

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL**  
**SANTIAGO-CHILE**



**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA**  
**COMPARATIVA DE FRUTILLAS LIOFILIZADAS Y**  
**CONGELADAS**

**CLAUDIO TOMÁS FERNÁNDEZ SANDOVAL**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

**PROFESOR GUÍA:**

**Dr. SERGIO ALMONACID**

**PROFESORA CORREFERENTE:**

**YOLANDA MEDINA**



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE  
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA COMPARATIVA de frutillas liofilizadas y congeladas

Nombre del candidato(a): CLAUDIO TOMÁS FERNÁNDEZ SANDOVAL

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: SAN JOAQUÍN Departamento: Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sony's Almonacid M., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/04/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02/04/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia en general, en especial a mis padres, por la oportunidad, a mis hermanos por el apoyo y las consideraciones. A mis tíos santiaguinos por la fraternidad de recibirme y acompañarme en este proceso.*

*A mis amigos, por creer en mí, por la sustentación emocional, la red de apoyo y por las distracciones necesarias que permitieron forjarme como persona y profesional.*

## **DEDICATORIA**

*Para mi madre, Astrid y mi padre Claudio, mis hermanos Julia y Benjamín. Para mis tíos Marcelo y Gisela. Para mis abuelos, en especial para Esperanza, que en paz descanse.*

*A los que se fueron, gracias por irse para no regresar.*

## RESUMEN EJECUTIVO

La Industria agroexportadora de Chile enfrenta el desafío constante de agregar valor a sus materias primas, mitigando los riesgos asociados a la alta perecibilidad de frutos no climatéricos, como la frutilla. Tradicionalmente, la exportación de este fruto se ha sustentado en la congelación, un método de conservación eficaz pero extremadamente dependiente de una estricta cadena de frío desde la producción, el transporte y su posterior distribución. En este contexto, este trabajo de título tiene como objetivo principal evaluar y comparar, técnico y económicamente, dos tecnologías de procesamiento para la conservación prolongada de la frutilla: la congelación rápida individual y la liofilización industrial.

Metodológicamente, la investigación se estructuró en tres fases: un análisis de mercado, un estudio técnico conceptual, y una evaluación financiera proyectada a un horizonte de 20 años. Para asegurar la comparabilidad de las alternativas tecnológicas, se estandarizó la capacidad instalada de ambas plantas en el procesamiento de 3.000 toneladas anuales de fruta fresca.

Del estudio técnico se comprobó una asimetría termodinámica y logística pronunciada entre ambos procesos. La línea de congelación rápida individual, opera de manera continua, demandando un consumo eléctrico específico de 0,39 kWh/kg de fruta procesada, logrando un rendimiento de 1,05 kg de materia prima por kg de producto final. En contraste, la liofilización, un proceso discontinuo, basado en la sublimación al vacío, exige una alta intensidad energética, 19 kWh/kg de producto final, y rinde 10,5 kg de fruta fresca por cada kg producido. No obstante, este elevado consumo energético inicial reduce masivamente su peso y elimina el requerimiento logístico de refrigeración.

La evaluación económica y el análisis del CAPEX (Clase V AACE) indicaron que la inversión inicial del proyecto de congelación es de 14,5 MMUSD, frente a 39,8 MMUSD del proyecto liofilizado. A pesar de esta barrera de entrada, el proyecto liofilizado se posiciona como el óptimo económico absoluto. Genera un Valor Actual Neto de 73,3 MMUSD y una Tasa Interna de Retorno de 38%, superando al modelo IQF, que alcanza un VAN de 11,9 MMUSD y una TIR de 24%.

Finalmente, el análisis de sensibilidad y ciclo de vida logístico probó que la congelación IQF arrastra una vulnerabilidad considerable, el costo de cadena de frío internacional representa el 21% de su costo económico unitario. Por el contrario, el proceso de liofilización blindó al proyecto, reduciendo la incidencia del costo logístico a solo un 1,5%. Además, se comprobó que el gasto energético inicial del liofilizador se compensa tras evitar 31 días de almacenamiento doméstico simultáneo de 1 kg de frutilla congelada en 2,85 millones de congeladores. Por tanto, se concluye que la liofilización representa una estrategia superior y más robusta a largo plazo para la descarbonización y maximización de márgenes de exportación chilena agroindustria.

## ABSTRACT

The Chilean agro-export industry faces the constant challenge of adding value to its raw materials, mitigating the risks associated with the high perishability of non-climacteric fruits, such as strawberries. Traditionally, the export of this fruit has relied on freezing, an effective preservation method but highly dependent on a strict cold chain throughout production, transport, and subsequent distribution. In this context, the main objective of this degree thesis is to evaluate and compare, technically and economically, two processing technologies for the prolonged preservation of strawberries: individual quick freezing (IQF) and industrial freeze-drying.

Methodologically, the research was structured in three phases: a market analysis, a conceptual technical study, and a financial evaluation projected over a 20-year horizon. To ensure the comparability of the technological alternatives, the installed capacity of both plants was standardized to process 3,000 metric tons of fresh fruit annually.

The technical study demonstrated a pronounced thermodynamic and logistical asymmetry between both processes. The IQF line operates continuously, demanding a specific electricity consumption of 0.39 kWh/kg of processed fruit, achieving a yield of 1.05 kg of raw material per kg of final product. In contrast, freeze-drying, a batch process based on vacuum sublimation, demands high energy intensity (19 kWh/kg of final product) and yields 10.5 kg of fresh fruit per kg produced. Nevertheless, this high initial energy consumption massively reduces the product's weight and eliminates the logistical requirement of refrigeration.

The economic evaluation and CAPEX analysis (AACE Class V estimate) indicated that the initial investment for the freezing project is 14.5 MMUSD, compared to 39.8 MMUSD for the freeze-drying project. Despite this high barrier to entry, the freeze-drying project positions itself as the absolute economic optimum. It generates a Net Present Value (NPV) of 73.3 MMUSD and an Internal Rate of Return (IRR) of 38%, outperforming the IQF model, which reaches an NPV of 11.9 MMUSD and an IRR of 24%.

Finally, the sensitivity and logistical life cycle analysis proved that IQF freezing carries considerable vulnerability, as the international cold chain accounts for 21% of its unit economic cost. Conversely, the freeze-drying process shields the project, reducing the incidence of logistical costs to only 1.5%. Furthermore, it was proven that the initial energy expenditure of the freeze-dryer is offset after avoiding 31 days of simultaneous domestic storage of 1 kg of frozen strawberries across 2.85 million freezers. Therefore, it is concluded that freeze-drying represents a superior and more robust long-term strategy for decarbonization and the maximization of export margins in the Chilean agro-industry.

**Keywords:** Freeze-drying, IQF Freezing, *Fragaria ananassa*, technical-economical evaluation, CAPEX, Food supply chain.

# ÍNDICE

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ÍNDICE.....                                                         | 6  |
| 1 INTRODUCCIÓN.....                                                 | 11 |
| 2 OBJETIVOS.....                                                    | 12 |
| 2.1 Objetivo Principal.....                                         | 12 |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                                     | 12 |
| 3. ANTECEDENTES GENERALES.....                                      | 13 |
| 3.1 Mercado de las Frutillas .....                                  | 13 |
| 3.1.1 Producción a nivel mundial .....                              | 13 |
| 3.1.2 Producción a nivel nacional.....                              | 14 |
| 3.2 Caracterización fisicoquímica y fisiológica de la frutilla..... | 15 |
| 3.2.1 Descripción de la especie .....                               | 15 |
| 3.2.2 Características de la frutilla postcosecha.....               | 15 |
| 3.3 Conservación de alimentos.....                                  | 17 |
| 3.3.1 Principios de la conservación de alimentos.....               | 17 |
| 3.3.2 Conservación frutillas enteras .....                          | 17 |
| 3.4 Liofilización.....                                              | 18 |
| 3.4.1 Descripción del proceso.....                                  | 18 |
| 3.4.2 Etapas del proceso .....                                      | 19 |
| 3.4.3 Secado Primario.....                                          | 20 |
| 3.4.4 Secado Secundario.....                                        | 20 |
| 3.5 Congelación.....                                                | 20 |
| 3.6 Ventajas y desventajas de la liofilización .....                | 21 |
| 3.6.1 Liofilización en la industria.....                            | 22 |
| 3.6.2 Liofilización de microorganismos .....                        | 23 |
| 3.6.3 Liofilización de alimentos .....                              | 23 |
| 3.6.4 Liofilización de productos farmacéuticos.....                 | 23 |
| 3.6.5 Liofilización de células humanas .....                        | 23 |
| 3.6.6 Otras aplicaciones.....                                       | 23 |
| 3.7 Tendencias del mercado.....                                     | 24 |
| 3.7.1 Frutas congeladas .....                                       | 24 |

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.2 | Frutas liofilizadas .....                                                   | 24 |
| 3.7.3 | Caso de las frutillas .....                                                 | 25 |
| 4.    | METODOLOGÍA.....                                                            | 26 |
| 4.1   | Enfoque general de la investigación.....                                    | 26 |
| 4.2   | Fases de desarrollo del estudio .....                                       | 26 |
| 4.2.1 | Estudio de mercado .....                                                    | 26 |
| 4.2.2 | Estudio Técnico .....                                                       | 27 |
| 4.2.3 | Evaluación Económica y análisis de escenarios.....                          | 27 |
| 4.3   | Delimitación del estudio .....                                              | 28 |
| 5.    | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                                    | 29 |
| 5.1   | Estudio de Mercado .....                                                    | 29 |
| 5.1.1 | Investigación Preliminar.....                                               | 29 |
| 5.1.2 | Análisis de la demanda .....                                                | 32 |
| 5.1.3 | Cuantificación de la Demanda.....                                           | 32 |
| 5.1.4 | Análisis de la Oferta .....                                                 | 33 |
| 5.1.5 | Análisis de Precios .....                                                   | 38 |
| 5.2   | Estudio Técnico .....                                                       | 40 |
| 5.2.1 | Fundamentos de las tecnologías de procesamiento .....                       | 40 |
| 5.2.2 | Descripción de las etapas productivas y diagramas de flujo de procesos .... | 42 |
| 5.2.3 | Balances macroscópicos de masa y energía .....                              | 45 |
| 5.2.4 | Estandarización de la Capacidad .....                                       | 49 |
| 5.2.5 | Definición de los productos.....                                            | 51 |
| 5.2.6 | Impacto en la Calidad del Producto.....                                     | 53 |
| 5.2.7 | Estructura de Inversiones y Estimación del CAPEX.....                       | 55 |
| 5.2.8 | Estructura de Costos de Operación (OPEX).....                               | 57 |
| 5.3   | Evaluación Económica Comparativa.....                                       | 60 |
| 5.3.1 | Premisas de evaluación.....                                                 | 60 |
| 5.3.2 | Proyección de ingresos y estrategia.....                                    | 62 |
| 5.3.3 | Flujos de Caja (FCF) y Métricas de Inversión .....                          | 63 |
| 5.3.4 | Análisis de riesgo y sensibilidad .....                                     | 64 |
| 6.    | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                        | 73 |

|     |                                                  |    |
|-----|--------------------------------------------------|----|
| 6.1 | Conclusiones.....                                | 73 |
| 6.2 | Recomendaciones .....                            | 74 |
| 7.  | REFERENCIAS .....                                | 75 |
| 8.  | ANEXOS.....                                      | 79 |
|     | ANEXO A. CAPEX planta frutilla congelada .....   | 79 |
|     | ANEXO B. CAPEX planta frutilla liofilizada ..... | 80 |
|     | ANEXO C. OPEX planta frutilla congelada .....    | 81 |
|     | ANEXO D. OPEX planta frutilla liofilizada.....   | 82 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1. Producción mundial de frutillas .....</i>                                                                                                                | <i>13</i> |
| <i>Tabla 2. Variación anual de producción.....</i>                                                                                                                   | <i>13</i> |
| <i>Tabla 3. Exportaciones de frutilla según producto comercializado. ....</i>                                                                                        | <i>14</i> |
| <i>Tabla 4. Ventajas y desventajas liofilización (Elaboración propia a partir de (Pardo &amp; Mauricio, 2002)).....</i>                                              | <i>22</i> |
| <i>Tabla 5. Matriz Benchmarking competitivo Frutillas Congeladas en Chile. ....</i>                                                                                  | <i>37</i> |
| <i>Tabla 6. Matriz Benchmarking competitivo Frutillas Liofilizadas en Chile. ....</i>                                                                                | <i>38</i> |
| <i>Tabla 7. Comparación del consumo energético y rendimiento del proceso estimado para cada tecnología (Elaboración propia a partir de (Savo et al., 2012)).....</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 8. Consumo de insumos claves para cada tecnología (Elaboración propia).....</i>                                                                             | <i>49</i> |
| <i>Tabla 9. Rendimiento kg de fruta fresca por kg de producto y producción anual de cada proceso (Elaboración propia). ....</i>                                      | <i>50</i> |
| <i>Tabla 10. Estimación de contenedores de transporte y exportación para cada proceso (Elaboración propia). ....</i>                                                 | <i>50</i> |
| <i>Tabla 11. Matriz comparativa de atributos sensoriales de cada producto.....</i>                                                                                   | <i>53</i> |
| <i>Tabla 12. Comparación del perfil nutricional y fisicoquímico de cada producto.....</i>                                                                            | <i>54</i> |
| <i>Tabla 13. Comparativa de inversión conceptual. ....</i>                                                                                                           | <i>55</i> |
| <i>Tabla 14. CAPEX planta de frutillas congeladas.....</i>                                                                                                           | <i>56</i> |
| <i>Tabla 15. CAPEX planta de frutillas liofilizadas. ....</i>                                                                                                        | <i>56</i> |
| <i>Tabla 16. Costos variables planta de frutillas congeladas.....</i>                                                                                                | <i>57</i> |
| <i>Tabla 17. Costos variables planta de frutillas liofilizadas. ....</i>                                                                                             | <i>58</i> |
| <i>Tabla 18. Costos fijos planta de frutillas congeladas. ....</i>                                                                                                   | <i>59</i> |
| <i>Tabla 19. Costos fijos planta de frutillas liofilizadas. ....</i>                                                                                                 | <i>59</i> |
| <i>Tabla 20. OPEX de ambos proyectos. ....</i>                                                                                                                       | <i>60</i> |
| <i>Tabla 21. Premisas de inversión y capital.....</i>                                                                                                                | <i>61</i> |
| <i>Tabla 22. Premisas de operación. ....</i>                                                                                                                         | <i>61</i> |
| <i>Tabla 23. Premisas de ingresos por venta. ....</i>                                                                                                                | <i>61</i> |

