

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



## **TESIS**

**“DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE UN COMPLEMENTO ALIMENTICIO A PARTIR DE ESPIRULINA A NIVEL PLANTA PILOTO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**ELABORADO POR**

**ANGIE LUCERITO CASTILLO BARZOLA**

**ID 0009-0005-7601-7858**

**ASESORA**

**Ing. TARSILA TUESTA CHAVEZ**

**ID 0000-0002-2594-9322**

**LIMA – PERÚ**

**2025**

---

Citar/How to cite	Castillo Barzola [1]
Referencia/Reference	[1] A. Castillo Barzola, " <i>Diseño del proceso de producción de un complemento alimenticio a partir de espirulina a nivel planta piloto</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Castillo, 2025)
Referencia/Reference	Castillo, A. (2025). <i>Diseño del proceso de producción de un complemento alimenticio a partir de espirulina a nivel planta piloto</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### **Dedicatoria**

*A mis padres Ana Barzola Rivera y Milciades Castillo Quinto por ser mi fuente de amor, fortaleza e inspiración. A mis abuelos, por su apoyo incondicional y por ser un pilar fundamental en mi vida. A mi hermano, por ser mi guía y modelo a seguir; a mi cuñada, primos y amigos, por sus consejos y compañía en los momentos más desafiantes. Y a Matteo, por iluminar mi vida desde que llegó a este mundo. Al Grupo de Investigación en Alimentos (GIA-FIQT-UNI), mi segunda casa durante los últimos tres años, por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de aprender y crecer en cada paso de mi formación. A mi asesora de tesis, la Ing. Tarsila Tuesta, por su invaluable guía, apoyo y confianza a lo largo de mi trayectoria académica y profesional.*

*A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.*

## **Agradecimientos**

Un profundo agradecimiento a los aliados estratégicos de este proyecto; Lic. Henry Linares, Dr. Oscar Jordan, Ing. Emilio Porras y Dr. Marco Faieta, por el asesoramiento constante y por compartir sus conocimientos, los cuales fueron valiosos y significativos, desde la formulación a la fecha. Al Ing. Gilberto García, por su valiosa orientación, paciencia y apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de esta tesis. Además, quiero expresar mi sincera consideración con los técnicos del laboratorio N° 23 – UNI: Sr. Victor Rojas y Elmer por su infinita paciencia y dedicación para guiarme en el uso del equipo Spray dryer. Su disposición y apoyo desinteresado fue crucial para la parte experimental de este proyecto. A CONCYTEC/PROCIENCIA, entidad que financia la ejecución de esta tesis mediante el Contrato N.º PE501084735-2023, en el marco del Esquema Financiero E073-2023-01: “Tesis de Pregrado y Posgrado en Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica”, por su valioso respaldo. Su contribución hizo posible que pudiera desarrollarme plenamente en el área de investigación durante el presente año. Agradezco profundamente la confianza depositada en este proyecto y en su potencial para aportar al avance de la ciencia y la tecnología, con miras a fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional de nuestro país.

## Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar un potencial complemento alimenticio a base de espirulina, orientado a adultos mayores, aprovechando su alto contenido y calidad proteica.

El desarrollo a nivel laboratorio consistió en aplicar el secado por atomización para la obtención de un microencapsulado utilizando maltodextrina como material de pared; además, al emplear la maltodextrina como encapsulante, con el fin de proteger los compuestos termolábiles frente a las elevadas temperaturas del proceso. Se estudiaron las variables espirulina:maltodextrina (E:M) en 3 niveles 1:2 - 1:4; asimismo, se varió la temperatura en 160 - 180 °C, según diseño factorial con la finalidad de determinar el mejor tratamiento respecto al rendimiento y contenido de proteínas. El tratamiento óptimo producto de la estadística fue: E:M 1:4 y a una temperatura 174,7 °C.

En base a la experiencia obtenida a nivel laboratorio, se propone el diseño del proceso de producción a nivel planta piloto con una capacidad estimada de 936 kg/mes. La propuesta contempla la selección de equipos, distribución de planta y evaluación económica. De acuerdo a los resultados, el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) financiero de S/ 718 732.00, Tasa Interna de Retorno (TIR) de 28.00% y un periodo de recuperación de la inversión de 3.37 años.

Palabras clave — espirulina, proteína, secado por atomización, producción, planta piloto.

## **Abstract**

The objective of this project was to develop a potential dietary complement based on spirulina, aimed at older adults, taking advantage of its high protein content and quality. The development at laboratory level involved applying spray drying to obtain a microencapsulated product using maltodextrin as the wall material. Maltodextrin served as an encapsulating agent to protect thermolabile compounds from the high temperatures of the process. The spirulina-to-maltodextrin ratio (S:M) was evaluated at three levels (1:2 to 1:4), and the inlet temperature varied between 160 °C and 180 °C, following a factorial design to determine the optimal treatment in terms of yield and protein content. The statistically optimal treatment was S:M 1:4 at a temperature of 174.7 °C.

Based on the laboratory findings, a pilot-scale production process was proposed, with an estimated capacity of 936 kg/month. The proposal includes equipment selection, plant layout design, and an economic evaluation. According to the results, the project presents a financial Net Present Value (NPV) of S/ 718 732.00, an Internal Rate of Return (IRR) of 28.00%, and a payback period of 3.37 years.

Keywords — spirulina, protein, spray drying, production, pilot-scale.

## Tabla de Contenido

Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	5
1.3 Objetivos del estudio .....	6
1.3.1. Objetivo general .....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4 Antecedentes investigativos .....	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual .....	9
2.1 Marco teórico .....	9
2.1.1. Algas: macroalgas y microalgas. ....	9
2.1.2. Espirulina .....	11
2.1.3. Técnicas de secado para espirulina.....	17
2.1.4. Proteínas .....	20
2.1.5. Técnicas de cuantificación de proteínas .....	26
2.2 Marco conceptual.....	29
2.2.1. Microencapsulación por secado por atomización.....	29
2.2.2. Condiciones de operación que influyen en el contenido proteico y en el rendimiento del proceso. ....	31
2.2.3. Mezclado y homogeneización.....	33
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....	34
3.1. Materiales.....	34
3.2. Diseño experimental.....	35
3.3. Metodología .....	36
3.3.1. Caracterización de la materia prima. ....	36
3.3.2. Acondicionamiento de la materia prima .....	38
3.3.3. Microencapsulación y caracterización .....	38
3.3.4. Caracterización del tratamiento óptimo.....	42
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....	43
4.1. Estabilidad microbiológica .....	59
Capítulo V: Diseño de proceso de producción .....	61
5.1. Panorama Global de la Producción y Consumo de Espirulina .....	61
5.2. Localización de planta.....	61

5.3.	Diseño del proceso de producción .....	63
5.3.1.	Recepción de materia prima .....	63
5.3.2.	Mezcla y homogeneización .....	63
5.3.3.	Secado por atomización: .....	63
5.3.4.	Envasado .....	64
5.4.	Selección de equipos. ....	66
5.4.1.	Congeladora .....	66
5.4.2.	Balanza industrial .....	66
5.4.3.	Homogeneizador multifuncional con sistema de mezcla.....	67
5.4.4.	Secador por atomización .....	68
5.4.5.	Envasadora .....	69
5.4.6.	Sistema de ablandamiento de agua.....	69
5.4.7.	Furgoneta.....	70
5.5.	Tamaño y distribución de planta.....	70
Capítulo VI:	Evaluación económica.....	72
6.1.	Determinación de la inversión .....	72
6.1.1.	Inversión en activo fijo. ....	72
6.1.2.	Inversión en intangibles.....	73
6.1.3.	Inversión en capital de trabajo .....	74
6.2.	Determinación de ingresos .....	74
6.3.	Determinación de costo de venta .....	75
6.4.	Determinación de gastos administrativos. ....	79
6.5.	Determinación de gastos de venta .....	80
6.6.	Estados financieros del proyecto.....	81
6.6.1.	Estado de pérdidas y ganancias.....	81
6.6.2.	Flujo de caja económico.....	81
6.7.	Evaluación financiera. ....	84
6.7.1.	Flujo de caja financiero.....	85
6.8.	Análisis de sensibilidad. ....	87
Conclusiones	.....	90
Recomendaciones	.....	92
Referencias bibliográficas	.....	93
Anexos	.....	116

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Principales diferencias entre macroalgas y microalgas.....	9
<b>Tabla 2</b> Composición de la espirulina presentes en 10 g de muestra. ....	13
<b>Tabla 3</b> Representación de los niveles o estructuras de las proteínas.....	22
<b>Tabla 4</b> Aminoácidos esenciales y no esenciales. ....	24
<b>Tabla 5</b> Métodos comunes de cuantificación de proteínas. ....	28
<b>Tabla 6</b> Lista de Materia prima, insumo y reactivos .....	34
<b>Tabla 7</b> Lista de equipos a nivel laboratorio.....	35
<b>Tabla 8</b> Formulaciones según diseño factorial.....	36
<b>Tabla 9</b> Métodos de análisis proximal.....	37
<b>Tabla 10</b> Análisis de metales de espirulina.....	45
<b>Tabla 11</b> Perfil de aminoácidos de la espirulina.....	46
<b>Tabla 12</b> Contenido de proteínas y rendimiento del microencapsulado de espirulina. ....	49
<b>Tabla 13</b> Análisis de varianza de proteínas. ....	53
<b>Tabla 14</b> Análisis de Varianza para Rendimiento .....	56
<b>Tabla 15</b> Especificaciones técnicas del congelador.....	66
<b>Tabla 16</b> Especificaciones técnicas de la balanza .....	67
<b>Tabla 17</b> Especificaciones técnicas del mezclador – homogenizador. ....	68
<b>Tabla 18</b> Especificaciones técnicas del spray-dryer.....	68
<b>Tabla 19</b> Especificaciones técnicas de la envasadora. ....	69
<b>Tabla 20</b> Especificaciones técnicas del sistema de ablandamiento de agua. ....	70
<b>Tabla 21</b> Especificaciones técnicas de la furgoneta.....	70
<b>Tabla 22</b> Maquinaria y equipos necesarios para la producción del complemento alimenticio. ....	72
<b>Tabla 23</b> Inversión en activo fijo para la producción del complemento alimenticio.....	73
<b>Tabla 24</b> Inversión en intangibles para la producción del complemento alimenticio.....	73
<b>Tabla 25</b> Inversión en capital fijo para la producción del complemento alimenticio.....	74
<b>Tabla 26</b> Inversión necesaria para realizar la producción a nivel planta piloto. ....	74
<b>Tabla 27</b> Ingresos por ventas anuales del complemento alimenticio. ....	75
<b>Tabla 28</b> Costo de materia prima y materiales directos necesarios para la para la producción anual. ....	75
<b>Tabla 29</b> Costo total anual de mano de obra directa.....	76
<b>Tabla 30</b> Costo total anual de mano de obra indirecta.....	76
<b>Tabla 31</b> Depreciación anual de máquinas y equipos.....	77
<b>Tabla 32</b> Costo total consumo de agua. ....	78
<b>Tabla 33</b> Costo total consumo de energía .....	78

<b>Tabla 34</b>	<i>Costo total indirecto de fabricación anual.</i>	79
<b>Tabla 35</b>	<i>Costo total de venta anual.</i>	79
<b>Tabla 36</b>	<i>Gastos administrativos anual.</i>	80
<b>Tabla 37</b>	<i>Gastos de ventas anual.</i>	80
<b>Tabla 38</b>	<i>Estado de pérdidas y ganancias.</i>	82
<b>Tabla 39</b>	<i>Flujo de caja económico.</i>	83
<b>Tabla 40</b>	<i>Flujo de caja económico acumulado.</i>	83
<b>Tabla 41</b>	<i>Indicadores económicos.</i>	84
<b>Tabla 42</b>	<i>Consideraciones para el pago de la deuda.</i>	85
<b>Tabla 43</b>	<i>Pago, interés y amortización de la deuda producto del financiamiento.</i>	85
<b>Tabla 44</b>	<i>Flujo de caja financiero.</i>	86
<b>Tabla 45</b>	<i>Flujo de caja financiero acumulado.</i>	86
<b>Tabla 46</b>	<i>Indicadores financieros.</i>	87
<b>Tabla 47</b>	<i>Sensibilidad económica del proyecto.</i>	88

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b>	<i>Composiciones macromoleculares promedios de microalgas.</i>	10
<b>Figura 2</b>	<i>Células de espirulina agrupadas en filamentos.</i>	12
<b>Figura 3</b>	<i>Cultivo de espirulina a diferentes escalas</i>	14
<b>Figura 4</b>	<i>Operaciones unitarias en la cosecha de espirulina.</i>	15
<b>Figura 5</b>	<i>Presentaciones de espirulina para consumo</i>	16
<b>Figura 6</b>	<i>Tecnologías de secado de espirulina.</i>	17
<b>Figura 7</b>	<i>Estructura química de un aminoácido y la conformación en una proteína.</i>	20
<b>Figura 8</b>	<i>Desnaturalización de proteínas</i>	25
<b>Figura 9</b>	<i>Esquema del proceso de secado por atomización.</i>	30
<b>Figura 10</b>	<i>Tipos de microcápsulas.</i>	30
<b>Figura 11</b>	<i>Estructura química de la maltodextrina.</i>	31
<b>Figura 12</b>	<i>Deposición en pared del secador en puntos superiores.</i>	32
<b>Figura 13</b>	<i>Microencapsulación de espirulina mediante secado por atomización</i>	39
<b>Figura 14</b>	<i>Medida de humedad en Balanza de Infrarrojo.</i>	39
<b>Figura 15</b>	<i>Cuantificación de proteínas por el método de Bradford</i>	40
<b>Figura 16</b>	<i>Medida de actividad del agua.</i>	41
<b>Figura 17</b>	<i>Medida del color de microencapsulado de espirulina.</i>	42
<b>Figura 18</b>	<i>Espirulina fresca a temperatura ambiente.</i>	43
<b>Figura 19</b>	<i>Equipos de secado por atomización.</i>	47
<b>Figura 20</b>	<i>Muestras de las formulaciones obtenidas de manera experimental.</i>	48
<b>Figura 21</b>	<i>FTIR de (A) espirulina, (B) maltodextrina y C) microencapsulado.</i>	53
<b>Figura 22</b>	<i>Diagrama de Pareto estandarizada de proteína</i>	55
<b>Figura 23</b>	<i>Superficie de respuesta estimada</i>	55
<b>Figura 24</b>	<i>Contornos de superficie de respuesta estimada</i>	56
<b>Figura 25</b>	<i>Diagrama de Pareto estandarizado para rendimiento.</i>	57
<b>Figura 26</b>	<i>Superficie de respuesta estimada.</i>	58
<b>Figura 27</b>	<i>Contorno de superficie de respuesta estimada</i>	58
<b>Figura 28</b>	<i>Superficie de respuesta estimada</i>	59
<b>Figura 29</b>	<i>Resultados de estabilidad microbiológica del encapsulado de espirulina.</i>	60
<b>Figura 30</b>	<i>Ubicación de planta piloto.</i>	62
<b>Figura 31</b>	<i>Esquema equipo de Secado por atomización.</i>	65
<b>Figura 32</b>	<i>Propuesta de distribución de planta piloto.</i>	71
<b>Figura 33</b>	<i>Flujo de caja económico acumulado y periodo de recuperación.</i>	84
<b>Figura 34</b>	<i>Flujo de caja financiero y periodo de recuperación.</i>	87
<b>Figura 35</b>	<i>Análisis de sensibilidad (Variación del VAN con respecto al COK).</i>	89

## Introducción

La presente tesis tiene como objetivo desarrollar un potencial complemento alimentario a base de espirulina y maltodextrina, utilizando la técnica de microencapsulación por secado por atomización. Además, se presenta una propuesta para la implementación de una planta piloto con la finalidad de tener las bases para adecuarlo a nivel industrial. Este proceso permite reducir la actividad del agua, restringiendo el crecimiento microbiano y obteniendo un producto de mayor valor agregado, tanto para su consumo directo como para ser utilizado como insumo en la preparación de otros alimentos funcionales.

El secado por atomización es un proceso unitario cuyo funcionamiento depende de diferentes variables de entrada y salida en la cámara de secado. El control de estos parámetros de trabajo es fundamental para garantizar la calidad del producto final. A continuación se presenta el contenido consolidado de cada capítulo de esta tesis.

En el Capítulo I, se plantea el problema mundial y nacional de la desnutrición de los adultos mayores y se aborda la espirulina como fuente alternativa de proteínas. También se explica el pretratamiento de la muestra previo al proceso de secado por atomización.

En el Capítulo II, se detalla el marco teórico y conceptual, donde se abarcan los conceptos generales sobre microalgas, concretamente sobre la espirulina y sobre la técnica de secado por atomización. Finalmente, se describen los principios del microencapsulado y las técnicas de cuantificación de proteínas aplicadas en la investigación.

El Capítulo III contempla el desarrollo experimental de secado por atomización a nivel laboratorio, aplicando un diseño factorial en función de las variables temperatura y proporción Espirulina:Maltodextrina (E:M). Se detallan los métodos de análisis empleados, tales como cuantificación de proteínas, contenido de humedad, perfil de aminoácidos, análisis de color, espectroscopía FTIR, microscopía SEM, entre otros.

En el Capítulo IV se muestran y discuten los resultados experimentales obtenidos, incluido el tratamiento estadístico de los datos. Además, se determina la fórmula óptima aplicando la metodología de superficie de respuesta.

En base a la experiencia en laboratorio, en el Capítulo V se propone el diseño del proceso de producción a nivel planta piloto, incluyendo el estudio del mercado, selección de equipos y distribución de la planta.

En el Capítulo VI, se realiza la evaluación económica de la propuesta de planta piloto, así como la estimación de la inversión, ingresos esperados, costos de operación, gastos administrativos y de venta, así como el análisis financiero y de sensibilidad.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

### 1.1 Generalidades

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el período 2021-2030 como el Decenio del Envejecimiento Saludable y pidió a la OMS que lidere su implementación (OMS, n.d.). Esta iniciativa busca promover una vida más larga y saludable, fomentando estrategias que permitan a las personas envejecer con bienestar y autonomía (Murillo-Llorente et al., 2023). En las últimas décadas, el aumento en la esperanza de vida ha llevado a un crecimiento acelerado de la población adulta mayor en comparación con otros grupos etarios (de Sire et al., 2022). A nivel mundial, la población de 65 años o más está experimentando un crecimiento acelerado, con estimaciones que indican un aumento de 727 millones en 2020 a 1 500 millones en 2050 (Melchior et al., 2023). Esta tendencia también se refleja en Perú, donde se proyecta que la población adulta mayor pasará de 3 millones en 2015 a 8.7 millones en 2050, según el Fondo de Población de las Naciones Unidas del Perú (UNFPA) (Fernández-Condori et al., 2024). Asimismo, de acuerdo con el Ministerio de Salud (MINSa, 2025), en los últimos años se ha registrado un incremento en este grupo poblacional, pasando de 4.14 millones en 2020 a 4.20 millones en 2024, lo que representa actualmente el 14.4% de la población total. Este crecimiento resalta la importancia de comprender las demandas específicas de los adultos mayores y proponer estrategias para prevenir y mitigar las afecciones que aquejan la salud y calidad de vida de esta población (Melchior et al., 2023).

La capacidad de comer es un factor fundamental para preservar la salud y el bienestar en la vejez (Liu et al., 2024). Sin embargo, diversos factores tales como la pérdida del apetito, disminución del sentido del olfato y del gusto, reducción de la producción de saliva, problemas de masticación y deglución debido a la pérdida de piezas dentales o alteraciones neuromusculares, trastornos digestivos que dificultan la absorción de nutrientes, entre otros problemas asociadas al envejecimiento, afectan la capacidad de los

adultos mayores para mantener una nutrición adecuada (Khan et al., 2023; Liu et al., 2024; Shimizu et al., 2021). Estas alteraciones disminuyen la disponibilidad y absorción de nutrientes, lo que lleva a deficiencias nutricionales y varios problemas de salud. Uno de los principales problemas que afectan a los adultos mayores es la pérdida progresiva de masa muscular y fuerza, una condición conocida como sarcopenia (Rogeri et al., 2021). Esta enfermedad no solo compromete la funcionalidad física, aumentando el riesgo de discapacidad, caídas accidentales y dependencia, sino que también se ha asociado con una mayor tasa de mortalidad (Jang, 2022; Lin et al., 2021; Moynihan & Teo, 2024). A pesar de la evidencia científica sobre los efectos adversos de la sarcopenia, tanto en la salud de los adultos mayores como en los costos sociales y del sistema de atención médica, esta condición sigue siendo subestimada y subtratada en la práctica clínica, lo que resalta la necesidad de mejorar su detección y manejo oportuno (Giacosa et al., 2024). Según el Grupo de Trabajo Europeo sobre Sarcopenia en Personas Mayores (EWGSOP2), la sarcopenia es considerada probable cuando se detecta una fuerza muscular reducida y se confirma con la presencia de una baja cantidad o calidad muscular. Además, se clasifica como grave cuando la disminución de la fuerza muscular afecta significativamente el rendimiento físico (Franco et al., 2024). Sin embargo aún existe controversia sobre los criterios más adecuados para el diagnóstico de la sarcopenia, ya que distintos organismos han propuesto definiciones y metodologías de evaluación, entre ellos, el Grupo de Trabajo Internacional sobre Sarcopenia (IWGS), el Grupo de Trabajo Asiático sobre Sarcopenia (AWGS), la Fundación Estadounidense para los Institutos Nacionales de Salud (FNIH) y el Consorcio de Definición y Resultados de la Sarcopenia (SDOC) han desarrollado documentos de consenso con enfoques diversos (Voulgaridou et al., 2024). Esta falta de uniformidad ha generado alta variabilidad en las estimaciones de prevalencia y frecuencia de la sarcopenia (Stuck et al., 2023). Por ejemplo, en el estudio realizado por Ni Lochlainn et al., (2023) indica que la prevalencia de la sarcopenia varía ampliamente, desde el 1% hasta el 31.9%. Por otro lado, en un estudio realizado en una población comunitaria de 1,151 adultos mayores de 55 años en Lima, Perú, se encontró que uno de cada cinco

adultos presentaba sarcopenia probable, con una prevalencia que varió entre 22.7% y 27.8%, dependiendo de los puntos de corte utilizados (Flores-Flores et al., 2024).

El progreso en el desarrollo de tratamientos farmacológicos efectivos ha sido lento y actualmente no existen medicamentos autorizados para la sarcopenia (Zec et al., 2025). Sin embargo, una característica clave de esta condición es que, aunque su aparición es inevitable, su progresión puede ser modificada significativamente por el estilo de vida, lo que resalta la importancia de estrategias preventivas y terapéuticas no farmacológicas (Van Der Heijden et al., 2023). Entre las intervenciones más efectivas, la actividad física y una ingesta adecuada de proteínas han demostrado ser fundamentales para ralentizar la progresión de la sarcopenia (Giacosa et al., 2024; Li et al., 2022). Sin embargo, dado que muchos adultos mayores presentan limitaciones para realizar ejercicio, aumentar la ingesta de proteínas es una estrategia fundamental para preservar la masa muscular y mejorar la fuerza (Lin et al., 2021). Además, el envejecimiento está asociado con un fenómeno denominado resistencia anabólica, que reduce la capacidad del organismo para utilizar eficientemente los aminoácidos de la dieta y estimular la síntesis de proteína muscular (SPM) (Jung et al., 2018). Por ello, diversos estudios han sugerido que la ingesta proteica en adultos mayores debe superar la recomendación estándar de 0.8 g/kg/día (Coelho-Junior et al., 2022; Jang, 2022), situándose en un rango de 1.0 a 1.3 g/kg/día, lo que podría reducir hasta en un 40% la pérdida de masa muscular (Rogeri et al., 2021).

En Perú, las principales fuentes de proteínas son de origen animal, destacando el consumo de aves (28 g/día), pescado (11 g/día), carne de res (7 g/día) y carne de cerdo (4 g/día) (Herrera-Cuenca et al., 2023). Estas proteínas son consideradas de alta calidad debido a su aporte de los nueve aminoácidos esenciales (EAA) (Ajomiwe et al., 2024). En contraste, las proteínas vegetales, tales como legumbres y cereales, suelen contener factores antinutricionales y estructuras más complejas que pueden dificultar su digestión y absorción, reduciendo su biodisponibilidad (Ali et al., 2022; Melchior et al., 2023). Además, se ha demostrado que las proteínas de origen animal inducen una mayor estimulación de

la síntesis muscular y una mejor función física en comparación con las proteínas de origen vegetal (Montiel-Rojas et al., 2020). Sin embargo, los sistemas actuales de producción animal representan un desafío en términos de sostenibilidad, ya que requieren un uso intensivo de recursos naturales, como tierra y agua dulce, y contribuyen significativamente al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero (Kurek et al., 2022; Salter & Lopez-Viso, 2021). Por otro lado, el consumo de proteínas de origen animal en adultos mayores enfrenta diversas limitaciones, entre ellas la disminución del apetito, las dificultades en la digestión y masticación, así como la sensación de saciedad que generan estas proteínas, lo que dificulta alcanzar los requerimientos proteicos recomendados (Ver Anexo 1) (Tayebati et al., 2021). En este contexto, estudios recientes han demostrado que los suplementos o complementos basados en aminoácidos esenciales (AAE) no generan saciedad significativa y pueden administrarse junto con las comidas para potenciar el efecto de una dieta con una ingesta subóptima de proteínas (Ispoglou et al., 2021). Por ejemplo, un ensayo clínico realizado por Bauer et al., (2015) informó que 13 semanas de administración de suplementos nutricionales de suero enriquecidos con Vitamina D y leucina mejoraron la masa muscular y la función de las extremidades inferiores en adultos mayores con sarcopenia. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de explorar fuentes proteicas alternativas y sostenibles, que contengan todos los aminoácidos, de fácil digestión y ambientalmente responsables, permitiendo a los adultos mayores alcanzar sus requerimientos nutricionales.

Entre las fuentes proteicas emergentes y sostenibles, la espirulina (*Arthrospira platensis*) se destaca como una alternativa prometedora, no solo por su elevado valor nutricional, sino también por su bajo impacto ambiental. Esta cianobacteria azul verdosa ha sido ampliamente reconocida a nivel internacional. La Organización Mundial de la Salud (OMS) la ha catalogado como uno de los alimentos más completos del planeta (V. D. Costa et al., 2022), mientras que la NASA la ha empleado como suplemento nutricional para astronautas (Soni et al., 2021), debido a su elevado contenido proteico y su perfil completo

de aminoácidos esenciales (M. Chang & Liu, 2024; ElFar et al., 2022; Fabre et al., 2022). Además, su composición rica en vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, como la ficocianina y los ácidos grasos poliinsaturados, le otorgan propiedades funcionales adicionales (Han et al., 2021; Sahil et al., 2024). Estas características de la espirulina la convierten en una opción atractiva como matriz para la formulación de complementos o suplementos proteicos para los adultos mayores.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

Uno de los suplementos dietéticos más consumidos a nivel mundial es la espirulina, reconocida por su alto valor nutricional, especialmente por su contenido proteico y la presencia de compuestos bioactivos como pigmentos, vitaminas, minerales, ácidos grasos insaturados y un perfil completo de aminoácidos esenciales (Han et al., 2021; Silva et al., 2023). Debido a que el presente estudio propone abarcar las necesidades de los adultos mayores con respecto al consumo de proteínas, se plantea un complemento alimenticio basado en espirulina. No obstante, en su forma fresca, la espirulina presenta un elevado contenido de humedad, lo que la hace altamente susceptible a la proliferación microbiana. Esta característica limita significativamente su manipulación, almacenamiento y distribución, haciendo necesaria la aplicación de técnicas de conservación adecuadas que permitan estabilizar sus propiedades y extender su vida útil (Silva et al., 2023). Por tanto, para mejorar su estabilidad, la espirulina fresca es usualmente comercializada como polvo (Demarco et al., 2022), el cual destaca por su versatilidad al permitir su incorporación en distintas matrices. Adicionalmente se presentan formatos como tabletas o cápsulas (Bocaneala et al., 2025).

El proceso convencional más utilizado para la obtención de espirulina en polvo es el secado por aspersion, el cual consiste en someter la biomasa fresca a altas temperatura (Mohammadi et al., 2021). Si bien esta técnica se destaca porque promueve un secado más rápido y una exposición a corto plazo al calor, también puede promover efectos negativos como provocar reacciones químicas no deseadas, entre ellos: oxidación de

pigmentos y reacciones de Maillard entre azúcares y grupos aminos, los cuales pueden comprometer su calidad nutricional y funcional (Demarco et al., 2022; Luo et al., 2024). Además, durante el proceso pueden liberarse compuestos azufrados volátiles, generando olores y sabores desagradables (similares a olor a pescado) que afectan negativamente su aceptación sensorial (Paula da Silva et al., 2021).

Frente a estas limitaciones, una de las técnicas propuestas es la microencapsulación por secado por atomización (Özyurt et al., 2024). Este proceso consiste en atomizar una dispersión líquida compuesta por espirulina y un agente encapsulante, como la maltodextrina, en una corriente de aire caliente, donde la rápida evaporación del agua genera partículas secas en forma de microcápsulas (Xiao et al., 2022). Además, la microencapsulación contribuye a enmascarar los sabores y olores indeseables, lo que incrementa su aceptabilidad sensorial (Mohammadi et al., 2021).

Dentro de los factores que determinan la eficiencia de la microencapsulación por secado por atomización, destacan la temperatura de secado y la relación entre espirulina y agente encapsulante (da Silva Júnior et al., 2023). Además, la temperatura elevada, aunque necesaria para la evaporación del solvente, puede comprometer la integridad de la espirulina; mientras que la proporción adecuada de maltodextrina puede mejorar la formación de partículas y prevenir pérdidas del complemento alimenticio resultante.

Por lo anterior expuesto, se plantea la siguiente interrogante: ¿En qué medida la temperatura y la relación Espirulina:Maltodextrina influyen en el contenido de proteínas y rendimiento en la microencapsulación por secado por atomización para la obtención de un complemento alimenticio?

### **1.3 Objetivos del estudio**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Diseñar el proceso de producción a nivel plata piloto para la obtención de un complemento alimenticio a partir de la microalga espirulina.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente la materia prima (espirulina fresca).
- Microencapsular la espirulina mediante el método de secado por atomización variando temperatura y proporción de espirulina:maltodextrina (E:M) según diseño factorial.
- Determinar las condiciones óptimas de operación en el secado por atomización a nivel laboratorio.
- Evaluar la estabilidad microbiológica del complemento alimenticio durante almacenamiento.
- Realizar la evaluación económica de una propuesta de planta piloto para la producción del complemento alimenticio.

