

Diseño teórico y estructuración de un esparcible tipo margarina a partir de aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) mediante fraccionamiento físico: una alternativa nutricionalmente superior

Theoretical design and structuring of a margarine-type spread from sachá inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.) by physical fractionation: A nutritionally superior alternative

Gómez Cardenas, E. F. y Hoyos Leyva, J. D.*

Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial - GINNA, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2021 / Fecha de aceptación: julio de 2021

Resumen

El aceite de sachá inchi, ampliamente distribuido en regiones amazónicas de Sudamérica, ha experimentado un crecimiento sostenido debido a su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, particularmente omega-3 y omega-6, asociados con beneficios para la salud humana. No obstante, su consumo permanece limitado por su presentación tradicional en forma líquida. En este estudio se diseñó teóricamente un proceso para la obtención de un producto esparcible a partir de aceite de sachá inchi, con el objetivo de diversificar sus formas de consumo y aumentar su valor agregado.

Se analizaron las propiedades fisicoquímicas del aceite proveniente de la variedad Catio-2, así como las alternativas tecnológicas disponibles para su estructuración sin comprometer su perfil lipídico. El fraccionamiento fue identificado como el método más viable para la adecuación de grasas, al permitir la conservación de ácidos grasos esenciales y compuestos bioactivos mediante procesos físicos que no inducen modificaciones químicas significativas. A partir de una revisión sistemática de literatura, se estableció una formulación base y las operaciones unitarias necesarias para la producción de una margarina untable.

El diseño incluyó un balance de masa que evidenció que, por cada 1000 g de aceite de sachá inchi procesado, se obtienen aproximadamente 126 g de producto final, bajo condiciones

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

específicas de formulación. Asimismo, se desarrolló un diagrama de operaciones que integra los equipos y condiciones requeridas para su producción. Los resultados sugieren la viabilidad tecnológica de transformar este aceite en un sistema semisólido con propiedades nutricionales destacadas, capaz de competir frente a productos comerciales convencionales.

Palabras clave: alimentos funcionales, fraccionamiento de grasas, diseño de procesos, estructuración lipídica.

Abstract

Sacha inchi oil, widely distributed across Amazonian regions of South America, has experienced sustained growth due to its high content of polyunsaturated fatty acids, particularly omega-3 and omega-6, which are associated with beneficial effects on human health. However, its consumption remains limited by its conventional liquid presentation. In this study, a process for producing a spreadable product from sachu inchi oil was theoretically designed, aiming to diversify its forms of consumption and increase its added value.

The physicochemical properties of the oil obtained from the Catio-2 variety were analyzed, along with available technological alternatives for lipid structuring without compromising its fatty acid profile. Fractionation was identified as the most suitable method for fat modification, as it preserves essential fatty acids and bioactive compounds through physical processes that do not induce significant chemical changes. Based on a systematic literature review, a base formulation and the required unit operations for producing a spreadable margarine were established.

The design included a mass balance showing that, for every 1000 g of sachu inchi oil processed, approximately 126 g of final product can be obtained under specific formulation conditions. Additionally, a process flow diagram was developed, integrating the equipment and operational conditions required for production. The findings suggest the technological feasibility of transforming this oil into a semisolid system with enhanced nutritional properties, capable of competing with conventional commercial products.

Keywords: Functional foods, fat fractionation, process design, lipid structuring.

Introducción

El aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.), originario de la región amazónica de Sudamérica, ha despertado un creciente interés en la ciencia y tecnología de alimentos debido a su excepcional perfil nutricional, caracterizado por un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente omega-3 y omega-6 (Wang *et al.*, 2018). Este aceite presenta proporciones elevadas de ácido α -linolénico (omega-3), linoleico (omega-6) y, en menor medida, oleico (omega-9) (Muangrat *et al.*, 2018), lo que le confiere propiedades funcionales asociadas con la prevención de enfermedades cardiovasculares, la modulación de procesos inflamatorios y el adecuado desarrollo neurológico (Valenzuela *et al.*, 2011; Saavedra *et al.*, 2012). Asimismo, la semilla de sachá inchi contiene entre el 28 y el 33 % de proteína, con una composición relevante de aminoácidos esenciales, así como compuestos bioactivos como tocoferoles y tocotrienoles, que potencian su valor nutracéutico (Singanusong y Jiamyangyuen, 2020).

