto a los coeficientes estimados (Tabla 8), la eficiencia de microencapsulación tuvo una relación positiva con la temperatura de entrada de aire y el flujo de alimentación; esto también se puede observar en las gráficas en 3D de superficie de respuesta mostradas en la Figura 4. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Aghbashlo (2012) en la encapsulación de aceite de pescado, donde la temperatura fue un factor determinante y de relación positiva con respecto a la eficiencia de microencapsulación. A medida que aumenta la temperatura de entrada del aire, aumenta la eficiencia de microencapsulación debido a la aceleración de la velocidad de secado de las gotas, promoviendo la rápida formación de la corteza de las partículas de polvo. Tan pronto se forma esta corteza, proporciona una membrana firme alrededor de la partícula impidiendo el escape de la sustancia oleosa (Jafari et al., 2008). Sin embargo, es probable que las temperaturas de entrada muy altas den lugar grietas en las membranas por la evaporación excesiva y provoquen la liberación prematura del aceite microencapsulado (Kha et al., 2014). Este punto de inflexión en la curva de temperatura de entrada que genera la mayor eficiencia antes de daños en el polvo se puede ver en la Figura 4.

El flujo de alimentación fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$) y tuvo un efecto positivo con respecto a la eficiencia de microencapsulación (Figura 4). Estos resultados difieren con lo expuesto por Moser et al. (2019) que microencapsularon aceite de butír y la eficiencia no fue afectada significativamente ($p > 0,05$) por el flujo de alimentación. Además, Phisut et al. (2012) señala que mientras los caudales son más altos el tiempo de contacto entre la alimentación y el aire de secado es más corto, lo que provocaría una

transferencia de calor menos eficiente y por lo tanto una eficiencia de microencapsulación menor. Estos datos controvertidos pueden estar relacionados principalmente con variaciones en el diseño del secado por atomización y los materiales de pared que se utilizaron.

Figura 4

Superficie de respuesta para la eficiencia de microencapsulación



La frecuencia del atomizador influye de manera inversamente proporcional al tamaño de partícula de polvo en el proceso de secado por atomización. En este estudio la frecuencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0,05$), lo cual podría explicarse debido a varios trabajos donde no ha quedado claro la influencia del tamaño de partícula en la eficiencia de microencapsulación. Fang et al. (2005) han informado que los tamaños de partícula más grandes dan lugar a un mayor contenido de aceite superficial debido con la morfología de su superficie. Sin embargo, Jafari et al. (2008) no pudieron encontrar ningún efecto relacionado con el tamaño de la partícula y atribuyeron el resultado de eficiencia a la alta

concentración de sólidos de la emulsión, es decir, el tamaño de la partícula no es importante si se utilizan altas concentraciones de sólidos como en el presente estudio.

Contenido de humedad

El contenido de humedad es un parámetro importante que determina la vida útil y la calidad de los polvos secos. La Tabla 7 muestra los porcentajes de humedad obtenidos de los microencapsulados que variaron de $2,07 \pm 0,07$ a $3,87 \pm 0,02\%$, los cuales estuvieron dentro del rango indicado en la norma del Codex 207-1999 para de leche en polvo y nata (crema) en polvo (Codex Alimentarius, 2014). Se utilizó esta norma debido a que no se encontró una específica para grasas vegetales en polvo, sin embargo, en las fichas técnicas de productos similares, utilizan la norma del Codex 207-1999 como base de comparación. Resultados similares se hallaron en la microencapsulación de aceite de coco (Hee, y otros, 2015), aceite de girasol (Roccia, 2014), aceite de pescado (Aghbashlo, 2012) y aceite de chía (Lavanya, 2019).

Los efectos lineales de los factores (Tabla 8) de temperatura de entrada (A), flujo de alimentación (B) y frecuencia del atomizador (C), fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$). La interacción entre los factores y los efectos cuadráticos también fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$). Según los coeficientes estimados (Tabla 8), el contenido de humedad tuvo una relación negativa con la temperatura de entrada (A) y la frecuencia de atomizador (C), mientras que tuvo una relación positiva con el flujo de alimentación (B). Estas relaciones entre el contenido de humedad y los factores se pueden observar también en la Figura 5.

El efecto significativo de la temperatura de entrada y la relación negativa con la humedad tuvieron concordancia con lo informado por Aghbashlo (2012) en

la microencapsulación de aceite de pescado, donde el aumento en la temperatura de entrada aceleró la tasa de evaporación, lo que resultó en un menor contenido de humedad en la microcápsula. Sin embargo, una temperatura elevada provoca una evaporación excesiva y da lugar a grietas en la membrana que inducen a una liberación prematura y por consiguiente la degradación del ingrediente encapsulado. Por el contrario, la temperatura de entrada muy baja, reduce la tasa de evaporación provocando la formación de microcápsulas con alto contenido de agua, poca fluidez y facilidad de aglomeración (Roccia, 2014; Gharsallaoui et al., 2007).

El flujo de alimentación fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$) (Tabla 8) y tuvo un efecto positivo con respecto al contenido de humedad (Figura 5). Resultados similares obtuvo Tonon et al. (2008) en la microencapsulación del acai. Esta investigación informó que las altas tasas de flujo implican un corto tiempo de contacto entre la alimentación y el aire de secado, haciendo que la transferencia de calor sea menos eficiente y dando lugar a una menor evaporación del agua. Es decir, a mayor flujo de alimentación mayor contenido de humedad.

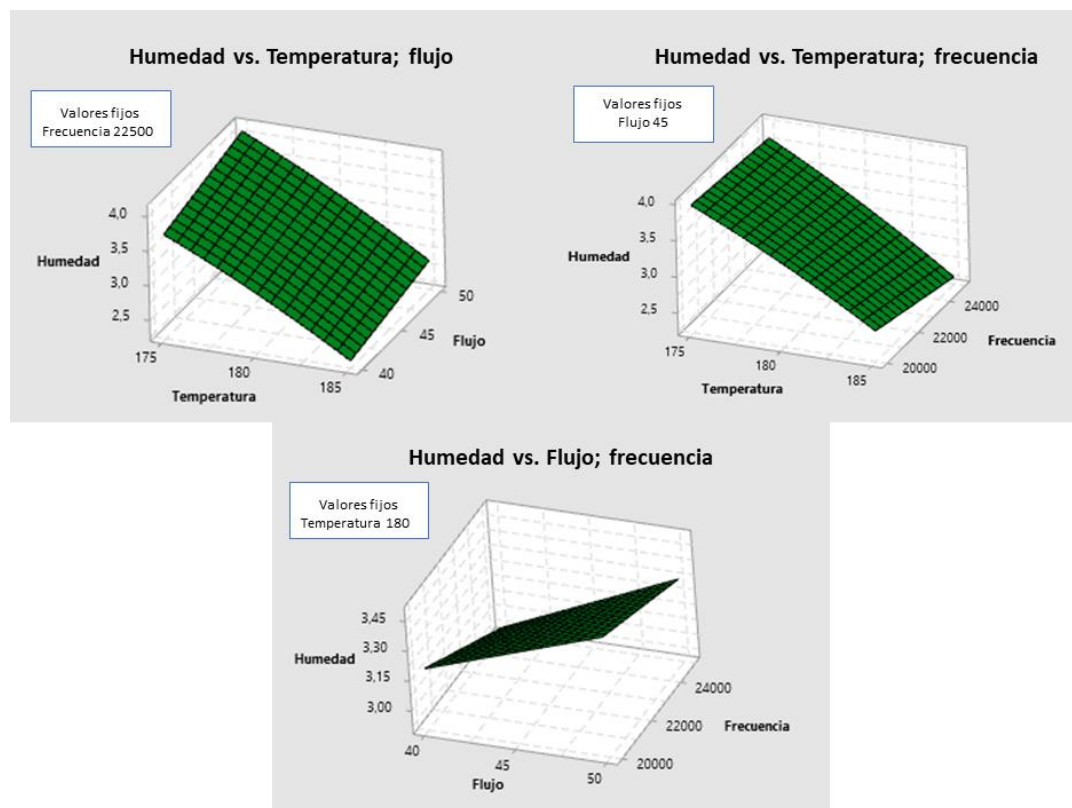
La frecuencia del atomizador influyó de manera negativa sobre el contenido de humedad (Figura 5), además que fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$). En un estudio de Phisut et al. (2012), el contenido de humedad disminuyó al aumentar la velocidad del atomizador, puesto que a mayor velocidad del atomizador se produjeron gotas más pequeñas y se evaporó más humedad como resultado de una mayor superficie de contacto.