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 24. Costo económico unitario y margen bruto unitario frutilla congelada.</i>                                           | 62 |
| <i>Tabla 25. Proyección de ingresos frutilla congelada.</i>                                                                     | 62 |
| <i>Tabla 26. Costo económico unitario y margen bruto unitario Frutilla Liofilizada.</i>                                         | 63 |
| <i>Tabla 27. Proyección de ingresos Frutilla Liofilizada.</i>                                                                   | 63 |
| <i>Tabla 28. Flujo de caja libre apalancado anual de cada proyecto.</i>                                                         | 64 |
| <i>Tabla 29. Indicadores financieros evaluación económica.</i>                                                                  | 64 |
| <i>Tabla 30. Tabla consolidada de costos unitarios por kilogramo de la cadena de suministro.</i>                                | 65 |
| <i>Tabla 31. Costos económicos unitarios según escenario de comparación para frutillas congeladas y frutillas liofilizadas.</i> | 66 |
| <i>Tabla 32. Tabla de resultados económicos de la sensibilización logística.</i>                                                | 66 |
| <i>Tabla 33. Consumo energético proceso y cadena logística del producto congelado.</i>                                          | 68 |
| <i>Tabla 34. Consumo energético total del producto liofilizado y su diferencia respecto al producto congelado.</i>              | 68 |
| <i>Tabla 35. Consumo energético diario almacenamiento doméstico.</i>                                                            | 69 |
| <i>Tabla 36. Consumo energético durante el transporte marítimo.</i>                                                             | 72 |
| <i>Tabla 37. CAPEX maquinaria principal planta frutilla congelada.</i>                                                          | 79 |
| <i>Tabla 38. CAPEX equipamiento de soporte y utilidades planta frutilla congelada.</i>                                          | 79 |
| <i>Tabla 39. CAPEX obras civiles y terreno planta frutilla congelada.</i>                                                       | 79 |
| <i>Tabla 40. CAPEX consolidado planta frutilla congelada.</i>                                                                   | 79 |
| <i>Tabla 41. CAPEX maquinaria principal planta frutilla liofilizada.</i>                                                        | 80 |
| <i>Tabla 42. CAPEX equipamiento de soporte y utilidades planta frutilla liofilizada.</i>                                        | 80 |
| <i>Tabla 43. CAPEX obras civiles y terreno planta frutilla liofilizada.</i>                                                     | 80 |
| <i>Tabla 44. CAPEX consolidado planta frutilla liofilizada.</i>                                                                 | 80 |
| <i>Tabla 45. Costos variables planta frutilla congelada.</i>                                                                    | 81 |
| <i>Tabla 46. Costos fijos planta frutilla congelada.</i>                                                                        | 81 |
| <i>Tabla 47. Costos variables planta frutilla liofilizada.</i>                                                                  | 82 |
| <i>Tabla 48. Costos fijos planta frutilla liofilizada.</i>                                                                      | 82 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1. Producción mundial de frutillas.</i>                                                | 14 |
| <i>Figura 2. Frutillas frescas (Guallpa, 2021)</i>                                               | 15 |
| <i>Figura 3. Estructura frutillas (Kusch, 2018).</i>                                             | 15 |
| <i>Figura 4. Índice de madurez del fruto (Morales, 2017).</i>                                    | 16 |
| <i>Figura 5. Material poroso generado durante la liofilización de alimentos (Ramirez, 2007).</i> | 19 |
| <i>Figura 6. Etapas del proceso de liofilización (Orrego, 2008).</i>                             | 19 |
| <i>Figura 7. Túnel Individual Quick Freezing o congelado ultrarrápido (Fresh Plaza, 2019).</i>   | 41 |
| <i>Figura 8. Liofilizador Industrial (BoLaiKe, 2026).</i>                                        | 42 |

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 9. Diagrama de Flujo de Proceso de la línea de congelación IQF (Elaboración propia).                                                                      | 43 |
| Figura 10. Diagrama de Flujo de Proceso de la línea de liofilización. (Elaboración propia).                                                                      | 45 |
| Figura 11. Análisis de la diferencia de consumo energético del producto congelado en función de la cantidad de días almacenado en refrigeradores del consumidor. | 69 |
| Figura 12. Análisis del consumo energético del producto congelado en función de la cantidad de días almacenado en refrigeradores del consumidor.                 | 70 |

# 1 INTRODUCCIÓN

La frutilla, en la actualidad, se encuentra entre las bayas más consumidas a nivel mundial debido a su particular sabor, aroma y, por, sobre todo, a que es una fuente rica de una amplia variedad de compuestos nutritivos, como azúcares, vitaminas y minerales, y compuestos bioactivos no nutritivos, como flavonoides, antocianinas, lignanos y ácidos fenólicos. Estas sustancias producen un efecto sinérgico y acumulativo en la salud humana y la prevención de enfermedades. De acuerdo con la literatura, dichos compuestos presentes en la fresa tienen propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias y antidiabéticas (Giampieri et al., 2015).

Esta baya es una fruta de temporada, las estaciones de producción (cosecha) se dan durante el período primavera-verano. En Chile, el período específico de cosecha es durante los meses de septiembre y abril, y su área de siembra se concentra principalmente en el centro del país, entre las regiones de Valparaíso hasta la región del Maule. La frutilla se caracteriza por ser una fruta no climatérica, de alto contenido de humedad, con un período de maduración corto, muy perecederas y extremadamente propensas a la pérdida de calidad debido a daños mecánicos o un almacenamiento inadecuado (Hu et al., 2022). En este contexto, con el objetivo de prolongar su vida útil, es importantísimo procesarlas y conservarlas luego de su cosecha.

Tradicionalmente, se ha optado por la congelación como el proceso idóneo para su conservación, dada su eficacia para reducir la actividad microbiana y enzimática, lo cual logra mantener el producto en condiciones para el consumo durante largos períodos. Sin embargo, se ha comprobado que, durante la congelación, almacenamiento y su posterior descongelación, se deteriora la calidad del fruto, principalmente debido a la degradación de la textura, el colapso estructural y la pérdida por goteo (Galletto et al., 2010). En esa misma línea, este proceso demanda una cadena de frío constante durante todo el tiempo de transporte, almacenamiento y distribución, lo que genera un aumento significativo del consumo energético durante las etapas mencionadas, elevando sus costos. Dichas limitaciones han incentivado la búsqueda de tecnologías y procesos alternativos que permitan conservar la fruta sin comprometer sus propiedades nutricionales, organolépticas y comerciales.

En este contexto, la liofilización emerge como una opción innovadora. Este proceso, también conocido como secado por congelación, elimina el agua el contenido de agua de los alimentos mediante sublimación al vacío, logrando una conservación eficaz y prolongada, conservando el aroma, sabor, color, textura y las propiedades nutricionales del alimento, y a su vez, permite su conservación, almacenamiento y distribución sin una cadena de frío, disminuyendo los costos asociados a este ítem (Alvarado, 2014).

Debido a la naturaleza del proceso de liofilización, los equipos necesarios para realizarlo sumado al gasto que implica la operación de dichos equipos lo convierten en un proceso bastante costoso. En comparación con otros secados, el tiempo requerido para llevar a cabo

una liofilización es ampliamente mayor. Este tratamiento consta de varias etapas: congelación, secado primario y secado secundario; siendo la segunda donde ocurre la sublimación del hielo, donde se elimina entre un 70 y 90% del agua contenida en el alimento, por lo cual, corresponde a la etapa que más demanda tiempo dentro de la totalidad del proceso (Hu et al., 2022).

De acuerdo con las características de ambos procesos, se plantea una comparación técnica económica dada la necesidad de aumentar la sostenibilidad de la industria agroalimentaria debido al valor agregado que les concede a los productos que se comercializan dentro y fuera del país. La innovación dentro de este rubro es clave para posicionar a Chile a lo más alto del mercado internacional de frutos. En este aspecto, la liofilización cumple un rol importantísimo debido a su capacidad de preservar las cualidades organolépticas y nutritivas de la frutilla. Sin embargo, la alta demanda energética que requiere durante el proceso, sumado a su potencial de exportación debido a sus bajos requerimientos de transporte y almacenaje, deja en evidencia la necesidad de un estudio que compare las características del consumo energético durante el procesamiento, transporte, almacenamiento y almacenamiento doméstico, entre frutillas congeladas y frutillas liofilizadas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Principal**

El objetivo principal de esta memoria es evaluar y comparar técnica y económicamente dos métodos para alargar la vida útil de la frutilla: liofilización y congelación, considerando costos de producción, transporte, almacenamiento y almacenamiento doméstico.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Definir cada tecnología de procesamiento de las frutillas, especificando, además, su posterior transporte y almacenamiento.
- Analizar precios, costos y consumo energético asociado a cada tecnología
- Evaluar económicamente ambos procesos en función de la cantidad productiva, sensibilizando transporte, almacenamiento y almacenamiento doméstico.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1 Mercado de las Frutillas

##### 3.1.1 Producción a nivel mundial

Las frutillas registraron, durante 2023, una producción mundial de 10,485 millones de toneladas. En comparación a 2018, se observa un aumento de 22,5%. En la Tabla 1 se presenta la producción mundial de Frutillas a 2023 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

*Tabla 1. Producción mundial de frutillas*

| <b>Producción Mundial de Frutillas</b> |                              |                  |
|----------------------------------------|------------------------------|------------------|
| <b>Año</b>                             | <b>Millones de toneladas</b> | <b>Variación</b> |
| <b>2023</b>                            | 10,485                       | 22,5%            |
| <b>2018</b>                            | 8,562                        |                  |

La misma tendencia puede observarse al comparar el período 2022-2023, con una variación de 2,3%. La comparación se presenta a continuación, en la Tabla 2 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

*Tabla 2. Variación anual de producción.*

| <b>Producción Mundial de Frutillas</b> |                              |                  |
|----------------------------------------|------------------------------|------------------|
| <b>Año</b>                             | <b>Millones de toneladas</b> | <b>Variación</b> |
| <b>2023</b>                            | 10,485                       | 2,3%             |
| <b>2022</b>                            | 10,247                       |                  |

En cuanto a los mayores productores de la frutilla, China lidera la producción mundial de fresas, con 4,2 millones de toneladas anuales, produciendo un 40% del total mundial. Lo sigue Estados Unidos, con 1,25 millones de toneladas, cuya producción se concentra mayoritariamente en el estado de California (Bascopé, 2012). Egipto se posiciona en el tercer lugar, con 0,731 millones de toneladas. A continuación, en la Figura 1, se presentan la distribución de la participación de los principales países productores en el mercado internacional de las frutillas durante el año 2023 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

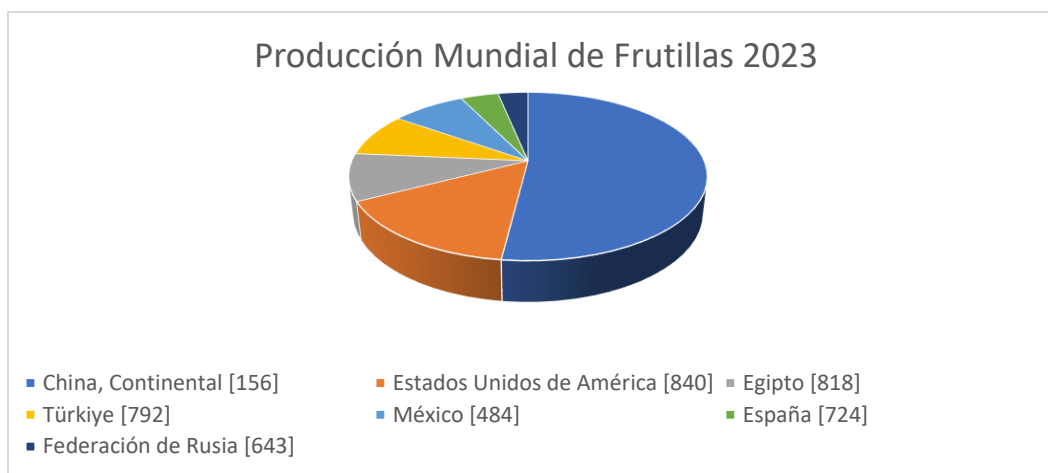


*Figura 1. Producción mundial de frutillas.*

### 3.1.2 Producción a nivel nacional

Chile cuenta con las condiciones óptimas y adecuadas tanto de suelo, como de clima para producir frutillas. Al año 2013, el 65% de la producción se destinó a consumo interno, de las cuales, un 90% fue fruta fresca y el 10%, frutillas congeladas. Por otra parte, respecto a las exportaciones, del 35% restante, un 77% correspondió a congelados, 16% fresco y el restante en jugos, conservas y deshidratados

A nivel nacional, según cifras de la ODEPA, la tendencia de la exportación de frutillas ha ido a la baja. Esto se puede explicar en gran parte por la contingencia mundial que significó la pandemia COVID-19 durante los años 2020-2022. El volumen de exportaciones se vió afectado principalmente en 2023 con las cifras más bajas de los últimos 5 años, como consecuencia de los antecedentes descritos. Sin embargo, dada la tendencia mundial, sumado a los resultados de 2024, se espera y asume que las exportaciones de frutilla se estabilicen y alcancen los niveles anteriores a la pandemia. En la Tabla 3 se presentan datos respecto a las principales exportaciones de frutilla de acuerdo con el producto comercializado (ODEPA, 2025).