Apesar de estas ventajas, el aprovechamiento agroindustrial del aceite de sachá inchi continúa siendo limitado, concentrándose principalmente en su comercialización en estado líquido. Esta restricción reduce su versatilidad tecnológica y limita su incorporación en matrices alimentarias de mayor valor agregado. En este contexto, la estructuración lipídica emerge como una estrategia clave para transformar aceites líquidos en sistemas semisólidos, tales como productos esparcibles, sin comprometer la integridad de sus componentes funcionales (Mattice *et al.*, 2020).

La producción de margarinas y esparcibles ha dependido tradicionalmente de procesos como la hidrogenación, asociados con la formación de ácidos grasos trans y con efectos adversos para la salud (Shukla, 2019). Alternativamente, técnicas como el fraccionamiento físico permiten modificar las propiedades reológicas y estructurales de los aceites manteniendo su perfil lipídico original, evitando pérdidas significativas de compuestos esenciales (Guo *et al.*, 2020). Este enfoque resulta particularmente relevante para el desarrollo de alimentos funcionales más saludables y alineados con las tendencias actuales del consumidor.

En Colombia, el mercado de productos esparcibles muestra una creciente demanda de alternativas más saludables; sin embargo, la oferta basada en materias primas no convencionales, como el aceite de sachá inchi, es aún incipiente (Benitez *et al.*, 2018). En este sentido, el presente estudio plantea el diseño teórico de un proceso para la obtención de un producto esparcible a partir de aceite de sachá inchi, integrando criterios fisicoquímicos, tecnológicos y normativos, con el fin de ampliar sus aplicaciones y fortalecer su posicionamiento en la cadena agroindustrial.

Materiales y métodos

El diseño del proceso productivo para la obtención de un esparcible de mesa a partir de aceite de sachá inchi se desarrolló mediante una investigación de carácter teórico-descriptivo, basada en una revisión sistemática de literatura científica y técnica.

Esta aproximación permitió estructurar las etapas del proceso, la formulación del producto y la selección de variables operacionales, en coherencia con los objetivos planteados.

Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Inicialmente, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de la nuez y del aceite de sachá inchi, con énfasis en su composición lipídica y en el contenido de ácidos grasos esenciales. Se compararon tres variedades de semilla, priorizando aquella con mayor rendimiento en aceite y mayor concentración de compuestos bioactivos. Asimismo, se evaluó el impacto del proceso de extracción mediante prensado en frío sobre la estabilidad y conservación de los ácidos grasos, con el fin de garantizar la calidad nutricional de la materia prima seleccionada.

Adecuación de grasas

La estructuración del aceite se abordó mediante un análisis comparativo de los principales métodos de modificación de grasas utilizados en la industria (hidrogenación, interesterificación y fraccionamiento). Se seleccionó el fraccionamiento físico como alternativa tecnológica, debido a su capacidad para preservar la integridad de los ácidos grasos insaturados y evitar la formación de compuestos indeseables, como los ácidos grasos trans.

Este proceso permitió obtener fracciones diferenciadas (oleína y estearina) con propiedades funcionales adecuadas para la formulación del producto.

Formulación y balance de masa

La formulación del esparcible se estableció a partir de la revisión de modelos reportados en la literatura, considerando la interacción entre la fase grasa y la fase acuosa, así como el uso de emulsificantes, conservantes y antioxidantes. Se realizó un balance de masa tomando como base 1000 g de aceite de sachá inchi como flujo de entrada.

Tras el proceso de fraccionamiento, se obtuvieron 61,9 g de estearina y 41,26 g de oleína, constituyendo la fase grasa (103,17 g). Posteriormente, se incorporaron aditivos en proporciones controladas, incluyendo vitamina D (0,018 g) y antioxidantes (0,001 g).

La fase acuosa se formuló mediante la adición de agua, sal (20 %), lecitina (2 %) y benzoato de sodio (0,1 %), obteniendo un flujo de 22,80 g. La integración de ambas fases dio lugar a un flujo total de 126 g de producto final. Para efectos del diseño teórico, se asumió un sistema sin pérdidas.

Variables de proceso y selección de equipos

Se identificaron variables críticas del proceso, incluyendo temperatura, pH, contenido de grasa sólida y condiciones de emulsificación, las cuales influyen directamente en la estabilidad, la textura y la calidad sensorial del producto. Asimismo, se definieron las operaciones unitarias necesarias, tales como mezcla, homogeneización, enfriamiento y cristalización controlada, junto con los equipos requeridos para su implementación a escala industrial.