Con respecto a la actividad del agua, esta no fue determinada en este estudio, pero Roccia (2014) menciona que el bajo contenido de humedad generalmente se asocia con una baja actividad de agua, lo que previene la

oxidación de los lípidos presentes en las microcápsulas y brinda una mejor estabilidad en el almacenamiento.

Figura 5

Superficie de respuesta para el contenido de humedad



Rendimiento

El rendimiento (%) es la cantidad de polvo obtenido en el colector del *Spray Dryer* en relación con la cantidad total de contenido sólido que se disolvió en la emulsión de alimentación y es una de las principales preocupaciones en el secado por atomización ya que está relacionado con los costos de producción y la eficiencia (Burhan et al., 2019). En este estudio, obtuvimos valores de rendimiento entre 70,12 y 78,01 %, como se muestra en la Tabla 7. Según Tontul & Topuz (2017) un secado por atomización exitoso debe tener un rendimiento del producto superior al 50%. El rendimiento se vio significativamente afectado ($p < 0,05$) por la temperatura de entrada (A) y el flujo de alimentación (B) (Tabla 8). No hubo

significancia estadística ($p > 0,05$) para la frecuencia del atomizador, ni para la interacción de factores y su efecto cuadrático. Según los coeficientes estimados (Tabla 8) el rendimiento tuvo relación positiva con la temperatura de entrada y relación negativa con el flujo de alimentación. El gráfico en 3D de la superficie de respuesta muestran también las relaciones entre factores y variables de respuesta (Figura 6).

En general, a una temperatura de entrada más alta, la evaporación del agua se produce más fácilmente debido a la mayor eficiencia de los procesos de transferencia de calor y masa entre las paredes de la cámara y los fluidos en movimiento, lo que resulta en un mayor rendimiento. Sin embargo, si la temperatura de entrada no es lo suficientemente alta, el agua no se vaporiza completamente, por lo que el polvo no está suficientemente seco y fácilmente se adhiere a la pared de la cámara de secado. Kha et al., (2014), Moser et al., (2019) y Roccia (2014) han realizado una observación similar en la microencapsulación de aceite de gac, aceite de butití y aceite de girasol, respectivamente.

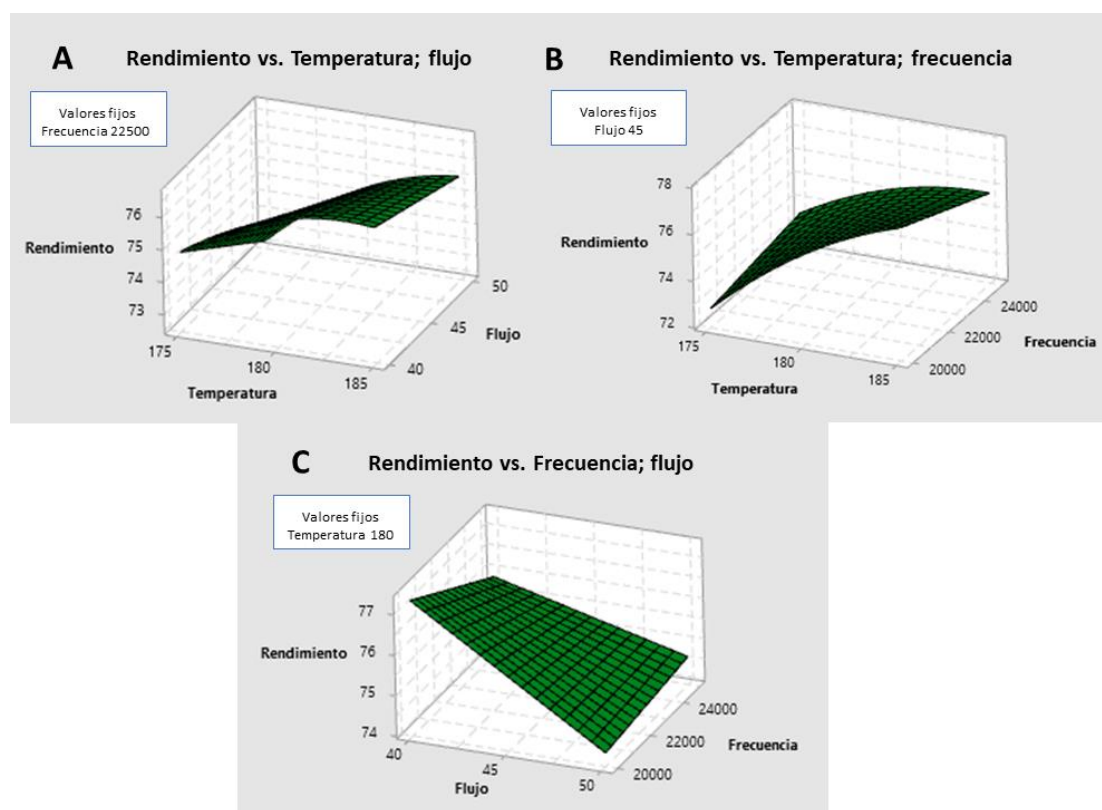
De igual forma, Roccia (2014) y Moser et al. (2019) tuvieron un resultado semejante en cuanto a la relación del flujo de alimentación con el rendimiento. A bajos flujos de alimentación, la carga de agua se evapora casi por completo, lo que disminuye la probabilidad de adhesión de las micropartículas a las paredes de la cámara y por tanto dan un mejor rendimiento. Por el contrario, el aumento del flujo de alimentación causa que la transferencia de calor y masa sea más lenta, provocando un secado incorrecto. Además, cuando se utilizan tasas de alimentación muy altas, puede haber goteo dentro de cámara principal porque la emulsión no se atomiza correctamente, lo que produce una reducción del rendimiento (Phisut et al., 2012).