*Tabla 3. Exportaciones de frutilla según producto comercializado.*

| Frutilla     |        | Año    |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo         | Unidad | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   |
| Fruta Fresca | [ton]  | 0      | 0      | 24     | 0      | 0      |
| Deshidratado | [ton]  | 105    | 100    | 41     | 31     | 44     |
| Conservas    | [ton]  | 594    | 571    | 651    | 1481   | 855    |
| Congelado    | [ton]  | 55.492 | 63.494 | 54.897 | 40.922 | 45.623 |
| Total        | [ton]  | 56.191 | 64.165 | 55.613 | 42.434 | 46.522 |

## 3.2 Caracterización fisicoquímica y fisiológica de la frutilla

### 3.2.1 Descripción de la especie

La frutilla (*Fragaria ananassa*) pertenece a la familia Rosaceae, y forma parte de los cotizados frutos rojos, principalmente debido a los beneficios nutricionales que aportan estas frutas, excelente fuente de polifenoles, específicamente antocianinas y ácidos fenólicos, vitamina C, manganeso, fibra dietética, yodo, solato, cobre, potasio, biotina, fósforo, magnesio, vitamina B6 y grasas omega-3. En la Figura 2 se presenta el aspecto típico de la frutilla fresca y en la Figura 3 se desglosa su estructura (Kusch, 2018).



*Figura 2. Frutillas frescas* (Guallpa, 2021)

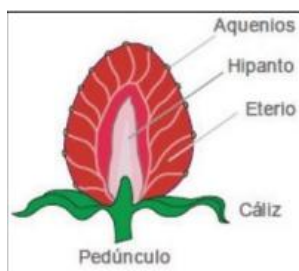


*Figura 3. Estructura frutillas* (Kusch, 2018).

### 3.2.2 Características de la frutilla postcosecha

La fresa es un fruto no climatérico, es decir, que no aumenta su contenido de azúcares postcosecha, solo se registran aumentos de color y disminución de la firmeza dada la alta tasa respiratoria del fruto, lo que la convierte en un fruto muy perecible, afectando directamente su apariencia y calidad. Es clave, en este contexto, que la orientación durante la cosecha y la postcosecha sea lograr un fruto de calidad y que esta se mantenga hasta la comercialización de la fruta, en la Figura 4 se presenta el índice de madurez del fruto, que determina su potencial cosecha, consumo fresco inmediato y su utilización por parte de la agroindustria (Morales, 2017).



*Figura 4. Índice de madurez del fruto (Morales, 2017)..*

La cosecha de frutillas se enfoca en la calidad del fruto, por tanto, su cosecha se lleva a cabo a primeras horas del día, donde la exposición al sol es mínima y, por ende, se presenta la menor pérdida de agua. Debido a las limitaciones planteadas con anterioridad, el fruto debe ser cosechado cerca de la madurez de consumo. El criterio varía según el mercado de destino: para fresco mercado interno, el color es rojo en el 80% del fruto; para fresco de exportación destaca la homogeneidad e intensidad del color anaranjado; para procesado se requiere un rojo intenso en el 100% del fruto y sin cáliz. No es frecuente que se utilice la acidez y los sólidos solubles totales para determinar el momento de cosecha. La maduración del fruto no es homogénea en la planta, por lo que se precisa repasar zonas ya cosechadas para recolectar aquellos frutos que, en su oportunidad, estaban inmaduros (Morales, 2017).

Una vez cosechado, es de vital importancia el tiempo de transporte a la agroindustria. Este trayecto debe realizarse lo más rápido posible, con un límite de 3 a 4 horas desde cosechada la frutilla. El transporte debe considerar lo frágil y susceptible de la carga a daños mecánicos por golpes o por una mala manipulación del fruto. Por tanto, se debe realizar de manera cuidadosa, evitando golpear en exceso la carga y evitando la contaminación de la fruta con partículas de polvo o materiales extraños durante su transporte.

En la agroindustria, el ingreso a frío o pre-enfriado, permite una rápida remoción del calor. Este procedimiento favorece la conservación de la calidad y la frescura, disminuyendo las incidencias de enfermedades comunes en postcosecha, la actividad enzimática y la tasa respiratoria del fruto, manteniéndose las características de la cosecha. Esta etapa es de vital relevancia, dado que la alta tasa respiratoria del fruto hace que tenga una vida muy corta luego de su cosecha, alrededor de 2 semanas a temperatura ambiente. Al tratarse de una especie de exportación, el almacenaje del fruto se realiza en condiciones controladas de concentración de gases, es decir, en una atmósfera controlada o modificada, estas permiten aumentar la vida útil del fruto, logrando llegar en condiciones aceptables a mercados de destino en contra estación

La calidad de la frutilla se determina de acuerdo con la cantidad de sólidos solubles que posee. Típicamente, para su consumo fresco, el contenido de azúcares debe rondar entre los 9° a 13° grados Brix, con 160 mg/100g de ácidos cítricos (Morales, 2017).

### **3.3 Conservación de alimentos**

Los procesos de conservación de alimentos desempeñan un rol clave en la actualidad debido a su capacidad de prolongar la vida útil de acuerdo con el tipo de procesamiento. Estos tratamientos determinan la inocuidad, calidad organoléptica y la duración de su vida útil. Los procesos de conservación de alimentos se pueden clasificar en métodos físicos: refrigeración, congelación, secado, liofilización, pasteurización, esterilización e irradiación; métodos químicos: uso de conservantes, salado, azucarado y acidificación; y métodos biológicos, como la fermentación.

#### **3.3.1 Principios de la conservación de alimentos**

Los principios de conservación de alimentos abarcan las bases científicas y técnicas que permiten mantener la calidad, seguridad y valor nutricional de los alimentos durante un tiempo prolongado. Entre ellos se considera: control de crecimiento microbiano, cuyo objetivo es ralentizar o evitar el crecimiento de bacterias, hongos o levaduras que causan la descomposición del producto y enfermedades; inactivación de enzimas, dado que las enzimas naturales presentes en ciertos alimentos puede provocar cambios estructurales no deseados, como oxidación, pérdida de color, sabor y textura; control del contenido de agua, ya que el agua disponible en los alimentos incrementa las posibilidades de crecimiento microbiano y la velocidad de reacciones químicas; prevención de reacciones químicas no deseadas como la oxidación de grasas, puesto que estas pueden deteriorar los alimentos; envasado o aislamiento del entorno, para evitar la contaminación presente en el ambiente, ya sea de microorganismos, oxígeno, humedad, entre otros; y uso de temperatura, pues tratamientos a temperaturas bajas ralentizan los agentes de deterioro, mientras que los de temperaturas altas los eliminan (Hu et al., 2022).

#### **3.3.2 Conservación frutillas enteras**

El menester de conservar el fruto en las condiciones óptimas de calidad por un largo período de tiempo deriva en la utilización de la congelación como el proceso más utilizado históricamente. Su eficacia al convertir el agua líquida contenida en el producto en hielo se traduce en la reducción de actividad microbiana y enzimática (Chevalier et al., 2000). No obstante, el proceso de congelación, su almacenamiento congelado y su posterior descongelación, favorece el deterioro de la calidad de frutas y verduras debido a la degradación de su textura, pérdidas por goteo y su colapso estructural (Galletto et al., 2010).

La disponibilidad de frutillas durante todo el año, al tratarse de un fruto de estación, se convierte en una necesidad para el sector agroindustrial. La congelación se perfila como la opción más factible y adecuada, a pesar de las pérdidas organolépticas y de calidad que le confiere el procesamiento.

En este contexto, la liofilización surge como una opción innovadora dada su gran capacidad de conservar las características nutricionales y organolépticas de los alimentos, además de facilitar su transportación debido a la disminución de peso que significa. Este proceso minimiza la pérdida de componentes aromáticos, no genera movimiento de líquidos o solutos, ni contracción del sólido o endurecimiento superficial, permitiendo que el producto conserve su forma, tamaño y estructura porosa, lo que favorece y facilita su posterior rehidratación (Gimeno, 2014).

### **3.4 Liofilización**

El proceso de liofilización ocurre cuando el producto se congela, y luego, en condiciones que generalmente son de baja presión y temperatura, se suministra calor para eliminar el hielo por sublimación. Las condiciones de operación de este proceso permiten conservar las características sensoriales y nutricionales que posee el alimento, convirtiéndolo en un método altamente efectivo para alargar su vida útil, extrayendo hasta un 95% del agua contenida. De otra manera, por ejemplo, en operaciones convencionales de secado, gran parte de estas cualidades se pierden (Ramirez, 2007).

Actualmente, la gran mayoría de las formulaciones de compotas infantiles, helados, gelatinas con pulpa, yogures con fruta, bebidas lácteas, sopas, entre otros, cuentan con una porción importante de producto liofilizado. Esta adición les confiere estabilidad y aumenta considerablemente el valor de los productos (Ocaña, 2013).

#### **3.4.1 Descripción del proceso**

La liofilización es un proceso de secado mediante sublimación. Se ha desarrollado con el objetivo de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos, los cuales se pierden con los procesos convencionales de secado. En este proceso se distinguen principalmente dos pasos: congelar el producto y secarlo mediante sublimación directa del hielo bajo presión reducida (Orrego, 2008). La estructura fisicoquímica del material no se ve afectada por el procesamiento, lo que permite su conservación indefinida sin cadena de frío, con una alta estabilidad microbiológica dado su porcentaje de humedad menor al 15% (Alvarado, 2014).

En términos simples, durante la liofilización, el hielo comienza a sublimar desde la superficie del producto congelado hacia el núcleo. Esto provoca un plano de sublimación, generando una división entre la parte que aún contiene hielo de la que se encuentra seca, siendo en esta última donde se ha formado un material poroso. Este fenómeno se representa en la Figura 5.



*Figura 5. Material poroso generado durante la liofilización de alimentos (Ramirez, 2007).*

### 3.4.2 Etapas del proceso

Al realizar el secado mediante liofilización se logran distinguir tres etapas que se esquematizan en la Figura 6. La transferencia de masa ocurre debido a la migración de vapor de agua mediante la capa seca del alimento, donde la fuerza impulsora es la diferencia de presión (Orrego, 2008).

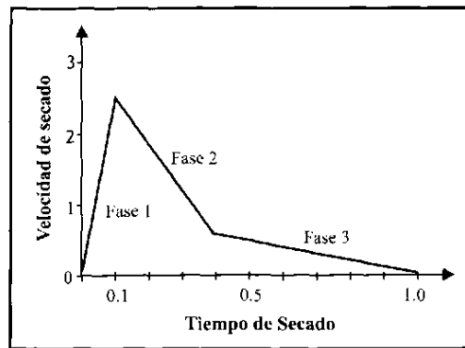


*Figura 6. Etapas del proceso de liofilización (Orrego, 2008).*

La Fase 1, llamada etapa conductiva, se caracteriza porque la velocidad de secado aumenta rápidamente hasta llegar a un máximo. El tiempo requerido para agotar esta fase es relativamente corto, significando entre un 10 y 15% del tiempo total.

La Fase 2, llamada etapa difusiva, evidencia un descenso importante en la velocidad de sublimación debido a la formación de una capa porosa de material seco que aumenta la resistencia al flujo de calor y al vapor a medida que procede el secado.

En la Fase 3, considerada segunda etapa difusiva, también conocida como secado secundario, la velocidad de sublimación continúa disminuyendo hasta que se aproxima a cero. Este fenómeno ocurre debido a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación. En esta fase, generalmente, puesto que la difusividad de los aromas disminuye sensiblemente cuando la humedad es lo necesariamente baja, es conveniente incrementar la temperatura de la calefacción.

### **3.4.3 Secado Primario**

El secado primario abarca las fases 1 y 2 de la Figura 6. En esta etapa se lleva a cabo la sublimación desde la fase sólida a la gaseosa. Las condiciones de operación que se deben proveer son bajo el punto triple del agua (6,13 mbar o 4580 mTorr y 0,001 °C). La variable de operación más relevante en esta etapa es la presión dentro del liofilizador, puesto que la sublimación requiere de una gran cantidad de energía, la cual se obtiene al generar vacío. La fuerza impulsora que mantiene la sublimación es el gradiente de presión de vapor entre la superficie congelada del producto y el condensador del liofilizador. Esta etapa retira aproximadamente un 90% del agua libre de la fruta (Kramer, 1999).

La temperatura máxima durante la sublimación es la temperatura eutéctica, o temperatura vítrea. Si la temperatura es demasiada alta durante el procesamiento, el material colapsará (Hu et al., 2022).