### **1.4 Antecedentes investigativos**

A medida que las personas envejecemos, pueden ocurrir cambios en la digestibilidad de las proteínas y lípidos debido a la disminución de la producción de pepsina y lipasa. Esto puede resultar en la pérdida de masa muscular, función y fuerza, así como en la aparición de condiciones como la sarcopenia y fragilidad (Calligaris et al., 2022) La Sarcopenia es un trastorno muscular que afecta a la población correspondiente a adultos mayores, se caracteriza por la disminución acelerada de la masa muscular, fuerza y función; por consiguiente, afecta su desempeño en las funciones diarias limitando su capacidad para llevar una vida independiente (Scholes, 2022). En investigaciones llevadas a cabo en este grupo de edad, especialmente en pacientes hospitalizados o residentes en centros geriátricos, se ha observado una superposición entre sarcopenia y desnutrición, siendo ambos factores que aumentan la vulnerabilidad de esta población a enfermedades agudas. (Ramos-Ramirez & Soto, 2020). En la actualidad, el principal método para abordar estas necesidades es la inclusión de suplementos proteicos o proteínas altamente biodisponibles que proporcionen una buena combinación de aminoácidos (Calligaris et al., 2022; Lee et al., 2022; Zhu et al., 2023).

Consecuentemente, la microalga espirulina está considerada una buena fuente de proteínas debido a su cantidad (40 - 70 % w/w) y a su digestibilidad (Pootthachaya et al., 2023). Según Iqbal & Hadiyanto, (2020) ; la espirulina presenta importantes cantidades de minerales, vitaminas y componentes bioactivos que tienen un gran impacto positivo en la salud; sin embargo, estos pueden desestabilizarse durante el almacenamiento debido a su sensibilidad a la humedad, luz, temperatura y pH. Por lo tanto, se plantean estrategias tales como la microencapsulación como un método efectivo y económico para proteger los compuestos de la espirulina ante condiciones adversas (Iqbal & Hadiyanto, 2020). No obstante, debido a los múltiples beneficios atribuidos a la espirulina, perfila como un potencial complemento alimenticio. Particularmente, se estima que el mercado global de proteínas basadas en microalgas alcance los 0,84 mil millones de dólares para el año 2023 (Thevarajah et al., 2022).

Paula da Silva et al. (2021) presentó un caso particular de aplicación directa de la espirulina en una galleta vegana, donde se resaltó que una de las limitaciones para la adición de espirulina fresca en alimentos es debido a sus características sensoriales, debido a que al 10% de espirulina, suele emitir un aroma desagradable frente a la oxidación; además de su característico color verde, el cual tampoco fue agradable para el panel de evaluadores. En este contexto, la microencapsulación por secado por atomización se presentó como una alternativa para enmascarar esas propiedades; además, obtuvo galletas con 40% más proteínas (debido a la adición de espirulina microencapsulada) sin perder la calidad sensorial (Paula da Silva et al., 2021).

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico



#### 2.1.1. Algas: macroalgas y microalgas.

El término “alga”, introducido por primera vez en 1753 por Linneo, hace referencia a un conjunto diverso y extenso de organismos fotosintéticos (Khalil et al., 2021). Las algas son ricas en compuestos bioactivos, por tanto, han encontrado aplicación en múltiples sectores, incluyendo la producción de biocombustibles, cosméticos, bioplásticos, alimentos para animales, fertilizantes, nutracéuticos y productos alimenticios destinados al consumo humano (Hachicha et al., 2022; Mendes et al., 2022).

Las algas se clasifican en dos grandes grupos: macroalgas, que son organismos multicelulares de gran tamaño y comúnmente conocidas como algas marinas; y microalgas, que son organismos unicelulares, microscópicos y de rápido crecimiento (Ahmed et al., 2023). A continuación, en la **Tabla 1** se presenta la comparación entre ambos grupos.

**Tabla 1**

*Principales diferencias entre macroalgas y microalgas.*

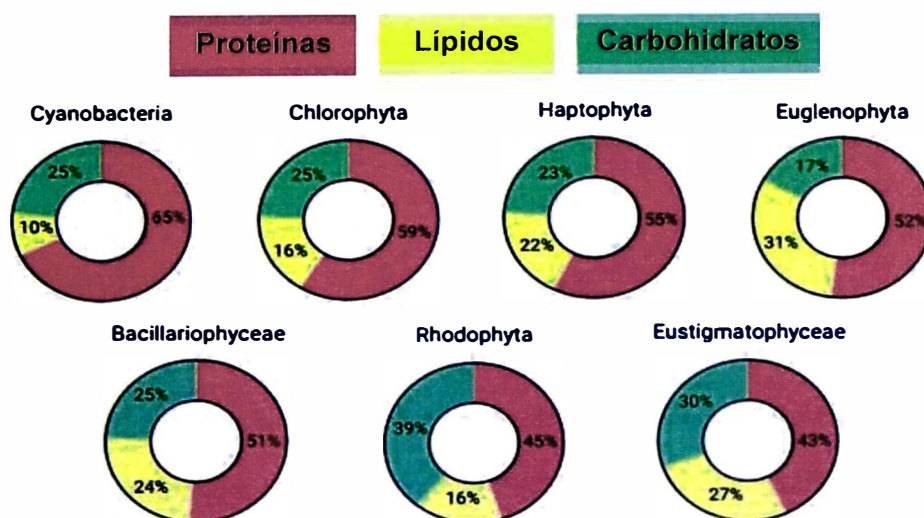
	Macroalgas	Microalgas
<b>Nivel de organización</b>	Multicelulares	Unicelulares
<b>Dominio celular</b>	Exclusivamente eucariotas	Mayormente eucariotas, aunque incluye procariotas como cianobacterias
<b>Clasificación taxonómica</b>	Algas verdes (Phylum Chlorophyta), algas pardas (Clase Pheophyceae) y algas rojas (Phylum Rhodophyta)	Charophyta, Chlorarachniophyta, Euglenozoa (euglenoideos), Bacillariophyceae (diatomeas), Cyanobacterias, entre otras.
<b>Tamaño celular</b>	De pocos milímetros hasta varios metros	Generalmente de 1 a 100 $\mu\text{m}$
<b>Imagen representativa</b>	 Rhodophyta	 Cyanobacteria

*Nota:* Adaptado de (Garofalo et al., 2022; Hachicha et al., 2022)

En las últimas décadas, las microalgas han adquirido mayor relevancia como una fuente alimenticia prometedora, no solo por su notable valor nutricional sino también por su adaptabilidad. Esto es atribuido a que las microalgas, a diferencia de las plantas, no se limitan a la fotosíntesis oxigénica, sino que también realizan metabolismo heterotrófico o mixotrófico, lo que les permite crecer en condiciones ambientales extremas, incluso en ausencia de luz (Garofalo et al., 2022), por tanto, pueden estar presentes desde las profundidades del océano hasta en el hielo ártico (Khalil et al., 2021). Además, las microalgas son capaces de sintetizar proteínas, lípidos y carbohidratos altamente digestibles, y presentan un perfil nutricional que incluye ácidos grasos esenciales, vitaminas y minerales en proporciones beneficiosas para la salud humana (Diaz et al., 2023). Sin embargo, debido a su flexibilidad metabólica y diversidad genética, la composición macromolecular promedio varía considerablemente entre las distintas especies de microalgas (**Figura 1**). Por ejemplo, en óptimas condiciones de crecimiento, las cianobacterias suelen acumular mayores concentraciones de proteínas que otros filos, mientras que Rhodophyta y Euglenophyta almacenan más carbohidratos y lípidos, respectivamente (Garofalo et al., 2022).

**Figura 1**

*Composiciones macromoleculares promedios de microalgas.*



*Nota:* Adaptado de Garofalo et al., (2022)

### **2.1.2. *Espirulina***

La espirulina, considerada uno de los organismos vivos más antiguos del planeta, es una cianobacteria que se clasifica dentro de las cianofíceas, comúnmente conocidas como “algas verdeazuladas” (Sinetova et al., 2024). Esta microalga se desarrolla en ambientes alcalinos, ricos en nutrientes nitrogenados y fosforados, expuestos a la luz y expuestos a temperaturas elevadas, condiciones que favorecen su crecimiento (Nabti et al., 2023).

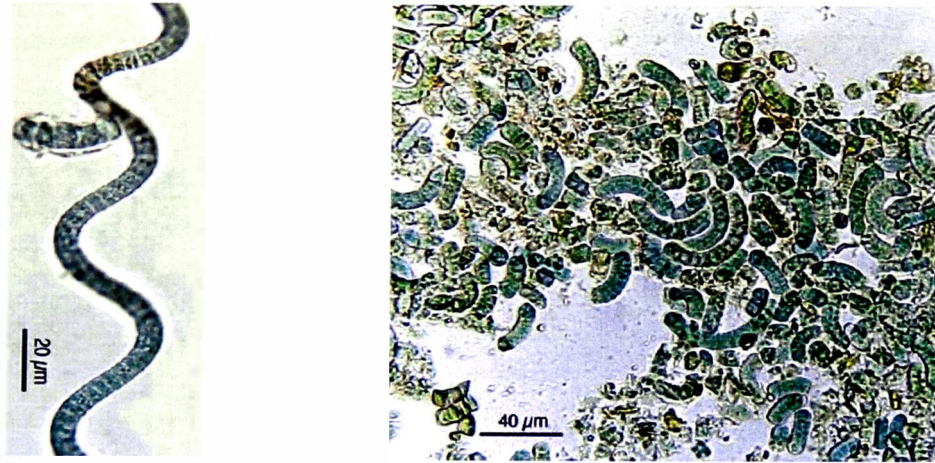
Su origen se remonta a lagunas alcalinas ubicadas en regiones de África y América Latina, donde ha sido tradicionalmente consumida por comunidades como los kanembous en el lago Chad y los aztecas en el Valle de México (AlFadhly et al., 2022). A pesar de su uso ancestral, fue recién en 1967 que la espirulina fue reconocida como una fuente de alimento para el futuro por la Asociación Internacional de Microbiología Aplicada debido a su alto valor nutricional y potencial biotecnológico (Costa et al., 2019).

En el caso del Perú, registros históricos indican la presencia natural de espirulina en cuerpos de agua como la laguna de Huacachina (Ica), el lago Orovilca, las Ventanillas de Otuzco (en la costa cercana a Lima) y el lago Titicaca (Lima Eugenio, 2021). Sin embargo, debido al incremento de la contaminación ambiental, actualmente ya no se reporta su presencia en estos ecosistemas de forma natural. Cabe resaltar que el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) conserva aún cepas originarias de espirulina procedentes de Ica, según lo corroborado por el biólogo Alberto Oscanoa durante una visita a sus instalaciones.

Desde el punto de vista morfológico, la espirulina se caracteriza por sus filamentos en forma de espiral o helicoidal (hélice abierta a la izquierda). Esta morfología es la que le confiere su nombre y es fundamental para su identificación (Nosratimovafagh et al., 2023). En la **Figura 2** se muestra una vista a nivel microscópico de la espirulina, permitiendo observar su morfología (Chaouachi et al., 2023; Nicoletti, 2016).

## Figura 2

*Células de espirulina agrupadas en filamentos.*



*Nota.* A la derecha, se observa la espirulina fragmentada luego de haber sido procesada para su comercialización. Adaptado de (Nicoletti, 2016).

Desde el punto de vista nutricional, la espirulina se distingue por su alta concentración de proteínas (60–70 % en base seca), superando significativamente a otras fuentes como carnes, leche en polvo, huevos o legumbres (Anvar & Nowruzzi, 2021). Además, cerca del 47 % de sus proteínas corresponden a aminoácidos esenciales, lo cual refuerza su valor como fuente completa de proteína para la alimentación humana (Nosratimovafagh et al., 2023). Aporta también carbohidratos fácilmente digeribles, lípidos ricos en ácidos grasos poliinsaturados, y una amplia gama de vitaminas y minerales esenciales como hierro, calcio, magnesio y potasio (AlFadhly et al., 2022). Asimismo, contiene pigmentos bioactivos como la ficocianina (14 – 20 %), carotenoides (0.5 %), junto con compuestos fenólicos, responsables de efectos antioxidantes, antiinflamatorios, anticancerígenos y neuroprotectores (Bortolini et al., 2022; Nabti et al., 2023).

**Tabla 2***Composición de la espirulina presentes en 10 g de muestra.*

<b>Composición general</b>			
Proteínas	60 - 70 %	Minerales	7.0 – 13.0 %
Carbohidratos	15 - 25 %	Fibras	3.6 – 6.0 %
Lípidos totales	5.0 – 10.0 %		
<b>Vitaminas (por 10 g)</b>			
Vitamina A	23,000 UI	Vitamina C	0.8 mg
Vitamina B1, B2, B3	0.4 – 1.4 mg	Vitamina D	1,200 UI
Vitamina B6, B12	20 – 60 µg	Vitamina E	1.0 mg
Vitamina K1, K2	200 µg	Inositol	6.4 mg
Biotina	0.5 – 1.0 µg	Ácido pantoténico	10 µg
Ácido fólico	-		
<b>Minerales (por 10 g)</b>			
Potasio	140 mg	Fósforo	60 mg
Sodio	90 mg	Magnesio	40 mg
Calcio	70 mg	Hierro	15 mg
Manganeso	0.5 mg	Zinc	0.3 mg
Cobre	120 µg	Iodo	55 µg
Germanio	60 µg	Cromo	25 µg
Selenio	10 µg		
<b>Aminoácidos esenciales</b>		<b>Aminoácidos no esenciales</b>	
Leucina	540 mg	Glutámico	910 mg
Valina	400 mg	Aspártico	610 mg
Isoleucina	350 mg	Alanina	470 mg
Treonina	320 mg	Arginina	430 mg
Lisina	290 mg	Glicina	320 mg
Fenilalanina	280 mg	Serina	320 mg
Metionina	140 mg	Tirosina	300 mg
Histidina	100 mg	Prolina	270 mg
Triptófano	90 mg	Cistina	60 mg

*Nota:* Adaptado de Nosratimovafagh et al., (2023).

A pesar de su elevado valor nutricional, la espirulina fresca presenta un alto contenido de humedad (superior al 70 %) y un valor elevado de actividad del agua, lo que la convierte en un producto altamente perecedero y susceptible al deterioro microbiológico (Stramarkou et al., 2021). Por tanto, es necesaria la aplicación de tecnologías de conservación que garanticen su estabilidad sin comprometer su calidad nutricional y funcional (Silva et al., 2023).

**Producción de espirulina.** La espirulina se produce utilizando fotobiorreactores ubicados en el interior. Los fotobiorreactores de microalgas se pueden dividir en dos grupos principales: sistemas cerrados y abiertos. Debido a su facilidad de escalamiento, mantenimiento y sus menores costos operativos, los diseños de raceway son los diseños de fotobiorreactores más comunes. Se estima que el 90% de la producción mundial de biomasa de microalgas se realiza utilizando reactores raceway (de Souza et al., 2019).

**Cultivo de microalgas.** El cultivo de microalgas requiere de condiciones favorables de CO<sub>2</sub>, luz y nutrientes; puede llevarse a cabo en sistemas abiertos o cerrados. Las microalgas consumen grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, que posteriormente se convierte en biomasa, y liberan oxígeno (O<sub>2</sub>) a la atmósfera a través de la fotosíntesis. (de Souza et al., 2019).

### Figura 3

*Cultivo de espirulina a diferentes escalas*

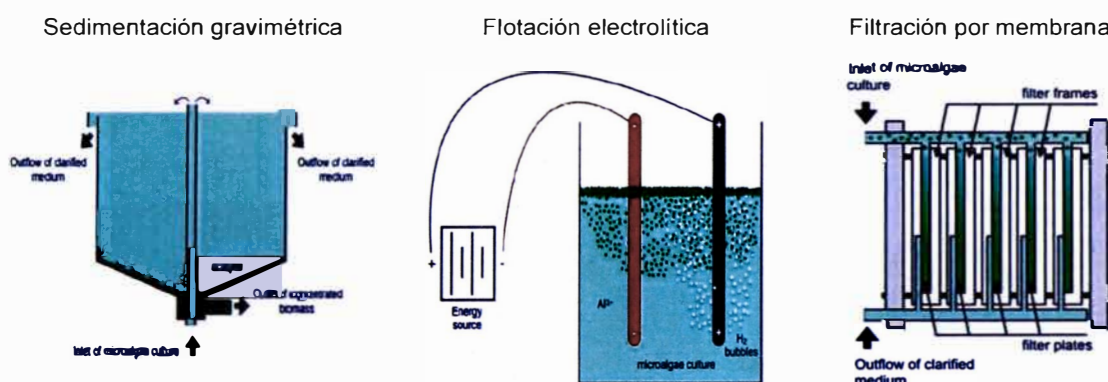


*Nota.* Las fotografías mostradas son referenciales, adaptado de (Universidad Simón Bolívar, 2020), (Fernandez, 2014).

**Cosecha / Separación del medio.** Es un proceso de separación que involucra una mezcla heterogénea compuesta por un sólido discontinuo (las microalgas) y una fase líquida continua (el medio de cultivo). (Roselet et al., 2019) La recuperación de la biomasa es esencial para la producción de bioproductos a escala comercial e industrial. Se han propuesto varios métodos para esta etapa de producción, como la floculación química, centrifugación, filtración, sedimentación natural, flotación, etc. Cada método tiene sus ventajas y desventajas en términos de eficiencia, costo y viabilidad; la elección del método depende de diversos factores tales como eficiencia, costo, consumo de energía y la reutilización del agua. (de Souza et al., 2019).

**Figura 4**

*Operaciones unitarias en la cosecha de espirulina*



Nota. Adaptado de (Roselet et al., 2019).

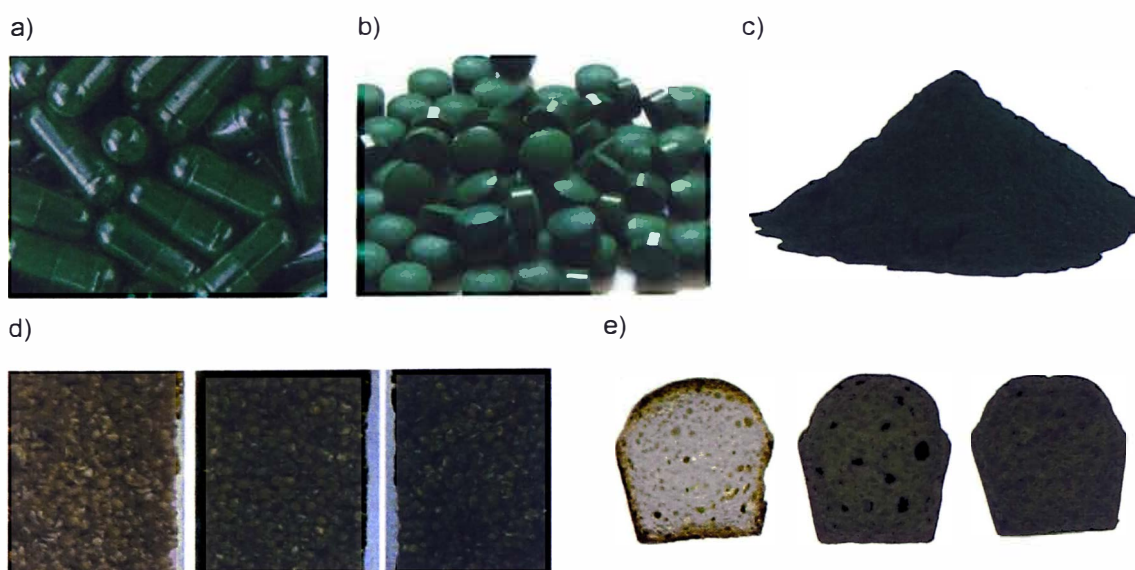
**Secado de biomasa.** Existen diversos métodos para el secado, como el secado por congelación, al sol, en horno, etc. Los parámetros involucrados en la degradación de ciertos componentes celulares importantes de las microalgas son la presión y la temperatura. La elección del método secado está relacionada principalmente con los costos de energía y el tiempo de procesamiento. Por otro lado, el secado por atomización es un método que se caracteriza por tener un costo específico de energía más bajo con una mayor productividad en comparación con otros métodos (de Souza et al., 2019); además, mediante la protección de la biomasa con un material encapsulante, se puede

llegar a proteger los compuestos termolábiles, lo que permite obtener micropartículas secas a escala industrial (Berraquero-García et al., 2023).

En el mercado, la espirulina se comercializa principalmente en forma de polvo y comprimidos, ya sea sola o combinada con otros compuestos. Entre estas presentaciones, el formato en polvo destaca por su versatilidad, ya que permite su incorporación directa en diversas matrices alimentarias, facilitando así su consumo en distintos grupos poblacionales (Bocaneala et al., 2025). Esta adaptabilidad, junto con su alto contenido proteico y una composición nutricional equilibrada, han posicionado a la espirulina como un ingrediente de interés en el desarrollo de complementos alimenticios (Nicoletti, 2016). En la **Figura 5**, se muestran diferentes presentaciones comerciales de la espirulina, así como ejemplos de su aplicación en alimentos funcionales destinados al consumo humano.

### Figura 5

#### *Presentaciones de espirulina para consumo*



*Nota.* a) cápsulas, b) pastillas comprimidas, c) polvo, d) Aplicación de espirulina en barra de cereal y e) Aplicación de espirulina en pan. Adaptado de Bitam & Aissaoui, (2020); Hernández-López et al. (2023) y Lucas et al. (2019).

No obstante, durante el procesamiento de la espirulina, especialmente en su etapa de secado, se ha reportado la generación de sabores y olores desagradables, atribuibles a la formación de aldehídos y compuestos azufrados (Paula da Silva et al., 2021). Estas

características sensoriales indeseables pueden afectar la aceptación del consumidor y representan uno de los principales desafíos en productos dirigidos al consumo directo (Colonia et al., 2023; Jia et al., 2024). Por tanto, resalta la necesidad de explorar la aplicación de tecnologías innovadoras que permitan desarrollar un complemento alimenticio a base de espirulina que no degraden sus compuestos y así preservar su contenido nutricional, así como sea aceptable sensorialmente.

### 2.1.3. Técnicas de secado para espirulina

La etapa final de la producción de espirulina, independientemente de su uso previsto, es el secado. Este proceso es fundamental para garantizar la reducción del contenido de agua, extendiendo significativamente su vida útil (Mróz et al., 2024). Sin embargo, es importante reconocer que también se produce una degradación significativa del valor nutricional debido a cambios estructurales, texturales y bioquímicos indeseables (Wang et al., 2024). Además, el secado puede influir significativamente en el perfil aromático de la espirulina debido a las reacciones químicas que se pueden desencadenar (Ughetti et al., 2024). A continuación, se presentan diferentes tecnologías de secado.

**Figura 6**

*Tecnologías de secado de espirulina.*



Nota: Adaptado de (Mróz et al., 2024).

**Secado en horno.** la biomasa de espirulina se extiende en una capa fina sobre bandejas y se coloca dentro de un horno a una temperatura específica. El aire caliente que circula dentro del horno evapora la humedad y lo va secando gradualmente. Es más económico en comparación con métodos de secado más especializados; sin embargo, suele tener una velocidad de secado lenta y puede consumir mucha energía. Este método también puede causar el mayor deterioro, especialmente si se utiliza una temperatura alta durante un período prolongado (Ughetti et al., 2024).

**Secado solar.** Convencionalmente, implica extender una capa delgada de biomasa sobre una superficie y exponerla a la luz solar. Es un método económico y sencillo, pero presenta limitaciones como baja eficiencia, dependencia climática y riesgo de contaminación por polvo, insectos o microorganismos (Guo et al., 2024; Hernández et al., 2024).

**Secado por tambor.** Consiste en hacer pasar la biomasa de microalgas por un cilindro giratorio calentado, donde el contacto directo con la superficie caliente permite la evaporación del agua. El producto deshidratado se retira como una lámina delgada, que luego puede procesarse en escamas, gránulos o polvo. Esta técnica permite una operación continua y de gran capacidad, lo que la hace adecuada para la producción industrial de espirulina (Hernández et al., 2024). Variaciones como el uso de lechos inertes en secadores rotatorios también han sido propuestas para optimizar el proceso (Silva et al., 2019)

**Liofilización.** Consiste en exponer las microalgas a bajas temperaturas, seguido de la colocación de la biomasa congelada en un entorno de vacío. Esto facilita la sublimación del hielo del estado sólido al vapor sin pasar de la fase líquida (Foo et al., 2023). Es considerada como el mejor método para preservar productos sensibles al calor como la espirulina, pero debido a su alto consumo de energía parece ser demasiado costosa y menos accesible para fines industriales (Mróz et al., 2024).

**Secado al aire.** Consiste en extender la biomasa de espirulina cosechada en capas finas y dejarla secar al aire libre. Si bien este método es sencillo y rentable, no siempre garantiza un secado uniforme y puede ser susceptible a la contaminación por factores ambientales como microorganismos. Además, el secado al aire puede no ser adecuado para la producción a gran escala debido a su baja velocidad de secado y a los posibles requisitos de espacio (Ughetti et al., 2024).

**Secado por aspersión.** Consiste en pulverizar biomasa de espirulina en una corriente de aire caliente, lo que evapora rápidamente la humedad y deja partículas de polvo secas. Este método ofrece un mayor control sobre el proceso de secado y produce un polvo fino y consistente. El secado por aspersión es adecuado para la producción a gran escala, ya que puede manejar eficientemente grandes volúmenes de biomasa de espirulina. Sin embargo, requiere equipo especializado y puede ser costoso y consumir mucha energía.

**Secado por radiación electromagnética.** Algunos estudios han demostrado que los sistemas de secado convencionales pueden ser ineficaces para preservar la calidad nutricional de las microalgas, además de agregar altos costos al proceso si no se realiza en condiciones adecuadas. Por tanto, diversos estudios han aplicado la radiación electromagnética (infrarrojo y microondas). En el secado infrarrojo, la energía penetra en la superficie del material y crea un calentamiento interno por vibración molecular, eliminando la humedad. El material se calienta intensamente, lo que aumenta la velocidad de secado y ahorra energía. Entre los puntos positivos del secado infrarrojo se encuentran su alta eficiencia en la conversión de la energía suministrada en calor, la mínima pérdida de calor al entorno y la facilidad de control y manejo. Por otro lado, en el secado por microondas, la agitación que las microondas provocan en las moléculas de agua dentro de los materiales, resultante de mecanismos dipolares e iónicos, resulta en velocidades altas de calentamiento y eliminación de humedad con un tiempo significativamente reducido y una mejor uniformidad (Silva, Graton, et al., 2023)

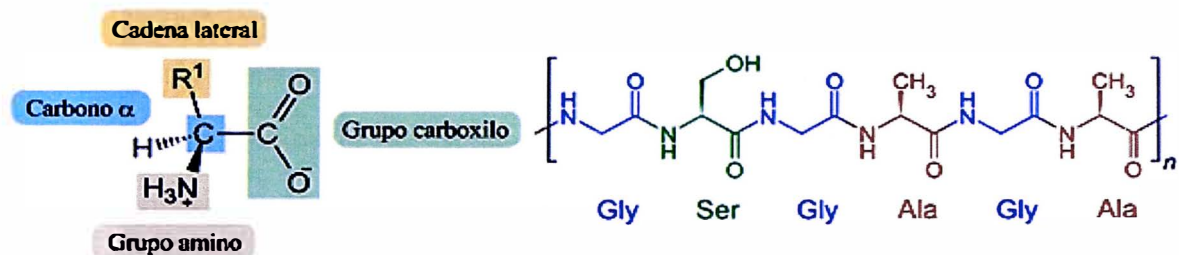
#### 2.1.4. Proteínas

Las proteínas son biomoléculas complejas conformadas por cadenas de aminoácidos (entre 80 y 300) e importantes por ser responsables de diversas funciones biológicas, de la presencia de otros elementos orgánicos o inorgánicos y de la forma tridimensional que presenten. Además, pueden cumplir la función de enzimas, hormonas, anticuerpos, moléculas transportadoras, almacenadoras, estructurales, entre otras (Alvarado Jaramillo et al., 2012; López Fandiño, 2016)

Como se muestra en la **Figura 7**, los aminoácidos están formados por un grupo amino ( $\text{NH}_2$ ), un grupo carboxilo ( $\text{COOH}$ ) unidos a un carbono central llamado carbono  $\alpha$ , el cual además presenta un hidrógeno y una cadena lateral ( $-\text{R}$ ) el cual caracteriza a cada uno de los 20 aminoácidos (Yruela & Sebastián, 2014).

**Figura 7**

*Estructura química de un aminoácido y la conformación en una proteína.*



Nota. Adaptado de (Yruela & Sebastián, 2014).

Se reconocen cuatro niveles estructurales o de organización de las proteínas; la estructura primaria hace referencia a la secuencia específica de la cadena de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos, es decir, del número y orden de aminoácidos que constituyen una proteína, conocer esta información es importante para entender su función (Luque Guillén, 2009). Por otro lado, la estructura secundaria se refiere a la configuración espacial producto del pliegue de las cadenas polipeptídicas para formar estructuras hélice alfa (Hélice  $\alpha$ ) u hoja beta plegada (hoja  $\beta$  plegada) por enlaces puentes de hidrógeno (Alvarado Jaramillo et al., 2012). Con respecto a la estructura terciaria, esta es tridimensional y globular originada a partir del pliegue de una estructura secundaria sobre

sí misma mediante enlaces covalentes y no covalentes (Yruela & Sebastián, 2014). Por último, la estructura cuaternaria comprende la asociación de 2 o más subunidades polipeptídicas mediante enlaces covalentes y no covalentes (Alvarado Jaramillo et al., 2012). En la **Tabla 3**, se presentan los niveles de organización estructural de las proteínas.

En la actualidad, las fuentes de proteínas comunes son de origen animal (carne, productos lácteos y huevos) y vegetal (soja, tofu). Generalmente, las proteínas de origen animal son de alta calidad y tienen un perfil de aminoácidos equilibrado siendo la carne una de las fuentes nutritivas más importantes por su alto valor biológico (Markou et al., 2023). Sin embargo, la producción de carne es responsable de severos daños ambientales como la deforestación; además, a esta actividad se le atribuye el 15% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Etter et al., 2024). Por tanto, para alimentar de forma sostenible a la creciente población, es deseable una transición a las proteínas de origen vegetal. En cuanto a las fuentes de proteínas de origen vegetal, la más importante es la soja con 35% a 40% de proteínas (Markou et al., 2023). Sin embargo, tanto la soja como otras fuentes vegetales comunes tienen aplicaciones limitadas por su sabor indeseable como el amargor (Nikbakht Nasrabadi et al., 2021); además, no todas cuentan con todos los AAE, contienen antinutrientes inhibidores como tripsina y taninos, y en algunos casos compuestos alérgenos (Markou et al., 2023).