En este estudio la frecuencia del atomizador no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo que difiere por lo expuesto por León-Martínez et al.

(2010), en donde el aumento de la velocidad de atomización resultó en un mayor rendimiento. El uso de una velocidad de atomización mayor da como resultado gotas más pequeñas con un área de superficie de secado más grande y un mejor intercambio de calor. Por el contrario, en gotas más grandes hay un mayor nivel de humedad que genera más cohesión entre las partículas que aumenta el producto pegado a la pared de la cámara de secado, y por consiguiente una reducción del rendimiento.

Figura 6

Superficie de respuesta para el rendimiento



En este trabajo solo se tuvo en cuenta el polvo recogido en el vaso colector, y no los polvos adheridos a las paredes de la cámara de secado o del ciclón. Esto debido a que el polvo acumulado en la pared de la cámara recibe más calor y podría tener propiedades diferentes, como el contenido de humedad,

el color y la solubilidad, por lo tanto, estos polvos no podrían considerarse como producto (Kha et al., 2014).

Optimización del proceso y verificación del modelo

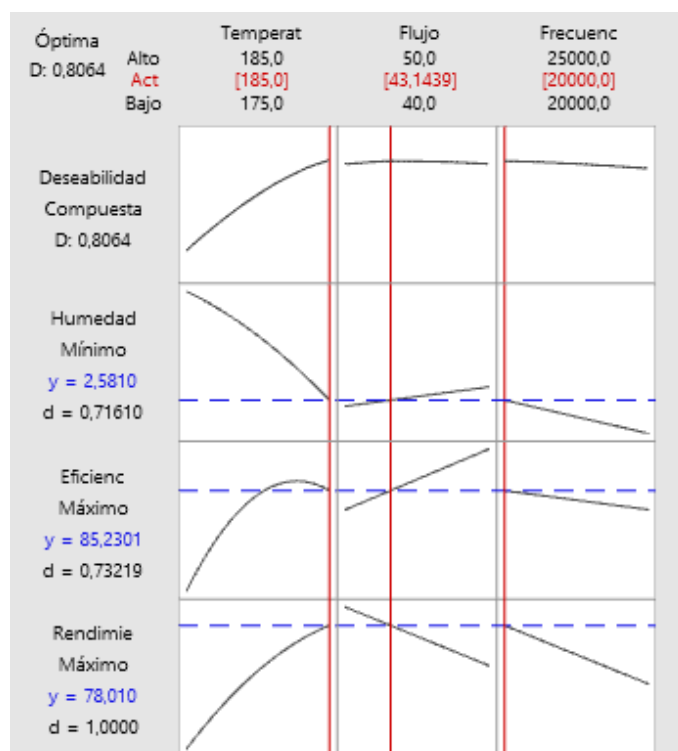
El objetivo de esta sección es hallar los parámetros óptimos del proceso de secado por atomización para obtener la máxima eficiencia de microencapsulación con un bajo contenido de humedad y un alto rendimiento. Se realizó la optimización gráfica utilizando perfiles de predicción después de limitar el objetivo de las respuestas, como maximizar la eficiencia de microencapsulación, minimizar el contenido de humedad y maximizar el rendimiento. Los perfiles de predicción (Figura 7) muestran que las condiciones óptimas de secado dentro del rango investigado para el microencapsulado, pueden determinarse moviendo las líneas rojas verticales a la izquierda o derecha. Las líneas de puntos azules horizontales indican los valores de las variables de respuesta alcanzados (Kha et al., 2014).

La deseabilidad compuesta (D: 0,806) evaluó que tan bien la configuración optimiza el conjunto de respuestas, es decir teniendo en cuenta los tres factores (Figura 7). Se consideró la optimización con la deseabilidad máxima de 0,806 ya que los valores de deseabilidad compuesta más cercanas a 1 indican que la configuración alcanza resultados favorables para todas las respuestas (Rahmer et al., 2019).

De acuerdo con la Figura 7, la condición óptima predicha se obtuvo como 185°C de temperatura de entrada, 43,14 mL/min de flujo de alimentación y 20000 rpm de frecuencia de atomizador. Esto también se puede observar en la Tabla 9.

Figura 7

Perfiles de predicción para la optimización de los parámetros de secado por atomización

**Tabla 9**

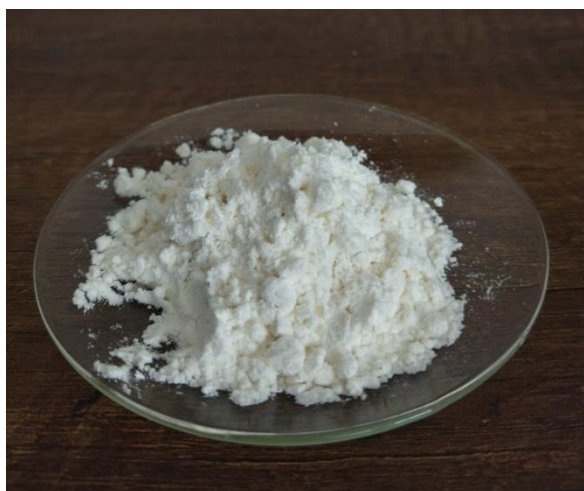
Restricciones y criterios de optimización del proceso de spray drying

Variables independientes	Rango	Valor óptimo
	experimental	obtenido
Temperatura de entrada (°C)	175-185	185
Flujo de alimentación (mL/min)	40-50	43,14
Frecuencia del atomizador (rpm)	20000-25000	20000

Para la verificación del modelo, se realizó un experimento bajo la condición óptima recomendada, la temperatura de entrada a 185°C, la frecuencia del atomizador a 20000 rpm, y con una ligera modificación en el flujo de alimentación de 43,14 mL/min a 44 mL/min. La Figura 8 muestra el polvo de grasa vegetal optimizado. Por su parte, en la Tabla 10 se tabulan los valores experimentales y predichos de la optimización.

Figura 8

Polvo de grasa vegetal de palma (Elaeis guineensis) optimizado.

**Tabla 10**

Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta en condiciones óptimas para el polvo de grasa vegetal secado por atomización

Variable de respuesta	Objetivo	Valores	
		Experimental	Predicho
Eficiencia (%)	Maximizar	85,83±0,24	85,23
Rendimiento (%)	Maximizar	78,69	78,01
Humedad (%)	Minimizar	2,31±0,07	2,58

Los valores experimentales obtenidos fueron cercanos a los valores predichos, lo que demuestra la precisión con la que el modelo de superficie de respuesta describe el proceso investigado.

Finalmente, el polvo optimizado cumplió en parte con la hipótesis planteada obteniendo un contenido de humedad menor al 5% y una eficiencia mayor al 80%, sin embargo, el rendimiento fue menor al 80% pero por poca diferencia y estuvo dentro de lo requerido por la parte interesada.

Análisis de las propiedades físicas del microencapsulado optimizado

Luego de obtener los parámetros óptimos del *Spray Dryer* se analizó las propiedades físicas del polvo como densidad aparente (DA), densidad empacada (DE), índice de compresibilidad de Carr (IC), relación de Hausner (RH), higroscopicidad (Tabla 11).