### **3.4.4 Secado Secundario**

Esta fase se encarga de eliminar, por desorción, las porciones remanentes de agua ligada que no sublima en la primera etapa del secado. A la salida del secado primario, un producto amorfo puede contener una cantidad de agua residual considerable. El objetivo de esta etapa es reducir aquella humedad residual hasta un nivel que garantice inocuidad, generalmente suele ser entre 1 a 3%. El secado secundario se realiza disminuyendo la presión de operación y aumentando la temperatura. Dicho aumento de temperatura debe realizarse de forma controlada, de manera de evitar aumentos bruscos que puedan provocar colapsos en el producto. Finalmente, se deben exponer a temperaturas “altas” durante el tiempo suficiente para permitir la desorción del agua. Generalmente, se recomienda utilizar una temperatura alta durante un tiempo corto, que una temperatura baja por un tiempo más largo. La razón para llevar esto a cabo recae en que la tasa de desorción de agua disminuye drásticamente con el tiempo a una temperatura establecida y tiempos superiores a 3-6 horas, lo que impide que siga disminuyendo la humedad (Tang & Pikal, 2004).

Generalmente, los tiempos de secado de 3-6 horas son óptimos, de acuerdo con la temperatura en función del producto, los que normalmente se encuentra en rangos de 40 a 50 °C. El tiempo óptimo de secado secundario se puede determinar mediante la medición de la humedad residual en tiempo real, extrayendo muestras del liofilizador sin interrumpir el secado en frío (Kamat et al., 1989).

## **3.5 Congelación**

Etapla previa a la liofilización, generalmente se realiza dentro del mismo liofilizador o en un congelador externo. El desarrollo de esta etapa influye directamente sobre las características del alimento, como el color y la densidad del producto final, así como en la velocidad de sublimación (Orrego, 2008).

El proceso de congelación requiere que la temperatura final del producto sea menor a la temperatura de solidificación y debe mantenerse durante la liofilización. En caso de que la temperatura decaiga lentamente, se producirán cristales de hielo relativamente grandes que generan lesiones en las células del producto por rupturas de membrana, pared celular o estructuras internas, lo que se traduce en una reducción de la calidad del producto con respecto al original, una vez que este se rehidrate. Para solucionar dicho dilema se utiliza la congelación rápida debido a que se generan cristales de hielo de menor tamaño, los cuales no dañan la estructura del alimento, obteniendo un producto rehidratado de mejor calidad. Como consecuencia, en el proceso de liofilización, realizar una congelación rápida significa un mayor tiempo de proceso en el secado primario, principalmente por la formación de poros de menor tamaño (Saclier et al., 2010).

Durante esta etapa se somete el producto a temperaturas por debajo de los 0°C, generalmente entre -18°C y -80°C, dependiendo del producto a congelar. Lo mismo ocurre con la temperatura y el tiempo. La fenomenología se basa en que la disminución de la temperatura induce la etapa de nucleación, cristales de hielo que luego seguirán creciendo, dando como resultado la congelación del producto. Finalizada la congelación se presentan dos fases, cristales de hielo formados por el contenido de agua del producto y los componentes del alimento (Talavera, 2018).

A medida que sucede el proceso de congelación, la disminución de la temperatura permite alcanzar el punto eutéctico, donde ocurre la formación de cristales del alimento con el agua. Puesto que la temperatura sigue disminuyendo, la formación de cristales de hielo y soluto es mayor, lo que deriva en una menor cantidad de agua. La congelación logra cristalizar entre un 90 y 95% del agua presente en materiales biológicos, esta fracción de agua se conoce como agua libre. El restante, queda en forma de agua líquida en el alimento y se le denomina agua ligada (Hu et al., 2022).

### **3.6 Ventajas y desventajas de la liofilización**

El motivo principal de realizar la liofilización de un alimento recae en eliminar el agua contenida mientras se mantiene la estructura básica y la composición del material intacto. Este objetivo se fundamenta de acuerdo con las siguientes razones (Ramirez, 2007):

- Disminución del agua: El agua presente en los alimentos favorece la acción de microorganismos, tales como bacterias que descomponen la materia. Dichos microorganismos pueden causar enfermedades y deteriorar la calidad del producto, es decir, el sabor, aroma, etc.
- Reducción del peso total del alimento: gran parte de los alimentos se componen de agua, en particular las frutas, las cuales tienen entre un 80 y 90% de agua en relación peso/peso. La eliminación de esta agua contenida se traduce en productos más ligeros que no requieren de una cadena continua de frío, lo que reduce los costos asociados al transporte y el almacenamiento.

A continuación, en la Tabla 4, se presentan las principales ventajas y desventajas de la liofilización.

*Tabla 4. Ventajas y desventajas liofilización (Elaboración propia a partir de (Pardo & Mauricio, 2002)).*

| <b>Ventajas</b>                                                                                                 | <b>Desventajas</b>                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mantiene mejor la estructura y aspecto original del alimento.                                                   | Se requiere una gran inversión de equipos y maquinaria, alrededor de tres veces lo requerido en comparación a otros métodos |
| El trabajo a bajas temperaturas impide la alteración de productos termolábiles                                  | Alto coste energético debido a la operación en bajas presiones y temperaturas                                               |
| La sublimación del hielo genera una estructura porosa que permite una reconstitución rápida                     | Elevado tiempo de procesamiento                                                                                             |
| El deterioro del color y del sabor por las reacciones químicas y pérdidas de propiedades fisiológicas se inhibe | Alto precio del producto final                                                                                              |
| La humedad residual es baja                                                                                     |                                                                                                                             |
| El tiempo de conservación es largo                                                                              |                                                                                                                             |
| La magnitud de la retención de aromas es muy alta                                                               |                                                                                                                             |
| El encogimiento del producto es despreciable                                                                    |                                                                                                                             |

### **3.6.1 Liofilización en la industria**

En la actualidad la liofilización aplicada en la industria puede clasificarse según (Hu et al., 2022):

- Liofilización de microorganismos y alimentos: es lo más frecuente en la industria, especialmente de café y leche. Emerge como una nueva alternativa la liofilización de frutas y verduras debido a su capacidad de conservación de las características organolépticas.
- Liofilización de productos farmacéuticos: este rubro se ha transformado en la aplicación más importante y con mayor inversión involucrada.
- Liofilización de células humanas.
- Otras aplicaciones.

### **3.6.2 Liofilización de microorganismos**

Microorganismos como bacterias, actinomicetos, levaduras, hongos filamentosos y virus se han logrado liofilizar exitosamente. La supervivencia de estos microorganismos liofilizados alcanza porcentajes superiores a 80%. No obstante, aún existen muchos microorganismos que no se han liofilizado con éxito, incluso, los procedimientos de liofilización y los agentes utilizados para aquellos que se realizan con éxito, varían según las necesidades.

### **3.6.3 Liofilización de alimentos**

La ventaja principal de la liofilización de alimentos recae en la conservación del color, olor y sabor, a la vez que se evita la pérdida de compuestos nutricionales y el endurecimiento de la superficie del alimento.

Al deshidratar completamente los alimentos, se convierten en un producto ligero, fácil de rehidratar, soluble y con la capacidad de almacenarse a temperatura ambiente por un largo tiempo. Al proceso de liofilización se le denomina procesamiento de alimento del siglo 21, el valor agregado del producto es superior y su precio es de 7 a 8 veces mayor que un producto congelado y de 4 a 6 veces más que un producto secado por métodos convencionales, como la exposición al calor (Mastrocola et al., 2005).

### **3.6.4 Liofilización de productos farmacéuticos**

Los productos farmacéuticos procesados mediante este método obtienen las siguientes características: nula pérdida de ingredientes volátiles, estabilidad estructural y básicamente no presentan cambios en la actividad biológica. Su estructura porosa le concede eficacia terapéutica, mientras que la eliminación del agua contenida entre un 95 y 99%, permite su almacenamiento a temperatura ambiente, no obstante, si se refrigera, se puede conservar por mucho más tiempo.

### **3.6.5 Liofilización de células humanas**

La atención actual del círculo académico internacional recae en el estudio activo de la liofilización de células humanas. En caso de ser exitoso, esta tecnología podría aplicarse en circunstancias importantísimas y significaría un vuelco relevante para la medicina clínica. A pesar de ello, no se ha logrado realizar con éxito debido a su extrema complejidad en comparación a la liofilización de microorganismos y drogas biológicas. Hoy en día aún se encuentra en etapas de exploración y no se ha puesto en práctica en el rubro.

### **3.6.6 Otras aplicaciones**

El proceso de liofilización ha encontrado aplicaciones importantes, como las siguientes:

- Preservación de la piel, córnea y hueso.
- Preparación del andamio de productos de ingeniería de tejidos

- Preparación de diversos polvos superfinos, incluidos polvos de cerámica, polvo de aleación, polvo magnético para grabar y polvo de catalizador, en la ciencia de los materiales.
- Preparación de muestras biológicas de microscopía de electrones, fabricación de muestras de órganos animales y humanos y en la formulación de nuevos cosméticos para el cuidado de la salud.

### **3.7 Tendencias del mercado**

En los últimos años, se ha evidenciado la transformación significativa en los patrones de consumo de alimentos a escala global. La creciente preocupación por la salud, nutrición y sostenibilidad ha impulsado y sostenido la demanda de alimentos naturales, mínimamente procesados y que tengan un alto valor tanto funcional, como nutricional. Es en este contexto que las frutas congeladas y liofilizadas han desarrollado un protagonismo en los diversos segmentos del mercado alimentario.

#### **3.7.1 Frutas congeladas**

La demanda de frutas congeladas ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado principalmente por el auge del consumo de repostería saludable, batidos de frutas y comidas rápidas realmente nutritivas. Esto, sumado a los avances tecnológicos en la congelación rápida, han permitido aumentar la calidad sensorial del producto final. No obstante, la necesidad de mantener una cadena de frío constante y continua durante todas las etapas de la cadena productiva, desde el productor hasta el consumidor final, implica costos logísticos elevados y una huella energética significativa.

#### **3.7.2 Frutas liofilizadas**

Las frutas liofilizadas se han ganado un espacio en mercado más especializados, orientados al consumo de bocadillos saludables, productos gourmet y alimentación funcional. Este tipo de producto es reconocido y valorado por su ligereza, larga vida útil y por la conservación de las propiedades nutricionales y organolépticas. El aumento del interés por alimentos “on-the-go”, es decir, alimentos de fácil alcance y saludables para consumidores que comen fuera de casa, que sean nutritivos, sin aditivos y con una presentación atractiva, ha favorecido el crecimiento del segmento de productos liofilizados, especialmente en países desarrollados y mercados premium.

Diversos estudios de mercado proyectan que la industria internacional de alimentos liofilizados seguirá creciendo a tasas superiores al 7% anual durante la próxima década, impulsada por la innovación en formulaciones, el cambio de preferencias de los consumidores y la apertura de nuevos canales de comercialización, como el comercio electrónico.

### **3.7.3 Caso de las frutillas**

Por su alto contenido de agua, su fragilidad estructural y su corto período postcosecha, la frutilla se posiciona como un excelente candidato tanto para la liofilización, como para la congelación. A pesar de que el mercado de la frutilla congelada está consolidado a nivel industrial, enfrenta desafíos relacionados con el costo energético y el aumento de la competencia internacional. En cambio, el mercado de la frutilla liofilizada representa una oportunidad clave de diferenciación y de desarrollo de productos con un alto valor agregado, especialmente para exportación o venta en nichos premium.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Enfoque general de la investigación**

La presente investigación corresponde a un estudio comparativo descriptivo y analítico, con un enfoque cuantitativo. Esto ya que se busca evaluar, desde una perspectiva técnica y económica, las diferencias claves entre los procesos de congelación y liofilización aplicado a frutillas enteras. La metodología de la investigación contempla tres fases de desarrollo: estudio de mercado, para analizar la demanda asociada a cada producto y las tendencias que rigen su comercialización; estudio técnico, para establecer y cuantificar las variables técnicas que permiten diferenciar ambos procesos; y una evaluación económica, con el objetivo de determinar criterios de rentabilidad y eficiencia que, a través de ciertos criterios que posibiliten establecer cuál de los dos procesos resulta más conveniente para el mercado chileno de exportación. Esta metodología está orientada a la generación de información útil para la toma de decisiones en el contexto de importación de productos procesados en Chile, evaluando distintos escenarios comerciales significativos y representativos para la frutilla.

El diseño metodológico contempla la formulación de una evaluación técnico-económica de proyectos industriales mutuamente excluyentes. Para asegurar la equivalencia en la comparación, se establece que ambos modelos de negocio se proyectarán sobre un horizonte de evaluación idéntico y se estandarizarán bajo una misma base de procesamiento de materia prima.

### **4.2 Fases de desarrollo del estudio**

#### **4.2.1 Estudio de mercado**

La primera fase de la investigación tiene como objetivo caracterizar el contexto comercial actual y proyectado de ambos productos, con enfoque en su comportamiento en mercados internacionales. La metodología por seguir se describe a continuación:

- Recolección y análisis de datos históricos sobre volúmenes de exportación de frutillas chilenas congeladas y liofilizadas.
- Análisis de los precios promedios por tonelada o kilogramo según corresponda para cada producto, segmentados por tipo de procesamiento. Los precios de venta se definirán a partir de un análisis comparativo de mercados de destino y canales de distribución.
- Identificación de los principales demandantes internacionales, con énfasis en mercados como el de Estados Unidos.
- Análisis de tendencias de consumo y comportamiento de la demanda para ambos productos.
- Estimación de la demanda actual y su respectiva proyección.

Para ello, se utilizarán datos provenientes de fuentes específicas y reconocidas, como ProChile, ODEPA, informes del Banco Central de Chile, bases de datos de comercio internacional, entre otros. El diagnóstico por realizar permitirá identificar oportunidades y restricciones de acceso comercial, además de establecer escenarios realistas para la evaluación técnica y económica a realizar posteriormente.