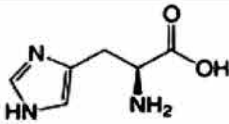
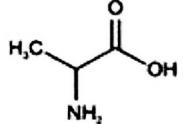
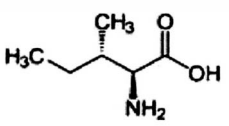
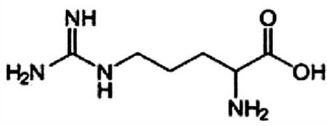
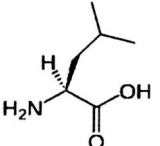
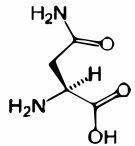
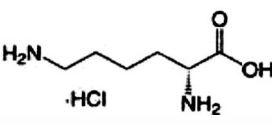
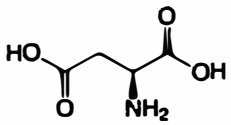
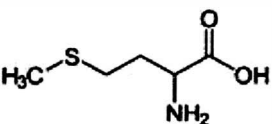
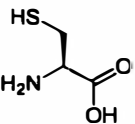
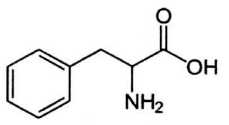
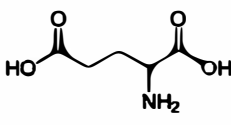
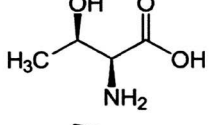
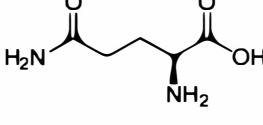
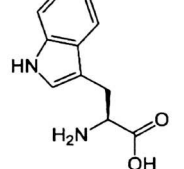
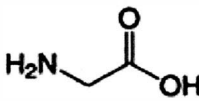
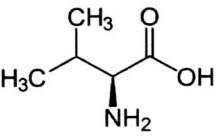
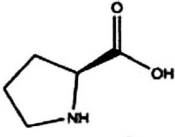
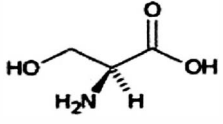
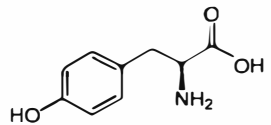


Las fuentes alternativas que desempeñarán un papel vital en el futuro en las dietas humanas y animales incluyen insectos, análogos de la carne basadas en plantas (Ravishankar et al., 2024), carne cultivada o carne *in vitro* (Post & Hocquette, 2017) y microorganismos. Recientemente, las proteínas a base de insectos a generado interés por su alto contenido de proteínas y fibra, pero el impulso de su consumo se ve limitada por el bajo nivel de aceptación por parte del consumidor; de manera similar, los análogos de carne y la carne *in vitro* presentan esta desventaja (Siegrist & Hartmann, 2023). La proteína microbiana, proteína unicelular o bioproteína se refiere a una masa de células considerada una fuente proteína emergente. La biomasa de algunos microbios, como levaduras, micelios fúngicos y bacterias, contiene típicamente más del 30% de proteína con un perfil de aminoácidos bien equilibrado. Actualmente, los principales productores de proteína unicelular son los hongos y las bacterias, ya que son conocidos por su rápido crecimiento y su eficiencia para generar un mayor contenido de proteína.

**Análisis de aminoácidos.** La característica más importante que define a una proteína, desde un punto de vista nutricional, son sus aminoácidos esenciales (AAE) (Mota et al., 2016) estos son la histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina, se reconocen como AAE porque tienen esqueletos de carbono que no pueden ser sintetizados por los humanos; por lo tanto, deben ser adquiridos a partir de la dieta. Por el contrario, los demás aminoácidos son considerados no esenciales porque pueden ser sintetizados por el cuerpo (Lopez & Mohiuddin, 2024). En la **Tabla 4**, se presenta la estructura de los veinte aminoácidos.

**Tabla 4**

*Aminoácidos esenciales y no esenciales.*

Aminoácido esencial	Estructura química	Aminoácido no esencial	Estructura química
Histidina (His)		Alanina (Ala)	
Isoleucina (Ile)		Arginina (Arg)	
Leucina (Leu)		Asparagina (Asn)	
Lisina (Lys)		Ácido aspártico (Asp)	
Metionina (Met)		Cisteína (Cys)	
Fenilalanina (Phe)		Ácido glutámico (Glu)	
Treonina (Thr)		Glutamina (Gln)	
Triptófano (Trp)		Glicina (Gly)	
Valina (Val)		Prolina (Pro)	
		Serina (Ser)	
		Tirosina (Tyr)	

Nota. Adaptado de (Yada, 2017).

**Desnaturalización de proteínas.** Proceso en el cual se rompen los enlaces y las fuerzas que mantienen unidas las estructuras secundaria, terciaria y cuaternaria dando como resultado a la cadena polipeptídica sin alterar la secuencia de aminoácidos (Sun, 2005); por lo tanto, la proteína modifica su actividad biológica y su propiedades físicas y químicas. Es provocado principalmente por cambios extremos de pH o temperatura; pero también se puede desnaturalizar una proteína cuando es sometida a agentes físicos como calor, radiación, congelación repetida y alta presión; de la misma forma, los agentes químicos como ácidos, álcalis, disolventes orgánicos y soluciones concentradas de urea pueden influir en la desnaturalización (Blanco & Blanco, 2022; Engelking, 2015; Wei et al., 2018; G. Zhang et al., 2023). A continuación, se muestra la **Figura 8** donde se presenta gráficamente el cambio estructural de la proteína producto de la desnaturalización.

### **Figura 8**

*Desnaturalización de proteínas*



*Nota.* Adaptado de (Blanco & Blanco, 2022)

En el caso de la espirulina, se ha identificado la presencia de más de 2000 moléculas de proteína en su composición (J. Zhang et al., 2023). Sin embargo, a pesar de su elevado contenido proteico, la digestibilidad de estas proteínas se ha convertido en una limitación importante para su aprovechamiento nutricional (M. M. Costa et al., 2023). La espirulina posee una pared celular peptidoglicano recalcitrante que interfiere en la biodisponibilidad y accesibilidad de los nutrientes. Además, muchas de sus proteínas bioactivas están covalentemente unidas a pigmentos, formando complejos proteina-

pigmento (Spínola et al., 2023). Esta compleja organización intracelular reduce significativamente la bioaccesibilidad y digestibilidad de sus proteínas de alta calidad.

Ante estas limitaciones, diversos investigadores buscan inducir la desnaturalización proteica, la ruptura de enlaces no covalentes y la exposición de grupos reactivos mediante la aplicación de tratamientos físicos, químicos o enzimáticos, con el objetivo de mejorar las propiedades fisicoquímicas y aumentar su perfil nutricional (Spínola et al., 2023; J. Zhang et al., 2022).

### **2.1.5. Técnicas de cuantificación de proteínas**

Las proteínas son macronutrientes esenciales para el organismo humano, involucradas en funciones estructurales, enzimáticas, hormonales e inmunológicas (Nadathur et al., 2017). Se han desarrollado numerosos métodos para medir el contenido de proteínas, entre los más comunes son Kjeldahl, Dumas, espectroscopia infrarroja y unión de colorantes aniónicos. Estos métodos son empleados comúnmente en el etiquetado nutricional y/o control de calidad. Por otro lado, existen otros métodos como Bradford y Ácido bicinconínico los cuales se utilizan comúnmente en laboratorios de investigación (S. K. C. Chang & Zhang, 2017).

El método estándar ISO para cuantificar el contenido proteico de diversas matrices, como por ejemplo la leche y productos lácteos, es Kjeldahl, que consiste en la determinación del nitrógeno total por oxidación de la muestra con ácido sulfúrico y posterior titulación de sulfato de amonio con NaOH (Hueso et al., 2022). A pesar de su aceptación, este método es laborioso, requiere reactivos corrosivos y es destructivo, además de necesitar grandes volúmenes de muestra. En contraste, el método Dumas, que también cuantifica el nitrógeno, a alta temperatura, es más rápido, seguro y automatizable, ya que no utiliza sustancias químicas peligrosas. No obstante, tanto Kjeldahl como Dumas presentan la limitación de no diferenciar entre nitrógeno proteico y no proteico, lo que puede afectar la precisión en matrices con alta proporción de compuestos nitrogenados no proteicos (Rosero-Chasoy et al., 2022).

En los últimos años, la alternativa de utilizar ensayos colorimétricos para la determinación de proteínas se ha extendido ampliamente debido a que son rápidos, fáciles de usar y requieren una pequeña cantidad de muestra. Existen dos métodos colorimétricos principales que difieren en su base: el ensayo de Bradford que se basa en la unión del colorante Azul Coomassie G250 a la proteína y el ensayo de ácido bicinónico (BCA), basado en la reacción de Biuret y la reducción de iones de cobre en condiciones alcalinas (Reinmuth-Selzle et al., 2022).

Se han desarrollado diversos métodos para estimar el contenido de proteínas, los cuales difieren en su fundamento químico, sensibilidad, precisión y aplicabilidad. En la **Tabla 5**, se presentan las técnicas de cuantificación de proteínas más comunes, tanto en aplicación como en la industria.

**Tabla 5***Métodos comunes de cuantificación de proteínas.*

<b>Método</b>	<b>Base química</b>	<b>Principio</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Kjeldahl	Nitrógeno (orgánico total)	Determine el nitrógeno mediante un método que implica digestión, neutralización, destilación y titulación.	Sistema económico. Método ampliamente utilizado y aceptado. Aplicable a todos los alimentos	Mide nitrógeno orgánico total, no solo nitrógeno proteico. Requiere mucho tiempo. Utiliza reactivos corrosivos. Tiene menor precisión que otros métodos.
Dumas	Nitrógeno (orgánico e inorgánico total)	El nitrógeno se libera durante la combustión y se cuantifica mediante cromatografía de gases.	No requiere productos químicos peligrosos. Rápido. Aplicable a todos los alimentos.	Equipo costoso. Mide el nitrógeno orgánico e inorgánico total, y no solo el nitrógeno proteico.
Espectroscopia infrarroja	Enlace peptídico	El enlace peptídico provoca la absorción de radiación en una longitud de onda específica (infrarrojo medio o cercano).	Rápido. Requiere un entrenamiento mínimo. Aplicable a una amplia gama de productos alimenticios (granos, cereales, carne, lácteos).	Equipo costoso. Solo proporciona una estimación del contenido de proteínas. El instrumento debe calibrarse con los resultados de los métodos oficiales.
Unión de colorantes aniónicos	Residuos de aminoácidos (histidina, arginina y lisina) y extremo N de proteína	Los residuos reaccionan con el colorante de ácido sulfónico aniónico para formar un complejo insoluble. El colorante soluble no unido se mide por absorbancia.	Rápido. Relativamente preciso; más que Kjeldahl. Sin reactivos corrosivos. No mide el nitrógeno no proteico.	No es tan sensible como otros métodos colorimétricos. Requiere curva de calibración. Algunos componentes no proteicos se unen al colorante o a la proteína, lo que provoca error.
<b>Bradford</b>	Residuos de arginina, histidina, lisina, tirosina, triptófano y fenilalanina	La absorbancia máxima de una solución ácida azul brillante de Coomassie G-250 cambia de 465 nm a 595 nm cuando se produce la unión a la proteína.	Ensayo rápido. Es bastante preciso y las muestras que están fuera del rango se pueden analizar rápidamente.	El reactivo de color tiñe las celdas del espectrofotómetro, es recomendable utilizar cubetas desechables. El ensayo es menos preciso para proteínas básicas o ácidas
Ácido bicinoninico	Enlace peptídico y aminoácidos específicos (cisteína, cistina, triptófano y tirosina)	El enlace peptídico se combina con iones cúpricos en condiciones alcalinas. Los iones cuprosos se quelan con el reactivo BCA para dar color medido por espectroscopia.	Buena sensibilidad. Los detergentes no iónicos y las sales tampón no interfieren con la reacción, como tampoco lo hacen las concentraciones medias de reactivos desnaturizantes.	El color no es estable con el tiempo. Cualquier compuesto capaz de reducir el cobre dará lugar a la formación de color. Los azúcares reductores y las altas concentraciones de sulfato de amonio interfieren.

Nota. Adaptado de (S. K. C. Chang &amp; Zhang, 2017; Rice University, 2015)

## 2.2 Marco conceptual

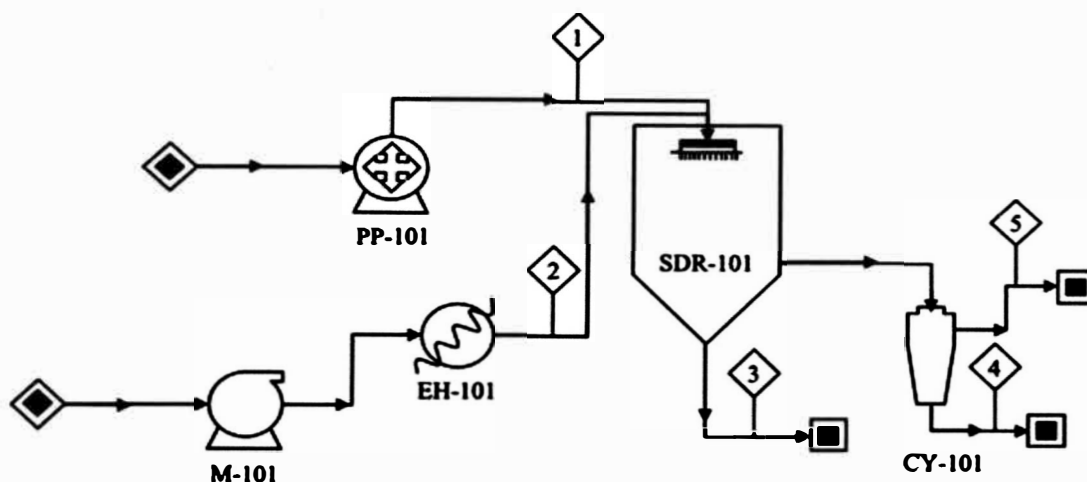
### 2.2.1. *Microencapsulación por secado por atomización*

La microencapsulación por secado por atomización es una de las técnicas más utilizados en la industria alimentaria debido a su escalabilidad, rentabilidad, versatilidad y producción a gran escala en modo continuo (Tatasciore et al., 2024). El secado por atomización implica transformar una alimentación líquida de compuesto bioactivo y material encapsulante en micropartículas en polvo mediante la pulverización y evaporación rápida del solvente (Díaz-Montes, 2023; Furuta & Neoh, 2021). Dicho compuesto bioactivo se integra completamente en un material de recubrimiento o se incrustan en una matriz homogénea o heterogénea para formar pequeñas cápsulas (Estevinho et al., 2013).

El proceso de secado por aspersion se lleva a cabo utilizando un equipo como el que se muestra en la **Figura 9**, y consta de cinco etapas consecutivas. Primero, se pulveriza la solución o mezcla líquida a través de un atomizador, que puede ser neumático, de disco giratorio, de boquilla de fluido, de boquilla de presión o de boquilla sónica. Luego, las gotas descienden a través de la cámara de secado, donde circula un gas caliente (normalmente aire). Las diferencias de temperatura facilitan la transferencia de masa de líquido a gas. Posteriormente, el líquido sale del equipo en forma de vapor. Finalmente, los sólidos se recogen en un recipiente. El proceso produce predominantemente microcápsulas polinucleares o de matriz (como se muestra en la **Error! Reference source not found.**). Sin embargo, su forma y morfología están influenciadas por factores como el material de la pared, la concentración de dispersión (relación entre el material de la pared y el material del núcleo) y las condiciones de funcionamiento del secador (como la temperatura del aire y la velocidad de alimentación) (Berraquero-García et al., 2023; Díaz-Montes, 2023).

**Figura 9**

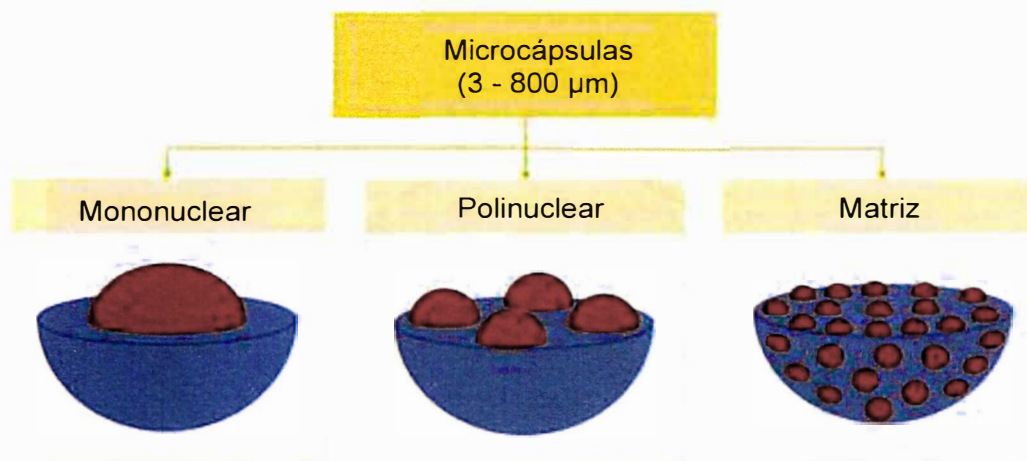
*Esquema del proceso de secado por atomización.*



*Nota:* Corrientes de (1) alimentación, (2) aire caliente, (3) sólidos pesados (4) sólidos ligeros, (5) aire húmedo. CY-101: Ciclón de gases, EH-101: Calentador eléctrico, M-101: Flujo de gas (soplador o compresor), PP-101: Flujo de fluido (bomba o alimentador) y SDR-101: Secador por atomización. Adaptado de Díaz-Montes, (2023).

**Figura 10**

*Tipos de microcápsulas.*



*Nota:* Adaptado de Díaz-Montes, (2023)

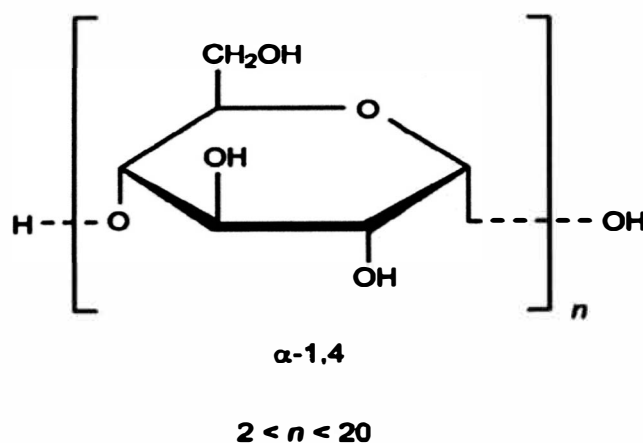
El material de pared se refiere a la matriz protectora que resguarda el material del núcleo durante el proceso de encapsulación y la posterior manipulación. En los procesos de secado por aspersión, el material de pared elegido debe garantizar la estabilidad y la vida útil de la partícula, sustancia o compuesto encapsulado, a la vez que debe ser rentable

en términos de rendimiento y eficiencia de encapsulación. Pueden ser a base de proteínas, lípidos y polisacáridos (Díaz-Montes, 2023). Entre los más empleados en el secado por atomización, destaca la maltodextrina por potencial de proteger los compuestos encapsulados y aumentar su biodisponibilidad (Samborska et al., 2021)

La maltodextrina se obtiene mediante hidrólisis ácida y/o enzimática controlada del almidón y está compuesta por polímeros de D-glucosa unidos por enlaces  $\alpha$ -(1,4) y  $\alpha$ -(1,6). Contiene entre 2–3 % de glucosa y 5–7 % de maltosa, y se presenta como un polvo blanco higroscópico. Es ligeramente dulce, casi insípida, soluble en agua, fácilmente dispersable e insoluble en alcohol. El grado de degradación del almidón se mide mediante el valor de dextrosa equivalente (DE). La maltodextrina presenta un DE entre 2 y 20, lo que indica una cadena de carbohidratos larga y una mezcla compleja de sustancias de alto y bajo peso molecular (Xiao et al., 2022)

### Figura 11

*Estructura química de la maltodextrina.*



Nota: Adaptado de (Aidoo et al., 2013)

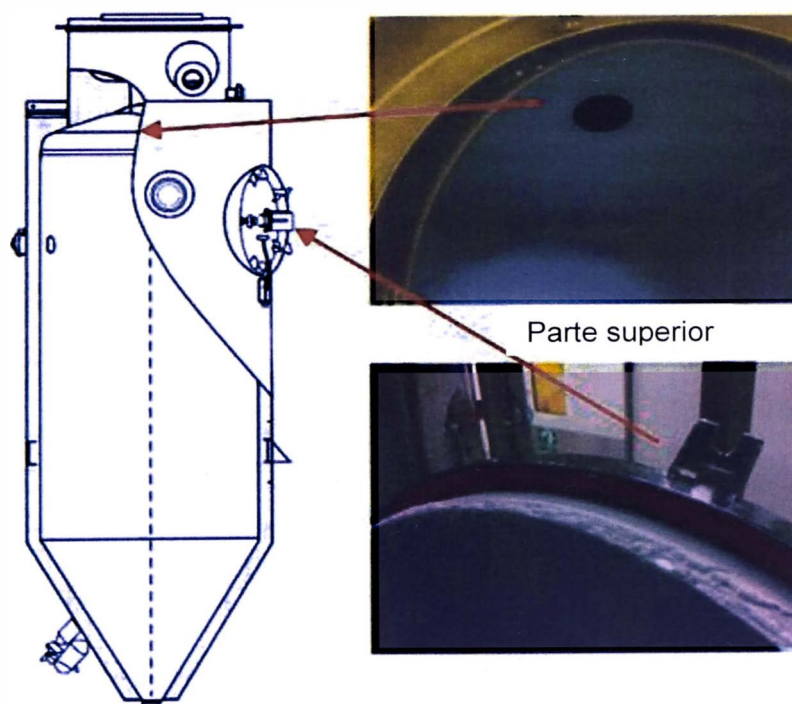
#### **2.2.2. Condiciones de operación que influyen en el contenido proteico y en el rendimiento del proceso.**

**Deposición de partículas en la cámara de secado.** Es uno de los principales inconvenientes en el proceso de secado por aspersión, ya que reduce la recuperación del

producto y afecta la calidad del mismo (Ramlan et al., 2022). Elementos de diseño del equipo, como la rugosidad superficial de las paredes internas y el diseño del dispersor de gas, podrían ser responsables de la adherencia a la pared (Sundararajan et al., 2023). La acumulación de material en las paredes del secador también puede deberse a que las gotas no se han secado completamente antes de impactar las superficies internas, lo cual suele estar relacionado con una mala distribución del flujo de aire que arrastra el polvo hacia las regiones superiores del secador (**Figura 12**). Además, una alimentación excesiva, gotas de gran tamaño o residuos de lotes anteriores pueden agravar la situación. Para minimizarlo, se recomienda optimizar la temperatura y el flujo de aire, controlar el tamaño de las gotas, realizar limpiezas entre lotes y, si es necesario, pulverizar solo disolvente para facilitar la recuperación del material (Sundararajan et al., 2023).

### **Figura 12**

*Deposición en pared del secador en puntos superiores.*



*Nota:* Adaptado de (Sundararajan et al., 2023).

**Pérdida de material.** Durante el secado por atomización, es fundamental la etapa de separación del polvo seco del medio de secado, ya que pueden producirse pérdidas de

partículas finas a través del aire de escape si no se cuenta con un sistema de recolección adecuado (Čulina et al., 2023). Para este propósito, se emplean ciclones y filtros de mangas, los cuales permiten recuperar el material y reducir su liberación al ambiente (Samborska et al., 2022).

### **2.2.3. Mezclado y homogeneización**

Uno de los procesos fundamentales previos a la microencapsulación por secado por atomización es la preparación de la mezcla de materiales, consiste en la dispersión homogénea entre el material de núcleo y el agente de pared. Es importante ya que influye directamente en el consumo de energía durante el secado y en las propiedades finales del polvo obtenido (Samborska et al., 2022)

De acuerdo con Batista de Oliveira et al., (2021), la espirulina fresca presenta una baja solubilidad en agua (51.88 %). La revisión bibliográfica (a nivel laboratorio) indica que usualmente se emplean homogeneizadores para garantizar una suspensión con partículas finamente dispersas. Por ejemplo, en el estudio realizado por Maag et al., (2022) previo al secado por atomización, homogenizan la mezcla a 200 bar en un homogeneizador de 2 etapas (Panda Plus 2000 [GEA Niro Soavi, Parma, Italia]). De manera similar, en el estudio realizado por Özyurt et al., (2023) en donde microencapsulan espirulina y espirulina fermentada en maltodextrina, emplean un ultra-turrax (14000 rpm por 10 min) para homogeneizar.

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1. Materiales

La espirulina fresca (*Arthrospira platensis*) es una cianobacteria de color verde - azulado adquirida por la empresa Intipacha Microalgas cuyo centro de cultivo se encuentra en Ica, Perú. La empresa se encarga del cultivo a condiciones controladas; así como de la venta y distribución de espirulina fresca a diversas partes del país, asegurando que se mantenga la cadena de frío.

Por otro lado, la maltodextrina fue adquirida a partir de la empresa IFF y los reactivos que se utilizarán fueron obtenidos de los laboratorios Sigma-Aldrich. A continuación, se muestra la donde se detallan las características de los reactivos, insumos y materia prima.

En la **Tabla 6**, se presentan las especificaciones de los materiales que fueron necesarios para el desarrollo experimental.

**Tabla 6**

*Lista de Materia prima, insumo y reactivos*

Materia prima / insumo / reactivo	Característica	Marca
Espirulina	Grado alimentario.	Intipacha Microalgas
Maltodextrina	DE 11,3%	IFF, Perú
Reactivo de Bradford	p.a.Lt: SLCK1933	Sigma Aldrich
Albúmina Sérica Bovina	p.a. ≥96% Polvo liofilizado Lt: 0000289566	Sigma Aldrich

*Nota.* Los reactivos fueron almacenados en refrigeración según recomendación del proveedor.

Para el desarrollo experimental, fueron empleados equipos de la Facultad de Ingeniería Química y Textil y en lo que concierne al análisis de FTIR, la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. A continuación, en la **Tabla 7** se enlistan los equipos a utilizar y sus características.

**Tabla 7***Lista de equipos a nivel laboratorio.*

<b>Equipo</b>	<b>Marca y modelo</b>	<b>Ubicación</b>
Balanza analítica	Sartorius Entris 124-1S	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Balanza de precisión	A&D FX-300i	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Congeladora	Electrolux – H320	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Agitador magnético	Neuation - hp 320	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Batidora de inmersión	Oster - FPSTHB460A	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Estufa	Ecocell 55	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Centrífuga	Dathan Scientific – CEF8	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Empacador al vacío	RYU – SV3300	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Vortex	VELP SCIENTIFICA - WIZARD	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Espectrofotómetro UV-VIS	SHIMADZU, UV-1700	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Medidor de actividad del agua	Novasina – CH8853	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Colorímetro	Konica Minolta – CR-20	Laboratorio de Físicoquímica (Nº 11), GIA-FIQT-UNI
Analizador de humedad	Sartorius - IR MA160	Laboratorio de Química General (Nº 15), FIQT-UNI
Secador por atomización	Pignat, ATM/3000	Laboratorio de Operaciones Unitarias (Nº 23), FIQT – UNI
FTIR	Shimadzu Prestige IR21	Laboratorio GISMA - Facultad de Ciencias

### **3.2. Diseño experimental**

El diseño fue seleccionado porque permite evaluar el efecto combinado de las variables independientes (relación espirulina:maltodextrina y temperatura de secado), asimismo permite la posibilidad de obtener un tratamiento óptimo mediante superficie de

respuesta, en comparación con un Diseño completo al azar. En la **Tabla 8**, se consignan las formulaciones propuestas.

**Tabla 8**

*Formulaciones según diseño factorial.*

Formulación	Espirulina (g)	Maltodextrina (g)	Temperatura de calentamiento (°C)
F1	2	4	160
F2	2	6	160
F3	2	8	160
F4	2	4	170
F5	2	6	170
F6	2	8	170
F7	2	4	180
F8	2	6	180
F9	2	8	180

*Nota.* Todas las formulaciones fueron realizadas por triplicado.

### **3.3. Metodología**

En esta etapa se desarrollaron las microcápsulas de maltodextrina cargadas con espirulina por la técnica de secado por atomización, la operación fue desarrollada en cuatro etapas:

- Caracterización de la materia prima.
- Acondicionamiento de materia prima.
- Microencapsulación de espirulina por secado por atomización y análisis de proteínas.
- Caracterización del tratamiento óptimo.

#### **3.3.1. Caracterización de la materia prima.**

**Análisis proximal.** La composición proximal brinda información del contenido de nutrientes (carbohidratos, proteínas) de un alimento; así como otros parámetros de interés (ceniza, humedad), para la investigación resultó relevante conocer las características iniciales de la espirulina debido a que esta se comparará con el producto final. Se realizó

el estudio a la espirulina fresca en el laboratorio Sociedad de Asesoramiento Técnico S.A.C (SAT); la muestra se mantuvo congelada hasta análisis; se evaluaron los parámetros carbohidratos, ceniza, energía total, grasa, humedad y proteína. A continuación, se muestra la **Tabla 9** indicando los métodos seguidos en cada análisis.

**Tabla 9**

*Métodos de análisis proximal*

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
Carbohidratos (g/100g)	Por Cálculo
Ceniza (g/100g)	AOAC 940.26, 22nd. Ed. (2023). Ash of Fruits and Fruit Products
Energía total (kcal/100g)	Por Cálculo
Grasa (g/100g)	AOAC 920.177, 22nd. Ed. (2023). Ether extract of confectionary
Humedad (g/100g)	AOAC 971.28, 21st. Ed. (2019). Solids (Total) in Frozen Spinach
Proteína ((Nx6,25) g/100g)	AOAC 920.152, 22nd. Ed. (2023). Protein in fruit products. Kjeldahl Method

**Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).** Se realizó el análisis FTIR de la espirulina para recopilar información estructural (grupos funcionales); para ello fue necesario un tratamiento previo de deshidratación a 40 °C por 72 horas en estufa (Ecocell 55), luego se hizo la lectura en Shimadzu Prestige IR21, con rango de 4000 a 650 cm<sup>-1</sup> por la técnica de muestreo reflectancia total atenuada (ATR). Adicionalmente, se realizó el análisis FTIR también a la maltodextrina, con el propósito de reconocer los picos característicos que identifican los grupos funcionales; finalmente, esto nos permitirá comparar ambos espectros con el espectro del microencapsulado para asegurar que no se hayan generado nuevos grupos funcionales.