Tabla 11

Propiedades físicas del microencapsulado optimizado.

DA (g/cm³)	DE (g/cm³)	IC (%)	RH	Higroscopicidad (%)	Solubilidad (%)
0,416±0,00	0,476±0,00	12,6	1,14	18,37±1,28	78,45±3,4

Densidad aparente y densidad empacada

La medición de la densidad aparente y empacada es de uso fundamental por parte de la industria para ajustar las condiciones de almacenamiento, procesamiento, envasado y distribución (Bae & Lee, 2008). En este estudio, la densidad aparente y empacada del polvo optimizado fue de 0,416 g/cm³ y 0,476 g/cm³, respectivamente (Tabla 11). El valor de la densidad aparente se encuentra dentro del rango promedio para productos alimenticios en polvo que varían entre 0,3 y 0,8 g/cm³ (Erbay et al., 2015). Estos valores tienen similitud con los resultados de Tonon et al. (2011) que obtuvo densidades de 0,363-0,449 g/cm³ en la microencapsulación de aceite de linaza, sin embargo, la densidad obtenida en este estudio fue mayor a lo reportado por Lavanya (2019), Bae & Lee (2008) y Aghbashlo (2012) con densidades de 0,273-0,361, 0,253-0,277 y 0,248-0,373 g/cm³ en microencapsulados de aceite de chia, aceite de aguacate y aceite de pescado, respectivamente. En consecuencia, la densidad obtenida es suficientemente alta para evitar el exceso de aire ocluido dentro de las micropartículas, producto de la evaporación de la humedad durante el proceso de

secado, provocando la reducción de la degradación oxidativa de los ácidos grasos y, por consiguiente, el aumento de la estabilidad en el almacenamiento (Tonon et al., 2011).

Con respecto a relativa alta densidad aparente obtenida, Burhan et al. (2019) mencionan que este resultado se debe al aumento del contenido total de sólidos de la emulsión de alimentación (50% p/p), lo que aumentó el contenido de sólidos por partícula, lo que condujo a un aumento de la masa por unidad de volumen y, por lo tanto, un aumento de la densidad. Otro factor que afecta la densidad aparente de forma inversa, es la temperatura de entrada de aire puesto que a mayor temperatura la tasa de evaporación fue más rápida lo que da como resultado polvos como una estructura más porosa y por ende con un mayor volumen (Tonon et al., 2011).

Por otro lado, la densidad empacada fue de $0,476 \text{ g/cm}^3$, lo que es un poco menor a los valores obtenidos por Burhan et al. (2019) que fue de $0,5-0,6 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, el valor es suficientemente alto para un buen envasado en contenedores pequeños, lo que facilitaría el transporte y reduciría costos.

Índice de comprensibilidad de Carr y Relación de Hausner

La fluidez es un parámetro importante de calidad de los polvos alimenticios, el cual es medido por el índice de Carr (IC) y la relación de Hausner (RH); el primero mide la capacidad de reducir el volumen de un polvo golpeando suavemente, mientras que el segundo indica la cohesión de las partículas de polvo. En la industria, la fluidez afecta el llenado y vaciado de bolsas, la dosificación de cantidades específicas o la selección de parámetros óptimos para mezclar y acondicionar los polvos (Pugliese et al., 2017).

En este estudio, el IC y el RH son de 12,6% y 1,14, respectivamente (Tabla 11). Según la clasificación fluidez presentada en la Tabla 12, estos valores

corresponden a una “buena” fluidez del polvo microencapsulado. La “buena” fluidez se debe principalmente al alto contenido de sólidos en la emulsión que influyeron positivamente a la densidad aparente y empacada (Pugliese et al., 2017; Quispe-Condori et al., 2011).

Tabla 12

Especificación para el índice de compresibilidad de Carr y la relación de Hausner

Fluidez	Índice de Carr (%)	Relación de Hausner
Excelente	0-10	1,00-1,11
Bueno	11-15	1,12-1,18
Razonable	16-20	1,19-1,25
Pasable	21-25	1,26-1,34
Pobre	26-31	1,35-1,45
Muy pobre	32-37	1,46-1,49
Muy muy pobre	>38	>1,60

Tomado de Pugliese et al., (2017)

Higroscopicidad

La higroscopicidad se define como la capacidad de un alimento en polvo para absorber la humedad del medio ambiente. En general, se desea producir un polvo con baja higroscopicidad debido a que la alta higroscopicidad significa mayor tendencia a absorber agua y causar pegajosidad, lo que puede influir en el proceso de oxidación de lípidos y afectar la calidad del producto (Fernandes, y otros, 2013).

La higroscopicidad en este estudio fue de 18,37 (Tabla 11), lo que según Tontul & Topuz (2017) es categorizada como polvo de baja higroscopicidad, ya que es menor al 20%. Valores similares obtuvo Samsu et al. (2020) en la microencapsulación de leche de palma aceitera (10-30%), sin embargo, los resultados fueron muy superiores a lo obtenido por Botrelet al. (2014) con el aceite de pescado (4,9-5,9%).

La baja higroscopicidad del polvo se explica debido a la alta carga de grasa (50% p/p) que por su naturaleza hidrófoba no absorbe agua (De Barros et al., 2014); además la elevada concentración de maltodextrina (30% p/p) en el polvo final produjo una baja higroscopicidad ya que la maltodextrina tiene una baja absorción de agua en el tiempo (Moghaddam et al., 2017). Sin embargo, la alta temperatura de entrada del aire (185°C) pudo no haber ayudado a que la higroscopicidad sea aún menor, porque el aumento de la temperatura genera menor humedad, lo que se relaciona con una mayor gradiente de concentración de agua entre el producto y el aire circundante (Samsu et al., 2020).

Solubilidad

La solubilidad es el parámetro que muestra la capacidad de los polvos para formar una solución o suspensión en agua, y es el criterio más confiable para indicar el comportamiento del polvo en solución acuosa (Moghaddam, Pero, & Askari, 2017). En este trabajo, la solubilidad del microencapsulado optimizado fue de 78,45%. Según Tontul & Topuz (2017) la alta solubilidad obtenida en este estudio es muy deseable, especialmente porque el polvo obtenido se va a usar como aditivo en la producción de diferentes productos.

Por su parte, la alta concentración de maltodextrina (30% p/p) y su buena solubilidad, explican el buen resultado del polvo, a pesar que el material del núcleo es hidrófobo (Moghaddam, Pero, & Askari, 2017). Además, la alta temperatura de entrada empleada produjo un bajo contenido de humedad lo que condujo a una mayor solubilidad (Kha et al., 2014).

Por último, luego del análisis de todas las propiedades físicas del polvo optimizado se aceptó la hipótesis planteada, ya que se obtuvo un microencapsulado optimizado que cumplió con las especificaciones de calidad para polvos alimenticios.

Propiedades organolépticas

Las propiedades organolépticas (color, olor y sabor) del microencapsulado optimizado se describen a continuación (Tabla 13).