#### **4.2.2 Estudio Técnico**

En la segunda etapa de la metodología se llevará a cabo una comparación técnica de los procesos de congelación y liofilización de frutillas. Se realizará una comparación detallada de las características técnicas, operacionales y logísticas de las tecnologías, con un enfoque específico en los siguientes aspectos:

- Se establecerá una capacidad de planta base para homologar los requerimientos de materia prima de ambos proyectos.
- Se elaborarán diagramas de flujos de procesos para mapear las operaciones unitarias. En base a estas, se formularán balances de masa y energía para cuantificar con rigor las cargas térmicas, donde se aplicarán modelos termofísicos empíricos reconocidos en la industria alimentaria.
- La estructura de costos de capital se formulará bajo los lineamientos de una estimación conceptual Clase V definida por la Association for the Advancement of Cost Engineering (AACE International), permitiendo estimar la inversión mediante el uso de factores de escala.
- Se estimarán costos de producción asociados a cada tecnología, considerando insumos, mano de obra y energía, estableciendo costos de procesamiento unitarios.
- Costos de transporte internacional, calculados en función del peso, volumen y modalidad de transporte respectivo de cada proceso aplicado a las frutillas. Además de los requerimientos específicos de cada producto.
- Costos de almacenamiento en frío y en seco, analizando las diferencias energéticas, espaciales y logísticas requeridas según el procesamiento. Se busca diferenciar ambos procesos considerando duración y requerimientos energéticos.
- Costo de almacenamiento doméstico con el objetivo de incluir el impacto en la cadena de valor hasta el consumidor final.

Para realizar este análisis se utilizará información obtenida en literatura científica y estudios de caso, se considerarán, en caso de ser posible, alternativas innovadoras que permitan optimizar los procesos de congelación y liofilización, disminuyendo sus costos respectivos y estimaciones a partir de balances de masa y energía simplificados.

#### **4.2.3 Evaluación Económica y análisis de escenarios**

Finalmente, la tercera fase contempla una evaluación económica comparativa que integre los resultados de las etapas realizadas anteriormente con el propósito de comparar la factibilidad de ambos procesos, integrando variables técnicas, logísticas y comerciales, con foco en:

- Estimación de costos totales por kilogramo exportado para frutillas liofilizadas y congeladas, considerando la totalidad de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final.
- Análisis de los márgenes de ganancia de acuerdo con los precios de venta y costos logísticos.
- Cálculo de indicadores económicos como rentabilidad, punto de equilibrio y retorno sobre la inversión, enfocados en un mercado y escenario representativo para las frutillas chilenas de exportación.
- Identificar puntos de quiebre de la rentabilidad y evaluar la resiliencia estructural de cada tecnología de conservación de la frutilla.

Finalmente, se realizará una sensibilización del consumo energético específico de cada producto, determinando, mediante consideraciones temporales, el punto de equilibrio energético, como consecuencia del consumo eléctrico que requiere la cadena de frío requerida por el producto congelado, desde la producción hasta el almacenamiento doméstico del consumidor final, comparándose con la cadena seca del producto congelado.

### **4.3 Delimitación del estudio**

Este estudio se encuentra acotado en los siguientes aspectos para mantener un enfoque claro y coherente con los objetivos planteados:

- La investigación se centra en el contexto chileno, específicamente en el análisis de frutillas procesadas destinadas a la exportación desde Chile hacia mercados internacionales. No se consideran plantas de procesamiento ubicadas en otros países ni rutas logísticas que no incluyan origen chileno.
- El estudio se enfoca exclusivamente en dos tecnologías de conservación: congelación y liofilización. No se consideran otras técnicas como deshidratación por aire caliente, osmodeshidratación ni tecnologías híbridas. Tampoco se evalúan diferencias entre tipos o marcas específicas de equipos, sino condiciones técnicas estandarizadas.
- Se analiza una escala de producción representativa y base para ambos proyectos que cuentan con la infraestructura para producir y exportar frutillas procesadas. No se abordan procesos artesanales ni de pequeña escala. Se considera que la materia prima, es decir, la frutilla fresca, cumple con estándares de calidad comercial exportable.
- El estudio excluye subsidios estatales, financiamiento externo o políticas de incentivo. Se enfoca exclusivamente en costos operativos directos e indirectos desde el procesamiento hasta la entrega en destino.
- No se incluye en esta tesis un análisis de huella de carbono, consumo hídrico ni impactos ambientales de cada proceso. Asimismo, se excluye el análisis de certificaciones sanitarias o normativas específicas por país de destino, aunque se asume que se cumplen con los requisitos mínimos exigidos para la exportación de los productos.

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 Estudio de Mercado**

En este apartado se desarrolla el estudio de mercado asociado a las frutillas en su formatos de procesados congelados (IQF) y liofilizado. El objetivo es identificar y comprender las tendencias de consumo, analizar los mercados y segmentos de clientes más relevantes, perfilar al consumidor final para establecer criterios para la evaluación económica de esta memoria.

#### **5.1.1 Investigación Preliminar**

##### **5.1.1.1 Análisis del Macroentorno**

La demanda de frutas procesadas se impulsa por las macrotendencias globales, las cuales favorecen e incentivan el consumo de ambos productos, aunque en diferente magnitud para cada una.

Los consumidores buscan activamente productos orgánicos, naturales y nutritivos que tenga una “etiqueta limpia”, es decir, que no tenga aditivos ni conservantes. Este motivo es el principal motor que permite el crecimiento de la demanda de frutas procesadas. Este punto favorece enormemente a la frutilla liofilizada, las que son percibidas como un bocadillo saludable premium que conserva casi intactas sus propiedades nutricionales y organolépticas posterior a su procesamiento. También favorece, en menor medida, a la frutilla congelada que se utiliza como ingrediente base para preparaciones caseras saludables, como batidos, pasteles o postres.

Los actuales estilos de vida acelerados aumentan la demanda de alimentos listos para consumir o que requieren de una preparación mínima. Este punto favorece ambos productos, por el lado de la frutilla congelada, debido a su disponibilidad durante todo el año y a la eliminación de la necesidad de lavar y picar el fruto. Mientras que, para la frutilla liofilizada, esta se considera el epítome de la conveniencia como bocadillo “al paso”.

Los consumidores y la industria en general buscan productos que tengan una vida útil prologada que permita minimizar las pérdidas en caso de baja demanda. En este aspecto, la congelación permite prolongar la vida útil del fruto en meses o hasta años, mientras que, la frutilla, al estar liofilizada, extiende la vida útil por más de 1 año si el envase es el adecuado y se controlan las condiciones de almacenamiento.

##### **5.1.1.2 Definición del Mercado Relevante**

Para efectos de esta memoria, el mercado objetivo se divide en dos grandes grupos, uno para cada tipo de procesamiento de frutilla analizado. Estos productos, debido a su naturaleza y precio, se dirigen a canales y clientes con perfiles y necesidades diferentes. Por tanto, se divide en dos canales principales: Canal B2B (“Business-to-Business”), correspondiente a consumidores industriales y servicios alimenticios; y el Canal B2C (“Business-to-

Consumer”), correspondiente al de consumidores finales, es decir, quienes adquieren el producto en el mercado minorista.

### **5.1.1.3 Mercado Objetivo para Frutillas Congeladas**

El mercado de frutillas congeladas se caracteriza por ser maduro, de alto volumen y enfocado a la eficiencia en costos.

#### **5.1.1.3.1 Canal B2B Congelados: Industrial y Food Service.**

Es el mercado principal y el motor de la demanda de frutillas congeladas. Se trata de empresas procesadoras de alimento de todo tipo de tamaño y el sector de hoteles, restaurantes y banquetería.

El perfil característico del cliente B2B son: Industria Láctea, fabricantes de yogur, helados y postres lácteos; Industria de Panadería y Pastelería, productores de pasteles, mermeladas, coberturas y relleno, y la industria de bebidas, productores de jugo, néctares y batidos

Estos clientes buscan un ingrediente estandarizado, de una calidad apropiada y consistente, que esté disponible durante todo el año a un precio competitivo. De esta manera, valoran la funcionalidad de la fruta como insumo para sus procesos productivos propio.

El foco geográfico, a nivel nacional, corresponde a empresas de alimentos a lo largo de Chile. Mientras que, a nivel internacional, corresponde a grandes mercados importadores, como Estados Unidos, Canadá y Japón. En estos países la industria alimentaria demanda un suministro importante y constante en contra estación, es decir, fuera de temporada de producción de frutillas.

#### **5.1.1.3.2 Canal B2C Congelados: Consumidor Final**

El segmento de clientes de este canal son principalmente hogares y consumidores individuales que adquieren el producto en mercados minoristas, como supermercados y tiendas de conveniencia.

El perfil del cliente es amplio, considerando familias, jóvenes y adultos que se preocupan por mantener un estilo de vida saludable, al mismo tiempo que mantienen la práctica en el consumo. Este perfil es amplio y no se divide ni limita a un nicho especial.

Generalmente, los clientes buscan conveniencia, es decir, fruta lista para ser consumida o utilizada en preparaciones más elaboradas, disponibilidad fuera de temporada, en invierno, por ejemplo, y una alternativa versátil y saludable para preparaciones sencillas como batidos, desayunos y postres en casa. Por lo tanto, el factor de precio de venta es un elemento relevante durante la decisión de compra.

El foco geográfico se basa principalmente en el mercado nacional, a través de las grandes y diversas cadenas de supermercados o tiendas de conveniencia.

#### **5.1.1.4 Mercado Objetivo para Frutillas Liofilizadas.**

El mercado de las frutillas liofilizadas es un nicho de alto valor agregado, que se enfoca en la calidad premium y una constante innovación, que se encuentra en crecimiento persistente.

##### **5.1.1.4.1 Canal B2B Liofilizados: Industrial Innovador y Food Service Gourmet.**

Este canal representa la mayor oportunidad de crecimiento y rentabilidad para el producto, dado su elevado precio de venta. El segmento se compone principalmente de empresas de alimento que compiten en segmentos premium y de alto valor agregado.

El perfil del cliente se caracteriza por ser parte de las siguientes industrias: industria de cereales de desayuno, fabricantes de granolas, mueslis y cereales premium que ocupan la fruta como un elemento de diferencia respecto a otros; industria de bocadillos saludables, productores de barras de cereal, mixes de frutos secos y bocadillos al paso; industria de la confitería y chocolatería, marcas de chocolate premium que utilizan trozos de frutilla o polvo como decoración o como insumo como tal; industria del té e infusiones, empresas que crean mezclas de té premium con trozos de fruta real; e industria de nutraceuticos, fabricantes de suplementos alimenticios y alimentos para bebés.

Estos clientes generalmente buscan un ingrediente que sea 100% orgánico y natural, con una “etiqueta limpia”, de sabor y color intenso, con una textura crujiente única y característica del producto.

El foco geográfico de este son los mercados de exportación, como Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y Corea del Sur, mercados que se caracterizan por su interés en la innovación alimentaria y por la fuerza de la demanda por productos premium.

##### **5.1.1.4.2 Canal B2C Liofilizados: Consumidor Final**

El segmento de clientes se caracteriza como consumidores de nicho, con alto poder adquisitivo y un especial foco en costumbres y alimentación orgánica y saludable. El perfil del cliente son adultos jóvenes y profesionales preocupados por su nutrición. Deportistas y padres que buscan snacks saludables. Generalmente se trata de consumidores informados, que leen etiquetas y están dispuestos a pagar un precio elevado debido al carácter premium e innovador, además de la alta calidad del producto.

Los clientes requieren de un snack saludable, conveniente, ligero y de gran sabor, sin aditivos ni conservantes. Se consume directamente del envase, como “topping” para yogures, ensaladas o helados. También se puede utilizar para repostería.

El foco geográfico reside en el mercado nacional a través de canales especializados, como tiendas saludables, mercados gourmet y/o e-commerce. En cambio, en el plano internacional, mercados de exportación a través de cadenas de retail enfocadas en productos orgánicos y saludables.

## **5.1.2 Análisis de la demanda**

### **5.1.2.1 Contexto y Tendencias del Mercado Global**

#### **5.1.2.1.1 Salud y Bienestar**

Los consumidores buscan activamente productos orgánicos, naturales y nutritivos. Esta tendencia actúa como motor principal de crecimiento para frutas procesadas en general. Esto beneficia directamente al producto liofilizado, percibido como un snack saludable premium que mantiene casi intacta sus propiedades nutritivas. Ocurre lo mismo en el caso congelado, como ingrediente base para preparaciones saludables.

#### **5.1.2.1.2 Conveniencia y Ahorro de Tiempo**

Los estilos de vida acelerados aumentan la demanda de alimentos listos para consumir o que requieren una preparación mínima. Ambos productos responden a esta necesidad. Las congeladas ofrecen disponibilidad durante todo el año, mientras que las liofilizadas, son la cúspide de la conveniencia.

#### **5.1.2.1.3 Reducción del Desperdicio de alimentos**

Los consumidores y la industria buscan productos con vida útil prolongada que permita minimizar las pérdidas. Es una ventaja clave para ambos productos.

## **5.1.3 Cuantificación de la Demanda**

Para determinar la viabilidad comercial, es crucial dimensionar el tamaño actual de los mercados de destino y proyectar su comportamiento futuro. A continuación, se analiza la demanda para cada producto, separando el mercado de exportación del mercado nacional.

### **5.1.3.1 Frutillas Congeladas**

Es un mercado maduro, consolidado y de gran volumen, donde Chile tiene una participación relevante.