Consideraciones normativas

El diseño del producto se ajustó a los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 241 (ICONTEC, 2002), la cual regula la composición, las propiedades fisicoquímicas y el uso de aditivos en margarinas y esparcibles de mesa. Se verificó que la formulación propuesta cumpliera con los requisitos de contenido graso, humedad, aditivos permitidos y calidad bromatológica, garantizando su viabilidad para una eventual aplicación comercial.

Resultados y discusiones

La investigación permitió determinar las características fisicoquímicas y nutricionales del aceite de sachá inchi, así como las variables clave del proceso y las operaciones unitarias necesarias para la obtención de un producto esparcible de mesa.

Características fisicoquímicas de aceite de sachá inchi

La caracterización fisicoquímica del aceite de sachá inchi constituye un elemento fundamental para evaluar su viabilidad como materia prima en la formulación de esparcibles de mesa con valor agregado nutricional. Los resultados evidencian que este aceite presenta un perfil lipídico altamente insaturado, con aproximadamente un 93 % de ácidos grasos insaturados (Nguyen et al., 2020), lo que lo posiciona como una de las fuentes vegetales más ricas en este tipo de compuestos (Wang et al., 2018).

En particular, se destaca la presencia de ácidos grasos esenciales, incluyendo ácido linoleico (-6) y ácido -linolénico (-3), los cuales, en conjunto con el ácido oleico (-9), representan cerca del 84 % de la composición total del aceite (Tabla 1).

Tabla 1. Composición del aceite de sachá inchi.

Información nutricional por 100 g de aceite	
Vitamina A	350 - 690 µg
Vitamina E	17 - 226 mg
Palmítico C 16:0	3,0 - 6,0 %
Esteárico C 18:0	2,0 - 3,5 %
Oleico C 18:1	8,0 - 12,0 %
Linoleico (omega 6) C 18:2	32,0 - 38,0 %
Linolénico (omega 3) C 18:3	42,0 - 52,0 %
Total ácidos grasos saturados	6,0 - 8,0 %
Total ácidos grasos insaturados	92,0 - 94,0 %

Fuente. Elaboración propia.

Este perfil lipídico no solo es relevante desde el punto de vista nutricional, sino que también influye directamente en las propiedades funcionales del aceite, tales como su comportamiento reológico, su susceptibilidad a la oxidación y su capacidad de estructuración en sistemas emulsificados (Hashempour-Baltork *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020). Adicionalmente, el aceite de sachá inchi contiene compuestos bioactivos de interés, incluyendo proteínas residuales, aminoácidos y una fracción significativa de vitamina E en forma de tocoferoles y tocotrienoles, los cuales contribuyen a su estabilidad oxidativa y a su potencial funcional en sistemas alimentarios (Singanusong y Jiamyangyuen, 2020).

Comparativamente, frente a otras semillas oleaginosas de uso convencional en la industria margarina, el sachá inchi presenta un contenido significativamente mayor de ácidos grasos insaturados y esenciales (Bobo *et al.*, 2021), lo que lo convierte en una alternativa prometedora para el desarrollo de productos más saludables. Esta ventaja nutricional, sin embargo, implica desafíos tecnológicos asociados con la estabilidad oxidativa y estructural del producto final, los cuales deben ser abordados mediante un diseño adecuado del proceso.

Producción de margarina con aceite de sachá inchi

Proceso de modificación de grasas (fase grasa)

Para la incorporación del aceite de sachá inchi como materia prima en margarinas esparsibles, resulta indispensable la

adecuación de sus propiedades mediante procesos de modificación de grasas, con el fin de alcanzar las características reológicas y estructurales requeridas para este tipo de sistemas. De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 241 (2002), estos productos deben presentar un contenido graso igual o superior al 80 %, lo que hace crítico el control del contenido de grasa sólida dentro de la formulación.