Tabla 13

Propiedades organolépticas del microencapsulado optimizado

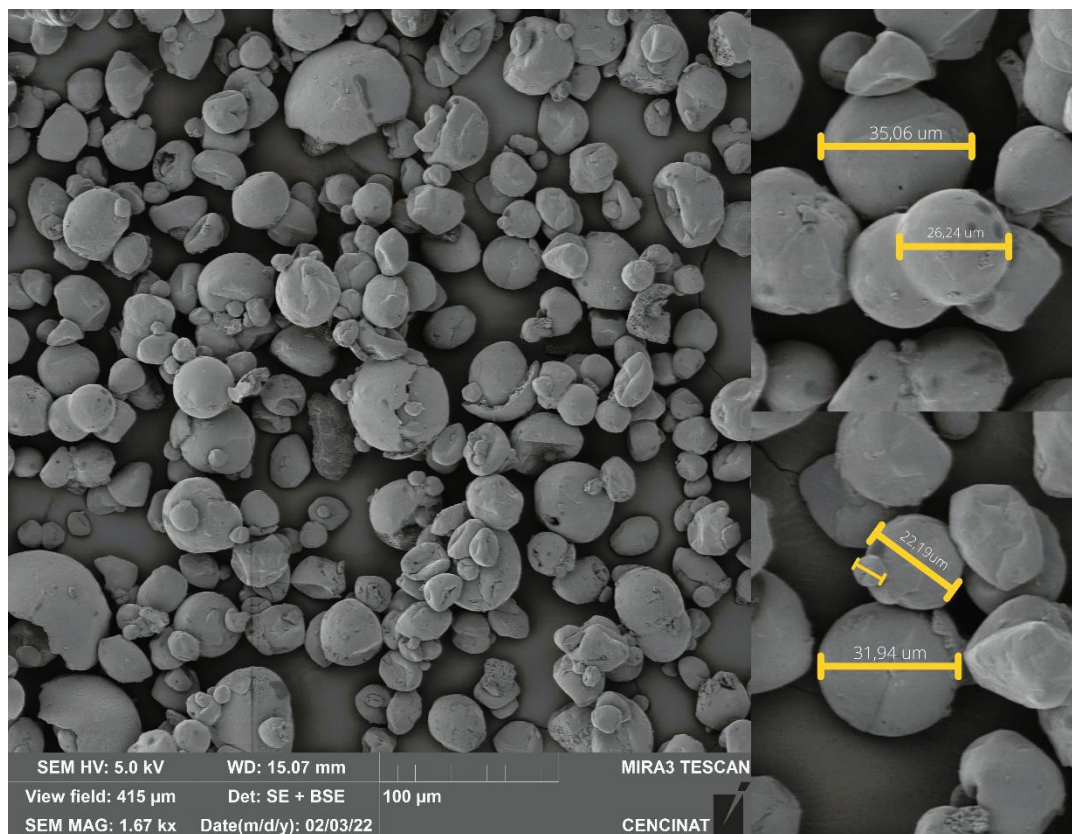
Propiedad organoléptica	Observación
Olor	Neutro
Color	Blanco crema
Sabor	Neutro, un poco lácteo

Caracterización morfológica de las microcápsulas optimizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB)

El tamaño de partícula es uno de los parámetros físicos más importantes de los polvos ya que afecta sus propiedades de manipulación, transporte y almacenamiento (Tontul & Topuz, 2017). Se realizó la medición de 60 micropartículas de las micrografías del polvo obtenido después de la optimización y se obtuvo partículas con una amplia gama de tamaños desde 8,51 μm hasta 46,78 μm (Figura 9). El valor promedio fue de $26,73 \pm 10,22 \mu\text{m}$, lo que tiene similitud con los resultados de Lavanya (2019) que obtuvieron tamaños de partícula entre 0,5 a 70 μm en la microencapsulación de aceite de pescado, y con Carneiro (2013) con tamaños de 17,98 a 23,03 μm en la microencapsulación de aceite de linaza. La amplia gama de tamaños de las micropartículas es una característica típica de los polvos secados por atomización y es beneficioso en el empaquetamiento del producto, ya que el espacio vacío entre las partículas grandes es llenado con partículas pequeñas, lo que da como resultado el aumento de la densidad aparente (Carneiro, 2013; Saifullah et al., 2016).

Figura 9

Micrografías MEB y tamaños de partícula del microencapsulado optimizado de grasa vegetal de palma obtenida por secado por atomización.



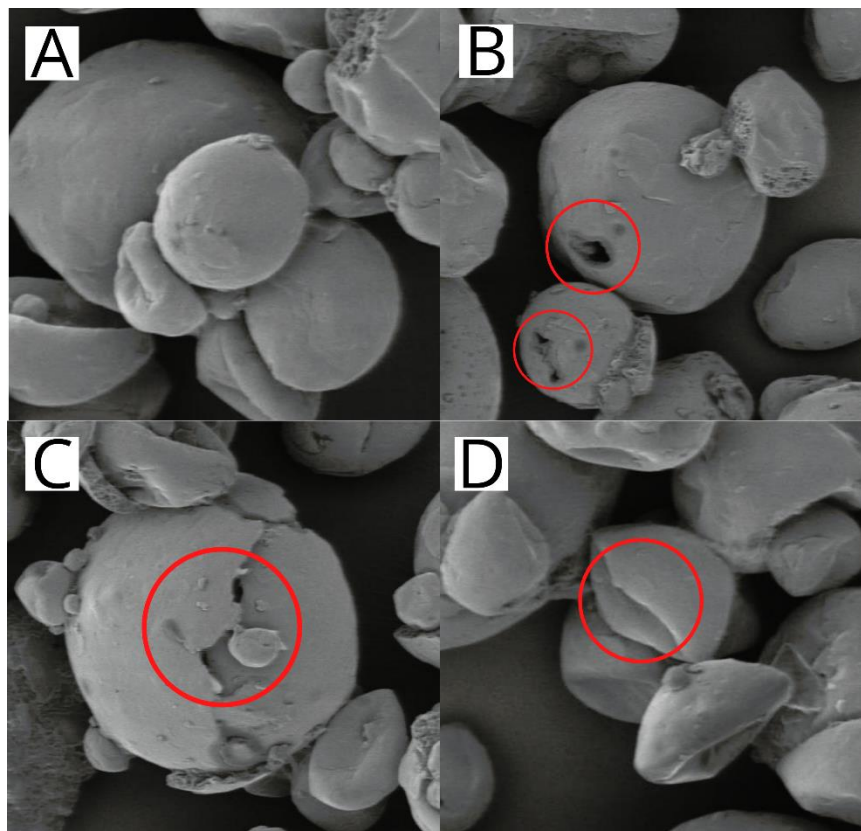
La mayoría de micropartículas presentaron forma esférica con una superficie externa lisa y sin fisuras o grietas visibles (Figura 10, A), lo cual se explica por la poca fragilidad del material de pared conformada por maltodextrina y caseinato de sodio (Lavanya, 2019). Esta morfología es importante para proporcionar una menor permeabilidad a los gases, una mejor protección y retención del núcleo, evitando que el aceite sufra reacciones de oxidación y que haya una liberación no deseada de gotitas a la superficie (Aghbashlo, 2012). Sin embargo, algunas micropartículas muestran orificios y pequeñas grietas en la superficie (Figura 10, B y 10, C) que podrían formarse durante el mismo proceso de secado por atomización (Bae & Lee, 2008), o debido al tiempo que transcurrió desde el secado por atomización hasta la observación en MEB (3 meses). La

poca presencia de orificios en la superficie de la microcápsula y la poca aglomeración se relacionó con la buena eficiencia de encapsulación obtenida en el estudio. Además, se observaron algunas partículas con superficies cóncavas y arrugadas (Figura 10, D), las cuales son típicas del proceso de secado por atomización (Roccia, 2014).