#### **5.1.3.1.1 Demanda Actual**

##### **5.1.3.1.1.1 Mercado de Exportación**

Es el principal motor de la demanda para producción chilena. Este producto, generalmente se comercializa como un commodity industrial. Se estima que las exportaciones chilenas de frutilla congelada en 2024 alcanzaron aproximadamente 58.000 toneladas métricas. El precio promedio de exportación (FOB) es de 2,8 USD/kg, por lo que el valor del mercado se estima en aproximadamente 162,4 MMUSD. Los principales mercados de destino son Estados Unidos, Canadá y Japón, y en menor medida, países europeos como Alemania y Países Bajos.

##### **5.1.3.1.1.2 Mercado Nacional**

La demanda interna está impulsada por la industria de alimentos y el canal HORECA (Hoteles, restaurantes y casinos), además de un creciente consumo en el retail. Se estima un consumo nacional aparente de 32.000 toneladas métricas en 2024. El precio mayorista

promedio es de 2,5 USD/kg, por lo que el valor del mercado nacional se estima en unos 80 MMUSD.

#### **5.1.3.1.2 Proyección de la demanda**

Se proyecta un crecimiento estable y moderado, impulsado por la demanda constante del sector industrial, sumado a un leve aumento en el consumo doméstico. Se estima una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) de 3,5% anual para el mercado total.

#### **5.1.3.2 Frutillas Liofilizadas**

Este mercado es de nicho, con un alto valor agregado y en una fase de crecimiento acelerado, tanto a nivel nacional, como a nivel global.

##### **5.1.3.2.1 Demanda actual.**

###### **5.1.3.2.1.1 Mercado de Exportación**

Es el mercado principal y más atractivo. El producto se posiciona como un ingrediente premium común para la industria y como un snack saludable de alto valor para el consumidor final. El volumen aun es incipiente pero creciente. Se estima un volumen de 450 toneladas métricas en 2024. A un precio de exportación FOB de 58 USD/kg, el valor de este mercado se estima en 26,1 MMUSD. Los principales mercados de destino son E.E.U.U., Alemania, Corea del Sur, Australia, entre otros mercados con alta demanda por productos saludables e innovadores.

###### **5.1.3.2.1.2 Mercado Nacional**

Es un mercado pequeño, pero en rápida expansión, visible en tiendas especializadas, e-commerce y como ingrediente en productos gourmet. Se estima un consumo aparente de 50 toneladas métricas en 2024. A un precio mayorista promedio de 60 USD/kg, el valor del mercado se estima en 2,9 MMUSD.

##### **5.1.3.2.2 Proyección de la demanda**

Se proyecta un crecimiento robusto y acelerado, impulsado por las macrotendencias de consumo saludable, etiqueta limpia y snack “on the go”. Se estima una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) de un 12% anual para el mercado total.

El análisis revela dos mercados con perfiles de demanda muy diferentes. Mientras el mercado de frutillas congeladas es un mercado de volumen, maduro y de crecimiento estable, que ofrece seguridad, pero márgenes ajustados, el mercado de las frutillas liofilizadas es un mercado de valor, emergente, que ofrece altos márgenes, pero con una mayor incertidumbre y requerimientos de desarrollo de mercado.

#### **5.1.4 Análisis de la Oferta**

El análisis se enfoca en el mercado chileno, complementado con una visión de los principales actores internacionales más relevantes para contextualizar la posición de Chile en el

panorama mundial y cuantificar la importancia relativa de su mercado interno versus el de exportación.

#### **5.1.4.1 Frutillas Congeladas**

Es un mercado maduro, de volumen alto y fuertemente orientado a la exportación.

##### **5.1.4.1.1 Principales Productores y Exportadores en Chile.**

Los productores nacionales de frutillas congeladas, por lo general, suelen tener una operación verticalmente integrada, desde el cultivo (propio o de agricultores asociados) hasta el procesamiento y la exportación. A continuación, se presentan los principales actores del mercado chileno.

**Frutícola Olmué:** Uno de los líderes del mercado de congelados en Chile, con una fuerte presencia de bayas, incluyendo frutillas. Exportan a mercados de alto estándar.

**Alifrut:** Es uno de los mayores procesadores y exportadores de hortalizas y frutas congeladas en el país. Cuentan con varias plantas productivas y una amplia red de distribución global.

**Vitafood:** Aunque su foco principal son los arándanos, a través de su división de congelados, es un actor muy relevante de berries en general.

**Frucol:** Empresa ubicada en la Región del Maule, especializada en producción, procesamiento y exportación de frutas congeladas, purés y conservas.

**Torca Frozen Berries:** Empresa familiar ubicada en Curicó, enfocada en el desarrollo y exportación de berries congelados IQF.

##### **5.1.4.1.2 Principales Distribuidores y Marcas en el Mercado Nacional (Retail)**

A nivel de consumidor final, las frutillas congeladas se encuentran principalmente bajo las marcas propias de los supermercados de los distribuidores especializados. A continuación, se detallan los principales distribuidores y marcas en el mercado nacional retail.

**Marcas Propias de Supermercado:** Lider, Jumbo, Tottus y Santa Isabel tienen sus propias marcas de productos congelados que son una parte importante de la oferta en góndola.

- **Frutos del Maipo:** Una de las marcas más reconocidas por el consumidor final en Chile en la categoría de congelados en general.
- **Minuto Verde:** Aunque su fuerte son las hortalizas también cuentan con una línea de frutas congeladas.
- **Fruton Chile / Terracuario:** Distribuidores del canal HORECA como al consumidor final, mediante plataformas en línea.

##### **5.1.4.1.3 Principales Actores Internacionales**

El mercado global de frutillas congeladas es altamente competitivo, con varios países liderando la producción mundial. Entre los principales países exportadores se tiene México,

España, Egipto, Turquía, entre otros, quienes son consistentemente los mayores exportadores mundiales.

Entre los conglomerados de alimentos y empresas especializadas que actúan en el mercado se pueden encontrar grandes marcas como Driscoll's (E.E.U.U), Ardo (Bélgica), y diversas cooperativas y productoras en Egipto, entre otros.

#### **5.1.4.2 Frutillas Liofilizadas**

Este es un mercado de nicho, de alto valor y en plena fase de crecimiento. Los actores suelen ser empresas mucho más especializadas en comparación a las de producto congelado.

##### **5.1.4.2.1 Principales Productores en Chile**

El número de productores en Chile es reducido, pero altamente especializado, con un claro enfoque de exportación y, a nivel local, en nichos gourmet.

- **SoutAm Freeze Dry:** Una de las empresas más importantes de liofilización en Chile y Sudamérica. Ofrecen productos para la industria, maquila y soluciones para retail en general.
- **Aliofi:** Empresa chilena de Foodtech especializada en liofilización, que ofrece frutas y otros productos para la industria y también para el consumidor final mediante su tienda en línea.
- **Aike: Enfocados** en berries nativos y endémicos liofilizados, como el maqui, pero también procesan frutillas, principalmente en polvo.
- **Nativ for Life:** Marca enfocada en superalimentos, que comercializa polvos y snacks de frutas liofilizadas, incluyendo la frutilla.

##### **5.1.4.2.2 Principales Distribuidores y Marcas en el Mercado Nacional**

La distribución es selectiva, enfocada en puntos de ventas que atraen a su público objetivo en específico.

Tiendas Especializadas: Se encuentran en tiendas de productos saludables y orgánicos, como AllFree, Dellanatura, La Chakra, entre otros.

E-commerce: Es un canal de venta realmente importante, tanto a través de los sitios web de los propios productores, como en marketplaces.

Supermercados (góndola gourmet): Algunas cadenas como Jumbo y Líder han incorporado estos productos en sus secciones de alimentos premium, saludables y/o gourmet.

##### **5.1.4.2.3 Principales Actores Internacionales**

El mercado global está liderado por empresas de Europa y Norteamérica con vasta experiencia en la tecnología de liofilización. Entre los países líderes se encuentran Estados Unidos, Reino Unido y Alemania, que son mercados clave tanto en consumo como en producción. European Freeze Dry (Reino Unido), Oregon Freeze Dry (E.E.U.U.),

Ajinomoto (Japón), Asahi Group Holdings (Japón) y Harmony House Foods (E.E.U.U.), entre otros.

#### **5.1.4.3 Cuantificación del aporte del mercado Nacional vs Internacional.**

La industria de frutilla procesada en Chile tiene una vocación eminentemente exportadora.

##### **5.1.4.3.1 Frutillas Congeladas**

Es el destino principal de la producción. Según datos de la industria, estimaciones de ChileAlimentos, para la temporada 2020, las exportaciones de frutilla congelada rondaron los 55.000 toneladas. Para el mismo período, se estimó un consumo interno de aproximadamente 30.000 toneladas, abasteciendo tanto al canal industrial, como al retail.

Aproximadamente el 65% de la producción de frutilla congelada se destina a exportación, el 35% restante se consume localmente. Esto demuestra que, si bien el mercado nacional es relevante, el crecimiento y la escala del negocio están fuertemente asociados al desempeño de este producto en los mercados internacionales.

##### **5.1.4.3.2 Frutillas Liofilizadas**

Es el mercado objetivo por excelencia. No existen cifras públicas consolidadas tan claras como el congelado. Pero se estima que entre el 70-90% de la producción se exporta. El alto valor del producto lo posiciona como un candidato ideal para nichos en mercados internacionales más desarrollados. Por ende, es un mercado pequeño y en desarrollo. El consumo es bajo en volumen, aunque creciente, y se concentra en un segmento de la población de altos ingresos.

El mercado nacional de la frutilla liofilizada actualmente es una oportunidad de nicho y un campo de prueba para nuevos formatos, pero el volumen y la rentabilidad del negocio dependen casi en su totalidad de la capacidad de la empresa para competir en el extranjero, aumentando los riesgos comerciales asociados.

#### **5.1.4.4 Benchmarking competitivo: Mercado Chileno**

Las siguientes matrices de Benchmarking analizan y comparan los principales actores que compiten en el mercado chileno de frutillas congeladas y liofilizadas. El objetivo es identificar sus estrategias de producto, mercado, precios y distribución para entender el panorama competitivo.

##### **5.1.4.5 Frutillas Congeladas**

Este es un mercado maduro caracterizado por actores con grandes capacidades de distribución y economías de escala, en la Tabla 5, se presenta una matriz benchmarking competitivo de las de las frutillas congeladas en Chile.

*Tabla 5. Matriz Benchmarking competitivo Frutillas Congeladas en Chile.*

| <b>Factor de Comparación</b>      | <b>Frutos del Maipo</b>                                            | <b>Alifrut (Minuto Verde)</b>                                                        | <b>Marcas Propias (Líder, Jumbo, etc.)</b>                                    |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mercado Objetivo Principal</b> | Consumidor final en retail.                                        | Food Service, Industria y Retail.                                                    | Consumidor final sensible al precio.                                          |
| <b>Canales de Venta</b>           | Supermercados, tiendas de conveniencia, distribuidores minoristas. | Venta directa a industria, distribuidores mayoristas y supermercados.                | Exclusivamente en sus propias cadenas de supermercados.                       |
| <b>Formato de Venta</b>           | Bolsas de 500g y 1kg, con cierre fácil (ziploc).                   | Bolsas de 1kg y formatos a granel (cajas de 10kg+) para la industria.                | Bolsas de 500g y 1kg, empaque simple.                                         |
| <b>Posicionamiento</b>            | Marca reconocida y tradicional en la categoría de congelados.      | Líder en producción y distribución. Solución integral para la industria y el retail. | Precio más bajo. La opción más económica en la góndola.                       |
| <b>Estrategia de Precio</b>       | Medio-Alto. Se posiciona como una marca de calidad superior.       | Medio. Competitivo tanto en retail como en el canal industrial.                      | Bajo. Estrategia de liderazgo en costos.                                      |
| <b>Fortalezas Percibidas</b>      | Fuerte reconocimiento de marca, amplia distribución en retail.     | Economías de escala, capacidad de exportación, diversificación de productos.         | Control total del punto de venta, capacidad para ofrecer el precio más bajo.  |
| <b>Debilidades Percibidas</b>     | Precio más elevado que las otras marcas                            | Menor posicionamiento de marca en la mente del consumidor final.                     | Percepción de menor calidad, dependencia de la estrategia de comercialización |

#### **5.1.4.6 Frutillas Liofilizadas**

Para las frutillas liofilizadas, en cambio, se trata de un mercado de nicho, en crecimiento, con actores enfocados en innovación y valor agregado. En la Tabla 6, se presenta una matriz de benchmarking competitivo de las frutillas liofilizadas en Chile.