**Perfil de aminoácidos.** Se realizó con la finalidad de cuantificar los siguientes aminoácidos en la espirulina; Ácido Glutámico, Alanina, Arginina, Aspártico, Cistina, Fenilalanina, Glicina, Histidina Isoleucina, Leucina, Lisina, Metionina, Prolina, Serina, Tirosina, Treonina, Triptófano, Valina y verificar la presencia de todos los aminoácidos esenciales. El análisis fue desarrollado por el laboratorio acreditado SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C. (SLab) por HPLC-UV; la espirulina fresca fue enviada y conservada en congelación hasta análisis.

**Análisis de metales.** Se realizó el barrido de metales con el objetivo de asegurar la calidad e inocuidad de espirulina fresca; teniendo en cuenta que los cultivos de espirulina son propensos a contaminación por metales. El ensayo fue realizado por el laboratorio acreditado SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C. (SLab) mediante Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).

### **3.3.2. Acondicionamiento de la materia prima**

Previo al secado por atomización, se requiere preparar la mezcla de espirulina y maltodextrina en medio acuoso según diseño experimental (**Tabla 8**); para ello, se empleó una batidora de inmersión (FPSTHB460A, Oster) con cuchilla de 4 aspas a velocidad baja durante 1 minuto; posteriormente, se agitó la mezcla a 300 rpm por agitación magnética durante 10 minutos; estas dos últimas operaciones se repitieron 3 veces intercaladamente con la finalidad de evitar aglomeraciones. La presencia de aglomeraciones puede llegar a taponear la boquilla o aspersor del equipo; por lo tanto, la etapa de acondicionamiento de espirulina es muy importante en el resultado.

### **3.3.3. Microencapsulación y caracterización**

La microencapsulación fue llevada a cabo empleando un equipo de Secado por Atomización ATM/3000 (PIGNAT, Francia), la mezcla fue previamente dosificada al equipo a caudal de 12 mL min<sup>-1</sup> aproximadamente, con temperaturas de secado en el rango de 160 a 180 °C según diseño factorial, todos los ensayos fueron realizados por triplicado. Como se observa en la **Figura 13**, el secado permitió obtener un polvo de color verde claro,

a diferencia de la mezcla líquida la cual presentó un color verde oscuro. Por otra parte, la intensidad de color del microencapsulado varió en función de la proporción espirulina:maltodextrina; además, con el objetivo de evitar que el microencapsulado se hidrate, se envasó en bolsas gofradas selladas al vacío con el empacador SV3 (RYU S.A.C.) y se almacenaron en un desecador a temperatura ambiente hasta análisis.

### Figura 13

*Microencapsulación de espirulina mediante secado por atomización*



**Humedad.** Se determinó humedad en el microencapsulado de espirulina mediante el uso de una Balanza infrarrojo de humedad MA 37 (Sartorius), la medición se realizó a 105 °C, cada análisis fue realizado consecutivamente. En la **Figura 14**, se presentan evidencias de las medidas realizadas.

### Figura 14

*Medida de humedad en Balanza de Infrarrojo.*

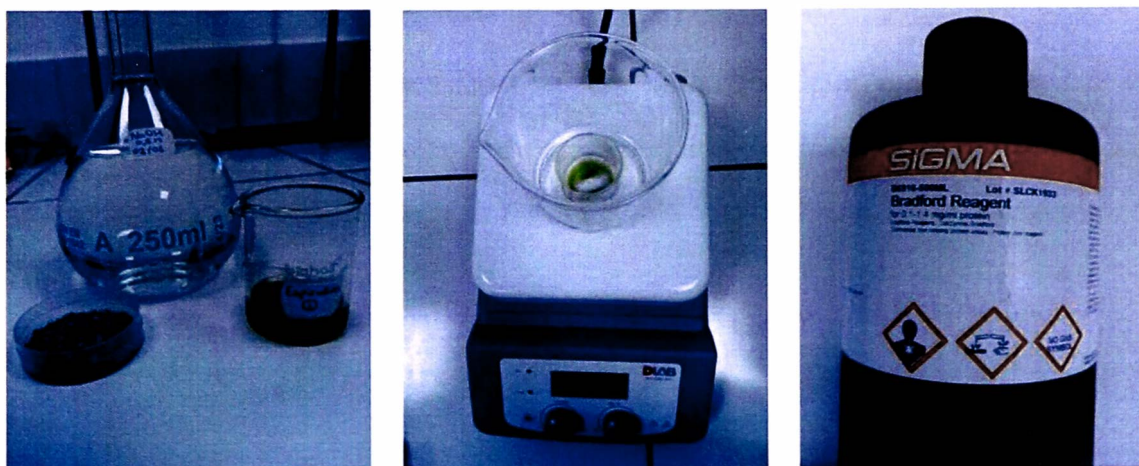


Nota. Las lecturas fueron realizadas por triplicado.

**Cuantificación de proteínas.** Siendo la espirulina una fuente de proteínas de calidad, es relevante evaluar su concentración luego del procesamiento; para la cuantificación de proteínas se siguió el método de Bradford descrito por Saxena et al., (2022) con ligeras modificaciones. Se pesaron 75 mg del microencapsulado de espirulina y se agregó a 5 ml de NaOH 0,5 N; la mezcla se agitó vigorosamente empleando un Vortex (VELP SCIENTIFICA – WIZARD) a 2400 rpm durante 1 minuto a temperatura ambiente; luego, se agitó a 80 °C a 300 rpm y después de 20 minutos se centrifugó a 6000 rpm por 15 minutos. El sobrenadante obtenido es el extracto de proteínas, el cual se almacenó en refrigeración y en ausencia de luz hasta análisis. Posteriormente, 250 µL del extracto fueron mezclados con 2,50 mL de reactivo de Bradford y agitados vigorosamente a 2400 rpm por 1 minuto; luego se dejó reaccionar en oscuridad durante 6 minutos a temperatura ambiente. Las absorbancias se midieron en un espectrofotómetro UV/Visible (UVV-1700, SHIMADZU) a 595 nm de longitud de onda. La cuantificación de proteínas se determinó mediante la curva de calibración de albúmina sérica bovina como estándar en el rango de 2.5 a 40 mg L<sup>-1</sup> (R<sup>2</sup> = 0,988). En la **Figura 15**, se presentan los reactivos empleados (NaOH y Reactivo de Bradford), así como evidencias de la medida.

### Figura 15

*Cuantificación de proteínas por el método de Bradford*

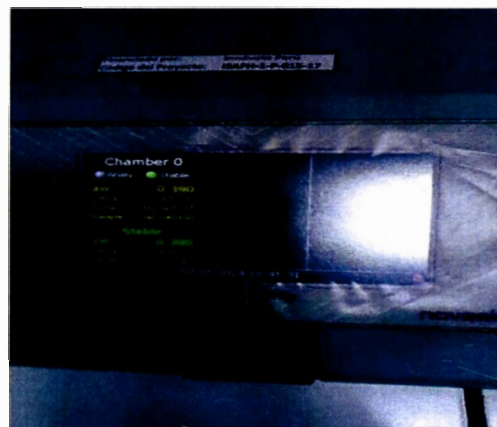


*Nota.* Las medidas fueron realizadas por triplicado.

**Actividad del agua.** Este parámetro se relaciona directamente con la vida útil de cualquier alimento ya que su valor indica el contenido de agua disponible para el crecimiento de microorganismos y actividad enzimática durante la conservación. La lectura se realizó en un medidor de actividad del agua (Novasina – CH8853) tal como se muestra en la **Figura 16**, para ello fue necesario colocar de 1,5 a 2 g del microencapsulado de espirulina en el recipiente de muestra y colocarlo en el equipo.

**Figura 16**

*Medida de actividad del agua.*



*Nota.* Las medidas fueron realizadas a cada tratamiento.

**Color.** Los tratamientos presentaban notable variación de intensidad de color entre sí; la determinación del color se realizó con el colorímetro CR-20 (Konica Minolta) con el método de CIELAB. Primero, en la placa accesorio del equipo se colocó el microencapsulado de espirulina y se compactó asegurando que la base de la placa se encuentre cubierta; luego, se volteó el equipo asegurando la dirección del lente apunte hacia arriba tal como se muestra en la **Figura 17**, se colocó encima la placa y se realizó la lectura.

**Figura 17**

*Medida del color de microencapsulado de espirulina.*



*Nota.* La medida se realizó para cada tratamiento por triplicado

#### **3.3.4. Caracterización del tratamiento óptimo.**

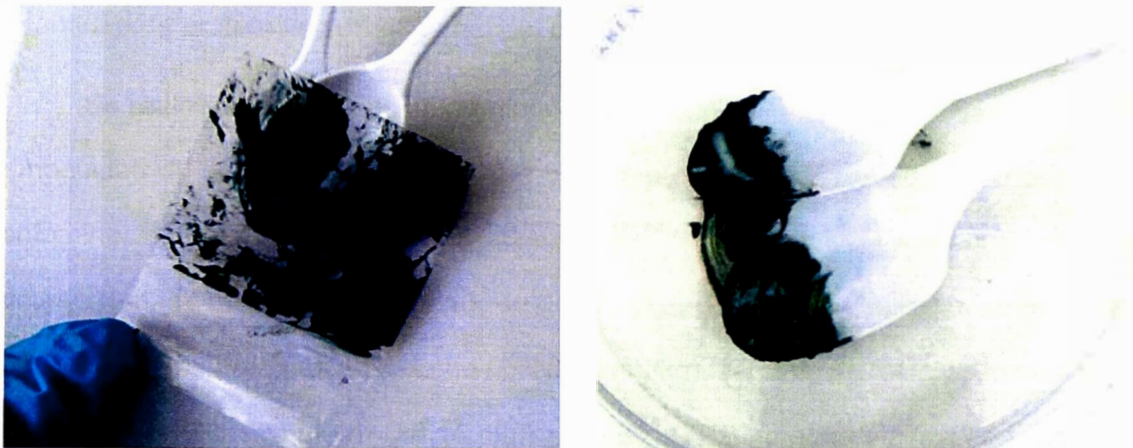
Se realizó humedad, color, actividad del agua, cuantificación de proteínas por el método de Bradford, perfil de aminoácidos e identificación de grupos funcionales por FTIR.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

La espirulina (*Arthrospira platensis*) de la variedad Orovilca obtenida a partir de la empresa Intipacha microalgas se conservó en congelación hasta el momento de su uso; ya sea para el microencapsulado como para los análisis respectivos. En la **Figura 18**, se presenta la biomasa descongelada cuya consistencia es similar a la de una masa heterogénea húmeda y pegajosa de color verde.

### Figura 18

*Espirulina fresca a temperatura ambiente.*



Los resultados del análisis proximal reportan que la espirulina presentó 4,01 % de carbohidratos; 1,76 % de ceniza; 2,30 % de grasa (todos en base húmeda) y 66,16 % de proteínas (en base seca); todos los análisis fueron realizados y calculados en base a 100 g de muestra. Según Bleakley & Hayes, (2021), el contenido de proteínas varía entre 65% a 77%, valores significativamente altos en comparación con el contenido de proteínas del pollo (24%), pescado (24%), carne (22%), soya (37%) y leche desnatada (36%). Por otro lado, el contenido de proteínas obtenido es superior al reportado por Ladjal-Ettoumi et al., (2024) el cual resultó 60,61%. Además, en contraste con la bibliografía, se resalta que la espirulina posee alto contenido de proteínas y bajo contenido de lípidos (Taiti et al., 2023). Sin embargo, a pesar de su potencial, la espirulina presenta alto contenido de humedad

(76,15 %) por lo que es un alimento perecedero (Silva, Freitas, et al., 2023; Stramarkou et al., 2021). Por consiguiente, debe ser conservada para extender su tiempo de vida útil, el estudio propuso el secado por atomización debido a que es una operación unitaria eficiente para la rápida evaporación del solvente (Salama, 2020). Sin embargo, al someter a alimentos ricos en proteínas a esta operación, las altas temperaturas pueden alterar la funcionalidad de la espirulina (Bhandari et al., 2024). Ante ello, se utilizó maltodextrina como agente encapsulante con la finalidad de microencapsular la espirulina, protegiendo tanto a la proteína como a sus otros componentes bioactivos, y a la vez disminuir su contenido de agua en una misma etapa. En el presente estudio se evalúa como afectan la proporción espirulina:maltodextrina y la temperatura de secado, según diseño factorial, en la cantidad de proteínas y rendimiento del proceso.

Se realizó la cuantificación de metales de la espirulina con la finalidad de asegurar la inocuidad de la materia prima, ya que el cultivo de espirulina puede estar asociado a contaminación y es susceptible a la acumulación de metales (X. Wang et al., 2024). A continuación, se muestra la **Tabla 10**, en donde se reportan los resultados de metales. El potasio fue el mineral más abundante (2128.49 mg/kg), seguido de fósforo, sodio y azufre. También se detectaron hierro (28.14 mg/kg), calcio (72.07 mg/kg) y zinc (1.94 mg/kg), en niveles comparables a estudios previos. Aunque la espirulina es rica en micronutrientes, puede acumular metales pesados como plomo, níquel y cadmio. En el presente estudio, los niveles de estos elementos tóxicos en la biomasa fresca estuvieron por debajo de los límites establecidos para consumo humano, garantizando la seguridad del producto (Al-Dhabi, 2013).

**Tabla 10***Análisis de metales de espirulina.*

Metal	Valor (mg kg <sup>-1</sup> )	Metal	Valor (mg kg <sup>-1</sup> )
Aluminio (Al)	<7,00	Potasio (K)	2128,49
Antimonio (Sb)	<3,00	Fósforo (P)	1165,91
Arsénico (As)	<3,00	Sodio (Na)	1106,52
Bario (Ba)	<0,30	Azufre (S)	918,67
Berilio (Be)	<0,10	Magnesio (Mg)	291,98
Bismuto (Bi)	<0,10	Calcio (Ca)	72,07
Boro (B)	<10,00	Hierro (Fe)	28,14
Cadmio (Cd)	<0,30	Manganeso (Mn)	3,21
Cerio (Ce)	<6,67	Zinc (Zn)	1,94
Cromo (Cr)	<1,00	Estroncio (Sr)	0,73
Cobalto (Co)	<1,00		
Cobre (Cu)	<1,00		
Plomo (Pb)	<3,00		
Litio (Li)	<0,30		
Mercurio (Hg)	<3,00		
Molibdeno (Mo)	<1,00		
Níquel (Ni)	<2,00		
Selenio (Se)	<7,00		
Silice (SiO <sub>2</sub> )	<0,50		
Plata (Ag)	<0,70		
Talio (Tl)	<0,30		
Estaño (Sn)	<2,33		
Titanio (Ti)	<6,67		
Uranio (U)	<3,00		
Vanadio (V)	<1,00		

Las fuentes vegetales de proteínas generalmente no son consideradas proteínas completas debido a que carecen de uno o más aminoácidos esenciales (Tayebati et al., 2021). Sin embargo, tal como se presenta en la **Tabla 11**, al realizar el perfil de aminoácidos de la espirulina empleada en la presente investigación, se corroboró la presencia de todos los aminoácidos esenciales. Por lo tanto, la espirulina además de tener un alto contenido de proteínas es una de las pocas fuentes vegetales que sí se considera una proteína completa. A manera de comparación, en la tabla también se presenta el perfil de aminoácidos del potencial complemento alimenticio obtenido en la experimentación.

**Tabla 11***Perfil de aminoácidos de la espirulina*

Aminoácido	Biomasa espirulina (g kg <sup>-1</sup> bs)	Microencapsulado de espirulina (g kg <sup>-1</sup> bs)
<b>Aminoácidos esenciales</b>		
Isoleucina	35,30	39,62
Leucina	52,70	68,69
Valina	39,90	49,40
Fenilalanina	27,90	41,04
Triptófano	11,50	10,45
Histidina	11,50	10,07
Lisina	30,20	39,43
Treonina	29,50	20,43
Metionina	10,40	19,48
<b>Aminoácidos no esenciales</b>		
Alanina	45,30	39,24
Glicina	31,90	29,93
Prolina	23,70	20,14
Tirosina	25,10	20,43
Ácido aspártico	59,20	39,05
Ácido glutámico	90,90	67,83
Arginina	43,10	29,64
Serina	25,90	29,74
Cisteína	6,20	9,88
Isoleucina	45,30	39,62
Leucina	31,90	68,69
Contenido total de aminoácidos (AT)	600.20	584.44
Aminoácidos esenciales (AE)	248.90	298.59
Aminoácidos no esenciales (ANE)	351.30	285.86

*Nota.* La cuantificación se realizó g kg<sup>-1</sup> en base seca (bs)

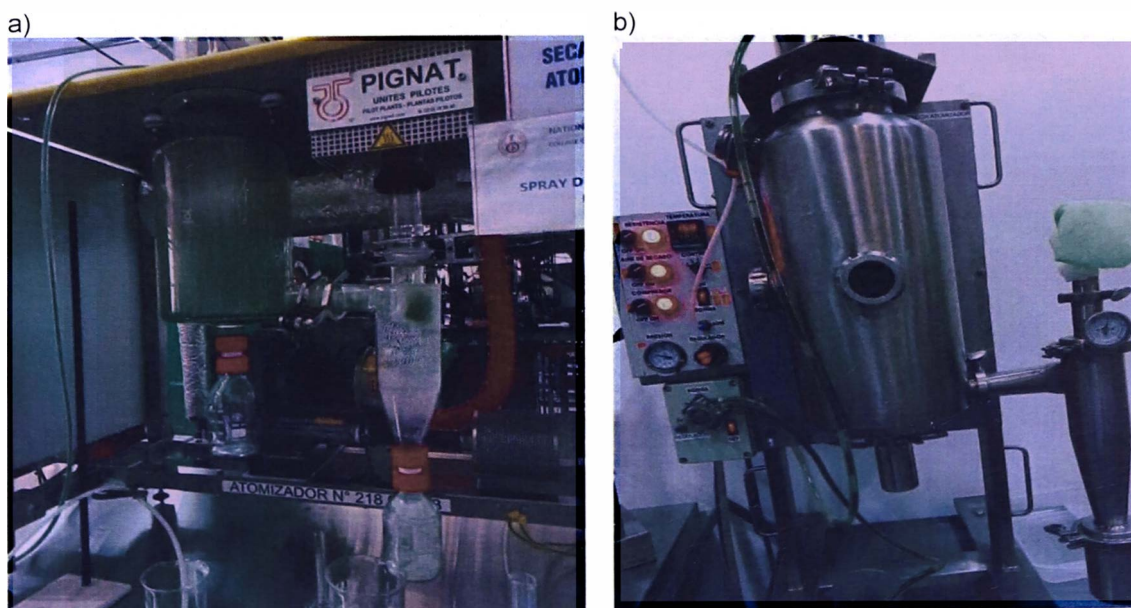
En su forma fresca, la espirulina presenta un contenido total de aminoácidos (AT) de 600.2 g/kg (base seca), con un 41.5 % correspondiente a aminoácidos esenciales (AE). El ácido glutámico fue el más abundante (15 %), seguido de ácido aspártico, leucina, alanina, arginina y valina. Tras el secado por atomización con maltodextrina (microencapsulado de espirulina), se conservaron todos los aminoácidos con una leve reducción en el AT (584.44 g/kg). La leucina fue el AE más abundante (11.8 % del AT), mientras que los mayores descensos se observaron en ácido aspártico (-34.05 %), arginina (-31.23 %) y treonina (-30.76 %). No obstante, la proporción de AAE aumentó a

51.1 %, lo que indica que, pese a una ligera pérdida proteica total, el valor nutricional del polvo se mantuvo gracias a la conservación de todos los aminoácidos esenciales.

Se desarrollaron los distintos tratamientos según diseño experimental para obtener los microencapsulados de espirulina. Para la operación del equipo se realizaron múltiples pruebas preliminares tanto en el equipo de Secado por Atomización ATM/300 (PIGNAT) ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) como en el equipo de Secado por Atomización ubicado en el Laboratorio de Físicoquímica de Alimentos de la Facultad de Ciencias de los Alimentos de la Universidad Le Cordon Bleu (ULCB). El material del equipo en la UNI es de vidrio, mientras que el de la ULCB es de acero inoxidable; se observó que el material del equipo influye en la operación trabajando a las mismas condiciones en ambos equipos. La adherencia de la mezcla en la cámara de secado de vidrio era notablemente mayor que en el de acero inoxidable; además, la recuperación del producto fue más sencilla en este último. En la **Figura 19** se presentan ambos equipos de Secado por Atomización.

### Figura 19

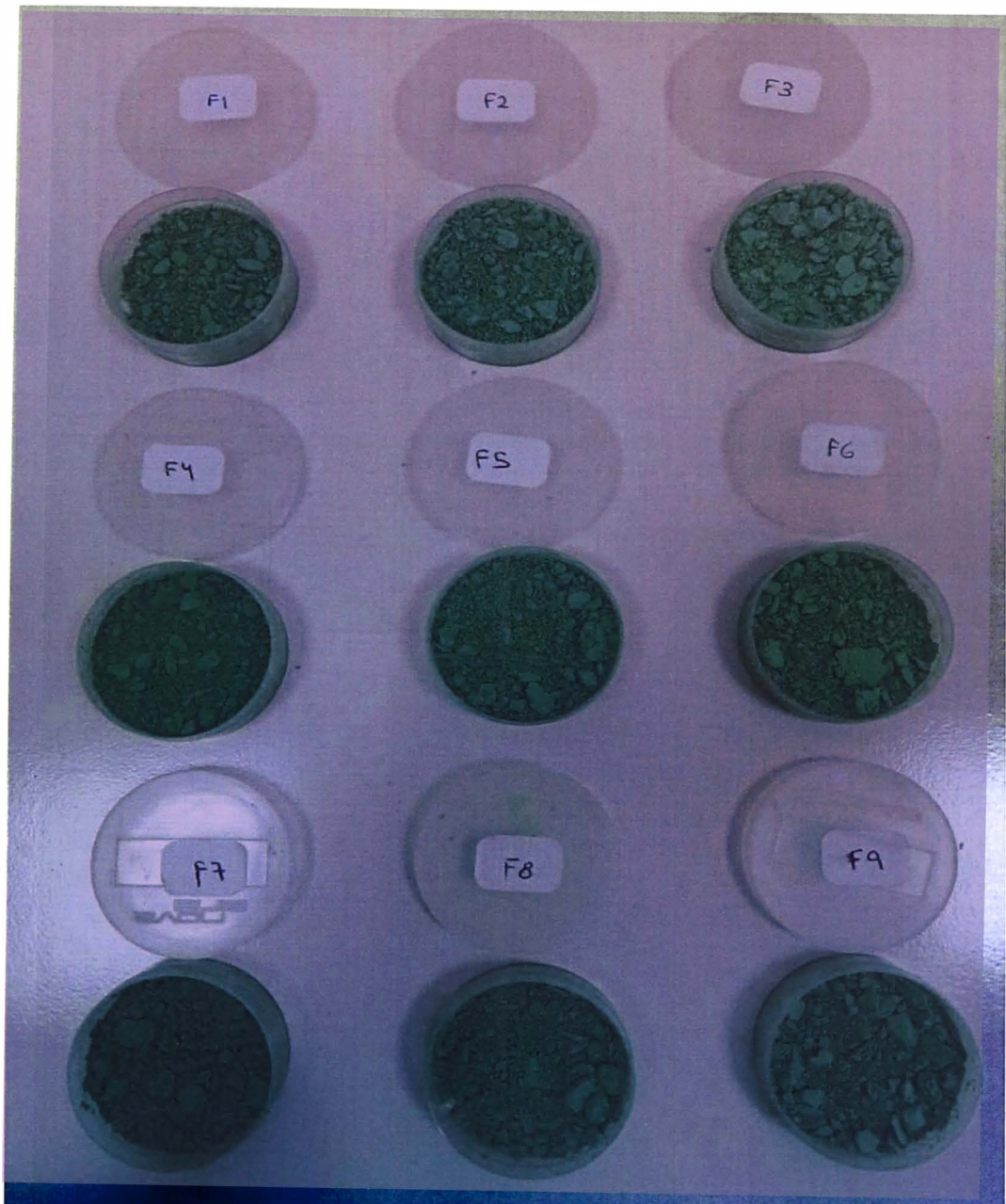
*Equipos de secado por atomización*



Nota. a) Equipo de Secado por atomización (UNI), material de vidrio. Equipo de Secado por atomización (ULCB), material acero inoxidable.

**Figura 20**

*Muestras de las formulaciones obtenidas de manera experimental.*



Con la finalidad de identificar la presencia de proteínas en el microencapsulado, se realiza la cuantificación por método de Bradford; cuyos resultados indican lo mostrado en la Tabla; además, como parte del diseño de proceso de producción, se determinó el rendimiento del proceso.

**Tabla 12***Contenido de proteínas y rendimiento del microencapsulado de espirulina.*

Formulación	Proteínas (%)	Rendimiento (%)
1	21,62	40
	21,82	39
	22,18	38
2	26,00	43
	25,57	42
	24,95	39
3	24,05	42
	23,61	44
	29,02	44
4	25,18	49
	25,18	42
	25,08	43
5	27,09	45
	26,62	46
	26,95	43
6	33,68	46
	35,30	46
	34,86	44
7	22,28	47
	26,59	41
	23,43	40
8	28,42	51
	27,14	44
	27,95	43
9	32,32	48
	30,39	46
	31,94	46

El contenido proteico de la biomasa inicial de espirulina (66 g/100 g) se redujo a un rango de 21.9–34.6 g/100 g en el polvo de espirulina. Esta disminución se atribuye a la desnaturalización de proteínas por el estrés mecánico durante la mezcla y las altas temperaturas de entrada del secado por atomización (Blanco & Blanco, 2022; Butreddy et

al., 2021). Además, parte del alimento seco se adhirió a las paredes de la cámara del secador, generando pérdidas adicionales.

Las formulaciones F6 y F9 mostraron el mayor contenido proteico, correlacionado positivamente con la cantidad de maltodextrina (MD), que protegió las proteínas durante el proceso (H. Zhang et al., 2022). Las mejores condiciones para preservar proteínas fueron 170 °C y una relación de encapsulante 1:4. Este tratamiento también fue efectivo para preservar la ficocianina, principal proteína de la espirulina (Faieta et al., 2020; Özyurt et al., 2023)

Por otro lado, la espirulina fresca presentó un alto contenido de humedad (76.15%) y actividad de agua (0.85), haciéndola muy perecible (Silva, Freitas, et al., 2023). El secado por atomización redujo la humedad del polvo SP-MD a menos del 8.7%, dentro de límites microbiológicos seguros (Özyurt et al., 2023)

En cuanto al rendimiento, los tratamientos con mayor contenido de MD (F8 y F9) presentaron mayores rendimientos, debido al aumento de sólidos y a una mayor temperatura de transición vítrea, que redujo la adhesión en las paredes del secador (Decker et al., 2024). Aunque la temperatura no mostró una tendencia clara, T6 y T9 alcanzaron altos valores de proteína y rendimiento sin diferencias estadísticas, recomendándose T6 para escalado por su eficiencia energética y menor costo (Tay et al., 2021).

Se realizó medida de humedad y color a todas las repeticiones de tratamiento; mientras que, para la actividad del agua, se empleó la mezcla de las tres repeticiones ya que el producto obtenido no era abundante.