Figura 10

Micrografías MEB del microencapsulado optimizado de grasa vegetal de palma:

(A) Forma esférica y superficie lisa (B) Orificios en la superficie (C) Grietas en la superficie (D) Superficie cóncava y arrugadas.



CAPÍTULO V

Conclusiones

Se logró convertir con éxito la grasa vegetal de palma (*Elaeis guineensis*) en microcápsulas estables y fáciles de manipular mediante el método de secado por atomización.

La optimización de las condiciones del proceso de secado por atomización para la grasa vegetal de palma fue implementada efectivamente utilizando una metodología de superficie de respuesta. Se obtuvieron las condiciones óptimas de secado por atomización dentro de los rangos experimentales, como: temperatura de entrada del aire 185°C, flujo de alimentación 44 mL/min y frecuencia del atomizador 20000 rpm. Se realizó el experimento final con estas condiciones y se obtuvo un polvo con las siguientes características: eficiencia: 85,83%, humedad: 2,31%, rendimiento: 78,69%.

La temperatura de entrada de aire y el flujo de alimentación fueron los parámetros más importantes que afectaron significativamente ($p < 0,05$) las tres variables de respuesta, mientras que la frecuencia de atomización solo tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) en el contenido de humedad.

El bajo contenido de humedad (2,31%) y la buena eficiencia de microencapsulación (85,93%) del polvo optimizado cumplieron con las especificaciones de calidad del producto, que se traduce en un largo tiempo de almacenamiento sin la oxidación y sin la liberación no deseada de grasa.

El rendimiento de 78,69% obtenido del polvo optimizado estuvo dentro de los requerimientos por la parte interesada.

Las propiedades físicas del polvo optimizado, como la densidad aparente (0,416 g/cm³), índice de Carl (12,6%), relación de Hausner (1,14), higroscopicidad (18,37%) y solubilidad (78,45%), cumplieron con las especificaciones de calidad

para asegurar buenas condiciones de almacenamiento, procesamiento y envasado.

La amplia distribución de tamaño de partículas del microencapsulado optimizado ($26,73 \pm 10,22 \mu\text{m}$) comprueba la alta densidad aparente obtenida en los ensayos, lo cual es beneficioso en el empaquetamiento del producto.

La forma esférica y la superficie externa lisa y sin grietas de la mayoría de las micropartículas, aseguraron buena protección a la grasa vegetal de palma microencapsulada.

Recomendaciones

Mantener las temperaturas adecuadas en la preparación de la emulsión para evitar la oxidación de la grasa vegetal y la caramelización del caseinato o la maltodextrina.

Para el establecimiento del producto final se recomienda realizar estudios de almacenamiento de polvos de grasa vegetal para conocer su vida útil exacta.

Se deben realizar análisis microbiológicos y de actividad de agua del polvo con el fin de cumplir las especificaciones de calidad del producto.

Para mantener el producto en buen estado se debe guardar en envases herméticos e impermeables a la humedad.

Se debe lavar adecuadamente el *Spray Dryer* luego de cada pasada de producto para evitar contaminación cruzada.

El rendimiento del proceso se podría mejorar agregando dispositivos de recuperación de polvo y utilizando cantidades altas de emulsión.

Bibliografía

- Aghbashlo, M. M. (2012). Influence of Wall Material and Inlet Drying Air Temperature on the Microencapsulation of Fish Oil by Spray Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1561–1569. doi:doi:10.1007/s11947-012-0796-7
- Akoh, C. (1998). Fat replacers. *Food Techonology* , 47-52.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* . México : Pearson Educación .
- Bae, E., & Lee, S. (2008). Microencapsulation of avocado oil by Spray Drying using whey protein and maltodextrin. *Journal of Microencapsulation*, 25(8), 549-568. doi:https://doi.org/10.1080/02652040802075682
- Bailey, A. (2005). *Bailey's Industrial oil and Fat Products*. New York: Wiley Interscience.
- Banat, B., Jumah, R., & Hammad, S. (2002). Effect of operating parameters on the spray drying of tomato paste. *Engineering in Life Sciences*, 2(12), 403-407. doi:https://doi.org/10.1002/1618-2863(20021210)2:12<403::AID-ELSC403>3.0.CO;2-G
- Bhandari, B., Datta, N., & Howes, T. (1997). Problems associated with spray drying of sugar rich foods. *Drying Techonology*, 14, 671-684. doi:https://doi.org/10.1080/07373939708917253
- Bockisch, M. (1998). *Fats and Oils Handbook*. Hamburg: AOCS Press.
- Botrel, D. A., de Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., & Yoshida, M. I. (2014). Influence of wall matrix systems on the properties of spray-dried microparticles containing fish oil. *Food Research International*(62), 344–352. doi:10.1016/j.foodres.2014.02.003
- Bringas, M., Expósito, I., Reineccius, G., López, O., & Pino, J. (2011). Influence of Spray-Dryer air temperatures on encapsulated mandarin oil. *Drying Technology*, 29(5), 520-526. doi:https://doi.org/10.1080/07373937.2010.513780
- Burhan, A. M., Abdel-Hamid, S. M., Soliman, M. E., & Sasmour, O. A. (2019). Optimization of the Microencapsulation of Lavender Oil by Spray Drying.

Journal of Microencapsulation, 1–42.

doi:doi:10.1080/02652048.2019.1620355

- Calvo, P., Castaño, Á. L., Lozano, M., & González-Gómez, D. (2012). Microencapsulation of refined olive oil: influence of capsule wall components and the addition of antioxidant additives on the shelf life and chemical alteration. *Journal of the Science of food and agriculture*, 92(13), 2689-2695. doi:10.1002/jsfa.5689
- Cameron, D., Chilson, W., Elsesser, C., & Rudolf, W. (1959). *Estados Unidos Patente nº US2913342A*.
- Carneiro, H. C. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 443-451. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033
- Casanova, H., & Cardona, S. (2004). Emulsiones O/W estabilizadas con caseinato de sodio: Efecto de los iones de calcio, concentración de proteína y temperatura. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 13-19.
- Codex Alimentarius. (2014). Norma del Codex para las leches en polvo y la nata (crema) en polvo. *CODEX STAN 207-1999*, 1-5.
- Corley, R., & Tinker, P. (2016). *The Oil Palm*. New Jersey : Wiley Blackwell.
- Cortés, G. (1994). *Atlas Agropecuario de Costa Rica* . San José : EUNED .
- Cuaspud, M. (2015). Obtención de aceite de aguacate microencapsulado mediante secado por atomización. *Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional*.
- Dalmoro, A., Barba, A., & d'Amore, M. (2013). Analysis of size correlations for microdroplets produced by ultrasonic atomization. *The Scientific World Journal*. doi:https://doi.org/10.1155/2013/482910
- Dashiell, G. (1989). Lecithins: Sources, Manufacture, & Uses. *American Oil Chemists' Society*, 213-224.
- Daza, L., Fujita, A., Fávoro, C., Rodrigues, J., & Granato, D. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (Eugenia