En la industria de producción de margarina, la modificación lipídica se ha realizado tradicionalmente mediante hidrogenación, interesterificación o combinaciones de ambos procesos (Shukla, 2019). No obstante, la hidrogenación induce cambios estructurales en los ácidos grasos, particularmente mediante la isomerización de configuraciones *cis* a *trans*, afectando compuestos esenciales como el ácido linolénico y generando implicaciones negativas para la salud, como alteraciones en los niveles de colesterol (Zhao *et al.*, 2018). Por su parte, la interesterificación, aunque permite redistribuir los ácidos grasos en los triacilglicéridos, puede inducir reacciones secundarias como descomposición o polimerización, comprometiendo la estabilidad del sistema (Sivakanthan y Madhujith, 2020).

En contraste, el fraccionamiento físico se establece como una alternativa tecnológica más adecuada, al permitir la separación de fracciones lipídicas sin alterar químicamente su estructura (Timms, 2018). En particular, el fraccionamiento en seco se basa en un tratamiento termo-mecánico mediante filtración a presión en prensas de membrana, operando en condiciones adiabáticas y sin el uso de catalizadores (Ashfaq *et al.*, 2020).

Durante este proceso, la oleína se separa progresivamente de la estearina, preservando la integridad de los ácidos grasos y minimizando los fenómenos de oxidación (Tong *et al.*, 2021).

A partir de la composición del aceite de sachá inchi, la fracción líquida (oleína) representa aproximadamente el 93,69 %, rica en ácidos grasos insaturados (ω -3, ω -6 y ω -9), mientras que la fracción sólida (estearina) corresponde al 6,19 %, compuesta principalmente por ácidos grasos saturados.

Estas proporciones constituyen la base para el diseño de la fase grasa.

Con base en la evidencia reportada, se definió una relación de 40 % de fase sólida (estearina) y 60 % de fase líquida (oleína), lo que permite alcanzar un equilibrio adecuado entre estabilidad estructural, viscosidad y capacidad de dispersión (Tabla 2).

En el presente estudio, considerando las condiciones climáticas de Bogotá (~19 °C), se espera una mayor estabilidad del sistema.

Tabla 2. Cantidades de ingredientes para la fase grasa.

Contenido en fase grasa	
Ingrediente	Cantidad
Estearina de sachá inchi	40 g grasa/100 g margarina
Oleína de sachá inchi	60 g aceite/100 g margarina
Vitamina D (ergocalciferol)	17 mg por cada 100 g de margarina
Antioxidante (ácido ascórbico)	10 mg/kg margarina

Fuente. Elaboración propia.

La adición de vitamina D se estableció con base en rangos reportados para margarinas comerciales (10–17 mg/100 g), seleccionando el valor superior con el fin de potenciar el perfil nutricional del producto.

Asimismo, la incorporación de ácido ascórbico como antioxidante responde a la necesidad de proteger los ácidos grasos insaturados frente a procesos de oxidación, los cuales pueden afectar negativamente los atributos sensoriales y la calidad nutricional del producto (Osuna *et al.*, 2018).

Fase acuosa

En paralelo, la fase acuosa se prepara en un sistema independiente de la fase grasa, conformado por diferentes corrientes de alimentación: un tanque de agua y salmuera, un tanque de emulsificantes y conservantes y una fracción de aditivos hidrosolubles. El agua utilizada debe cumplir con estándares de potabilidad, estar libre de microorganismos y presentar baja dureza, a fin de evitar interferencias en la estabilidad de la emulsión.

Este sistema suele incorporar mecanismos de calentamiento que facilitan la disolución de componentes minoritarios y previenen fenómenos de precristalización durante la premezcla con la fase grasa. Cambios amplios de temperatura pueden inducir heterogeneidad y una deficiente interacción entre fases, afectando negativamente la estructura final del producto (Gutiérrez y Vásquez, 2016).

El primer tanque de alimentación de la fase acuosa está constituido por una mezcla de 75 % de agua y 25 % de sal, a partir de la cual se obtiene una salmuera que se dosifica en un 20 % respecto al peso total del sistema. Esta solución debe presentar características fisicoquímicas adecuadas: ausencia de contaminantes de origen biológico, orgánico o inorgánico, así como propiedades sensoriales aceptables (incolora, inodora y de sabor agradable). La sal cumple una doble función tecnológica: actúa como agente conservante al inhibir el crecimiento microbiano y contribuye al perfil sensorial del producto final (Panero y Pérez, 2014).