**Tabla 1***Humedad, color y actividad del agua del microencapsulado de espirulina*

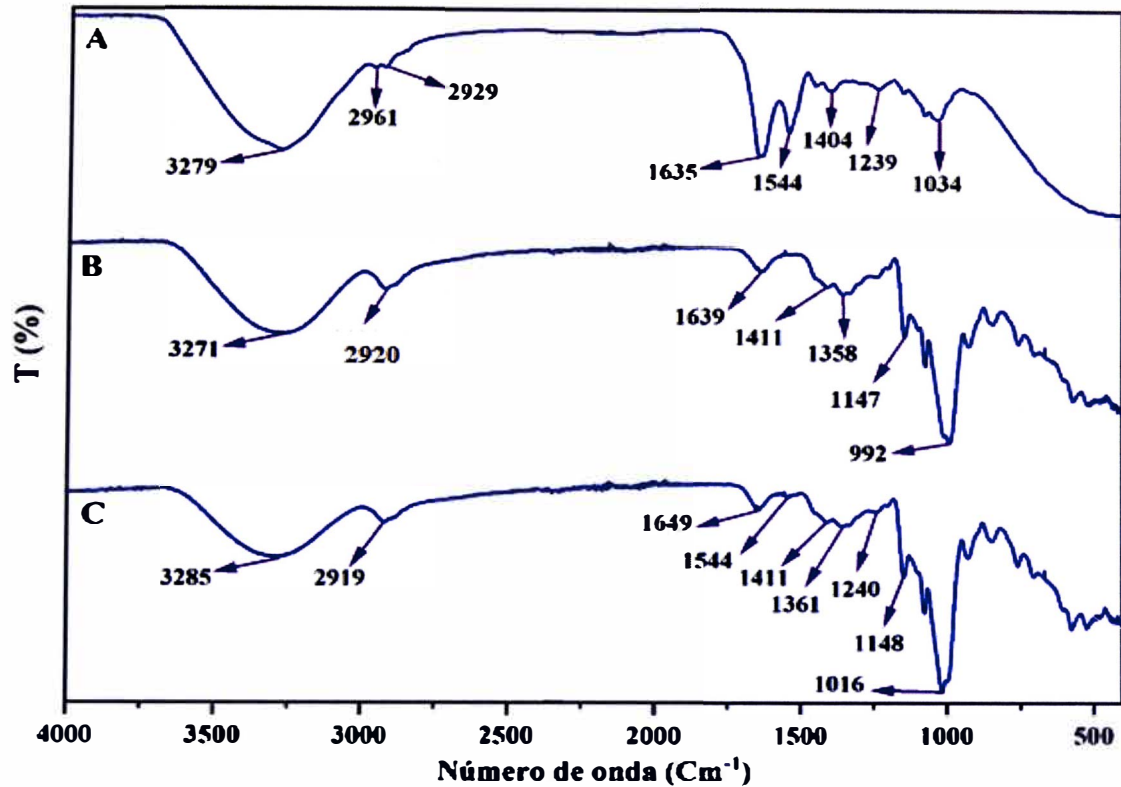
Tratamiento	Humedad	Color			Actividad del agua
		L*	a	b	
1	6,73%	61,6	-12,9	4,5	0,45
	6,76%	61,2	-13,3	4	
	6,56%	62	-12,5	4,6	
2	7,52%	64,2	-13,6	3,8	0,39
	5,49%	63,7	-14,3	3,5	
	5,72%	64	-14	3,7	
3	5,84%	67,5	-11,3	4,9	0,38
	5,72%	66,3	-11,8	4,5	
	6,51%	65,3	-12,3	4,2	
4	6,46%	61	-14	4,6	0,38
	6,31%	59,1	-14,4	5,2	
	7,34%	58,7	-14,7	5,1	
5	6,94%	64	-12,1	5,1	0,33
	7,10%	63	-12,6	4,8	
	5,45%	62,2	-13,4	4,9	
6	5,59%	65,8	-12	4,7	0,35
	6,32%	65,7	-11,8	4,7	
	5,94%	64,8	-12,7	4,7	
7	5,05%	61,7	-11,6	5,8	0,35
	5,66%	59,4	-13	5,9	
	5,22%	59	-13,7	5,6	
8	5,28%	63,8	-12,6	6,3	0,34
	6,28%	62,6	-13,6	6,1	
	6,56%	62,2	-13,4	6,2	
9	5,69%	66,1	-12,3	4,6	0,371
	6,05%	65	-13,3	4,3	
	4,68%	65,2	-12,7	4,3	

La **Figura 21** muestra los espectros FTIR asociado a los grupos funcionales y enlaces químicos de la espirulina (SP), maltodextrina (MD) y del encapsulado de la proteína en la MD. El espectro infrarrojo de la espirulina (**A**) mostro picos característicos en 3279  $\text{cm}^{-1}$ , atribuido a la vibración de estiramiento simétrico del grupo – OH solapado con el N-H. Así mismo, dos bandas en 2961 y 2920  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente con las vibraciones

asimétricas del C-H en los alifáticos (-CH<sub>3</sub> y -CH<sub>2</sub> respectivamente). También fue identificada la banda en 1635 cm<sup>-1</sup>, consecuente con la vibración del C=O en la amida I, otra en 1544 y 1239 cm<sup>-1</sup> atribuidas a las vibraciones en la amida II y III, respectivamente. Por otro lado, la presencia de las vibraciones de estiramiento del grupo C-O fue identificada en 1034 cm<sup>-1</sup>, correspondiente con similares resultados reportados en la literatura (Buhani et al., 2019; S. C. da Silva et al., 2019; Golmakani et al., 2024). En el espectro de la maltodextrina (**B**), los picos identificados en 3271 y 2920 cm<sup>-1</sup> fueron atribuidos a las vibraciones de estiramiento del grupo -OH y C-H, respectivamente. Mientras que la banda en 1639 cm<sup>-1</sup>, es asociado al enlace del agua con la maltodextrina debido al contenido de humedad, señal típica observado en los polisacáridos (S. C. da Silva et al., 2019; Pais et al., 2021). Por otra parte, las señales encontradas en 1358, 1147 y 992 cm<sup>-1</sup> fueron asociadas con las vibraciones asimétricas del -CH<sub>2</sub>- en tijereo, al estiramiento asimétrico y simétrico del enlace glucosídico C-O-C, así como el estiramiento asimétrico del C-O, respectivamente (Pais et al., 2021; Yu et al., 2021). El infrarrojo de la SP encapsulada en MD (**Figura 21 C**), mostro un ligero desplazamiento en la banda asociada al grupo -OH (de 3279 cm<sup>-1</sup> a 3285 cm<sup>-1</sup>), debido a las interacciones puente hidrogeno ocurrido entre estos grupos con los de la MD, similarmente fue notado en la banda de 1635 cm<sup>-1</sup> desplazada hasta 1649 cm<sup>-1</sup>. Así mismo, fueron identificadas la presencia de las bandas asociadas a la amida II en 1544 cm<sup>-1</sup> y amida III en 1240 cm<sup>-1</sup>, sugiriendo que la integridad estructural de la espirulina se mantiene, al igual que el de la MD ya que se encontraron los picos de 1148 cm<sup>-1</sup> y 1016 cm<sup>-1</sup>, atribuidos a las vibraciones del enlace glucosídico C-O-C y C-O, respectivamente. Los resultados muestran claramente que la espirulina mantiene sus características químicas y funcionales, al igual que el encapsulante (MD); lo cual indica que la SP se mantiene encapsulada en la MD, generalmente a través de fuerzas intermoleculares de Vander Waals y puentes hidrógeno.

**Figura 21**

FTIR de (A) espirulina, (B) maltodextrina y C) microencapsulado.



A continuación, se muestra el análisis de varianza de proteínas en donde los factores son: Temperatura y Proporción de encapsulante, los cuales presentan efecto significativo en el contenido de proteínas; de manera similar al efecto cuadrático de temperatura ( $p < 0,005$ ). Mientras que las interacciones temperatura – proporción de encapsulante y el efecto cuadrático de la proporción de encapsulante no afecta significativamente en la concentración de proteína total. A continuación, se muestra en la **Tabla 13** los resultados del Análisis de Varianza o ANOVA.

**Tabla 13**

*Análisis de varianza de proteínas.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,556161	1	0,556161	15,13	0,0010
B:Proporción de encapsulante	2,12249	1	2,12249	57,75	0,0000
AA	0,474141	1	0,474141	12,90	0,0019

AB	0,10622	1	0,10622	2,89	0,1054
BB	0,00946713	1	0,00946713	0,26	0,6176
bloques	0,0193905	2	0,00969526	0,26	0,7709
Error total	0,698294	19	0,0367523		
Total (corr.)	3,98616	26			

R-cuadrada = 82,482 %

Según el estadístico R-Cuadrada indica que el modelo explica 82.482% de la variabilidad en Proteína. A continuación, se adjunta la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Proteína} = -77.242 + 0.945131*A - 0.747181*B - 0.00281111*A^2 + 0.00470417*A*B + 0.00993056*B^2$$

En donde las unidades de las variables son:

A: Temperatura (°C)

B: Proporción de encapsulante (g)

Proteína (g /100g muestra)

La variable respuesta (Proteína) se maximiza cuando la temperatura y la proporción de encapsulante son 174,8 °C y 8 g respectivamente.

A continuación, se muestra el Diagrama de Pareto, la cual grafica lo mencionado líneas arriba en la que la Proporción de encapsulante, temperatura y el efecto cuadrático de la temperatura; tienen efecto significativo en la concentración de proteína ya que estos valores son superiores al límite estadístico crítico del efecto estandarizado.

Figura 22

Diagrama de Pareto estandarizada de proteína

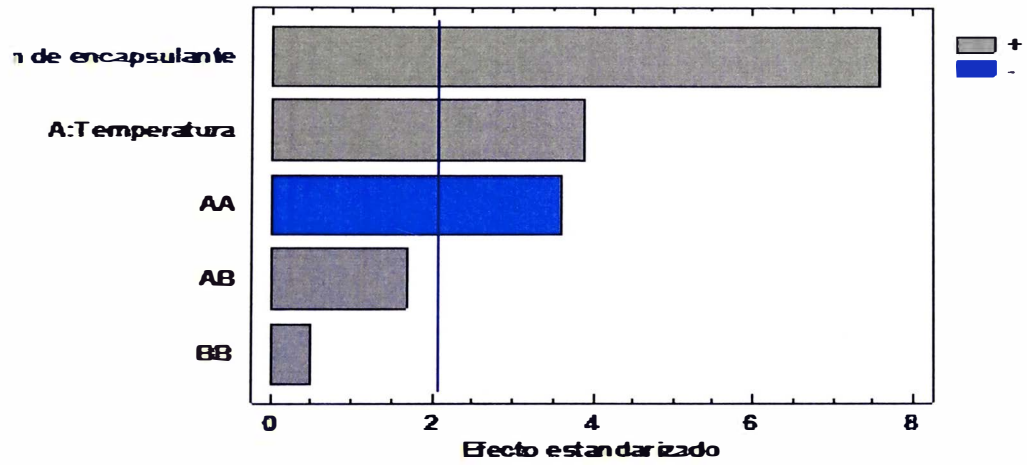
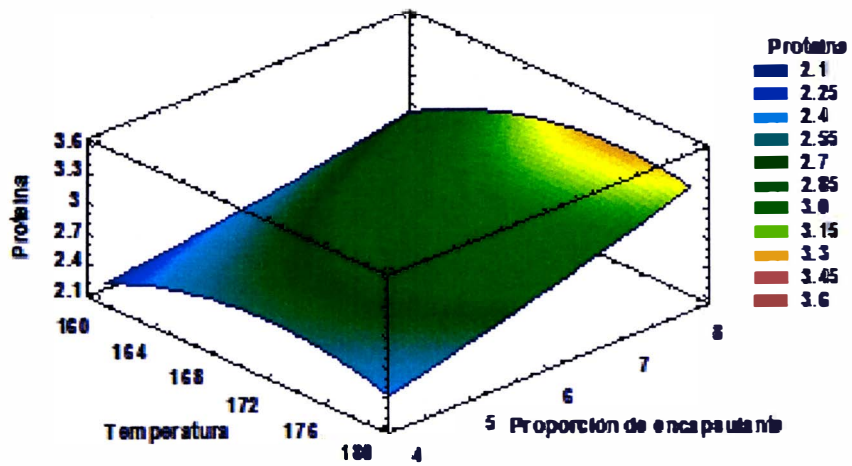


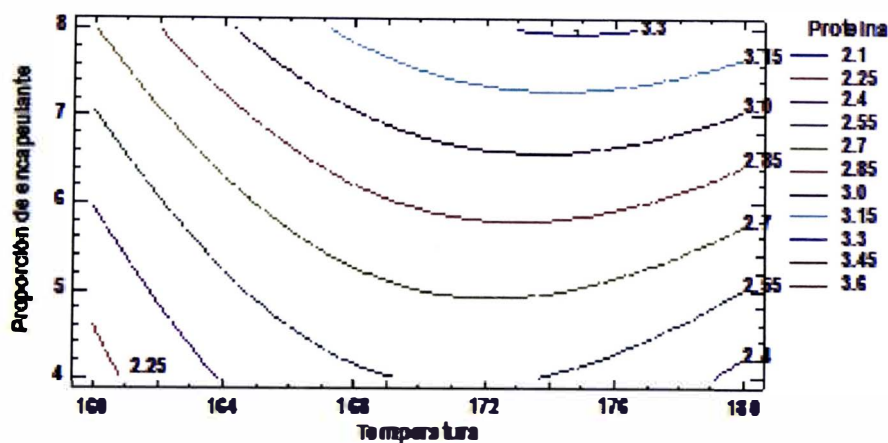
Figura 23

Superficie de respuesta estimada



**Figura 24**

*Contornos de superficie de respuesta estimada*



De manera similar, se muestra el análisis de varianza de rendimiento en donde los factores son: Temperatura y Proporción de encapsulante, los cuales presentan efecto significativo en el rendimiento; de manera similar, el efecto cuadrático de temperatura ( $p < 0,005$ ). Mientras que las interacciones temperatura – proporción de encapsulante y el efecto cuadrático de la proporción de encapsulante no afecta significativamente en la concentración de proteína total.

**Tabla 14**

*Análisis de Varianza para Rendimiento*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	62.9068	1	62.9068	13.72	0.0015
B: Proporción de encapsulante	34.4727	1	34.4727	7.52	0.0130
AA	22.9061	1	22.9061	5.00	0.0376
AB	0.0200083	1	0.0200083	0.00	0.9480
BB	0.0689796	1	0.0689796	0.02	0.9037
bloques	53.4691	2	26.7345	5.83	0.0106
Error total	87.1009	19	4.58426		
Total (corr.)	260.945	26			

R-cuadrada = 66.6209 porciento

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 66.6209% de la variabilidad en Rendimiento. A continuación, se muestra la ecuación de regresión ajustada:

$$\text{Rendimiento (\%)} = -558.677 + 6.84242*A + 1.36069*B - 0.0195389*A^2 - 0.00204167*A*B - 0.0268056*B^2$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales tal como se mencionó anteriormente.

La variable respuesta (Rendimiento) se maximiza cuando la temperatura y la proporción de encapsulante son 174,6 °C y 8 g respectivamente. A continuación, se muestra el Diagrama de Pareto, la cual grafica lo mencionado líneas arriba en la que la Proporción de encapsulante, temperatura y el efecto cuadrático de la temperatura; tienen efecto significativo en la concentración de proteína ya que estos valores son superiores al límite estadístico crítico del efecto estandarizado.

### Figura 25

Diagrama de Pareto estandarizado para rendimiento.

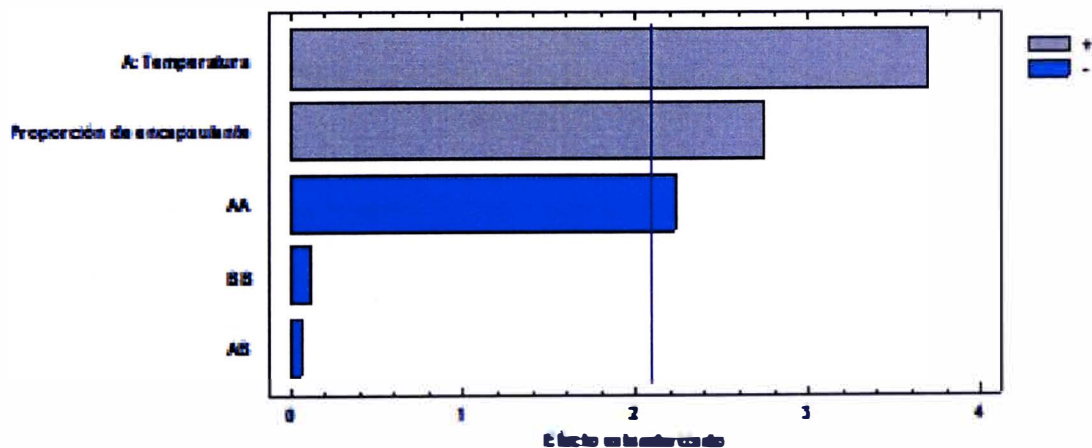


Figura 26

Superficie de respuesta estimada.

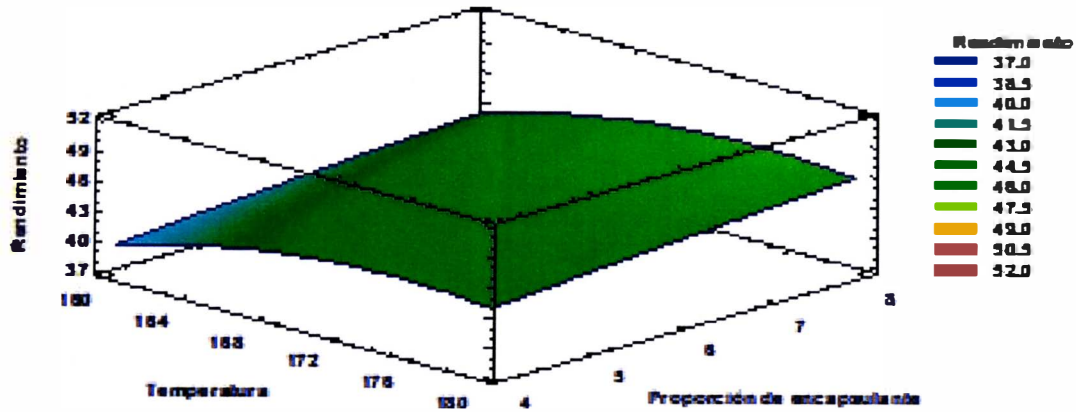
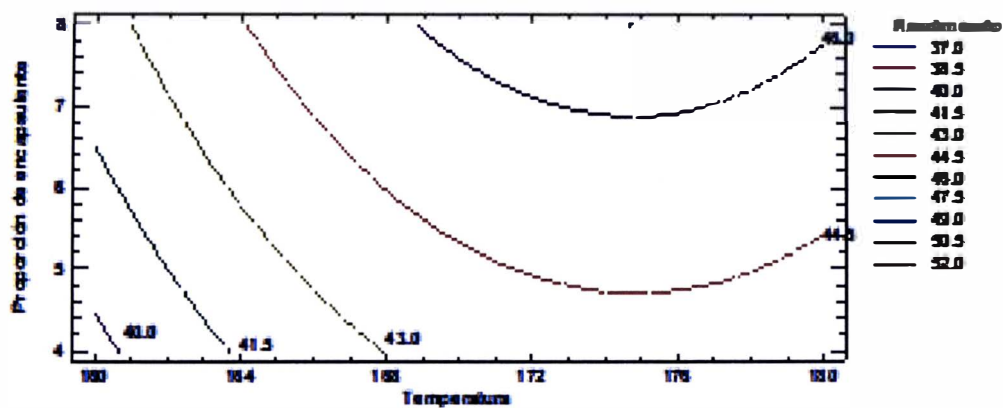


Figura 27

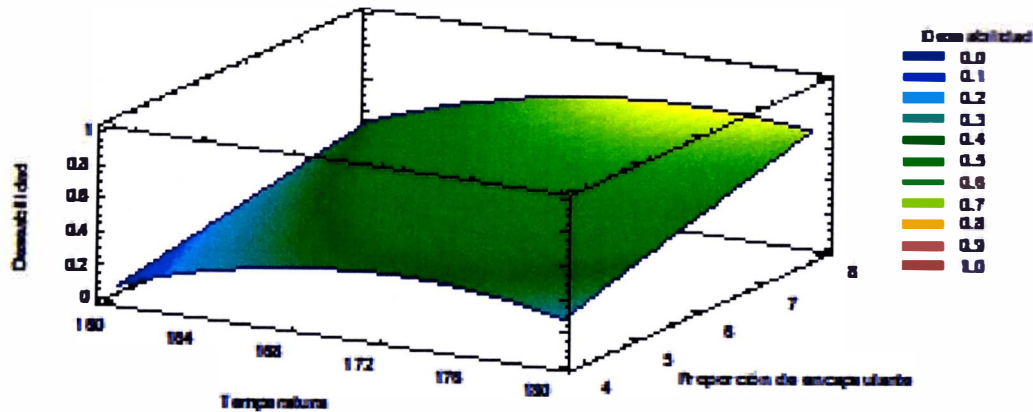
Contorno de superficie de respuesta estimada



A continuación, se muestra la Optimización múltiple: deseabilidad cuyo valor resultó 0,76. Este concepto nos permite combinar múltiples objetivos o respuestas en una sola medida. Los valores de temperatura y proporción de encapsulante que permiten maximizar la deseabilidad son 174,7 °C y 8 g respectivamente.

**Figura 28**

*Superficie de respuesta estimada*



#### 4.1. Estabilidad microbiológica

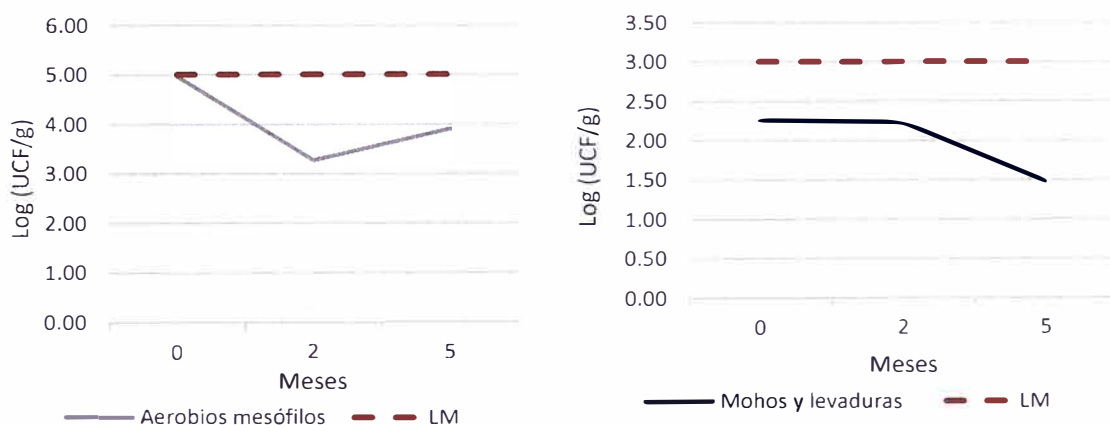
La evaluación de la estabilidad microbiológica del encapsulado de espirulina tuvo como propósito verificar la eficacia del secado por atomización como operación unitaria para prolongar la vida útil del producto. La espirulina fresca es conocida por su alta perecibilidad, atribuida principalmente a su elevada actividad del agua ( $a_w \approx 0.85$ ), que proporciona un entorno favorable para el desarrollo microbiano (Silva, Freitas, et al., 2023; Stramarkou et al., 2021). Sin embargo, mediante el proceso de atomización, se logró reducir el valor a  $a_w = 0.39$ , por debajo del límite crítico (0.61); lo cual indica que el encapsulado de espirulina no es susceptible a la proliferación de microorganismos (Barbosa-Cánovas et al., 2020).

En el presente trabajo, el estudio de estabilidad microbiológica del complemento alimenticio, se llevó a cabo mediante el recuento de aerobios mesófilos, mohos y levaduras. Estos microorganismos fueron seleccionados por su relevancia en la evaluación de productos deshidratados: los aerobios mesófilos como indicadores de higiene general del proceso, los anaerobios por su capacidad de desarrollarse en ausencia de oxígeno y los mohos y levaduras por su resistencia a condiciones de baja humedad y su potencial producción de micotoxinas.

En la **Figura 29** se muestran los resultados del recuento bacteriano durante 5 meses, en la cual se observa que todos los valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible. Estos resultados se infiere que al reducir la actividad del agua, se garantiza que el producto es estable e inocuo. Apto para el consumo.

**Figura 29**

*Resultados de estabilidad microbiológica del encapsulado de espirulina.*



## Capítulo V: Diseño de proceso de producción

### 5.1. Panorama Global de la Producción y Consumo de Espirulina

La espirulina es la microalga más importante en términos de volumen y valor, seguida por *Chlorella*, *Dunaliella* y *Haematococcus*, las cuatro principales microalgas cultivadas comercialmente (Chen et al., 2016). Esta microalga es de alto valor nutricional y de fácil digestibilidad, lo que la hace una excelente fuente de alimento. Su cultivo comercial se ha desarrollado durante más de 40 años. A nivel industrial, su producción comenzó en la década de 1970 en México (Thevarajah et al., 2022).

El interés por la espirulina creció significativamente tras su incorporación como suplemento dietético para astronautas en misiones espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos. Gracias a sus beneficios nutricionales y versatilidad, el mercado global de la espirulina ha experimentado un crecimiento sostenido. En 2019, su valor se estimó en 0,4 mil millones de dólares y se proyecta que alcance los 0,95 mil millones de dólares para 2028 (Gromek et al., 2024). Actualmente, la producción mundial de espirulina se estima en aproximadamente 10 000 toneladas anuales de biomasa seca, con China aportando cerca del 50% de este total (Thevarajah et al., 2022). Sin embargo, no existen cifras claras sobre la producción en el resto del mundo. Esto sugiere que, a pesar de la amplia difusión sobre la espirulina y sus beneficios, aún no ha recibido la atención que merece como un cultivo potencialmente clave en zonas costeras y alcalinas (Habib, 2008).

### 5.2. Localización de planta

Para la selección de la ubicación de la planta piloto se han tomado en cuenta ciertos criterios técnicos y económicos. Uno de ellos es que se encuentre dentro de una zona industrial. En ese sentido, Lurín, ha sido seleccionado por su consolidación como parte del eje industrial de Lima Sur. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática

(INEI), Lurín ha evolucionado significativamente, registrando un crecimiento industrial sostenido del 6% en los últimos cinco años, lo que refleja una dinámica favorable (Centenario, 2024).

Además, la proximidad geográfica tanto con el proveedor de la materia prima como con la capital (principal zona de distribución del producto) representa una ventaja a nivel logístico. Con respecto a la empresa proveedora de la espirulina fresca, esta se encuentra ubicada en la región de Ica, aproximadamente a 300 km de Lurín, lo que permite realizar el transporte de espirulina fresca en menos de cinco horas, esto es importante para asegurar la recepción del insumo fresco en planta y conservar sus propiedades nutricionales antes del proceso.

Por otro lado, Lima ha sido identificado como el principal centro de distribución y comercialización, ya que concentra al mayor número de puntos de venta, canales de comercialización y operadores logísticos. Estar cerca de esta zona facilita el acceso a mercados, reduce costos de transporte y tiempos de entrega, lo que permite una respuesta más rápida ante la demanda de los consumidores.

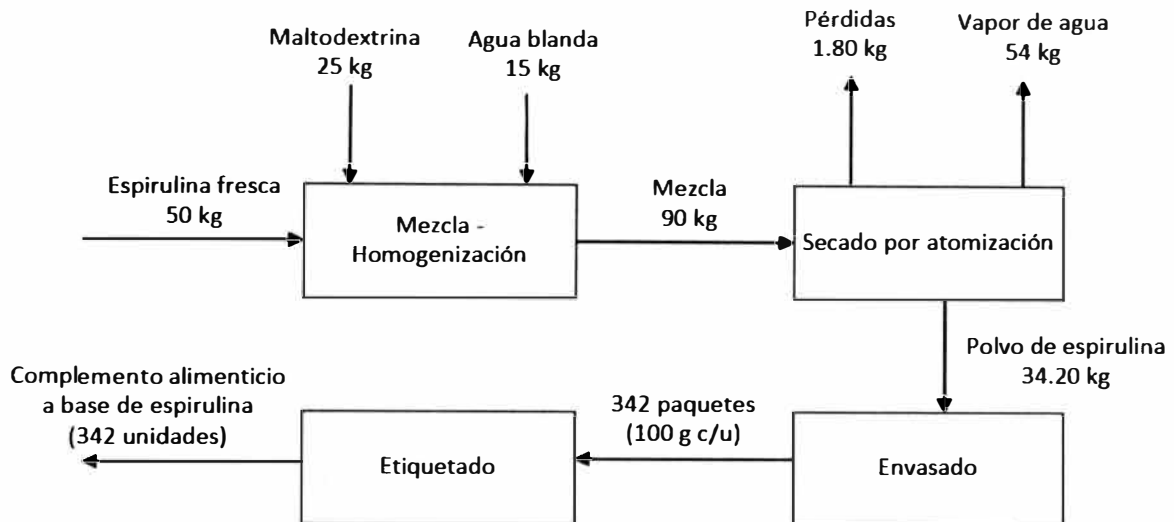
### Figura 30

*Ubicación de planta piloto.*



### 5.3. Diseño del proceso de producción

Las etapas desarrolladas en el proceso de producción de microencapsulación de espirulina por secado por atomización se presentan en la siguiente figura.



#### 5.3.1. Recepción de materia prima

La espirulina (*Arthrospira platensis*) es obtenida de la empresa Intipacha microalgas, esta debe ser transportada manteniendo la cadena de frío hasta la zona de procesamiento, por ello se ha cotizado la adquisición de una furgoneta con sistema de refrigeración controlada. Por otro lado, la maltodextrina se adquirió a partir de la empresa IFF, la presentación del producto son sacos de 25 kg, estos se deben almacenar en parihuelas para evitar contaminación.

#### 5.3.2. Mezcla y homogeneización

Se prepara una mezcla acuosa de espirulina con maltodextrina en proporción 1:8; la mezcla se homogeneiza para evitar que la espirulina precipite; además, el aspensor del equipo secado por atomización puede ser tapado.

#### 5.3.3. Secado por atomización:

Esta operación unitaria se lleva a cabo en el equipo ATM/3000 (PIGNAT, Francia) cuyo material es de vidrio resistente a altas temperaturas. La mezcla se trasvasa

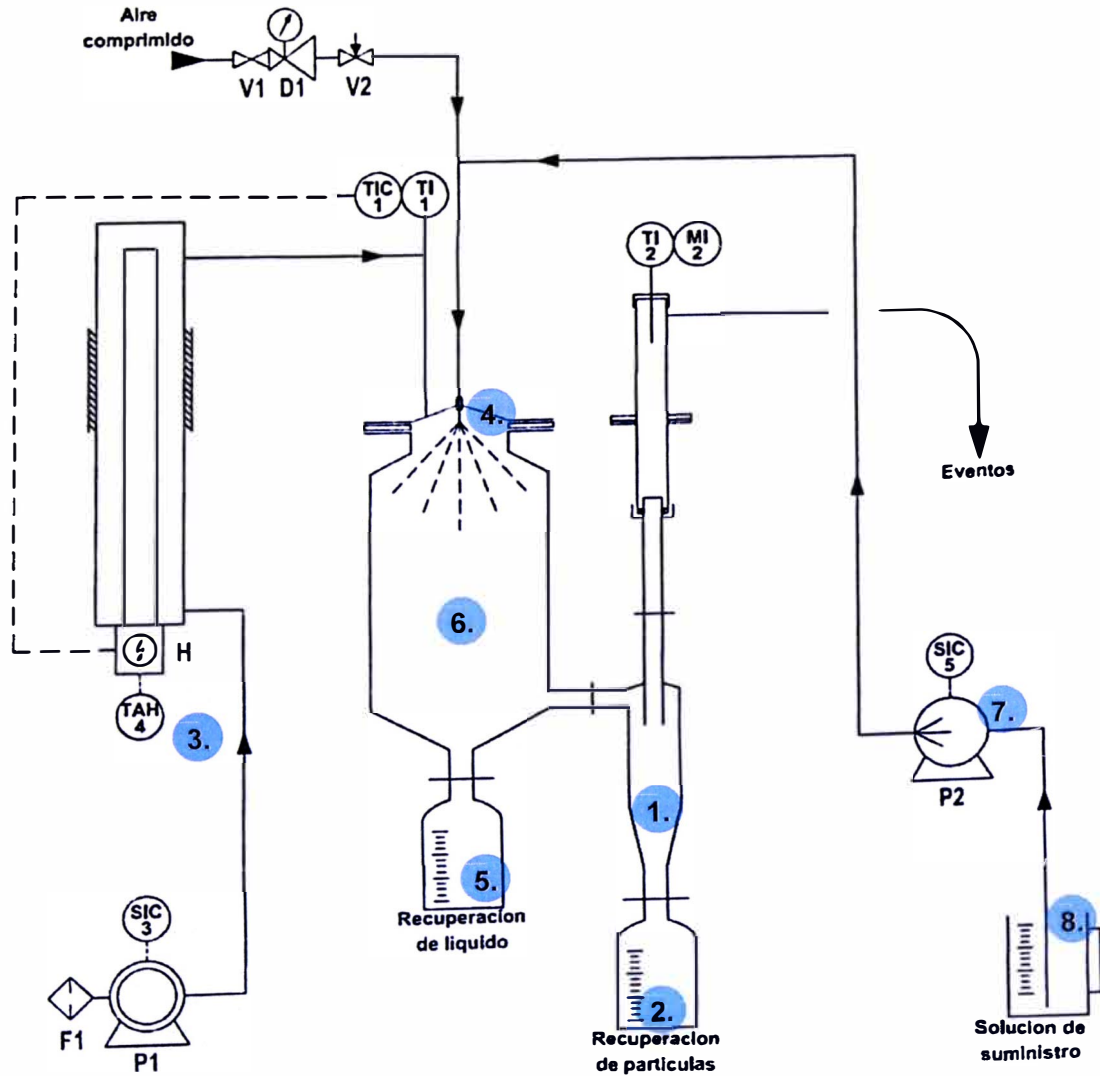
empleando una bomba peristáltica regulada a  $12 \text{ ml min}^{-1}$  de caudal, con ventilador 80%; la mezcla es aspersada por la boquilla e inmediatamente pasa a la cámara de atomización con flujo de aire caliente y cuya temperatura es regulada automáticamente a  $174,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Otras de las condiciones de operación relevantes es el % ventilador, se emplea 80%. El solvente se evapora y el microencapsulado obtenido pasa al ciclón para recuperar los sólidos.