- dysenterica DC.) fruit extracts. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 20-29. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.10.001>
- De Barros, R., Marques, G. R., Borges, S. V., & Botrel, D. A. (2014). Effect of solids content and oil load on the microencapsulation process of rosemary essential oil. *Industrial Crops and Products*, 58, 173–181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.025>
- De Martino, L., De Feo, V., & Nazzaro, F. (2009). Chemical composition and in vitro antimicrobial and mutagenic activities of seven Lamiaceae essential oils. *Molecules*, 14(10), 4213-4230. doi:<https://doi.org/10.3390/molecules14104213>
- Desai, K., & Park, H. (2012). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*, 23(7), 1361-1394. doi:<https://doi.org/10.1081/DRT-200063478>
- Dickinson, E. (1992). An Introduction to Foods Colloids. *Oxford University Press*, 36(5), 140-173. doi:<https://doi.org/10.1002/food.19920360540>
- Dziezak, J. (1988). Microencapsulation and encapsulated ingredients. *Food Technology*, 2(4), 136-151.
- Edem, D. (2002). Palm oil: biochemical, physiological, nutritional, hematological, and toxicological aspects: a review. *Plant Foods Human Nutrition*, 57, 319-341. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1021828132707>
- Erbay, Z., Koca, N., Kaymak-Ertekin, F., & Ucuncu, M. (2015). Optimization of spray drying process in cheese powder production. *Food and Bioproducts Processing*, 93, 156–165. doi:[doi:10.1016/j.fbp.2013.12.008](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.12.008)
- Estevinho, B., Rocha, F., Santos, L., & Alves, A. (2013). Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications- A review. *Trends in Food Science and Technology*, 31(2), 138-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.04.001>
- Fang, X., Shima, M., & Adachi, S. (2005). Effects of Drying Conditions on the Oxidation of Linoleic Acid Encapsulated with Gum Arabic by Spray-drying. *Food Science and Technology Research*, 11(4), 380–384. doi:[doi:10.3136/fstr.11.380](https://doi.org/10.3136/fstr.11.380)
- FAO. (1997). *Grasas y aceites en la nutrición humana*. Roma: Organización de las Naciones Unidas.

- FAO. (2000). *La utilización de extensores cárnicos*. La Habana : Organización de las Naciones Unidas .
- Faridi, H. (1994). *Technology of cookie and cracker production* . New York : Chapman and Hall.
- Fernandes, R. V., Borges, S. V., Botrel, D. A., Silva, E. K., Costa, J. M., & Queiroz, F. (2013). Microencapsulation of Rosemary Essential Oil: Characterization of Particles. *Drying Technology*, 31(11), 1245–1254. doi:doi:10.1080/07373937.2013.7854
- Gallardo, G., Guida, L., Martinez, V., López, M. C., Bernhardt, D., Blasco, R., & Hermida, L. G. (2013). Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application. *Food Research International*, 52(2), 473–482. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.020
- Gallo, L., Llabot, J., Allemandi, D., Bucalá, V., & Piña, J. (2011). Influence of spray-drying operating conditions on Rhamnus purshiana (Cáscara sagrada) extract powder physical properties. *Powder Technology*, 208(1), 205-214. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.12.021
- Gesteiro, E., Galera, J., & González, M. (2020). Aceite de palma y salud cardiovascular: consideraciones para valorar la literatura. *Nutrición Hospitalaria*, 35(5), 1229-1242. doi:https://dx.doi.org/10.20960/nh.1970.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004
- Ghosh, S. (2006). *Functional Coatings*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag .
- Gottenbosy, J., & Vles, R. (1985). Valor nutritivo del aceite de palma. *Palmas*, 11-15.
- Goula, A., Adamopoulos, K., & Kazakis, N. (2004). Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. *Drying Technology*, 22(5), 1129-1151. doi:10.1081/DRT-120038584
- Guevara, B., & Quispe, B. (2019). Optimización del proceso de microencapsulación de aceite de palta obtenido por CO2 supercrítico. *Repositorio Institucional- Universidad Nacional del Centro del Perú*.

- Hammami, C., & René, F. (1997). Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *Journal of Food Engineering*, 32(2), 133-155. doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00023-X)
- Hee, Y., Tan, C., Rahman, A., Adzaham, N., Lai, W., & Chong, G. (2015). Influence of Different Wall Materials on the Microencapsulation of Virgin Coconut Oil by Spray Drying. *Int. J. Food Eng*, 11(1), 61-69. doi:10.1515/ijfe-2014-0215
- Ishwarya, P. (2015). Spray Drying Technique for Food Ingredient Encapsulation. *Food Science and Technology*, 403-420. doi:10.1002/9781118863985
- Jafari, S., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation Efficiency of Food Flavours and Oils during Spray Drying. *Drying Technology*, 26(7), 816-835. doi:<https://doi.org/10.1080/07373930802135972>
- Kenyon, M. (1995). Modified Starch, Maltodextrin and Corn Syrup Solids as Wall Materials for Food Encapsulation. *ACS Symposium Series*, 42-50. doi:10.1021/bk-1995-0590.ch004
- Kha, T. C., Nguyen, M. H., Roach, P. D., & Stathopoulos, C. E. (2014). Microencapsulation of Gac oil: Optimisation of spray drying conditions using response surface methodology. *Powder Technology*(264), 298–309. doi:10.1016/j.powtec.2014.05.053
- Lavanya, M. N. (2019). Influence of spray-drying conditions on microencapsulation of fish oil and chia oil. *Drying Technology*, 1-14. doi:10.1080/07373937.2018.1553181
- León, F., Méndez, L., & Rodríguez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 864-870. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.061>
- León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization . *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 864–870. doi:10.1016/j.carbpol.2010.03.061
- López, O. (2010). Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión . *Revista Cubana de Farmacia* , 383-384.

- Maury, M., Murphy, K., Sandeep, K., Shi, L., & Lee. (2005). Effects of process variables on the powder yield of spray-dried trehalose on a laboratory spray-dryer. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 59(3), 565-573. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2004.10.002>
- Medina, L. (2013). Obtención de maltodextrinas por vía enzimática a partir de almidón de camote. *Instituto Politécnico Nacional Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral*.
- Miller, D., Ellenberger, D., & Gil. (2016). Spray-Drying Technology. *Advances in the Pharmaceutical Sciences Series*, 437-525. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_10
- Moghaddam, A. D., Pero, M., & Askari, G. R. (2017). Optimizing spray drying conditions of sour cherry juice based on physicochemical properties, using response surface methodology (RSM). *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 174–184. doi:<https://doi.org/10.1007/s13197-016-2449-8>
- Mohammadi, R., Mortazavian, A., Khosrokhavar, R. G., & A. (2011). Probiotic ice cream: viability of probiotic bacteria and sensory properties. *Ann Microbiology*, 61, 411-424. doi:<https://doi.org/10.1007/s13213-010-0188-z>
- Montgomery, D. (2016). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa.
- Moser, P., Ferreira, S., & Nicoletti, V. R. (2019). Buriti oil microencapsulation in chickpea protein/pectin matrix as affected by spray drying parameters. *Food and Bioproducts Processing*, 183-193. doi:[doi:10.1016/j.fbp.2019.07.009](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.009)
- Muñoz, J., & Alfaro, M. (2007). Avances en la formulación de emulsiones. *Universidad de Sevilla*, 58(1), 64-73.
- Nazzaro, F., Orlando, P., Fratianni, F., & Coppola, R. (2012). Microencapsulation in food science and biotechnology. *Opinion in Biotechnology*, 23(2), 182-186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.10.001>
- Noboa, C., & Herrera, B. (2015). Desarrollo del proceso de obtención del caseinato de sodio para uso industrial. *Repositorio Institucional-Universidad de Guayaquil*.
- O'Brien, C., Chapman, D., Neville, D., Keogh, M., & Arendt, E. (2003). Effect of varying the microencapsulation process on the functionality of