El sistema incorpora un tanque destinado a la adición de emulsionantes, donde la lecitina es ampliamente utilizada en formulaciones de esparcibles de mesa. La selección y dosificación de este compuesto dependen de su balance hidrofílico-lipofílico (HLB), parámetro que define su afinidad relativa por las fases acuosa y lipídica. En sistemas tipo agua en aceite (W/O), como la margarina, se requieren emulsionantes con un bajo valor de HLB, dado que presentan mayor solubilidad en la fase grasa y favorecen la estabilidad de la emulsión (Zhu *et al.*, 2019).

La calidad de la lecitina constituye un factor crítico en el desempeño del producto final. Se ha reportado que lecitinas de baja calidad pueden inducir defectos sensoriales, tales como sabores residuales a pescado o grasa, incluso a concentraciones inferiores al 0,5 %. En este contexto, se seleccionó lecitina blanqueada debido a su mayor estabilidad sensorial y a su mejor comportamiento funcional en rangos de adición entre 0,10 % y 0,50 %. Adicionalmente, la normativa alimentaria establece un límite máximo de incorporación de lecitina de 0,50 % en productos de este tipo (Jiménez, 2017).

Desde el punto de vista tecnológico, diversos estudios han evidenciado el efecto de la lecitina sobre la cinética de cristalización de sistemas lipídicos. En particular, Furlán *et al.* (2017) demostraron que la adición de 0,2 % (p/p) de lecitina en mezclas de manteca de cacao y azúcar reduce significativamente el tiempo de inducción o nucleación, acelerando la formación de cristales en un rango de temperatura entre 25 y 30 °C. Este comportamiento es altamente deseable en la producción de margarinas, ya que contribuye al desarrollo de una estructura cristalina más homogénea y de mejores propiedades reológicas.

Con base en estos antecedentes, se estableció una dosificación de lecitina del 0,2 % (p/p), incorporada en un tanque agitador operado a 30 °C, en conjunto con el conservante. En cuanto a este último, se emplea benzoato de sodio en bajas concentraciones, con el fin de minimizar posibles interferencias sensoriales, en concordancia con el Reglamento Sanitario de los Alimentos, que permite una concentración máxima de 1 g/kg de producto terminado (Schmidt-Hebbel, 1990).

Formación de la emulsión

Una vez finalizadas las etapas de preparación de la fase grasa y la fase acuosa, se procede a la formación de la emulsión, etapa crítica para garantizar la homogeneidad y estabilidad del sistema. En esta operación, la fase lipídica (grasas y aceites) se incorpora al tanque que contiene la fase acuosa, asegurando una adecuada dispersión de los componentes mediante condiciones controladas de temperatura y agitación.

Con el fin de favorecer la miscibilidad y la interacción con los emulsionantes y compuestos liposolubles, la mezcla se somete a calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 49 °C. Este sistema opera con un agitador de paletas a una velocidad de 20 rpm, condiciones que influyen directamente en la precristalización de la emulsión.

Estas variables permiten generar una estructura inicial adecuada, la cual será determinante en la etapa posterior de enfriamiento y cristalización.

La literatura reporta que la combinación de temperatura y caudal tiene un efecto significativo sobre la calidad cristalina del producto. En particular, condiciones de operación cercanas a 49 °C y caudales entre 1630 y 1650 kg/h favorecen la formación de cristales tipo β' , los cuales están asociados con mejores propiedades reológicas, plasticidad y estabilidad en margarinas, especialmente bajo esquemas de procesamiento semicontinuo (Salas et al., 2012).

Proceso de cristalización

La cristalización de la emulsión se lleva a cabo mediante un sistema continuo y cerrado, conocido como intercambiador de calor de superficie raspada. Este equipo está constituido por un cilindro de acero inoxidable con un eje central rotatorio que deja un espacio anular de aproximadamente 5-10 mm, ocupado por palas raspadoras acopladas al eje.

El enfriamiento de la emulsión se realiza a través de una camisa externa por la cual circula un refrigerante, típicamente amoníaco líquido, lo que permite alcanzar temperaturas cercanas a -5 °C. La emulsión, impulsada por una bomba de alta presión, entra en contacto con las paredes frías del cilindro, lo que induce una rápida transferencia de calor.

Las palas, operando a velocidades cercanas a 500 rpm, remueven continuamente el material cristalizado de la superficie, facilitando un enfriamiento uniforme y, simultáneamente, promoviendo el amasado del producto.

Las condiciones de alta presión y cizalla generan una nucleación acelerada durante tiempos de residencia cortos (5-10 s), lo que favorece la formación de una microestructura cristalina homogénea.