Tabla 6. Matriz Benchmarking competitivo Frutillas Liofilizadas en Chile.

| <b>Factor de Comparación</b>      | <b>SouthAm Freeze Dry</b>                                                | <b>Aliofi</b>                                                                              | <b>Nativ for Life / Aike</b>                                                       |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mercado Objetivo Principal</b> | Industria alimentaria, maquila.                                          | Industria gourmet y E-commerce.                                                            | Consumidor final enfocado en salud y superalimentos                                |
| <b>Canales de Venta</b>           | Venta directa a empresas, contratos de maquila, exportación.             | Venta directa a empresas y tienda online propia.                                           | Tiendas especializadas (saludables/gourmet), farmacias y e-commerce.               |
| <b>Formato de Venta</b>           | Cajas a granel (polvo, trozos, entero) según requerimiento del cliente.  | Formatos pequeños (sachets de 15-20g) y medianos (100g) para B2C. Formatos personalizados. | Formatos pequeños (sachets, doypacks) enfocados en el snack y polvos.              |
| <b>Posicionamiento</b>            | Líder en capacidad productiva y certificaciones.                         | Soluciones de liofilización para distintos usos, desde la industria al hogar.              | Producto 100% natural, enfocado en los beneficios nutricionales.                   |
| <b>Estrategia de Precio</b>       | Alto. Definido por volumen y especificaciones técnicas.                  | Alto. Precio premium justificado por la tecnología y calidad.                              | Muy Alto. Se vende como un producto de alto valor funcional.                       |
| <b>Fortalezas Percibidas</b>      | Capacidad tecnológica y productiva, fuerte enfoque B2B y de exportación. | Modelo de negocio flexible (B2B/B2C), agilidad para desarrollar nuevos productos.          | Fuerte posicionamiento en el nicho de salud, branding atractivo y claro.           |
| <b>Debilidades Percibidas</b>     | Poca o nula presencia de marca para el consumidor final.                 | Reconocimiento de marca en construcción.                                                   | Volúmenes de producción pequeños, precio muy elevado que limita el mercado masivo. |

### 5.1.5 Análisis de Precios

Se recopilan y analizan los precios de venta históricos y actuales para ambos productos de frutilla procesada. El objetivo es establecer una base sólida para la proyección de ingresos

del proyecto. Se examinan precios tanto para el canal B2C (retail) como para el B2B (industrial/exportación), identificando los principales factores que influyen en el comportamiento, proyectando su evolución.

#### **5.1.5.1 Precios de Venta: Frutillas Congeladas**

##### **5.1.5.1.1 Canal B2C (Retail-Mercado Nacional)**

Durante el período 2020-2024, el precio al consumidor ha mostrado un alza constante, influenciado por la inflación general y el aumento en costos logísticos. Los precios por bolsa de 1 kilogramo han evolucionado de un rango de \$3.500 - \$4.500 CLP hasta \$4.500 - \$5.800 CLP.

Una revisión de las principales cadenas de supermercados en Chile muestra los siguientes precios promedios para una bolsa de 1 kilogramo de frutilla congelada:

- Marcas Propias: \$4.690 - \$5.190 CLP
- Marcas Reconocidas: \$5.490 - \$5.990 CLP

Por lo tanto, se establece que el precio promedio actual minorista es de aproximadamente 5 USD/kg.

##### **5.1.5.1.2 Precios de Exportación**

El precio de exportación (FOB Chile) es volátil y depende de la producción de los principales competidores. Históricamente ha fluctuado entre \$2.2 y \$3.0 USD/kg. En años de baja oferta global, los precios han superado los \$3.2 USD/kg.

Considerando la demanda estable y los costos de producción al alza, se estima un precio de exportación promedio FOB de \$2.8 USD/kg. Este es el valor de referencia para el canal industrial.

#### **5.1.5.2 Factores Clave que Influyen en el Precio**

El precio pagado a los productores de frutilla fresca es el principal componente del costo. Contar con cultivos propios generaría una ventaja competitiva, o la creación de contratos de venta ajustados por el volumen de consumo. La congelación es un proceso intensivo en energía, por lo que el costo OPEX es determinante para el precio. Finalmente, las cosechas de los principales países productores impactan directamente el precio internacional, dado que establecen los precios para competir, además de que un dólar alto favorece los ingresos por exportación.

#### **5.1.5.3 Precios de Venta: Frutillas Liofilizadas**

##### **5.1.5.3.1 Canal B2C (Retail-Mercado Nacional)**

Al realizar un análisis histórico, siendo el liofilizado un mercado más nuevo, la data histórica es menor. Sin embargo, los precios se han mantenido consistentemente altos. El formato de

ventas es en sachets pequeños (10-20g). El precio por kg equivalente ha estado siempre en el rango de \$90.000 - \$160.000 CLP/kg.

Marcas como Aliofi o Nativ for Life venden sachets de 10g a un precio aproximado de 1,8 USD. Esto se traduce en un precio por kilogramo de \$180 USD. Sin embargo, el proceso productivo contempla vender a precio mayorista para generar un margen sano para los distribuidores y comercializadores minoristas, por lo tanto, se establece \$100 USD/kg como el valor a utilizar como referencia para el canal B2C.

#### **5.1.5.3.2 Canal B2B (Industrial y Exportación)**

Respecto al análisis histórico, este precio es altamente confidencial y depende del volumen, formato y relación comercial. Como regla general, el precio industrial es significativamente menor que el de retail. Se estima que el precio B2B se encuentra en un rango de 50 – 60% del precio de retail.

Basado en esto, sumado a lo anteriormente comentado, se establece un precio B2B de referencia de \$60 USD/kg.

#### **5.1.5.4 Factores Clave que Influyen en el Precio**

La inversión (CAPEX) y el costo operativo (energía eléctrica) de los liofilizadores son muy elevados, debido a que el proceso utiliza esta electricidad para eliminar el agua presente en la fruta, sublimándola. Por otra parte, dada la naturaleza del proceso, se requieren aproximadamente 10 kg de fruta fresca para obtener 1 kg de frutilla liofilizada. Finalmente, el posicionamiento como producto premium, saludable e innovador permite justificar y sostener un precio de venta alto, sumado a que la competencia mundial es menor debido a la menor cantidad de actores en este.

## **5.2 Estudio Técnico**

### **5.2.1 Fundamentos de las tecnologías de procesamiento**

El corazón de cada proceso reside en una pieza de equipamiento altamente especializada, cuyas características determinan la operación. En estricto rigor, la frutilla fresca a procesar contiene por cada 100g de fruto, un 90% de agua, mientras que el 10% restante corresponden a sólidos totales, entre ellos, azúcares y fibras.

#### **5.2.1.1 Frutilla Congelada: Túnel de congelación IQF.**

El equipo central para la producción de frutillas congeladas es el túnel de congelación IQF (Individual Quick Freezing). Conceptualmente, es un sistema de congelación continuo que opera bajo el principio de lecho fluidizado. La fruta, ya preparada, ingresa al túnel a través de una cinta transportadora perforada. Desde abajo, potentes ventiladores inyectan una corriente de aire a muy baja temperatura (entre -30°C y -40°C) y a alta velocidad. En la Figura 7, se presenta un esquema representativo de un túnel IQF.



*Figura 7. Túnel Individual Quick Freezing o congelado ultrarrápido (Fresh Plaza, 2019).*

La corriente de aire frío hace que las frutillas floten y se muevan constantemente, como si de un fluido se tratara. Este fenómeno logra dos objetivos clave: Congelación ultrarrápida y separación del producto. Respecto al primero, las condiciones de operación establecen una alta transferencia de calor, congelando cada fruta individualmente en cosa de minutos, minimizando la formación de grandes cristales de hielo y preservando mejor la textura. Por la otra parte, el constante movimiento inducido por el aire frío evita que las frutillas se peguen o adhieran entre sí, resultado un producto individual y fácil de manipular, característico del formato IQF. La naturaleza del proceso es continuo, diseñado específicamente para manejar grandes volúmenes de producto de manera eficiente (Fresh Plaza, 2019).

#### **5.2.1.2 Frutilla Liofilizada: Liofilizador Industrial.**

El equipo principal para este proceso es el liofilizador industrial, una máquina tecnológicamente compleja que opera en ciclos discontinuos, por lo que está limitada por el tamaño de la cámara y la duración del ciclo.

Consiste, básicamente, en una cámara hermética de acero inoxidable capaz de soportar un alto vacío. En su interior se encuentran bandejas calefaccionadas donde se coloca el producto previamente congelado. El sistema se complementa con dos componentes cruciales: El sistema de vacío y el condensador. El primero, se trata de potentes bombas que extraen el aire de la cámara para reducir la presión a niveles muy bajos(vacío). El segundo, es una superficie refrigerada a muy baja temperatura, que actúa como trampa de hielo. En la Figura 8 se presenta un liofilizador industrial típico.



*Figura 8. Liofilizador Industrial (BoLaiKe, 2026).*

Una vez que el producto congelado está en la cámara de vacío, se aplica un calor controlado a las bandejas. A esa baja presión, el hielo no se derrite, sino que sublima. El vapor de agua viaja por el interior de la cámara y se congela instantáneamente al entrar en contacto con el condensador. Este ciclo se mantiene por largas horas, hasta eliminar la gran mayoría del agua presente en la fruta (BoLaiKe, 2026).

## **5.2.2 Descripción de las etapas productivas y diagramas de flujo de procesos**

El procesamiento industrial de la frutilla, independiente de la tecnología de conservación a emplear, requiere de una serie de operaciones unitarias que permiten adecuar la materia prima. En este apartado se describen de manera secuencial las etapas productivas para ambas alternativas tecnológicas en estudio, culminando con sus respectivos Diagramas de Flujo de Procesos (PFD).

### **5.2.2.1 Línea de producción de frutilla congelada IQF**

El proceso de congelación individual rápida está diseñado para una operación continua, donde se priorizan altos volúmenes de flujo másico. Las operaciones unitarias involucradas son:

1. **Recepción y acopio:** La fruta fresca proveniente de los predios agrícolas se recibe en bins plásticos. Se realiza un control de calidad inicial y se almacena temporalmente en una cámara de espera momentánea, generalmente en condiciones de temperatura cercana a los 4°C, lo que permite frenar considerablemente la tasa respiratoria del fruto.
2. **Lavado y desinfección:** La fruta ingresa a una lavadora por inmersión con agitación por burbujeo de aire, donde se remueve la carga física, típicamente el polvo o la tierra proveniente del proceso de cosecha. Posteriormente, pasa por baños de aspersión que aplican una solución clorada u ozonizada para la reducción de la carga microbiana inicial.
3. **Inspección y descorazonado:** A través de cintas transportadoras, personal calificado o sistemas de visión artificial, retiran el pedúnculo y cáliz del fruto, a la vez que se separan los frutos que no cumplen con los estándares de calidad comercial.

4. **Preenfriamiento:** La frutilla es transportada a través de un túnel de aire forzado o se rocía con agua helada para reducir la temperatura interna desde aproximadamente 15°C a 4°C, disminuyendo la carga térmica del túnel IQF.
5. **Congelación IQF:** La fruta ingresa al túnel IQF. La inyección de frío a alta velocidad, entre -30°C y -40°C, genera un lecho fluidizado que congela el fruto de manera individual en un período típico de entre 10 a 15 minutos, llevando la temperatura del centro del producto a unos -18°C.
6. **Envasado y almacenamiento:** El producto congelado es derivado a una pesadora multicabezal, en un ambiente de temperatura controlada, donde se empaca en bolsas de polietileno de baja densidad (PEBD). Finalmente, es paletizado y almacenado en cámaras frigoríficas masivas a -18°C a la espera de su posterior expedición logística.

En la Figura 9, se presenta el PFD de la línea de congelación IQF para la frutilla congelada.

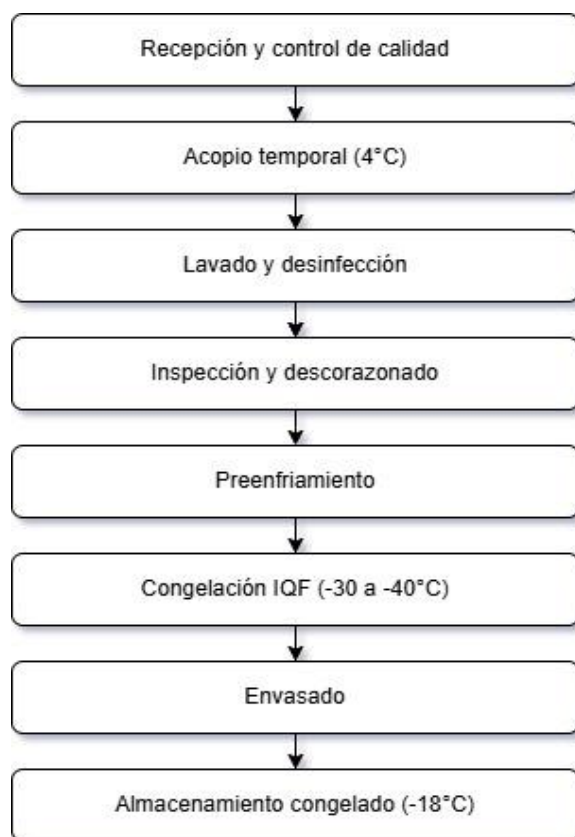


*Figura 9. Diagrama de Flujo de Proceso de la línea de congelación IQF (Elaboración propia).*

#### 5.2.2.2 Línea de producción de frutilla liofilizada

A diferencia de la congelación continua, la liofilización es un proceso por lotes de alta especialización y tiempos de retención prolongados. Las etapas involucradas en el proceso

son las que se describen a continuación. Además, en la Figura 10, se presenta el diagrama de flujo del proceso como consolidación de lo descrito.