hydrogenated vegetable fat in shortdough biscuits. *Food Research International*, 36(3), 215-221. doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(02\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(02)00139-4)

Oi-Ming, L., & Chin-Ping, T. (2015). *Palm Oil*. Elsevier.

Orozco, J., & Rivadeneira, V. (2019). Propuesta de Estrategia de Diversificación para el Grupo Industrial DANEC S.A. *Repositorio Institucional - Universidad San Francisco de Quito*.

Pande, G., Akoh, C., & Lai, O. (2012). Food Uses of Palm Oil and Its Components. *Palm Oil*, 561-586. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50022-8>

Parra, R. (2010). Revisión: Microencapsulación de alimentos. *Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*, 63(2), 5669-5684.

Pastuña, A., & López, O. (2016). Microencapsulación de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) mediante secado por aspersión. *Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato*.

Patel, R., Patel, M., & Suthar, A. (2009). Spray Drying technology: an overview. *Indian Journal of Science and Technology*, 2(10), 44-47. doi:10.1.1.972.1186

Paulo, F., & Santos, L. (2017). Design of experiments for microencapsulation applications: A review. *Materials Science and Engineering*, 77, 1327–1340. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.219>

Phisut, V., Chauhan, A., & Singh, R. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: Some factors influencing the properties of product. *International Food Research Journal*, 19(4), 1297-1306.

Potter, L. (2011). La industria del aceite de palma en Ecuador: ¿un buen negocio para los pequeños agricultores? *EUTOPIA*(2), 39-54. doi:<https://doi.org/10.17141/eutopia.2.2010.1028>

Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M., Carini, E., & Mucchetti, G. (2017). Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *Journal of Food Science and Technology*, 54(11), 3433–3442. doi:doi:10.1007/s13197-017-2795-1

- Quispe-Condori, S., Saldaña, M. D., & Temelli, F. . (2011). Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying. *LWT - Food Science and Technology*, *44*(9), 1880–1887. doi:doi:10.1016/j.lwt.2011.01.005
- Rahmer, B., Garzón, H., & Solana, J. (2019). Uso de la función de deseabilidad para la optimización de un proceso de producción de poliestireno. *Revista de Ingeniería Industrial*(1), 27-42.
doi:https://doi.org/10.22320/S07179103/2019.02
- Rincón, S., & Martínez, D. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *PALMAS*.
- Roccia, P. M. (2014). Influence of spray-drying operating conditions on sunflower oil powder qualities. *Powder Technology*(254), 307–313.
doi:doi:10.1016/j.powtec.2014.01.044
- Rodrigues, P., Lopes, P., & Costa, L. (2018). Microencapsulation and Its Uses in Food Science and Technology: A Review. *Microencapsulation - Processes, Technologies and Industrial Applications*. doi:10.5772/intechopen.81997
- Rosenberg, M., & Sheu, T. (1996). Microencapsulation of volatiles by spray-drying in whey protein-based wall systems. *International Dairy Journal*, *6*(3), 273-284. doi:https://doi.org/10.1016/0958-6946(95)00020-8
- Samsu, Z., Asyiqin, & Mohamad Zahir, A. Z. (2020). Production of oil palm milk powder by spray drying technique. *Materials Today: Proceedings*.
doi:10.1016/j.matpr.2020.06.015
- Sánchez. (2012). Análisis de rentabilidad de un cultivo de palma africana híbrida (OxG) en la provincia de Orellana. *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*.
- Sánchez, A., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (2018). Sector Aceites y Grasas del Ecuador . *Observatorio Económico y Social de Tungurahua - Universidad Técnica de Ambato*, 1-4.
- Santos, A., Vilela, S., Ferreira, N., Vaz, H., Pascoli, M., & Regina, E. (2009). Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato. *Food Science and Techonology*, *29*(2), 291-294.
doi:https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000200008

- SCRLA. (2015). Actualización acalificación de riesgo del cuarto programa de emisión de papel comercial. *Sociedad Calificadora de Riesgo Latinoamericana*.
- Shahidi, F., & Han, X. (1993). Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(6), 501-547.
doi:10.1080/10408399309527645
- Shishir, M., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 49-67. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006
- Solís, M., & López, O. (2018). "Extracción y microencapsulación de aceite de linaza (*linum usitatissimum*) para la adición en una matriz alimenticia. *Repositorio de la Universidad Técnica de Ambato* .
- Sue, T. (2009). *Pocketbook of palm oil uses*. Kuala Lumpur: Malaysian Palm Oil Board.
- Tashiro, Y., Baba, H., Obatake, K., Sakka, H., & Sohara, I. (1989). *Estados Unidos Patente nº US4855157A*.
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88(3), 411–418. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029
- Tonon, R. V., Grosso, C. R., & Hubinger, M. D. (2011). Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying. *Food Research International*, 44(1), 282–289. doi:doi:10.1016/j.foodres.2010.10.018
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*(63), 91–102.
doi:doi:10.1016/j.tifs.2017.03.009
- Tze, N., Han, C., Yusof, Y., & Ling, C. (2012). Physicochemical and nutritional properties of spray-dried pitaya fruit powder as natural colorant. *Food Science and Biotechnology*, 21, 675-682.
doi:https://doi.org/10.1007/s10068-012-0088-z

- Valenzuela, A., & Morgado, N. (2005). LAS GRASAS Y ACEITES EN LA NUTRICION HUMANA: ALGO DE SU HISTORIA. *Revista Chilena de Nutrición*, 32(2). doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182005000200002>
- Wehrle, K., Gallagher, E., Neville, D., Keogh, M., & Arendt, E. (1999). Microencapsulated high-fat powders in biscuit production. *Z Lebensm Unters Forsch A*, 208, 388-393. doi:<https://doi.org/10.1007/s002170050435>
- Woo, M., & Bhandari, B. (2013). Spray Drying for food powder production. *Handbook of Food Powders*, 29-56. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.29>
- Yepes, V. (2019). ¿Qué es la metodología de la superficie de respuesta? *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Young, N. (2014). Emulsifiers and stabilisers. *Fats in Food Technology*, 253-287. doi:[10.1002/9781118788745](https://doi.org/10.1002/9781118788745)