No obstante, el tiempo total requerido para alcanzar un grado adecuado de cristalización es del orden de seis minutos, lo cual es consistente con lo reportado en sistemas industriales de producción de margarinas (González Cantoñi, 2009).

Caracterización de los equipos

Proceso 1: Transformación de grasas

La modificación de grasas se realiza mediante un filtro prensa que permite el fraccionamiento del aceite de sachá inchi en sus fracciones líquida (oleína) y sólida (estearina). Este equipo opera a presiones cercanas a 16 bares y está compuesto por placas de cámara y membrana accionadas hidráulicamente. El aceite se introduce en las cámaras, donde la membrana inflable ejerce presión, facilitando la separación de la fase líquida y reteniendo la fase sólida en las placas.

Este proceso permite incrementar el contenido de grasa sólida, cumpliendo con los requerimientos establecidos por la normativa para margarinas (Hendrix *et al.*, 2016).

Proceso 2: Preparación de fases

La preparación de las fases grasa y acuosa se realiza en sistemas independientes de mezclado. La fase grasa se homogeniza en un tanque con agitación constante de 20 rpm. Por su parte, la fase acuosa se compone de dos tanques: el primero (agua y salmuera) opera a 10 rpm para asegurar la completa disolución; el segundo (emulsionantes y conservantes) se mantiene a 60 °C para evitar la formación de agregados.

Posteriormente, ambas fases se combinan en un tanque de mezcla a 49 °C y 20 rpm, generando una emulsión inicial adecuada para la cristalización.

Proceso 3: Cristalización

La emulsión es transferida al intercambiador de superficie rascada, donde ocurre un enfriamiento rápido mediante un choque térmico inducido por amoníaco a bajas temperaturas (-5 °C). Este proceso maximiza la eficiencia de la transferencia de calor y permite obtener una estructura cristalina uniforme, fundamental para la calidad del producto final.

Proceso 4: Empaque

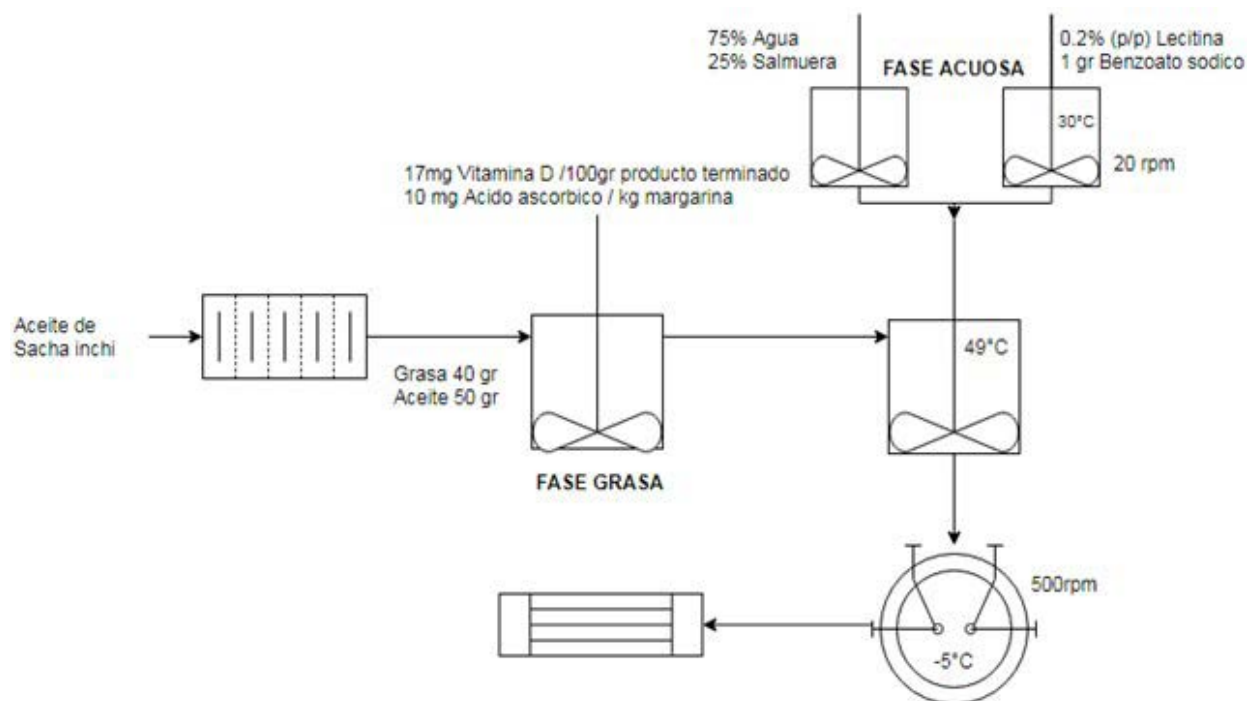
Finalmente, el producto pasa por un tubo de reposo con sistema de enfriamiento a -6 °C, donde se incrementa su consistencia. Este acondicionamiento facilita el envasado y asegura la estabilidad estructural del producto durante su almacenamiento (Jiménez, 2017).