#### **5.3.4. Envasado**

El microencapsulado es un polvo fino con notable adherencia; al seleccionar el material de envasado es necesario tomar en cuenta las propiedades antiadherentes internas; además, debe proporcionar una barrera contra la humedad, oxígeno y luz; Las condiciones de almacenamiento deben ser en un ambiente fresco, seco y baja humedad relativa.

**Figura 31**

*Esquema equipo de Secado por atomización.*



- 1- Frasco de alimentación en polipropileno, 2 L
- 2- Bomba peristáltica a caudal variable 0 a 1 L/h
- 3- Cánula de inyección líquida y aire comprimido
- 4- Sistema de circulación de aire precalentado
- 5- Cámara de atomización en vidrio
- 6- Frasco en vidrio de recuperación
- 7- Ciclón en vidrio
- 8- Frasco de alimentación de partículas sólidas

## 5.4. Selección de equipos.

### 5.4.1. Congeladora

Equipo que será empleado para conservar la espirulina fresca a temperaturas de congelación, con el objetivo de minimizar el deterioro microbiológico y mantener su calidad antes del procesamiento. Según el diseño del proceso de producción, la materia prima será adquirida de forma quincenal, por lo que se requiere una capacidad de almacenamiento que permita conservar aproximadamente 650 kg de espirulina fresca en ese periodo. En función de este requerimiento, se seleccionó una congeladora tal como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 15**

*Especificaciones técnicas del congelador*



Marca	Ilumi
Modelo	TF-12002GD
Material	Acero Inoxidable
Capacidad	1000 L
Precio	S/ 13,649.00
Voltaje	220-240 V – 60 HZ
Consumo de energía	21.8 Kwh/24h

### 5.4.2. Balanza industrial

Instrumento de medición que permitirá pesar las cantidades necesarias de espirulina fresca y de maltodextrina para la formulación. Se estima que la cantidad máxima a pesar es de 50 kg, correspondiente a la espirulina fresca. Por ello, se seleccionó una balanza industrial con capacidad superior, considerando no solo las necesidades actuales de la planta piloto, sino también una posible ampliación de la capacidad productiva en el futuro.

**Tabla 16**

*Especificaciones técnicas de la balanza*

Marca	Genérico
Modelo	ACSTCS-150K
Material	Bandeja de Fierro Fundido Diamantada
Peso máximo	150 kg.
Precio	S/ 380.00
Dimensiones	46 x 60 cm
Fuente de energía	Batería 4V

**5.4.3. Homogeneizador multifuncional con sistema de mezcla.**

Equipo utilizado para obtener una dispersión uniforme entre la espirulina fresca y la maltodextrina antes del secado, esta operación es muy importante para evitar obstrucciones en la boquilla del secador por atomización. Según los ensayos realizados en laboratorio, se evidenció que la agitación simple no es suficiente para lograr una dispersión uniforme, ya que la espirulina tiende a formar grumos. Por ello, se seleccionó un mezclador-homogeneizador con motor de velocidad variable, sistema de paletas con raspador de pared y cabezal homogeneizador, lo que asegura una distribución homogénea de los sólidos en suspensión. Según el diseño del proceso de producción, se preparará un volumen de mezcla de 90 kg.

**Tabla 17***Especificaciones técnicas del mezclador – homogenizador.*

	Marca	JBJ
	Modelo	JBJ-100L
	Material	Acero inoxidable 316L
	Capacidad	100 L
	Precio (CIF Callao)	\$ 3 080.00
	Consumo de energía	5.5 Kwh
	Origen	China

**5.4.4. Secador por atomización**

El equipo de secado por atomización será empleado para transformar la mezcla líquida de espirulina y maltodextrina en un polvo fino mediante el contacto con una corriente de aire caliente. Este proceso permite encapsular la espirulina, preservando los compuestos termosensibles de la espirulina, así como mejorar su estabilidad fisicoquímica y sensorial. De acuerdo con el diseño del proceso de producción, se requiere un equipo con una capacidad de operación de 15 kg/h, por lo que se selecciona un secador por atomización que cumpla con esta especificación técnica.

**Tabla 18***Especificaciones técnicas del spray-dryer.*

	Marca	Changzhou Yanlong Drying Equipment Co., Ltd
	Modelo	LPG-20
	Material	Acero inoxidable SUS304
	Capacidad	15–30 kg/h
	Precio (CIF Callao)	\$ 28 900.00
	Consumo de energía	18 Kwh
	Origen	China

#### 5.4.5. Envasadora

Máquina encargada de dosificar y envasar la espirulina en polvo en presentaciones de 100 g, garantizando condiciones de higiene, precisión en el peso y prolongación de la vida útil del producto mediante un sellado hermético. Se eligió un equipo cuya capacidad permite envasar de 6 a 15 bolsas por minuto. A continuación, se presentan los detalles técnicos del equipo.

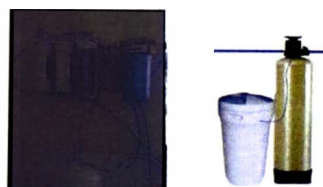
**Tabla 19**

*Especificaciones técnicas de la envasadora.*

Marca	JINDE
Modelo	JDN-100B
Material	Acero inoxidable 304
Capacidad	6-15 bolsas/min
Precio (CIF Callao)	\$ 779.00
Consumo de energía	0.5 Kwh
Origen	Henan, China

#### 5.4.6. Sistema de ablandamiento de agua

Este sistema consta de un conjunto de equipos diseñados para eliminar dureza del agua (iones de calcio y magnesio) que podría afectar la eficiencia y vida útil de los equipos de calor, como el secador por atomización. El sistema incluye equipos como pre-filtros, filtro de carbón activado, membrana de ósmosis inversa, desionizador, tanque de almacenamiento presurizado y un ablandador automático con resinas catiónicas y aniónicas.

**Tabla 20***Especificaciones técnicas del sistema de ablandamiento de agua.*

Marca	DERVATEC
Modelo	DVT-100
Material	Funda protectora de Acero Inoxidable
Capacidad	15 L/h
Precio	S/ 20 000.00
Voltaje	220V / 60 Hz

**5.4.7. Furgoneta**

Vehículo de transporte acondicionado para movilizar la espirulina fresca desde la zona de cultivo (Ica) hasta la planta piloto en Lurín. Este vehículo está acondicionado con una cabina de refrigeración que mantiene temperaturas entre -5 °C y -18 °C, asegurando así la conservación de la calidad del insumo durante el trayecto.

**Tabla 21***Especificaciones técnicas de la furgoneta.*

Marca	KYC
Modelo	T3 c/ Furgón Refrigerado
Material	Carrocería metálica con aislamiento térmico
Capacidad	Volumen: 7.9 m <sup>3</sup> Carga útil: 1,480 kg
Precio (CIF Callao)	S/ 61 838.00

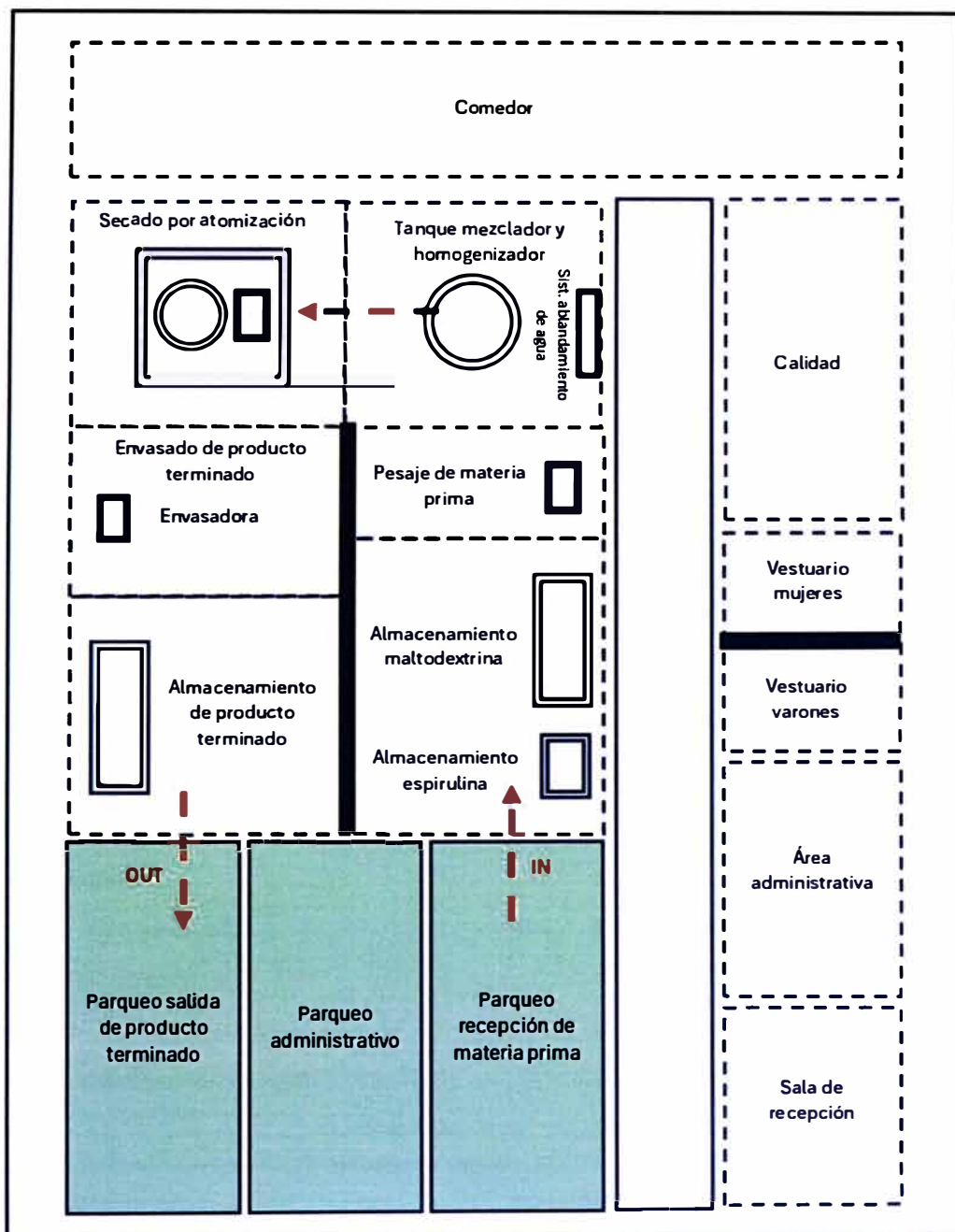
**5.5. Tamaño y distribución de planta**

En la **Figura 32**, se presenta la propuesta de distribución de planta para la producción del complemento alimenticio a base de espirulina a nivel piloto. Fue desarrollado considerando los equipos y áreas requeridas para el proceso, así como los

lineamientos de ingeniería aplicables a la industria alimentaria. Se ha estimado un terreno de 300 m<sup>2</sup> (15 x 20 m), destacando una distribución en forma de “U” para optimizar el flujo del proceso. Además, se han contemplado zonas de descarga para la recepción de materia prima y una zona de carga destinada al producto terminado.

**Figura 32**

*Propuesta de distribución de planta piloto.*



## Capítulo VI: Evaluación económica

En el presente capítulo se desarrolla la evaluación económica de la implementación de una planta piloto para la producción del complemento alimenticio a base de espirulina. De acuerdo con el capítulo anterior, se ha proyectado una capacidad de producción de 34 kg/batch de espirulina en polvo.

### 6.1. Determinación de la inversión

La estimación de la inversión del proyecto, se define como la suma de la inversión en capital fijo (activo fijo e intangibles) y el capital de trabajo.

#### 6.1.1. Inversión en activo fijo.

La inversión en activos fijos comprende todos los bienes físicos indispensables para el funcionamiento de la planta piloto. Son considerados los conceptos de: Maquinaria y equipos, instalaciones, equipos de cómputo, terreno y obras civiles (construcción).

A continuación, se presenta a detalle la inversión correspondiente a maquinaria y equipos, cuyos detalles técnicos fueron indicados en la sección anterior.

**Tabla 22**

*Maquinaria y equipos necesarios para la producción del complemento alimenticio.*

Maquinaria o equipo	Cantidad	Precio Individual	Precio Total
Congeladora	1	S/ 13,649.00	S/ 13,649.00
Balanza industrial	1	S/ 380.00	S/ 380.00
Mezclador - homogeneizador	1	S/ 14,044.80	S/ 14,044.80
Secado por atomización	1	S/ 131,784.00	S/ 131,784.00
Envasadora	1	S/ 2,960.20	S/ 2,960.20
Sistema de ablandamiento de agua	1	S/ 20,000.00	S/ 20,000.00
Furgoneta	1	S/ 61,838.00	S/ 61,838.00
<b>Total</b>			S/ 244,656.00

De acuerdo con el método de Peters & Timmerhaus', los costos asociados a instalaciones y obras civiles pueden estimarse como un porcentaje del costo total de la maquinaria y equipos (M.F. van Amsterdam, 2018). En contraste, el valor del terreno y de los equipos de cómputo fue determinado a partir de cotizaciones reales. En base a estas consideraciones, la inversión en activo fijo tangible se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 23**

*Inversión en activo fijo para la producción del complemento alimenticio.*

<b>Activos tangibles</b>	<b>S/</b>	
Maquinaria y equipo	S/	244,656.00
Instalaciones (instrumentación e instalaciones eléctricas)	S/	48,931.20
Equipos de computo	S/	5,895.00
Terreno	S/	370,000.00
Obras civiles(construcción, mejoras del terreno y servicios)	S/	119,881.44
<b>Total</b>	<b>S/</b>	<b>789,363.64</b>

#### **6.1.2. Inversión en intangibles.**

La inversión intangible comprende aquellos gastos preliminares que son necesarios para la puesta en marcha del proyecto. Entre ellos se incluyen los estudios y el desarrollo del proyecto de ingeniería, los gastos de constitución legal de la empresa, entre otros.

**Tabla 24**

*Inversión en intangibles para la producción del complemento alimenticio.*

<b>Activos intangibles</b>	<b>S/</b>	
Estudios y Proyecto de Ingeniería	S/	100,000.00
Gastos de constitución	S/	7,000.00
Registro de marca	S/	2,000.00
Licencia(construcción, funcionamiento)	S/	2,799.60
Gasto de puesto en Marcha	S/	30,000.00
<b>Total</b>	<b>S/</b>	<b>141,799.60</b>

### 6.1.3. Inversión en capital de trabajo

El capital de trabajo corresponde a los recursos líquidos necesarios para asegurar la continuidad operativa del proyecto mientras se concreta el cobro de las ventas. Su estimación se ha basado en una planificación financiera, considerando el tiempo de cobro a clientes, el plazo de pago a proveedores y la rotación de inventarios.

**Tabla 25**

*Inversión en capital fijo para la producción del complemento alimenticio.*

<b>Capital de trabajo</b>		<b>S/</b>
Mantener Caja por el equivalente a 02 días de venta	S/	31,824.00
Esperar 30 días por pago de los clientes	S/	477,360.00
Mantener inventarios por 45 días	S/	716,040.00
Proyectar 35 días como pago a proveedores	S/	556,920.00
<b>Total</b>	<b>S/</b>	<b>668,304.00</b>

A continuación, se presenta la estimación de la inversión necesaria para la implementación de la planta piloto destinada a la producción del complemento alimenticio a base de espirulina.

**Tabla 26**

*Inversión necesaria para realizar la producción a nivel planta piloto.*

<b>Inversión</b>		<b>S/</b>
Inversión tangible	S/	789,363.64
Inversión intangible	S/	91,300.00
Capital de trabajo	S/	668,304.00
<b>Inversión total</b>	<b>S/</b>	<b>1,548,967.64</b>

### 6.2. Determinación de ingresos

De acuerdo con las presentaciones de este tipo de productos en el mercado, se considera su comercialización en presentaciones de 100 g, con un precio estimado de S/ 51.00 por empaque. Este valor se encuentra dentro del rango de precios observados actualmente en el mercado para productos similares a base de espirulina.

El cálculo de los ingresos han sido considerados suponiendo que la producción diaria será vendida al siguiente día. La estimación de los ingresos se ha realizado bajo el supuesto de que la totalidad de la producción diaria será vendida al día siguiente, lo que permite asumir un flujo constante de ingresos. Asimismo, los ingresos anuales proyectados contemplan un incremento sostenido del 2 % por año, en concordancia con la tasa de inflación estimada por el Estado Peruano, (2025).

**Tabla 27**

*Ingresos por ventas anuales del complemento alimenticio.*

Año	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos por ventas	S/ 5,728,320.00	S/ 5,842,886.40	S/ 5,959,744.13	S/ 6,078,939.01	S/ 6,200,517.79

### 6.3. Determinación de costo de venta

El costo de venta anual representa el costo de producir el complemento alimenticio por el periodo de un año. Este costo incluye materiales directos, mano de obra directa y costos indirectos de fabricación.

Los materiales directos necesarios para la producción del complemento alimenticio son espirulina fresca, maltodextrina y el envase. Los precios unitarios de ambos insumos se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 28**

*Costo de materia prima y materiales directos necesarios para la para la producción anual.*

	kg/batch	Soles/kg	Precio/batch	Precio anual
Espirulina	50.00	S/ 300.00	S/ 15,000.00	S/ 4,680,000.00
Maltodextrina	25.26	S/ 4.00	S/ 101.05	S/ 31,528.42
	unidades/batch	soles/unidad	Precio/batch	Precio anual
Envase	342	S/ 0.70	S/ 239.06	S/ 74,586.10
Precio anual total				<b>S/ 4,786,114.52</b>

*Nota:* Para fines de la evaluación económica, se asumirá que los precios se mantendrán constantes a lo largo del horizonte de evaluación del proyecto, en virtud de un acuerdo contractual establecido con los proveedores.

Con respecto al número de operarios en planta (mano de obra directa), se considera la contratación de dos personas, quienes estarán a cargo de diversas tareas operativas: acondicionamiento de la materia prima, preparación de la formulación, limpieza y desinfección de equipos y superficies, control de parámetros operacionales en el equipo de secado por atomización, entre otras.

**Tabla 29**

*Costo total anual de mano de obra directa.*

	Cantidad	Pago mensual Unitario		Pago mensual total		Pago anual total	
Operario en planta	2	S/	1,300.00	S/	2,600.00	S/	31,200.00
Cargas sociales (25%)						S/	7,800.00
<b>Costo total M.O.D.</b>						<b>S/</b>	<b>39,000.00</b>

*Nota:* Las cargas sociales representan aproximadamente el 25% del pago anual, que corresponden a los conceptos de CTS, ESSALUD, gratificaciones, vacaciones, entre otros.

Por otro lado, se considera como mano de obra indirecta a un supervisor de producción, quien será el responsable de coordinar y supervisar el proceso productivo, asegurando el cumplimiento de los procedimientos operativos, buenas prácticas de manufactura, realizar controles de calidad y capacitar al personal. Además, a 2 vigilantes (en 2 turnos), quienes se encargarán de resguardar las instalaciones y controlar accesos.

**Tabla 30**

*Costo total anual de mano de obra indirecta.*

	Cantidad	Pago mensual Unitario		Pago mensual total		Pago anual total	
Supervisor de producción	1	S/	2,500.00	S/	2,500.00	S/	30,000.00
Vigilantes	2	S/	1,400.00	S/	2,800.00	S/	33,600.00
Cargas sociales (25%)						S/	15,900.00
<b>Costo total M.O.I.</b>						<b>S/</b>	<b>79,500.00</b>

*Nota:* Las cargas sociales representan aproximadamente el 25% del pago anual, que corresponden a los conceptos de CTS, ESSALUD, gratificaciones, vacaciones, entre otros.

La depreciación de los activos fijos es tomada en cuenta también en la evaluación económica debido a que representa el desgaste y pérdida de valor de los equipos utilizados en el proceso productivo. En el presente estudio, se aplicó un sistema de depreciación lineal, donde la tasa de depreciación es un porcentaje fijo anual sobre el valor del bien. El valor de recuperación se calculó restando al valor inicial del bien el producto de la tasa de depreciación por los años de uso. De acuerdo con lo establecido en el artículo 22 del reglamento de la Ley del Impuesto a la Renta, para maquinarias y equipos se considera un porcentaje anual de depreciación hasta un máximo de 10% (SUNAT, 2004). Por otro lado, se considerará el 3% para obras civiles.

**Tabla 31**

*Depreciación anual de máquinas y equipos.*

Máquina/equipo	Tasa de depreciación	Precio de adquisición	Depreciación anual	Valor de recupero
Congeladora	10%	S/ 13,649.00	S/ 1,364.90	S/ 6,824.50
Balanza industrial	10%	S/ 380.00	S/ 38.00	S/ 190.00
Mezclador - homogeneizador	10%	S/ 14,044.80	S/ 1,404.48	S/ 7,022.40
Secado por atomización	10%	S/ 131,784.00	S/ 13,178.40	S/ 65,892.00
Envasadora	10%	S/ 2,960.20	S/ 296.02	S/ 1,480.10
Sistema de ablandamiento de agua	10%	S/ 20,000.00	S/ 2,000.00	S/ 10,000.00
Furgoneta	10%	S/ 61,838.00	S/ 6,183.80	S/ 30,919.00
Instalaciones	10%	S/ 48,931.20	S/ 4,893.12	S/ 24,465.60
Equipos de computo	10%	S/ 5,895.00	S/ 589.50	S/ 2,947.50
Obras civiles(construcción)	3%	S/ 119,881.44	S/ 3,596.44	S/ 101,899.22
<b>Total de depreciación anual</b>			<b>S/ 33,544.66</b>	<b>S/ 251,640.32</b>

A continuación, se presentan los costos indirectos de fabricación asociados al consumo de agua y energía, servicios que son esenciales para llevar a cabo las diversas operaciones dentro del proceso de producción, tales como la preparación de la mezcla y la limpieza y desinfección de equipos. La estimación de costos se basó en el volumen de

agua necesario por lote de producción, para ello se tomó en cuenta la tarifa de agua potable indicada por SEDAPAL en zona industrial (6.253 S/ /m<sup>3</sup>) (GESTIÓN, 2021).

**Tabla 32**

*Costo total consumo de agua.*

Equipo	Tipo de agua	Consumo (kg/año)	Consumo (m <sup>3</sup> /año)	Consumo (S/ /año)	Consumo (S/ /año)
Mezclador - homogenizador	Agua blanda	4597.89	4.60	S/	28.75
Lavado de materiales	Agua doméstica	1560	1.56	S/	9.75
Lavado del spray dryer	Agua doméstica	9360	9.36	S/	58.53
Lavado de homogenizador	Agua doméstica	3120	3.12	S/	19.51
Servicios	Agua doméstica	35880	35.88	S/	224.36
<b>Total consumo de agua</b>				S/	340.90

Mientras que para la estimación del costo de energía eléctrica, se basó en los requerimientos energéticos de los equipos seleccionados, considerando que la tarifa establecida por el Banco Central de Reserva del Perú (0.45 S/ / Kw) (BCRP, 2023).

**Tabla 33**

*Costo total consumo de energía*

Equipos	Consumo (kW h <sup>-1</sup> )	Tiempo (h)	Consumo diario (kW)	Consumo mensual (kW)	Consumo anual (/S )
Congeladora	0.91	24	21.80	654.00	S/ 3,531.60
Balanza industrial	3	0.5	1.50	45.00	S/ 243.00
Mezclador - Homogeneizador	5.5	0.5	2.75	82.50	S/ 445.50
Secado por atomización	18	7	126.00	3780.00	S/ 20,412.00
Envasadora	0.5	0.95	0.48	14.25	S/ 76.95
Sistema de ablandamiento de agua	0.4	1	0.40	12.00	S/ 64.80
Iluminaria					S/ 720.00
<b>Total consumo de energía</b>					<b>S/ 25,493.85</b>

En base a los cálculos previamente realizados, se determina el costo total de los gastos indirectos de fabricación los cuales comprenden todos aquellos costos necesarios

para la operación de la planta piloto que no están directamente vinculados con la transformación de la materia prima en producto terminado.

**Tabla 34**

*Costo total indirecto de fabricación anual.*

Concepto		Costo anual
Consumo de agua	S/	340.90
Consumo de energía	S/	25,493.85
Depreciación de las máquinas	S/	33,544.66
Mano de Obra indirecta	S/	79,500.00
<b>Total costo indirecto de fabricación anual</b>	<b>S/</b>	<b>138,879.41</b>

En la siguiente tabla, se muestra el cálculo del costo de venta anual del producto, el cual representa el total de los costos incurridos para la fabricación y comercialización del complemento alimenticio. Cabe resaltar que la materia prima representa más del 90% del costo total de venta anual.

**Tabla 35**

*Costo total de venta anual.*

		Costo anual
Materia prima	S/	4,786,114.52
Mano de obra directa	S/	39,000.00
C. Indirectos de fabricación	S/	138,879.41
<b>Total costo de venta anual</b>	<b>S/</b>	<b>4,963,993.93</b>

#### **6.4. Determinación de gastos administrativos.**

Los gastos administrativos representan aquellos desembolsos necesarios para el funcionamiento general y la gestión operativa del proyecto. Para la evaluación económica, se ha considerado la contratación de un gerente, un personal para el área de marketing y un asistente administrativo, así como las cargas sociales y otros gastos que incluyen el consumo de materiales de oficina, servicios de telefonía, internet, así como otros gastos relacionados con la gestión contable, legal y documental del proyecto

**Tabla 36***Gastos administrativos anual.*

	Cantidad	Pago mensual Unitario	Pago mensual total	Pago anual total
Gerente	1	S/ 5,500.00	S/ 5,500.00	S/ 66,000.00
Marketing	1	S/ 1,800.00	S/ 1,800.00	S/ 21,600.00
Asistente administrativo	1	S/ 1,500.00	S/ 1,500.00	S/ 18,000.00
Cargas sociales (25%)				S/ 26,400.00
Otros gastos				S/ 6,000.00
<b>Total gastos administrativos anual</b>				<b>S/ 138,000.00</b>

*Nota:* Las cargas sociales representan aproximadamente el 25% del pago anual, que corresponden a los conceptos de CTS, ESSALUD, gratificaciones, vacaciones, entre otros.

### 6.5. Determinación de gastos de venta

Los gastos de ventas comprenden todos aquellos costos asociados a las actividades necesarias para colocar el producto en el mercado y facilitar su comercialización. Estos incluyen los gastos relacionados con la preparación de los artículos para la venta, actividades de promoción y publicidad, así como los costos logísticos involucrados en la distribución del producto.

**Tabla 37***Gastos de ventas anual.*

	Cantidad	Pago mensual Unitario	Pago mensual total	Pago anual
Supervisor de almacén y distribución	1	S/ 2,500.00	S/ 2,500.00	S/ 30,000.00
Chofer	1	S/ 1,300.00	S/ 1,300.00	S/ 15,600.00
Cargas sociales (25%)				S/ 11,400.00
Propaganda	200	S/ 7.00	S/ 1,400.00	S/ 16,800.00
Otros gastos				S/ 6,000.00
<b>Gasto de venta total</b>				<b>S/ 79,800.00</b>

*Nota:* Las cargas sociales representan aproximadamente el 25% del pago anual, que corresponden a los conceptos de CTS, ESSALUD, gratificaciones, vacaciones, entre otros.

## **6.6. Estados financieros del proyecto.**

En el presente estudio, orientado al diseño e implementación de una planta piloto para la producción de un complemento alimenticio a base de espirulina, se han elaborado los principales estados financieros con el fin de evaluar su viabilidad económica.

### **6.6.1. Estado de pérdidas y ganancias.**

El estado de pérdidas y ganancias resume los ingresos generados por la comercialización del complemento alimenticio, así como los costos y gastos asociados a su producción y operación. Además, permite determinar el beneficio neto anual esperado y evaluar la rentabilidad operativa del proyecto.

### **6.6.2. Flujo de caja económico.**

El flujo de caja económico presenta la proyección de los ingresos y egresos estimados de efectivo durante el periodo de evaluación de cinco años. Este estado financiero permite analizar la capacidad del proyecto para generar liquidez operativa y recuperar la inversión inicial en el tiempo previsto. A partir de esta información, se construyó el flujo de caja económico acumulado, el cual sirvió como base para el cálculo de los principales indicadores de rentabilidad: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permiten sustentar la viabilidad económica del escalamiento y producción del complemento alimenticio a nivel planta piloto.