Diseño del proceso

El conjunto de operaciones descritas se integra en un diagrama operacional (Figura 1), el cual sintetiza la secuencia de etapas, las condiciones de operación y la interacción entre fases.

Este diseño, fundamentado en una revisión bibliográfica, permite establecer un sistema de producción optimizado que garantiza propiedades reológicas, bromatológicas y nutricionales adecuadas en una margarina esparcible a partir de aceite de sachá inchi, la cual se destaca por su alto contenido de ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos.

Figura 1. Diagrama del proceso por operación para la elaboración de margarina esparcible de mesa a partir del aceite de sachá inchi.



Fuente. Elaboración propia.

Conclusiones

El presente estudio demuestra la viabilidad técnica y nutricional del aceite de sachá inchi como materia prima para la elaboración de esparcibles tipo margarina, destacándose por su elevado contenido de ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos.

La selección del fraccionamiento en seco como método de modificación lipídica permitió preservar la integridad estructural de los ácidos grasos, evitando la formación de isómeros trans asociados a procesos convencionales como la hidrogenación. Esta estrategia, junto con la proporción

óptima de oleína y estearina (60:40), permitió obtener una fase grasa con propiedades adecuadas de estabilidad, plasticidad y comportamiento reológico.

La formulación propuesta, basada en evidencia bibliográfica y en el cumplimiento de la normativa NTC 241, logró integrar eficientemente componentes liposolubles e hidrosolubles, favoreciendo la estabilidad de la emulsión y la calidad sensorial del producto.

Asimismo, las condiciones de proceso definidas para la emulsificación y cristalización promovieron la formación de cristales tipo β' , fundamentales para la textura y untabilidad del producto final.

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, el sistema diseñado mostró coherencia operativa y eficiencia, evidenciada en el balance de materia, con un rendimiento de aproximadamente 126 g de esparcible por cada 1000 g de aceite procesado.

En conjunto, estos resultados posicionan al aceite de sachá inchi como una alternativa promisorio para el desarrollo de productos grasos funcionales, alineados con las tendencias actuales de la industria alimentaria hacia formulaciones más saludables, sostenibles y libres de grasas trans.

Referencias

- Ashfaq, A., Clochard, M. C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ula ski, P. y Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877.
- Benítez, R., Coronell, C. y Martin, J. (2018). Chemical characterization sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) seed: oleaginosa promising from the Colombian Amazon. *International Journal of Current Science Research and Review*, 1(1), 1-12.
- Bobo, G., Nicolau Lapeña, I. y Aguiló Aguayo, I. (2021). Conventional oils and oilseeds: composition and nutritional importance. *Oil and oilseed processing: opportunities and challenges*, 23-40.
- Furlán, L. T. R., Baracco, Y., Lecot, J., Zaritzky, N. y Campderrós, M. E. (2017). Influence of hydrogenated oil as cocoa butter replacers in the development of sugar-free compound chocolates: Use of inulin as stabilizing agent. *Food Chemistry*, 217, 637-647.
- González Cantoñi, D. (2009). *Margarina*. Valle del Cauca - Colombia: Universidad del Valle Tecnología en Alimentos Manejo de Sólidos y Fluidos.
- Guo, Y., Cai, Z., Xie, Y., Ma, A., Zhang, H., Rao, P. y Wang, Q. (2020). Synthesis, physicochemical properties, and health aspects of structured lipids: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 759-800.
- Gutiérrez, C. E., y Vásquez, E. A. (2016). *Diseño de sistema automático para la dosificación de margarina en la empresa Lehmä*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Hashempour-Baltork, F., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S. y Savage, G. P. (2018). Chemical, rheological and nutritional characteristics of sesame and olive oils blended with linseed oil. *Advanced pharmaceutical bulletin*, 8(1), 107.
- Hendrix, M., Gibon, V. y Calliauw, G. (2016). Modificación de las grasas para agregar valor a los aceites de palma y de palmiste. *Revista palmas*, 173-183.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2002). *Higiene y seguridad. Colores y señales de seguridad* (NTC 241).

- Jiménez, D. (2017). *Estudio del proceso industrial para la fabricación de margarina*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Mattice, K. D., Wright, A. J. y Marangoni, A. G. (2020). Crystallization and rheological properties of milk fat. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 2: Lipids*, 219-244.
- Muangrat, R., Veeraphong, P. y Chantee, N. (2018). Screw press extraction of Sacha inchi seeds: Oil yield and its chemical composition and antioxidant properties. *Journal of food processing and preservation*, 42(6), e13635.
- Nguyen, H. C., Vuong, D. P., Nguyen, N. T. T., Nguyen, N. P., Su, C. H., Wang, F. M. y Juan, H. Y. (2020). Aqueous enzymatic extraction of polyunsaturated fatty acid-rich sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed oil: An eco-friendly approach. *LWT – Food Science and Technology*, 133, 109992.
- Osuna, M. B., Romero, C. A., Romero, A. M., Judis, M. A. y Bertola, N. C. (2018). Proximal composition, sensorial properties and effect of ascorbic acid and -tocopherol on oxidative stability of bread made with whole flours and vegetable oils. *LWT – Food Science and Technology*, 98, 54-61.
- Panero, M. y Perez, S. (2014). *Elaboración de margarina a base de aceite de girasol*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Saavedra, J. J. H., Silva, B. E. F., Pairazamán, P. I. E. y Minaya, K. Y. C. (2012). Efectos de la ingesta de *Plukenetia volubilis* Linneo o "Sachá inchi" en el perfil lipídico de adultos jóvenes. *Acta Médica Peruana*, 29(3), 155-160.
- Salas, Y., Tapia, I. y Garzón, M. (2012). Cristalización y plastificación de margarina industrial para panificación. *Química Central*, Vol. 2, 39-47.
- Shukla, V. K. (2019). Margarine and baking fats. En *Healthful lipids* (pp. 665-684). AOCS Publishing.
- Singanusong, R., y Jiamyangyuen, S. (2020). Effects of maturity on chemical composition and antioxidant activity of sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) cultivated in Northern Thailand. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 17(9), 998-1009.
- Sivakanthan, S. y Madhujith, T. (2020). Current trends in applications of enzymatic interesterification of fats and oils: A review. *LWT – Food Science and Technology*, 132, 109880.
- Schmidt-Hebbel, H. (1990). *Aditivos alimentarios y la reglamentación de los alimentos*. Santiago - Chile: Fundación Chile.
- Timms, R. E. (2018). Fractionation. En *Lipid technologies and applications* (pp. 199-222). Routledge.
- Tong, S. C., Tang, T. K. y Lee, Y. Y. (2021). A review on the fundamentals of palm oil fractionation: processing conditions and seeding agents. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(12), 2100132.

- Valenzuela, R., Tapia, G., González, M. y Valenzuela, A. (2011). Ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA) y su aplicación en diversas situaciones clínicas. *Revista chilena de nutrición*, 38(3), 356-367.
- Wang, S., Zhu, F. y Kakuda, Y. (2018). Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses. *Food chemistry*, 265, 316-328.
- Wang, C., Sun, C., Lu, W., Gul, K., Mata, A. y Fang, Y. (2020). Emulsion structure design for improving the oxidative stability of polyunsaturated fatty acids. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2955-2971.
- Zhao, Y., Ren, Y., Zhang, R., Zhang, L., Yu, D., Jiang, L. y Elfalleh, W. (2018). Preparation of hydrogenated soybean oil of high oleic oil with supported catalysts. *Food bioscience*, 22, 91-98.
- Zhu, Q., Pan, Y., Jia, X., Li, J., Zhang, M. y Yin, L. (2019). Review on the stability mechanism and application of water in oil emulsions encapsulating various additives. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 18(6), 1660-1675.