**Tabla 38***Estado de pérdidas y ganancias.*

		<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Ventas</b>	S/	5,728,320.00	S/ 5,842,886.40	S/ 5,959,744.13	S/ 6,078,939.01	S/ 6,200,517.79
(-) Costo de ventas	S/	4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93
(-) Depreciación	S/	33,544.66	S/ 33,544.66	S/ 33,544.66	S/ 33,544.66	S/ 33,544.66
<b>Utilidad Bruta</b>	S/	730,781.41	S/ 845,347.81	S/ 962,205.53	S/ 1,081,400.42	S/ 1,202,979.20
(-) Gastos Administrativos	S/	138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00
(-) Gastos de ventas	S/	79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00
<b>Utilidad de Operación</b>	S/	512,981.41	S/ 627,547.81	S/ 744,405.53	S/ 863,600.42	S/ 985,179.20
(-) Gastos financieros	S/	29,600.00	S/ 24,554.49	S/ 19,105.34	S/ 13,220.25	S/ 6,864.36
<b>Utilidad Antes de los Imp.</b>	S/	483,381.41	S/ 602,993.32	S/ 725,300.20	S/ 850,380.16	S/ 978,314.83
(-) A la renta 30%	S/	145,014.42	S/ 180,898.00	S/ 217,590.06	S/ 255,114.05	S/ 293,494.45
<b>Utilidad antes de la R.L.</b>	S/	338,366.98	S/ 422,095.32	S/ 507,710.14	S/ 595,266.11	S/ 684,820.38
(-) Reserva legal 10%	S/	33,836.70	S/ 42,209.53	S/ 50,771.01	S/ 59,526.61	S/ 68,482.04
<b>Utilidad Neta</b>	<b>S/</b>	<b>304,530.29</b>	<b>S/ 379,885.79</b>	<b>S/ 456,939.12</b>	<b>S/ 535,739.50</b>	<b>S/ 616,338.35</b>

**Tabla 39***Flujo de caja económico.*

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
Inversión	-S/ 1,548,967.64					
Valor recuperado						S/ 251,640.32
(+) Ventas		S/ 5,728,320.00	S/ 5,842,886.40	S/ 5,959,744.13	S/ 6,078,939.01	S/ 6,200,517.79
(-) Costo de ventas		S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93	S/ 4,963,993.93
(-) Gastos administrativos		S/ 138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00	S/ 138,000.00
(-) Gastos de ventas		S/ 79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00	S/ 79,800.00
(-) Impuesto a la renta 30%		S/ 145,014.42	S/ 180,898.00	S/ 217,590.06	S/ 255,114.05	S/ 293,494.45
<b>Flujo de caja económico</b>	<b>-S/ 1,548,967.64</b>	<b>S/ 401,511.65</b>	<b>S/ 480,194.47</b>	<b>S/ 560,360.14</b>	<b>S/ 642,031.03</b>	<b>S/ 976,869.73</b>

**Tabla 40***Flujo de caja económico acumulado.*

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
Flujo de caja económico	-S/ 1,548,967.64	S/ 401,511.65	S/ 480,194.47	S/ 560,360.14	S/ 642,031.03	S/ 976,869.73
Tasa de actualización	1	0.91	0.83	0.75	0.68	0.62
Flujo actualizado	-S/ 1,548,967.64	S/ 365,375.60	S/ 398,561.41	S/ 420,270.10	S/ 436,581.10	S/ 605,659.23
<b>Flujo de caja acumulado</b>	<b>-S/ 1,548,967.64</b>	<b>-S/ 1,183,592.04</b>	<b>-S/ 785,030.63</b>	<b>-S/ 364,760.52</b>	<b>S/ 71,820.58</b>	<b>S/ 677,479.81</b>

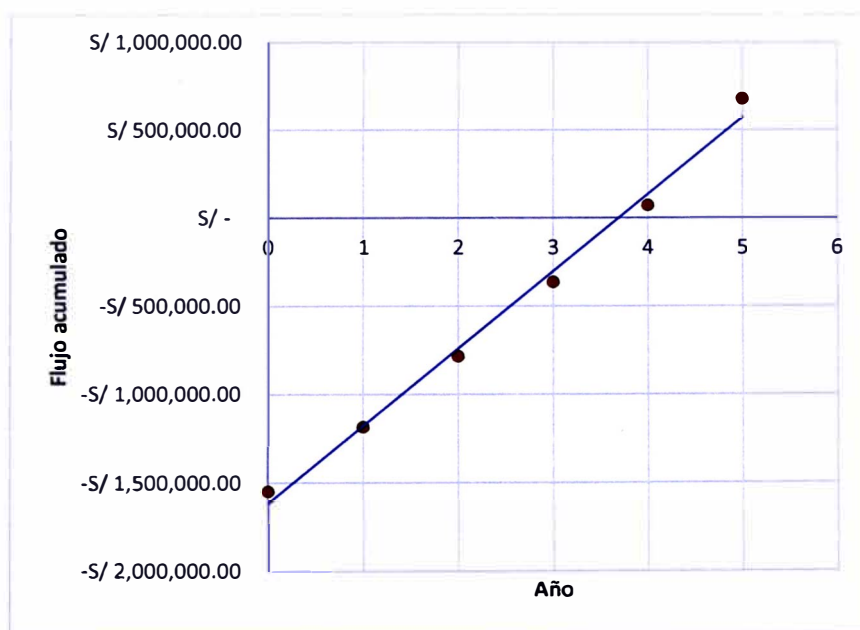
**Tabla 41**

*Indicadores económicos.*

VANE	S/	677,479.81
VA	S/	2,227,947.47
TIR		23.62%
Costo de oportunidad		10%
Periodo de recuperación (años)		3.69
Relación beneficio/costo del proyecto (B/C)		1.44

**Figura 33**

*Flujo de caja económico acumulado y periodo de recuperación.*



*Nota:* La línea de color rojo representa la tendencia lineal de recuperación de la inversión ( $R^2 = 0.993$ ).

### **6.7. Evaluación financiera.**

Para la ejecución del proyecto, se requiere una inversión total de S/ 1 548 967.64, de la cual el 76.11 % corresponde a un aporte propio por parte del promotor del proyecto, mientras que el 23.89 % será financiado a través de un préstamo (financiamiento externo). Se proyecta que este monto cubra el costo total del terreno.

A continuación, se calculan las cuotas, intereses y amortización de la deuda. El tiempo del pago será completado en un periodo de 5 años, considerando una tasa de interés es del 8% capitalizable anualmente.

**Tabla 42**

*Consideraciones para el pago de la deuda.*

Préstamo=C	S/	370,000.00	soles
Tiempo=n		5	años
Tasa interés=i		8%	anual
Pago=R	S/	92,668.89	anual

**Tabla 43**

*Pago, interés y amortización de la deuda producto del financiamiento.*

Año		Pago		Interés		Amortización		Saldo
0		-		-		-	S/	370,000.00
1	S/	92,668.89	S/	29,600.00	S/	63,068.89	S/	306,931.11
2	S/	92,668.89	S/	24,554.49	S/	68,114.40	S/	238,816.71
3	S/	92,668.89	S/	19,105.34	S/	73,563.55	S/	165,253.16
4	S/	92,668.89	S/	13,220.25	S/	79,448.64	S/	85,804.53
5	S/	92,668.89	S/	6,864.36	S/	85,804.53	S/	-

### 6.7.1. Flujo de caja financiero.

Tomando en consideración los pagos de intereses y amortizaciones, así como el escudo fiscal por los gastos financieros (asumiendo un beneficio tributario por deducción de intereses), se presenta el flujo de caja financiero y flujo de caja financiero acumulado.

**Tabla 44***Flujo de caja financiero.*

	Año 0		Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5	
Flujo de caja económico	-S/	1,548,967.64	S/	401,511.65	S/	480,194.47	S/	560,360.14	S/	642,031.03	S/	976,869.73
Financiamiento	S/	370,000.00										
Interés			S/	29,600.00	S/	24,554.49	S/	19,105.34	S/	13,220.25	S/	6,864.36
Amortización			-S/	63,068.89	-S/	68,114.40	-S/	73,563.55	-S/	79,448.64	-S/	85,804.53
Escudo fiscal gastos fina.			S/	8,880.00	S/	7,366.35	S/	5,731.60	S/	3,966.08	S/	2,059.31
<b>Flujo de caja financiero</b>	<b>-S/</b>	<b>1,178,967.64</b>	<b>S/</b>	<b>317,722.76</b>	<b>S/</b>	<b>394,891.93</b>	<b>S/</b>	<b>473,422.85</b>	<b>S/</b>	<b>553,328.22</b>	<b>S/</b>	<b>886,260.15</b>

**Tabla 45***Flujo de caja financiero acumulado.*

	Año 0		Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5	
Flujo de caja financiero	-S/	1,178,967.64	S/	317,722.76	S/	394,891.93	S/	473,422.85	S/	553,328.22	S/	886,260.15
factor de actualización		1		0.91		0.83		0.75		0.68		0.62
Flujo de caja actualizado	-S/	1,178,967.64	S/	289,127.71		327760.3041	S/	355,067.14	S/	376,263.19	S/	549,481.30
<b>Flujo de caja actual Acumulado</b>	<b>-S/</b>	<b>1,178,967.64</b>	<b>-S/</b>	<b>889,839.93</b>	<b>-S/</b>	<b>562,079.62</b>	<b>-S/</b>	<b>207,012.49</b>	<b>S/</b>	<b>169,250.70</b>	<b>S/</b>	<b>718,732.00</b>

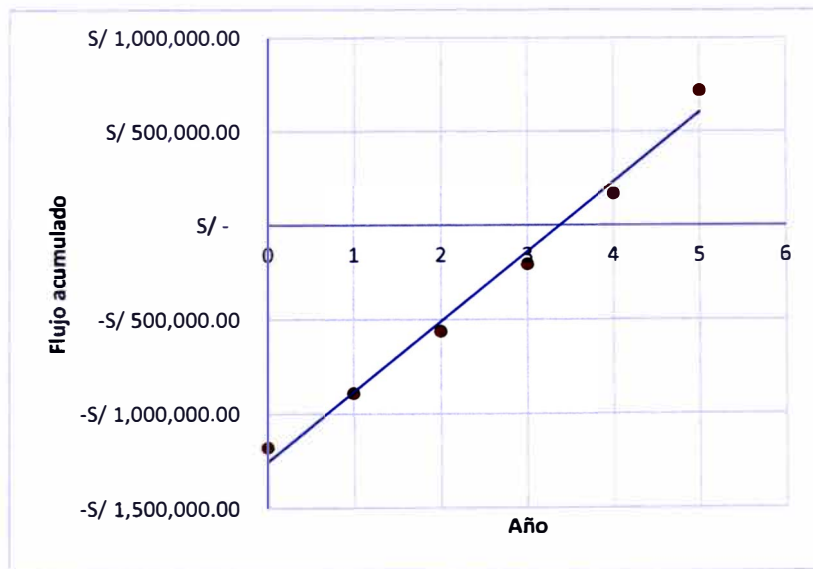
**Tabla 46**

*Indicadores financieros.*

VANF	S/	718,732.00
VA	S/	1,899,113.88
TIR		28.00%
Costo de oportunidad		10%
Periodo de recuperación(años)		3.37
B/C		1.61

**Figura 34**

*Flujo de caja financiero y periodo de recuperación.*



*Nota:* La línea de color rojo representa la tendencia lineal de recuperación de la inversión ( $R^2 = 0.988$ ).

### **6.8. Análisis de sensibilidad.**

El análisis de sensibilidad económica permite identificar cómo se ve afectado el Valor Actual Neto Económico (VANE) del proyecto frente a variaciones en el Costo de Oportunidad del Capital (COK). El COK representa la tasa mínima de retorno exigida por los inversionistas. Este indicador es fundamental para los tomadores de decisiones, ya que permite determinar si el proyecto genera suficiente valor económico como para justificar su ejecución.

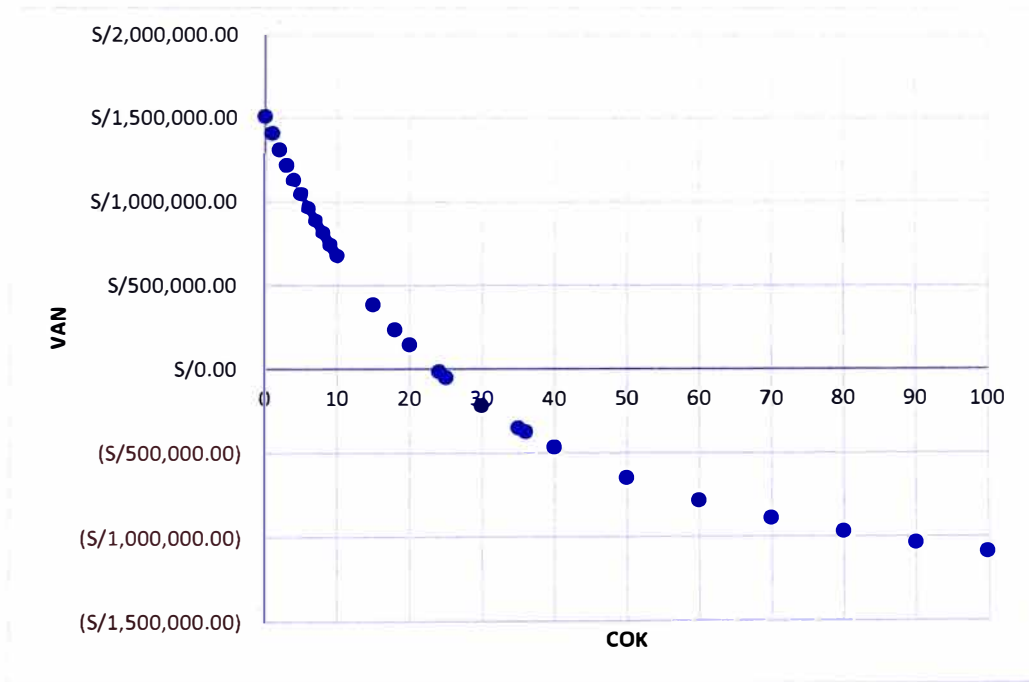
**Tabla 47***Sensibilidad económica del proyecto.*

COK	VANE
0%	S/ 1,511,999.38
1%	S/ 1,409,618.65
2%	S/ 1,312,177.49
3%	S/ 1,219,380.42
4%	S/ 1,130,952.69
5%	S/ 1,046,638.62
6%	S/ 966,200.09
7%	S/ 889,415.15
8%	S/ 816,076.81
9%	S/ 745,991.86
10%	S/ 678,979.83
15%	S/ 384,475.05
18%	S/ 235,368.37
20%	S/ 145,579.75
24%	-S/ 14,184.87
25%	-S/ 50,452.88
30%	-S/ 213,024.49
35%	-S/ 349,166.17
36%	-S/ 373,715.88
40%	-S/ 464,203.88
50%	-S/ 646,378.58
60%	-S/ 782,512.50
70%	-S/ 886,899.26
80%	-S/ 968,755.90
90%	-S/ 1,034,213.48
100%	-S/ 1,087,464.06

*Nota:* Los resultados muestran que el proyecto mantiene un VAN positivo hasta un COK de 23.61 %, marcando el umbral de rentabilidad.

**Figura 35**

*Análisis de sensibilidad (Variación del VAN con respecto al COK).*



## Conclusiones

La espirulina fresca reporta 66% de contenido de proteína de acuerdo con el análisis proximal; además, es una proteína completa debido a que presenta todos los aminoácidos esenciales.

El encapsulado de espirulina presenta 32 % de contenido de proteínas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque el valor de proteínas es inferior al de la espirulina no tratada, la microencapsulación mantuvo todos los aminoácidos esenciales con solo ligeras variaciones.

Fue posible microencapsular la espirulina luego de muchas pruebas y abundante revisión bibliográfica; las condiciones óptimas operación fueron 174 °C, 12 ml min<sup>-1</sup> de caudal y 80% de ventilador; con una relación espirulina:maltodextrina 1:4

El análisis FTIR permitió confirmar la microencapsulación de espirulina al presentar bandas de absorción característicos tanto de la maltodextrina como la espirulina, no se generaron nuevos grupos funcionales.

Los resultados microbiológicos indican que el complemento alimenticio presenta una buena estabilidad microbiológica durante el periodo de evaluación, manteniéndose dentro de los parámetros aceptables. La reducción progresiva de los microorganismos refleja una efectiva conservación del producto, atribuida tanto al proceso de microencapsulación por secado por atomización, como al adecuado almacenamiento y formulación del

La cuantificación de proteínas se determinó mediante el método de Bradford donde se lleva a cabo la interacción del colorante Coomassie Brilliant Blue G-250 con los aminoácidos arginina, lisina, histidina, triptófano, tirosina y fenilamina de la espirulina. Producto del análisis del tratamiento de datos, se ha logrado identificar que a mayor proporción de encapsulante, mayor contenido de proteínas en el microencapsulado; por

tanto, se concluye que la maltodextrina cumple la función protectora de encapsulante y contrarresta el efecto de la desnaturalización de proteínas por acción de la temperatura.

El estudio económico presentado en este estudio es estrictamente referencial considerando que un estudio a nivel piloto tiene como objetivo principal verificar el comportamiento de las variables en juego, en este caso del secado por atomización, se determinó que la relación espirulina:maltodextrina y temperatura influyeron significativamente en el rendimiento del proceso.

Finalmente, de acuerdo con la propuesta de diseño del proceso de producción, el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) financiero de S/ 718 732.00, Tasa Interna de Retorno (TIR) de 28.00% y un periodo de recuperación de la inversión de 3.37 años.

## **Recomendaciones**

Se recomienda estandarizar las buenas prácticas en el proceso de cultivo, cosecha, almacenamiento y distribución en los centros de producción de espirulina para tener una materia prima homogénea e inocua. Para ello es necesario la digitalización en el proceso, así como el seguimiento continuo a los centros de producción.

Se recomienda escalar el proceso utilizando equipos de mayor capacidad, complementado con un estudio de mercado que permita evaluar la viabilidad técnica y económica de la producción a nivel industrial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abozenadah, H. A., Bishop, A. H., Bittner, S. D., & Flatt, P. M. (2018). *Allied Health Chemistry*. <https://www.wou.edu/chemistry/courses/online-chemistry->
- Ahmed, E., Suzuki, K., & Nishida, T. (2023). Micro- and Macro-Algae Combination as a Novel Alternative Ruminant Feed with Methane-Mitigation Potential. *Animals* 2023, Vol. 13, Page 796, 13(5), 796. <https://doi.org/10.3390/ANI13050796>
- Aidoo, R. P., Depypere, F., Afoakwa, E. O., & Dewettinck, K. (2013). Industrial manufacture of sugar-free chocolates – Applicability of alternative sweeteners and carbohydrate polymers as raw materials in product development. *Trends in Food Science & Technology*, 32(2), 84–96. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2013.05.008>
- Ajomiwe, N., Boland, M., Phongthai, S., Bagiyal, M., Singh, J., & Kaur, L. (2024). Protein Nutrition: Understanding Structure, Digestibility, and Bioavailability for Optimal Health. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1771, 13(11), 1771. <https://doi.org/10.3390/FOODS13111771>
- Al-Dhabi, N. A. (2013). Heavy metal analysis in commercial Spirulina products for human consumption. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 383–388. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2013.04.006>
- AlFadhly, N. K. Z., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., & Cacciola, F. (2022). Tendencies Affecting the Growth and Cultivation of Genus Spirulina: An Investigative Review on Current Trends. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 3063, 11(22), 3063. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11223063>
- AlFadhly, N. K. Z., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., Cacciola, F., & Narayanankutty, A. (2022). Trends and Technological Advancements in the Possible Food Applications of Spirulina and Their Health Benefits: A Review. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27175584>

- Ali, A., Devarajan, S., Manickavasagan, A., & Ata, A. (2022). Antinutritional Factors and Biological Constraints in the Utilization of Plant Protein Foods. *Plant Protein Foods*, 407–438. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_14)
- Alvarado Jaramillo, M. L., Calderón Pinillos, S., Cancino Laos, C., Castro Muñoz, M. del R., López Bonilla, C., Meza Contreras, V., Moreno Díaz, P., & Redolfi de Huiza, I. (2012). *BIOLOGÍA*.
- Anvar, A. A., & Nowruz, B. (2021). Bioactive Properties of Spirulina: A Review. *Microbial Bioactives*, 4(1), 134–142. <https://doi.org/10.25163/microbbioacts.412117B0719110521>
- Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). (2023). *Evolución de los precios de la energía eléctrica en Perú*. TERMASOL. [https://termasol.net/2024/07/kw-a-soles/#google\\_vignette](https://termasol.net/2024/07/kw-a-soles/#google_vignette)
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2020). *Effects of Water Activity (aw)*. <https://doi.org/10.1002/9780470376454.ch10>
- Batista de Oliveira, T. T., Miranda dos Reis, I., Bastos de Souza, M., da Silva Bispo, E., Fonseca Maciel, L., Druzian, J. I., Lordelo Guimarães Tavares, P. P., de Oliveira Cerqueira, A., dos Santos Boa Morte, E., Abreu Glória, M. B., Lima Deus, V., & Radomille de Santana, L. R. (2021). Microencapsulation of Spirulina sp. LEB-18 and its incorporation in chocolate milk: Properties and functional potential. *LWT*, 148, 111674. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111674>
- Bauer, J. M., Verlaan, S., Bautmans, I., Brandt, K., Donini, L. M., Maggio, M., McMurdo, M. E. T., Mets, T., Seal, C., Wijers, S. L., Ceda, G. P., De Vito, G., Donders, G., Drey, M., Greig, C., Holmbäck, U., Narici, M., McPhee, J., Poggiogalle, E., ... Cederholm, T. (2015). Effects of a Vitamin D and Leucine-Enriched Whey Protein Nutritional Supplement on Measures of Sarcopenia in Older Adults, the PROVIDE Study: A

- Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Trial. *Journal of the American Medical Directors Association*, 16(9), 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2015.05.021>
- Berraquero-García, C., Pérez-Gálvez, R., Espejo-Carpio, F. J., Guadix, A., Guadix, E. M., & García-Moreno, P. J. (2023). Encapsulation of Bioactive Peptides by Spray-Drying and Electrospraying. *Foods*, 12(10), 2005. <https://doi.org/10.3390/foods12102005>
- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (2024). *Handbook of powders: Processes and properties* (Elsevier).
- Bitam, A., & Aissaoui, O. (2020). Spirulina platensis, oxidative stress, and diabetes. *Diabetes: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants*, 325–331. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815776-3.00033-4>
- Blanco, A., & Blanco, G. (2022). Proteins. *Medical Biochemistry*, 21–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91599-1.00004-3>
- Bleakley, S., & Hayes, M. (2021). Functional and Bioactive Properties of Protein Extracts Generated from Spirulina platensis and Isochrysis galbana T-Iso. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 3964, 11(9), 3964. <https://doi.org/10.3390/APP11093964>
- Bocaneala, M., Hategan, A. R., David, M., Dehelean, A., Cristea, G., Szücs-Balázs, J.-Z., Rakosy-Tican, E., & Magdas, D. A. (2025). Profiling the Spirulina Dietary Supplements Available on the Romanian Market. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 2658, 15(5), 2658. <https://doi.org/10.3390/APP15052658>
- Bortolini, D. G., Maciel, G. M., Fernandes, I. de A. A., Pedro, A. C., Rubio, F. T. V., Branco, I. G., & Haminiuk, C. W. I. (2022). Functional properties of bioactive compounds from Spirulina spp.: Current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100134. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHMS.2022.100134>
- Butreddy, A., Janga, K. Y., Ajarapu, S., Sarabu, S., & Dudhipala, N. (2021). Instability of therapeutic proteins — An overview of stresses, stabilization mechanisms and

- analytical techniques involved in lyophilized proteins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 309–325. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.11.188>
- Calligaris, S., Moreton, M., Melchior, S., Mosca, A. C., Pellegrini, N., & Anese, M. (2022). Designing food for the elderly: the critical impact of food structure. In *Food and Function* (Vol. 13, Issue 12, pp. 6467–6483). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2fo00099g>
- Centenario. (2024). ¿Por qué Lurín es considerado el hub industrial más consolidado de Lima Sur? - *Macropolis*. <https://centenariomacropolis.com.pe/por-que-lurin-es-considerado-el-hub-industrial-mas-consolidado-de-lima-sur/>
- Chang, M., & Liu, K. (2024). *Arthrospira platensis* as future food: a review on functional ingredients, bioactivities and application in the food industry. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(3), 1197–1212. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16882>
- Chang, S. K. C., & Zhang, Y. (2017). *Protein Analysis*. 18(1), 315–331. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_18)
- Chaouachi, M., Vincent, S., & Groussard, C. (2023). A Review of the Health-Promoting Properties of Spirulina with a Focus on athletes' Performance and Recovery. *Journal of Dietary Supplements*.
- Chen, J., Wang, Y., Benemann, J. R., Zhang, X., Hu, H., & Qin, S. (2016). Microalgal industry in China: challenges and prospects. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 715–725. <https://doi.org/10.1007/S10811-015-0720-4/METRICS>
- Coelho-Junior, H. J., Calvani, R., Azzolino, D., Picca, A., Tosato, M., Landi, F., Cesari, M., & Marzetti, E. (2022). Protein Intake and Sarcopenia in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8718. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19148718/S1>
- Colonia, B. S. O., de Melo Pereira, G. V., Carvalho, J. C. de, Karp, S. G., Rodrigues, C., Soccol, V. T., Fanka, L. S., & Soccol, C. R. (2023). Deodorization of algae biomass to

- overcome off-flavors and odor issues for developing new food products: Innovations, trends, and applications. *Food Chemistry Advances*, 2, 100270. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2023.100270>
- Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Rosa, G. M., Moraes, L., Morais, M. G., & Mitchell, B. G. (2019). Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery. *Bioresource Technology*, 292, 121946. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121946>
- Costa, M. M., Spinola, M. P., & Prates, J. A. M. (2023). Combination of Mechanical/Physical Pretreatments with Trypsin or Pancreatin on *Arthrospira platensis* Protein Degradation. *Agriculture* 2023, Vol. 13, Page 198, 13(1), 198. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE13010198>
- Costa, V. D., Filippini, R., Zusso, M., Caniato, R., & Piovan, A. (2022). Monitoring of Spirulina Flakes and Powders from Italian Companies. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 3155, 27(10), 3155. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27103155>
- Čulina, P., Zorić, Z., Garofulić, I. E., Repajić, M., Dragović-Uzelac, V., & Pedisić, S. (2023). Optimization of the Spray-Drying Encapsulation of Sea Buckthorn Berry Oil. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 2448, 12(13), 2448. <https://doi.org/10.3390/FOODS12132448>
- da Silva Júnior, M. E., Araújo, M. V. R. L., Martins, A. C. S., dos Santos Lima, M., da Silva, F. L. H., Converti, A., & Maciel, M. I. S. (2023). Microencapsulation by spray-drying and freeze-drying of extract of phenolic compounds obtained from ciriguela peel. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40390-4>
- de Sire, A., Ferrillo, M., Lippi, L., Agostini, F., de Sire, R., Ferrara, P. E., Raguso, G., Riso, S., Rocuzzo, A., Ronconi, G., Invernizzi, M., & Migliario, M. (2022). Sarcopenic Dysphagia, Malnutrition, and Oral Frailty in Elderly: A Comprehensive Review. *Nutrients* 2022, Vol. 14, Page 982, 14(5), 982. <https://doi.org/10.3390/NU14050982>

- de Souza, M. P., Hoeltz, M., Brittes Benitez, L., Machado, É. L., & de Souza Schneider, R. de C. (2019). Microalgae and Clean Technologies: A Review. In *Clean - Soil, Air, Water* (Vol. 47, Issue 11). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/clen.201800380>
- Decker, B. L. A., Miguel, E. de C., Fonteles, T. V., Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2024). Impact of Spray Drying on the Properties of Grape Pomace Extract Powder. *Processes* 2024, Vol. 12, Page 1390, 12(7), 1390. <https://doi.org/10.3390/PR12071390>
- Demarco, M., Moraes, J. O. de, Ferrari, M. C., Neves, F. de F., Laurindo, J. B., & Tribuzi, G. (2022). Production of Spirulina (*Arthrospira platensis*) powder by innovative and traditional drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 45(1). <https://doi.org/10.1111/JFPE.13919>
- Diaz, C. J., Douglas, K. J., Kang, K., Kolarik, A. L., Malinovski, R., Torres-Tiji, Y., Molino, J. V., Badary, A., & Mayfield, S. P. (2023). Developing algae as a sustainable food source. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1029841. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.1029841/XML/NLM>
- Díaz-Montes, E. (2023). Wall Materials for Encapsulating Bioactive Compounds via Spray-Drying: A Review. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 2659, 15(12), 2659. <https://doi.org/10.3390/POLYM15122659>
- ElFar, O. A., Billa, N., Lim, H. R., Chew, K. W., Cheah, W. Y., Munawaroh, H. S. H., Balakrishnan, D., & Show, P. L. (2022). Advances in delivery methods of *Arthrospira platensis* (spirulina) for enhanced therapeutic outcomes. *Bioengineered*, 13(6), 14681–14718. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2100863>
- Engelking, L. R. (2015). Protein Structure. *Textbook of Veterinary Physiological Chemistry*, 18–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391909-0.50004-9>
- Estado Peruano. (2025). Inflación de solo 1.9 % a nivel nacional al cierre del 2024 favorece poder adquisitivo de las familias, resalta premier Adrianzén. *Presidencia Del Consejo*

de Ministros. <https://www.gob.pe/institucion/pcm/noticias/1085517-inflacion-de-solo-1-9-a-nivel-nacional-al-cierre-del-2024-favorece-poder-adquisitivo-de-las-familias-resalta-premier-adrianzen>

Estevinho, B. N., Rocha, F., Santos, L., & Alves, A. (2013). Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 31(2), 138–155. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2013.04.001>

Etter, B., Michel, F., & Siegrist, M. (2024). Which are the most promising protein sources for meat alternatives? *Food Quality and Preference*, 119, 105226. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2024.105226>

Fabre, J. F., Niangoran, N. U. F., Gaignard, C., Buso, D., Mouloungui, Z., & Valentin, R. (2022). Extraction, purification and stability of C-phycoerythrin from *Arthrospira platensis*. In *European Food Research and Technology* (Vol. 248, Issue 6, pp. 1583–1599). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-03987-z>

Faieta, M., Corradini, M. G., Di Michele, A., Ludescher, R. D., & Pittia, P. (2020). Effect of Encapsulation Process on Technological Functionality and Stability of *Spirulina Platensis* Extract. *Food Biophysics*, 15(1), 50–63. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09602-1>

Fernandez, J. (2014). *Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas. Fotobiorreactores Para El Cultivo Masivo de Microalgas.* <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html>

Fernández-Condori, R., Vera-Sánchez, G. M., Durán-Agüero, S., Fernández-Condori, R., Vera-Sánchez, G. M., & Durán-Agüero, S. (2024). Asociación entre la dependencia y la evaluación nutricional, fragilidad y detección de sarcopenia en personas mayores

peruanas. *Revista Chilena de Nutrición*, 51(4), 295–301.  
<https://doi.org/10.4067/S0717-75182024000400295>

Flores-Flores, O., Zevallos-Morales, A., Pollard, S. L., Checkley, W., Siddharthan, T., Hurst, J. R., Bernabé-Ortiz, A., Runzer-Colmenares, F. M., Witham, M. D., & Parodi, J. F. (2024). Sarcopenia and sarcopenic obesity among community-dwelling Peruvian adults: A cross-sectional study. *PLOS ONE*, 19(4), e0300224.  
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0300224>

Foo, S. C., Mok, C. Y., Ho, S. Y., & Khong, N. M. H. (2023). Microalgal culture preservation: Progress, trends and future developments. *Algal Research*, 71, 103007.  
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2023.103007>

Franco, M. F., Leme, D. E. da C., Coimbra, I. B., & Coimbra, A. M. V. (2024). Prevalence and factors associated with sarcopenia among Brazilian older adults: An exploratory network analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 123, 105438.  
<https://doi.org/10.1016/J.ARCHGER.2024.105438>

Furuta, T., & Neoh, T. L. (2021). Microencapsulation of food bioactive components by spray drying: A review. *Drying Technology*, 39(12), 1800–1831.  
<https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1862181>

Garofalo, C., Norici, A., Mollo, L., Osimani, A., & Aquilanti, L. (2022). Fermentation of Microalgal Biomass for Innovative Food Production. *Microorganisms 2022*, Vol. 10, Page 2069, 10(10), 2069. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10102069>

GESTIÓN. (2021, December 27). *Alza de tarifa de agua y desagüe en Lima recién se dará en el 2024*. SEDAPAL. <https://gestion.pe/economia/alza-de-tarifa-de-agua-y-desague-en-lima-recien-se-dara-en-el-2024-noticia/>

Giacosa, A., Barrile, G. C., Mansueto, F., & Rondanelli, M. (2024). The nutritional support to prevent sarcopenia in the elderly. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1379814.  
<https://doi.org/10.3389/FNUT.2024.1379814/BIBTEX>

- Gromek, W., Kołdej, N., Kurowski, M., & Majsiak, E. (2024). Spirulina (*Arthrospira platensis*): Antiallergic Agent or Hidden Allergen? A Literature Review. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1052, 13(7), 1052. <https://doi.org/10.3390/FOODS13071052>
- Guo, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Yu, D. (2024). Drying technologies of novel food resources for future foods: Progress, challenges and application prospects. *Food Bioscience*, 60, 104490. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.104490>
- Habib, M. A. B. ; P. M. ; H. T. C. ; H. M. R. ; Fisheries and A. M. D. (2008). A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. *Breeding Plans for Ruminant Livestock in the Tropics.*, 75–110. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i0424e>
- Hachicha, R., Elleuch, F., Hlima, H. Ben, Dubessay, P., de Baynast, H., Delattre, C., Pierre, G., Hachicha, R., Abdelkafi, S., Michaud, P., & Fendri, I. (2022). Biomolecules from Microalgae and Cyanobacteria: Applications and Market Survey. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 1924, 12(4), 1924. <https://doi.org/10.3390/APP12041924>
- Han, P., Li, J., Zhong, H., Xie, J., Zhang, P., Lu, Q., Li, J., Xu, P., Chen, P., Leng, L., & Zhou, W. (2021). Anti-oxidation properties and therapeutic potentials of spirulina. *Algal Research*, 55, 102240. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2021.102240>
- Hernández, A., González-Moya, M., Márquez, A., & Acevedo, L. (2024). Review microalgae drying: A comprehensive exploration from conventional air drying to microwave drying methods. *Future Foods*, 10, 100420. <https://doi.org/10.1016/J.FUFO.2024.100420>
- Hernández-López, I., Alamprese, C., Cappa, C., Prieto-Santiago, V., Abadias, M., & Aguiló-Aguayo, I. (2023). Effect of Spirulina in Bread Formulated with Wheat Flours of Different Alveograph Strength. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 3724, 12(20), 3724. <https://doi.org/10.3390/FOODS12203724>
- Herrera-Cuenca, M., Yépez García, M. C., Cortés Sanabria, L. Y., Hernández, P., Sifontes, Y., Ramírez, G., Vásquez, M., Gómez, G., Liria-Domínguez, M. R., Rigotti, A., Fisberg,

- M., Kovaslkys, I., & Landaeta-Jiménez, M. (2023). Contribution of Proteins to the Latin American Diet: Results of the ELANS Study. *Nutrients*, *15*(3), 669. <https://doi.org/10.3390/NU15030669/S1>
- Hueso, D., Fontecha, J., & Gómez-Cortés, P. (2022). Comparative study of the most commonly used methods for total protein determination in milk of different species and their ultrafiltration products. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 925565. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.925565/BIBTEX>
- Iqbal, M. N., & Hadiyanto, H. (2020). Experimental investigation of phycocyanin microencapsulation using maltodextrin as a coating material with spray drying method. *AIP Conference Proceedings*, *2197*. <https://doi.org/10.1063/1.5140953>
- Ispoglou, T., Witard, O. C., Duckworth, L. C., & Lees, M. J. (2021). The efficacy of essential amino acid supplementation for augmenting dietary protein intake in older adults: implications for skeletal muscle mass, strength and function. *Proceedings of the Nutrition Society*, *80*(2), 230–242. <https://doi.org/10.1017/S0029665120008010>
- Jang, Y. J. (2022). The Effects of Protein and Supplements on Sarcopenia in Human Clinical Studies: How Older Adults Should Consume Protein and Supplements. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *33*(2), 143. <https://doi.org/10.4014/JMB.2210.10014>
- Jia, X., Cui, H., Qin, S., Ren, J., Zhang, Z., An, Q., Zhang, N., Yang, J., Yang, Y., Fan, G., & Pan, S. (2024). Characterizing and decoding the key odor compounds of *Spirulina platensis* at different processing stages by sensomics. *Food Chemistry*, *461*, 140944. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2024.140944>
- Jung, H. W., Kim, S. W., Kim, I. Y., Lim, J. Y., Park, H. S., Song, W., Yoo, H. J., Jang, H. C., Kim, K., Park, Y., Park, Y. J., Yang, S. J., Lee, H. J., & Won, C. W. (2018). Protein Intake Recommendation for Korean Older Adults to Prevent Sarcopenia: Expert Consensus by the Korean Geriatric Society and the Korean Nutrition Society. *Annals*

*of Geriatric Medicine and Research*, 22(4), 167.  
<https://doi.org/10.4235/AGMR.18.0046>

Khalil, S., Mahnashi, M. H., Hussain, M., Zafar, N., Waqar-Un-Nisa, Khan, F. S., Afzal, U., Shah, G. M., Niazi, U. M., Awais, M., & Irfan, M. (2021). Exploration and determination of algal role as Bioindicator to evaluate water quality – Probing fresh water algae. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5728–5737.  
<https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2021.06.004>

Khan, J., Chattopadhyay, A., & Shaw, S. (2023). Assessment of nutritional status using anthropometric index among older adult and elderly population in India. *Scientific Reports 2023 13:1*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39167-6>

Kurek, M. A., Onopiuk, A., Pogorzelska-nowicka, E., Szpicer, A., Zalewska, M., & Pótorak, A. (2022). Novel Protein Sources for Applications in Meat-Alternative Products— Insight and Challenges. *Foods 2022, Vol. 11, Page 957*, 11(7), 957.  
<https://doi.org/10.3390/FOODS11070957>

Ladjal-Ettoumi, Y., Hamadi, M., Douik Lina, H., Cherifi, Z., & Akmal, N. (2024). Physicochemical, functional, and nutraceutical properties of Spirulina and Chlorella biomass: A comparative study. *Algal Research*, 103561.  
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2024.103561>

Lee, C. W., Chang, Y. B., Park, C. W., Han, S. H., Suh, H. J., & Ahn, Y. (2022). Protein Hydrolysate from *Spirulina platensis* Prevents Dexamethasone-Induced Muscle Atrophy via Akt/Foxo3 Signaling in C2C12 Myotubes. *Marine Drugs*, 20(6).  
<https://doi.org/10.3390/md20060365>

Li, L., He, Y., Jin, N., Li, H., & Liu, X. (2022). Effects of protein supplementation and exercise on delaying sarcopenia in healthy older individuals in Asian and non-Asian countries: A systematic review and meta-analysis. *Food Chemistry: X*, 13, 100210.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100210>

- Lima Eugenio, P. E. (2021). *Acción antiulcerosa de extracto acuoso de spirulina pratensis en rattus norvegicus var. sprague dawley con ulceras inducidas experimentalmente*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12979>
- Lin, C. C., Shih, M. H., Chen, C. D., & Yeh, S. L. (2021). Effects of adequate dietary protein with whey protein, leucine, and vitamin D supplementation on sarcopenia in older adults: An open-label, parallel-group study. *Clinical Nutrition*, *40*(3), 1323–1329. <https://doi.org/10.1016/J.CLNU.2020.08.017>
- Liu, T., Zheng, J., Du, J., & He, G. (2024). Food Processing and Nutrition Strategies for Improving the Health of Elderly People with Dysphagia: A Review of Recent Developments. *Foods* *2024*, Vol. *13*, Page *215*, *13*(2), 215. <https://doi.org/10.3390/FOODS13020215>
- López Fandiño, R. (2016). *Las proteínas de los alimentos* (Los Libros de La Catarata, Ed.). [https://www.google.com.pe/books/edition/Las\\_prote%C3%ADnas\\_de\\_los\\_alimentos/G8mrEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=proteinas+aminoacido+esencial&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Las_prote%C3%ADnas_de_los_alimentos/G8mrEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=proteinas+aminoacido+esencial&printsec=frontcover)
- Lopez, M. J., & Mohiuddin, S. S. (2024). Biochemistry, Essential Amino Acids. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557845/>
- Lucas, B. F., da ROSA, A. P. C., de CARVALHO, L. F., de MORAIS, M. G., Santos, T. D., & Costa, J. A. V. (2019). Snack bars enriched with Spirulina for schoolchildren nutrition. *Food Science and Technology*, *40*, 146–152. <https://doi.org/10.1590/FST.06719>
- Luo, G., Liu, H., Yang, S., Sun, Z., Sun, L., & Wang, L. (2024). Manufacturing processes, additional nutritional value and versatile food applications of fresh microalgae Spirulina. *Frontiers in Nutrition*, *11*, 1455553. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2024.1455553/BIBTEX>

- Maag, P., Dirr, S., & Karslioglu, Ö. Ö. (2022). Investigation of Bioavailability and Food-Processing Properties of *Arthrospira platensis* by Enzymatic Treatment and Micro-Encapsulation by Spray Drying. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 1922, 11(13), 1922. <https://doi.org/10.3390/FOODS11131922>
- Markou, G., Chentir, I., Eliopoulos, C., Arapoglou, D., Vaquero, M. G., & Tiwari, B. (2023). Microalgae as a source of alternative protein. *Handbook of Food and Feed from Microalgae: Production, Application, Regulation, and Sustainability*, 59–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99196-4.00036-X>
- Melchior, S., Moretton, M., Alongi, M., Calligaris, S., Cristina Nicoli, M., & Anese, M. (2023). Comparison of protein in vitro digestibility under adult and elderly conditions: The case study of wheat, pea, rice, and whey proteins. *Food Research International*, 163, 112147. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.112147>
- Mendes, M. C., Navalho, S., Ferreira, A., Paulino, C., Figueiredo, D., Silva, D., Gao, F., Gama, F., Bombo, G., Jacinto, R., Aveiro, S. S., Schulze, P. S. C., Gonçalves, A. T., Pereira, H., Gouveia, L., Patarra, R. F., Abreu, M. H., Silva, J. L., Navalho, J., ... Speranza, L. G. (2022). Algae as Food in Europe: An Overview of Species Diversity and Their Application†. *Foods*, 11(13), 1871. <https://doi.org/10.3390/FOODS11131871/S1>
- M.F. van Amsterdam. (2018). *Factorial Techniques applied in Chemical Plant Cost Estimation: A Comparative Study based on Literature and Cases*. Delt University of Technology.
- MINSA. (2025). *REUNIS - Repositorio Único Nacional de Información en Salud*. Población Total y Población Adulto Mayor. <https://www.minsa.gob.pe/reunis/?op=2&niv=10&tbl=5>
- Mohammadi, M., Hamishehkar, H., Ghorbani, M., Shahvalizadeh, R., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2021). Engineering of Liposome Structure to Enhance

Physicochemical Properties of *Spirulina plantensis* Protein Hydrolysate: Stability during Spray-Drying. *Antioxidants* 2021, Vol. 10, Page 1953, 10(12), 1953. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX10121953>

Montiel-Rojas, D., Nilsson, A., Santoro, A., Bazzocchi, A., de Groot, L. C. P. G. M., Feskens, E. J. M., Berendsen, A. A. M., Madej, D., Kaluza, J., Pietruszka, B., Jennings, A., Fairweather-Tait, S., Battista, G., Capri, M., Franceschi, C., & Kadi, F. (2020). Fighting Sarcopenia in Ageing European Adults: The Importance of the Amount and Source of Dietary Proteins. *Nutrients* 2020, Vol. 12, Page 3601, 12(12), 3601. <https://doi.org/10.3390/NU12123601>

Mota, C., Santos, M., Mauro, R., Samman, N., Matos, A. S., Torres, D., & Castanheira, I. (2016). Protein content and amino acids profile of pseudocereals. *Food Chemistry*, 193, 55–61. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.11.043>

Moynihan, P. J., & Teo, J. L. (2024). Exploring Oral Function, Protein Intake, and Risk of Sarcopenia: A Scoping Review. *JDR Clinical and Translational Research*, 9(1), 4–20. [https://doi.org/10.1177/23800844231157259/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_23800844231157259-FIG3.JPEG](https://doi.org/10.1177/23800844231157259/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_23800844231157259-FIG3.JPEG)

Mróz, M., Parchem, K., Józwiak, J., Domingues, M. R., & Kusznierevicz, B. (2024). The Impact of Different Drying Methods on the Metabolomic and Lipidomic Profiles of *Arthrospira platensis*. *Molecules*, 29(8), 1747. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29081747/S1>

Murillo-Llorente, M. T., Lafuente-Sarabia, B., Samper de la Paz, J., Flores-Púa, M., Tejada-Adell, M., Legidos-García, M. E., & Perez-Bermejo, M. (2023). Assessing Nutritional Status and Frailty among Poor Elderly Individuals in Requena del Tapiche, Peru. *Nutrients* 2023, Vol. 15, Page 3840, 15(17), 3840. <https://doi.org/10.3390/NU15173840>

- Nabti, B., Bammoune, N., Meliani, H., & Stambouli, B. (2023). Antioxidant and antimicrobial activities of Spirulina from the region of Tamanrasset, Algeria. *Journal of Herbal Medicine*, 41, 100748. <https://doi.org/10.1016/J.HERMED.2023.100748>
- Nadathur, S. R., Wanasundara, J. P. D., & Scanlin, L. (2017). Proteins in the Diet: Challenges in Feeding the Global Population. *Sustainable Protein Sources*, 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00001-9>
- Ni Lochlainn, M., Bowyer, R. C. E., Welch, A. A., Whelan, K., & Steves, C. J. (2023). Higher dietary protein intake is associated with sarcopenia in older British twins. *Age and Ageing*, 52(2), 1–10. <https://doi.org/10.1093/AGEING/AFAD018>
- Nicoletti, M. (2016). Microalgae nutraceuticals. *Foods*, 5(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/foods5030054>
- Nikbakht Nasrabadi, M., Sedaghat Doost, A., & Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118, 106789. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106789>
- Nosratimovafagh, A., Esmaeili Fereidouni, A., & Krujatz, F. (2023). Effect of light spectrum, salinity, and glucose levels on Spirulina morphology. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(6), 1687–1701. <https://doi.org/10.1111/JWAS.13012>
- OMS. (n.d.). *Década del Envejecimiento Saludable (2021-2030)*. Retrieved March 4, 2025, from <https://www.who.int/es/initiatives/decade-of-healthy-ageing>
- Özyurt, G., Durmuş, M., Sakarya, Y., Uslu, L., & Kuley, E. (2024). Improved oxidative stability of functional oils with Spirulina enhanced by probiotic fermentation and encapsulation. *Journal of Applied Phycology*, 36(4), 1837–1847. <https://doi.org/10.1007/S10811-024-03209-X/FIGURES/3>
- Özyurt, G., Uslu, L., Durmuş, M., Sakarya, Y., Uzlaşır, T., & Küley, E. (2023). Chemical and physical characterization of microencapsulated Spirulina fermented with Lactobacillus

plantarum. *Algal Research*, 73, 103149.  
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2023.103149>

Paula da Silva, S., Ferreira do Valle, A., & Perrone, D. (2021). Microencapsulated *Spirulina maxima* biomass as an ingredient for the production of nutritionally enriched and sensorially well-accepted vegan biscuits. *LWT*, 142.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110997>

Pootthachaya, P., Puangsap, W., Bunchalee, P., Plangklang, P., Reungsang, A., Yuangsoi, B., Cherdthong, A., Tengjaroenkul, B., & Wongtangtintharn, S. (2023). Investigation of nutritional profile, protein solubility and in vitro digestibility of various algae species as an alternative protein source for poultry feed. *Algal Research*, 72, 103147.  
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2023.103147>

Post, M. J., & Hocquette, J. F. (2017). New Sources of Animal Proteins: Cultured Meat. *New Aspects of Meat Quality: From Genes to Ethics*, 425–441.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00017-5>

Ramlan, N., Zubairi, S. I., & Maskat, M. Y. (2022). Response Surface Optimisation of Polydimethylsiloxane (PDMS) on Borosilicate Glass and Stainless Steel (SS316) to Increase Hydrophobicity. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 3388, 27(11), 3388.  
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES27113388>

Ramos-Ramirez, K. E., & Soto, A. (2020). Sarcopenia, mortalidad intrahospitalaria y estancia hospitalaria prolongada en adultos mayores internados en un hospital de referencia peruano. *ACTA MEDICA PERUANA*, 37(4).  
<https://doi.org/10.35663/amp.2020.374.1071>

Ravishankar, G. A., Ranga Rao, A., Tahergorabi, R., & Mohan, A. (2024). *Handbook of plant-based meat analogs: innovation, technology and quality*.

Reinmuth-Selzle, K., Tchpilov, T., Backes, A. T., Tscheuschner, G., Tang, K., Ziegler, K., Lucas, K., Pöschl, U., Fröhlich-Nowoisky, J., & Weller, M. G. (2022). Determination of

the protein content of complex samples by aromatic amino acid analysis, liquid chromatography-UV absorbance, and colorimetry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 414(15), 4457–4470. <https://doi.org/10.1007/S00216-022-03910-1/FIGURES/6>

Rice University. (2015). *Bradford protein assay*. <https://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/methods/protein/bradford.html>

Rogeri, P. S., Zanella, R., Martins, G. L., Garcia, M. D. A., Leite, G., Lugaresi, R., Gasparini, S. O., Sperandio, G. A., Ferreira, L. H. B., Souza-junior, T. P., & Lancha, A. H. (2021). Strategies to Prevent Sarcopenia in the Aging Process: Role of Protein Intake and Exercise. *Nutrients* 2022, Vol. 14, Page 52, 14(1), 52. <https://doi.org/10.3390/NU14010052>

Roselet, F., Vandamme, D., Muylaert, K., & Abreu, P. C. (2019). Harvesting of microalgae for biomass production. In *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment* (pp. 211–243). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_10)

Rosero-Chasoy, G., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Buitrón, G., Chairez, I., & Ruiz, H. A. (2022). Growth kinetics and quantification of carbohydrate, protein, lipids, and chlorophyll of *Spirulina platensis* under aqueous conditions using different carbon and nitrogen sources. *Bioresource Technology*, 346, 126456. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126456>

Sahil, S., Bodh, S., & Verma, P. (2024). *Spirulina platensis*: A comprehensive review of its nutritional value, antioxidant activity and functional food potential. *Journal of Cellular Biotechnology*, 1–14. [https://doi.org/10.3233/JCB-240151/ASSET/0F95BC04-FA56-46AB-93BF-C266C7D43948/ASSETS/GRAPHIC/10.3233\\_JCB-240151-FIG2.JPG](https://doi.org/10.3233/JCB-240151/ASSET/0F95BC04-FA56-46AB-93BF-C266C7D43948/ASSETS/GRAPHIC/10.3233_JCB-240151-FIG2.JPG)

- Salama, A. H. (2020). Spray drying as an advantageous strategy for enhancing pharmaceuticals bioavailability. *Drug Delivery and Translational Research*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S13346-019-00648-9/METRICS>
- Salter, A. M., & Lopez-Viso, C. (2021). Role of novel protein sources in sustainably meeting future global requirements. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(2), 186–194. <https://doi.org/10.1017/S0029665121000513>
- Samborska, K., Boostani, S., Geranpour, M., Hosseini, H., Dima, C., Khoshnoudi-Nia, S., Rostamabadi, H., Falsafi, S. R., Shaddel, R., Akbari-Alavijeh, S., & Jafari, S. M. (2021). Green biopolymers from by-products as wall materials for spray drying microencapsulation of phytochemicals. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 297–325. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.01.008>
- Samborska, K., Poozesh, S., Barańska, A., Sobulska, M., Jedlińska, A., Arpagaus, C., Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2022). Innovations in spray drying process for food and pharma industries. *Journal of Food Engineering*, 321, 110960. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2022.110960>
- Saxena, R., Rodríguez-Jasso, R. M., Chávez-Gonzalez, M. L., Aguilar, C. N., Quijano, G., & Ruiz, H. A. (2022). Strategy Development for Microalgae *Spirulina platensis* Biomass Cultivation in a Bubble Photobioreactor to Promote High Carbohydrate Content. *Fermentation* 2022, Vol. 8, Page 374, 8(8), 374. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION8080374>
- Scholes, G. (2022). Protein-energy malnutrition in older Australians: A narrative review of the prevalence, causes and consequences of malnutrition, and strategies for prevention. *Health Promotion Journal of Australia*, 33(1), 187–193. <https://doi.org/10.1002/HPJA.489>
- Shimizu, A., Fujishima, I., Maeda, K., Murotani, K., Kayashita, J., Ohno, T., Nomoto, A., Ueshima, J., Ishida, Y., Inoue, T., & Mori, N. (2021). Texture-Modified Diets are

Associated with Poor Appetite in Older Adults who are Admitted to a Post-Acute Rehabilitation Hospital. *Journal of the American Medical Directors Association*, 22(9), 1960–1965. <https://doi.org/10.1016/J.JAMDA.2021.05.018>

Siegrist, M., & Hartmann, C. (2023). Why alternative proteins will not disrupt the meat industry. *Meat Science*, 203, 109223. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2023.109223>

Silva, N. C., Freitas, L. V.D., Silva, T. C., Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. S. (2023). Use of Refractance Window Drying as an Alternative Method for Processing the Microalga *Spirulina platensis*. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 720, 28(2), 720. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28020720>

Silva, N. C., Graton, I. S., Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. S. (2023). Effects of Infrared and Microwave Radiation on the Bioactive Compounds of Microalga *Spirulina platensis* after Continuous and Intermittent Drying. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 5963, 28(16), 5963. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28165963>

Silva, N. C., Machado, M. V. C., Brandão, R. J., Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. S. (2019). Dehydration of microalgae *Spirulina platensis* in a rotary drum with inert bed. *Powder Technology*, 351, 178–185. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.04.025>

Sinetova, M. A., Kupriyanova, E. V., & Los, D. A. (2024). *Spirulina/Arthrospira/Limnospira*—Three Names of the Single Organism. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 2762, 13(17), 2762. <https://doi.org/10.3390/FOODS13172762>

Soni, R. A., Sudhakar, K., Rana, R. S., & Baredar, P. (2021). Food Supplements Formulated with *Spirulina*. *Algae: Multifarious Applications for a Sustainable World*, 201–226. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7518-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7518-1_9)

Spinola, M. P., Costa, M. M., & Prates, J. A. M. (2023). Studies on the Impact of Selected Pretreatments on Protein Solubility of *Arthrospira platensis* Microalga. *Agriculture*

2023, Vol. 13, Page 221, 13(1), 221.  
<https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE13010221>

Stramarkou, M., Papadaki, S., Kyriakopoulou, K., Tzovenis, I., Chronis, M., & Krokida, M. (2021). Comparative Analysis of Different Drying Techniques Based on the Qualitative Characteristics of *Spirulina platensis* Biomass. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(5), 498–516. <https://doi.org/10.1080/10498850.2021.1900969>

Stuck, A. K., Tsai, L. T., Freystaetter, G., Vellas, B., Kanis, J. A., Rizzoli, R., Kressig, R. W., Ambrecht, G., Da Silva, J. A. P., Dawson-Hughes, B., Egli, A., & Bischoff-Ferrari, H. A. (2023). Comparing Prevalence of Sarcopenia Using Twelve Sarcopenia Definitions in a Large Multinational European Population of Community-Dwelling Older Adults. *The Journal of Nutrition, Health and Aging*, 27(3), 205–212. <https://doi.org/10.1007/S12603-023-1888-Y>

Sun, X. S. (2005). THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOY PROTEINS. *Bio-Based Polymers and Composites*, 292–326. <https://doi.org/10.1016/B978-012763952-9/50010-1>

SUNAT. (2004). *REGLAMENTO DE LA LEY DEL IMPUESTO A LA RENTA*.

Sundararajan, P., Moser, J., Williams, L., Chiang, T., Riordan, C., Metzger, M., Zhang-Plasket, F., Wang, F., Collins, J., & Williams, J. (2023). Driving Spray Drying towards Better Yield: Tackling a Problem That Sticks Around. *Pharmaceutics*, 15(8), 2137. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15082137/S1>

Taiti, C., Di Vito, M., Di Mercurio, M., Costantini, L., Merendino, N., Sanguinetti, M., Bugli, F., & Garzoli, S. (2023). Detection of Secondary Metabolites, Proximate Composition and Bioactivity of Organic Dried *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 67, 14(1), 67. <https://doi.org/10.3390/APP14010067>

Tatasciore, S., Santarelli, V., Neri, L., Di Mattia, C. D., Di Michele, A., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2024). Microencapsulation of hop bioactive compounds by spray drying: Role

of inlet temperature and wall material. *Current Research in Food Science*, 8, 100769.  
<https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2024.100769>

Tayebati, H., Pajoum Shariati, F., Soltani, N., & Sepasi Tehrani, H. (2021). Effect of various light spectra on amino acids and pigment production of *Arthrospira platensis* using flat-plate photobioreactor. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*.  
<https://doi.org/10.1080/10826068.2021.1941102>

Thevarajah, B., Nishshanka, G. K. S. H., Premaratne, M., Nimarshana, P. H. V., Nagarajan, D., Chang, J. S., & Ariyadasa, T. U. (2022). Large-scale production of *Spirulina*-based proteins and c-phycoerythrin: A biorefinery approach. *Biochemical Engineering Journal*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108541>

Ughetti, A., D'Eusanio, V., Strani, L., Russo, A. L., & Roncaglia, F. (2024). Influence of Drying and Storage Conditions on the Volatile Organic Compounds Profile of *Spirulina Platensis*. *Separations*, 11(6), 180.  
<https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS11060180/S1>

Universidad Simón Bolívar. (2020, December). *Iraka*.

Van Der Heijden, I., Monteyne, A. J., Stephens, F. B., & Wall, B. T. (2023). Alternative dietary protein sources to support healthy and active skeletal muscle aging. *Nutrition Reviews*, 81(2), 206–230. <https://doi.org/10.1093/NUTRIT/NUAC049>

Voulgaridou, G., Tyrovolas, S., Detopoulou, P., Tsoumana, D., Drakaki, M., Apostolou, T., Chatziprodromidou, I. P., Papandreou, D., Giaginis, C., & Papadopoulou, S. K. (2024). Diagnostic Criteria and Measurement Techniques of Sarcopenia: A Critical Evaluation of the Up-to-Date Evidence. *Nutrients* 2024, Vol. 16, Page 436, 16(3), 436.  
<https://doi.org/10.3390/NU16030436>

Wang, L., Liu, X., Liu, J., Zheng, T., Wang, Z., Liu, X., & Luo, G. (2024). Effects of different drying methods on the nutritional components, microstructure, and metabolomic profile

of *Spirulina maxima*. *Algal Research*, 84, 103788.  
<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2024.103788>

Wang, X., Li, Y., Zhang, X., Chen, X., Wang, X., Yu, D., & Ge, B. (2024). The extracellular polymeric substances (EPS) accumulation of *Spirulina platensis* responding to Cadmium (Cd<sup>2+</sup>) exposure. *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134244.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.134244>

Wei, L., Yu, L., Jiaoqi, H., Guorong, H., Yang, Z., & Weiling, F. (2018). Application of terahertz spectroscopy in biomolecule detection. *Frontiers in Laboratory Medicine*, 2(4), 127–133. <https://doi.org/10.1016/J.FLM.2019.05.001>

Xiao, Z., Xia, J., Zhao, Q., Niu, Y., & Zhao, D. (2022). Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120113.  
<https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120113>

Yada, R. Y. (2017). Proteins in Food Processing: Second Edition. *Proteins in Food Processing: Second Edition*, 1–654.

Yruela, I., & Sebastián, A. (2014). *Macromoléculas biológicas: proteínas, DNA y RNA*.  
[https://www.researchgate.net/publication/282606296\\_Macromoleculas\\_biologicas\\_proteinas\\_DNA\\_y\\_RNA\\_Biological\\_macromolecules\\_proteins\\_DNA\\_and\\_RNA#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/282606296_Macromoleculas_biologicas_proteinas_DNA_y_RNA_Biological_macromolecules_proteins_DNA_and_RNA#fullTextFileContent)

Zec, M., Michael Camera, D., Joe Millward, D., Li, M., Yang, X., Copyright, fnut, Wu, W., Chen, F., Ma, H., Lu, J., Zhang, Y., Zhou, H., Yang, Y., Nie, S., Wang, R., & Yue, W. (2025). Dietary protein requirements of older adults with sarcopenia determined by the indicator amino acid oxidation technology. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1486482.  
<https://doi.org/10.3389/FNUT.2025.1486482>

Zhang, G., Zhu, C., Walayat, N., Nawaz, A., Ding, Y., & Liu, J. (2023). Recent development in evaluation methods, influencing factors and control measures for freeze

denaturation of food protein. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(22), 5874–5889. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2025534>

Zhang, H., Gong, T., Li, J., Pan, B., Hu, Q., Duan, M., & Zhang, X. (2022). Study on the Effect of Spray Drying Process on the Quality of Microalgal Biomass: a Comprehensive Biocomposition Analysis of Spray-Dried *S. acuminatus* Biomass. *Bioenergy Research*, 15(1), 320–333. <https://doi.org/10.1007/S12155-021-10343-8>

Zhang, J., Wang, J., Li, M., Guo, S., & Lv, Y. (2022). Effects of heat treatment on protein molecular structure and in vitro digestion in whole soybeans with different moisture content. *Food Research International*, 155, 111115. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111115>

Zhang, J., Zou, Y., Yan, B., Zhang, N., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2023). Microwave treatment on structure and digestibility characteristics of *Spirulina platensis* protein. *Current Research in Food Science*, 7, 100581. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2023.100581>

Zhu, X., Wang, J., Lu, Y., Zhao, Y., Zhang, N., Wu, W., Zhang, Y., & Fu, Y. (2023). Potential of Food Protein-Derived Bioactive Peptides against Sarcopenia: A Comprehensive Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(14), 5419–5437. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c09094>