1. **Acondicionamiento inicial:** Las etapas de recepción, lavado, desinfección e inspección y descorazonado son operativamente idénticas a las de la línea de IQF descritas anteriormente, lo que asegura una materia prima limpia e inocua.
2. **Corte o troceado (opcional):** Dependiendo de la especificación técnica solicitada por el cliente, la fruta puede liofilizarse entera (como en este caso de estudio), en mitades o rodajas. Este proceso aumenta el área superficial expuesta, reduciendo los tiempos del ciclo de liofilización.
3. **Congelación rápida:** Previo a su ingreso al equipo de vacío, las frutillas se disponen en bandejas de acero inoxidable y se someten a un proceso de congelación ultra rápida, típicamente hasta  $-40^{\circ}\text{C}$ , en abatidores de temperatura. Estos equipos están diseñados para asegurar una cristalización fina del agua intra e intercelular, previniendo el colapso estructural del fruto, crítico en aspectos de calidad del producto final. Generalmente, los liofilizadores industriales masivos incluyen este procesamiento dentro de sus funciones operativas.
4. **Liofilización:** Las bandejas con el producto congelado se introducen en la cámara del liofilizador industrial. Una vez que se alcanza un estado hermético dentro de dicha cámara, se activan las bombas de vacío, llevando la presión absoluta al interior por debajo de los 6,13 mbar. Mediante un sistema de fluido térmico, se transfiere el calor sensible a las placas de acero inoxidable, proporcionando la entalpía de sublimación necesaria para que el hielo pase directamente desde fase sólida, a fase vapor. Este vapor es capturado en por un condensador criogénico (una trampa de frío operando a aproximadamente  $-50^{\circ}\text{C}$ ). El ciclo dura entre 18 y 60 horas, de acuerdo con la especificación técnica del producto (troceado o entero), hasta alcanzar una humedad residual inferior al 3%.
5. **Descarga y envasado en sala blanca:** Tras romper el vacío generado por las bombas con un gas inerte, típicamente nitrógeno seco para evitar la oxidación, el producto se extrae en una sala con atmósfera estrictamente controlada (baja temperatura y humedad relativa  $<30\%$ ). Dadas las características altamente higroscópicas del producto, se envasa inmediatamente en empaques de alta barrera (trilaminados PET/ALU/PE), asegurando la hermeticidad del formato comercial.
6. **Almacenamiento:** El producto liofilizado terminado y empacado se acopia en bodegas a temperatura ambiente fresca y seca, sin requerimientos de cadena de frío logística.

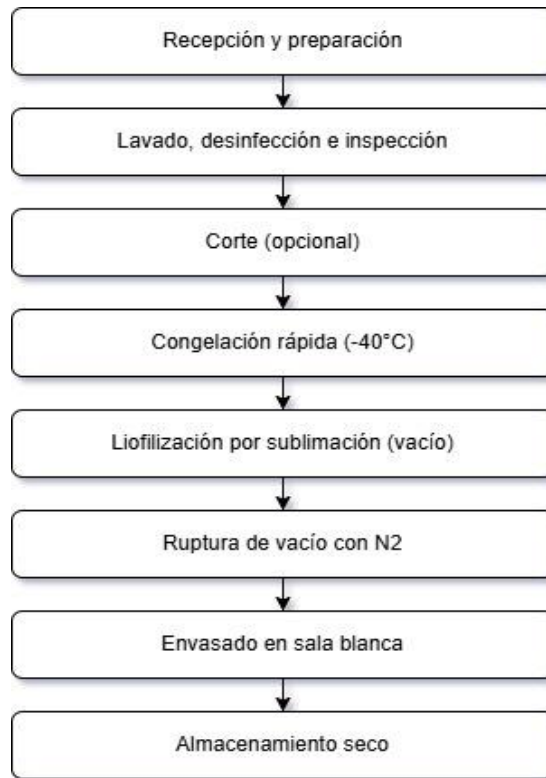


*Figura 10. Diagrama de Flujo de Proceso de la línea de liofilización. (Elaboración propia).*

### 5.2.3 Balances macroscópicos de masa y energía

Para sustentar la evaluación técnica y económica de ambos proyectos, se desarrollan los balances microscópicos de masa y energía. La validación de factores de rendimiento de materia prima y los consumos específicos de energía eléctrica de cada tecnología se sustentan en los cálculos descritos a continuación.

#### 5.2.3.1 Bases de cálculo y propiedades termodinámicas.

Para efectos del cálculo inicial se establece una base de cálculo de 1000 kg/h de frutilla fresca que ingresa a la planta. De acuerdo con la literatura técnica, se asume que la composición de la frutilla fresca es de aproximadamente un 90% de agua,  $X_w = 0,9$ , y un 10% de sólidos totales,  $X_s = 0,1$  (ASHRAE, 2014).

Las capacidades caloríficas sobre el punto de congelación  $Cp_u$ , bajo el punto de congelación  $Cp_f$  y el calor latente de fusión del fruto  $\lambda_f$ , se establecen a través de las ecuaciones empíricas de Siebel, descritas a continuación (Singh & Heldman, 2014):

$$Cp_u = 4,18 \cdot X_w + 1,42 X_s = 3,90 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$Cp_f = 2,10 \cdot X_w + 1,42 X_s = 2,03 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$\lambda_f = 334 \cdot X_w = 300,60 \frac{kJ}{kg}$$

Estas ecuaciones son ampliamente validadas en la literatura de ingeniería de procesos alimentarios para predecir propiedades termo físicas en función de la fracción másica de agua (Fellows, 2022).

Las temperaturas de referencia son: temperatura inicial de la fruta 15°C, temperatura de congelación de la fruta -1°C, temperatura final a la salida del túnel IQF -18°C y temperatura de congelación profunda para la liofilización -40°C (ASHRAE, 2014).

### 5.2.3.2 Balances de masa y rendimientos.

#### 5.2.3.2.1 Etapa de acondicionamiento (común para ambos procesos)

- Corriente de entrada: 1000 kg de frutilla fresca (900 kg agua y 100 kg sólidos).
- Merma (lavado y descorazonado): Se estima una pérdida de 5% en peso correspondiente a cálices, pedúnculos y descarte (Sinha et al., 2012).

$$M_{merma} = 1.000 \text{ kg} \cdot 0,05 = 50 \text{ kg}$$

- Fruta acondicionada para procesar:

$$M_{a \text{ procesar}} = 1.000 \text{ kg} - 50 \text{ kg} = 950 \text{ kg}$$

Donde de los 950 kg, 855 kg corresponden a agua y 95 kg corresponden a sólidos totales.

#### 5.2.3.2.2 Línea de congelado IQF

- Rendimiento industrial congelado

En el túnel de lecho fluidizado, se asumen que las pérdidas por deshidratación superficial son mínimas ( $\approx 0\%$ ). Por ende, la masa del producto final congelado es de 950 kg

$$Rendimiento_{IQF} = \frac{1000 \text{ kg fruta fresca}}{950 \text{ kg congelado}} = 1,05 \frac{kg}{kg}$$

#### 5.2.3.2.3 Línea de liofilización

La fruta acondicionada ingresa al liofilizador. La especificación técnica del producto exige una humedad residual inferior al 3%,  $X_{w,final} = 0,03$ . Por lo tanto, los 95 kg de sólidos representan un 97% de la masa del producto final (Mujumdar, 2014).

- Masa del producto liofilizado

$$M_{lio\text{filizado}} = \frac{95 \text{ kg}}{0,97} = 97,94 \text{ kg}$$

- **Agua sublimada**

$$M_{sublimada} = 855 \text{ kg} - 2,94 \text{ kg} = 852,06 \text{ kg}$$

- **Rendimiento industrial liofilizado**

$$Rendimiento_{lio\text{filizado}} = \frac{1000 \text{ kg fruta fresca}}{97,94 \text{ kg liofilizado}} = 10,21 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Considerando mermas de manipulación en el envasado y rotura de la estructura porosa, se adopta un rendimiento operativo conservador de 10,5 kg de fruta fresca por kg de producto liofilizado para el modelo económico (Savo et al., 2012).

### 5.2.3.3 Balances de energía y consumo específico.

#### 5.2.3.3.1 Demanda térmica línea IQF

El cálculo de la carga térmica  $Q_{IQF}$  por kilogramo de fruta condicionada se desglosa en tres etapas (Singh & Heldman, 2014):

##### 1. Calor sensible: Enfriamiento de 15°C a -1°C.

$$Q_{1IQF} = 1 \text{ kg} \cdot 3,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (15 - (-1))^\circ\text{C} = 62,4 \text{ kJ/kg}$$

##### 2. Calor latente: Congelación a -1°C.

$$Q_{2IQF} = 1 \text{ kg} \cdot 300,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 300,6 \text{ kJ}$$

##### 3. Calor sensible: Subenfriamiento de -1°C a -18°C.

$$Q_{3IQF} = 1 \text{ kg} \cdot 2,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (-1 - (-18))^\circ\text{C} = 34,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

La carga térmica es la sumatoria de las etapas,  $Q_{IQF} = 397,51 \text{ kJ/kg}$ , equivalente a 0,11 kWh/kg térmicos. Considerando que el ciclo de refrigeración y la energía consumida por los ventiladores de levitación del lecho fluidizado, opera con un coeficiente de operación COP de  $\approx 1,5$ , el consumo eléctrico real se alza hasta los 0,39 kWh/kg de producto final (Messineo, 2012; Savo et al., 2012).

#### 5.2.3.3.2 Demanda térmica línea liofilizada

El requerimiento energético se calcula en base a 1 kg de producto liofilizado. De acuerdo con el balance de masa, se requiere procesar 9,7 kg de fruta acondicionada y sublimar aproximadamente 8,7 kg de agua.

##### 1. Congelación inicial profunda (hasta -40°C)

$$Q_{cong} = 442,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 9,7 \text{ kg} = 4,289 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 1,19 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

## 2. Calor de sublimación:

Se debe entregar el calor latente de sublimación del hielo bajo vacío,  $\lambda_s \approx 2.838$  kJ/kg, a través de las placas de acero inoxidable presentes en el liofilizador, además se asume que el sistema de calentamiento tiene un 95% de eficiencia, por tanto (Moran et al., 2014):

$$Q_{sub} = 8,7 \text{ kg}_{agua} \cdot 2.838 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 24.690 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 6,85 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{0,95} = 7,21 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

## 3. Carga del condensador criogénico

El condensador es el encargado de retirar la misma energía térmica para solidificar el vapor a  $-50^{\circ}\text{C}$ . Los compresores en cascada a esta temperatura típicamente poseen un COP cercano a 0,8 (Messineo, 2012).

$$Q_{condensador} = \frac{6,85 \text{ kWh}}{0,8} = 8,56 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

## 4. Sistemas auxiliares de vacío

El subtotal de consumo, correspondiente a la suma aritmética de todos los calores involucrados por kilogramo, es de 16,96 kWh/kg de producto liofilizado. Sin embargo, debido a los altos tiempos de procesamiento continuo de las bombas de vacío y las pérdidas térmicas durante los ciclos, se asume un sobreconsumo de 12%, con lo cual, se alcanza un consumo eléctrico específico total de 19 kWh/kg de producto liofilizado (Savo et al., 2012).

A continuación, en la Tabla 7, se sintetiza la información y se compara el consumo de materia prima y del consumo energético específico estimado para cada tecnología.

*Tabla 7. Comparación del consumo energético y rendimiento del proceso estimado para cada tecnología (Elaboración propia a partir de (Savo et al., 2012)).*

| Parámetro                     | Congelación | Liofilización | Observaciones                                       |
|-------------------------------|-------------|---------------|-----------------------------------------------------|
| Consumo Materia Prima         | 1,05 kg/kg  | 10,5 kg/kg    | Kilogramo de fruta fresca por kilogramo de producto |
| Consumo Energético Específico | 0,39 kWh/kg | 19 kWh/kg     | Valores de referencia para la evaluación económica  |

El proceso de liofilización consume aproximadamente 7 veces más energía por kilogramo de producto final que el proceso de congelación IQF. Este factor impacta directamente en los costos variables de producción, por tanto, convierte a la liofilización en un proceso muy sensible al precio de la electricidad.

### 5.2.3.4 Otros Insumos Críticos

#### 5.2.3.4.1 Consumo de agua

El consumo de agua es similar en ambos procesos, ya que este consumo se concentra en las etapas iniciales de lavado y desinfección de la fruta fresca, así como en las labores de limpieza de las líneas, por lo que no representa una diferencia significativa en los costos operativos entre ambas tecnologías.

#### 5.2.3.4.2 Material de empaque y mano de obra

El producto congelado requiere bolsas de polietileno de baja densidad, un material estándar y de costo relativamente bajo. En cambio, el material requerido por el producto liofilizado, al ser extremadamente higroscópico, son empaques de alta barrera para asegurar la vida útil. Estos empaques, debido a sus características técnicas, son significativamente más costosos que los utilizados para productos congelados. A continuación, en la Tabla 8, se presenta la tabla final de consumo de insumos claves.

*Tabla 8. Consumo de insumos claves para cada tecnología (Elaboración propia).*

| Insumo              | Congelación                                                         | Liofilización                                                             | Observaciones                                                                                |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agua de proceso     | Moderado                                                            | Moderado                                                                  | Sin diferencia significativa. Usada principalmente para el lavado de la fruta fresca         |
| Material de Empaque | Bolsas de polietileno (PEBD)                                        | Bolsas trilaminadas (PET/ALU/PE)                                          | El empaque para liofilizado es más específico, por lo que es significativamente más costoso. |
| Mano de Obra        | Requiere personal para operación continua de la línea de producción | Requiere de personal calificado para supervisar ciclos largos y complejos | El costo por hora es mayor para la liofilización, pero por kg de producto es menor.          |

### 5.2.4 Estandarización de la Capacidad

Chile es una potencia agroexportadora, siendo la frutilla un cultivo consolidado. Se producen anualmente entre 50.000 y 60.000 toneladas de frutilla de diferentes variedades, como Camarosa, Albion y Monterey. Por tanto, para estandarizar la capacidad de las plantas a evaluar, se requiere de un volumen de producción que sea factible y que, a su vez, asegure que su entrada al mercado no distorsione agresivamente los precios locales. Por lo tanto, en base a estos antecedentes, la selección de estandarizar la capacidad en 3.000 toneladas anuales de fruta a procesar implica capturar de un 5-6% de la producción nacional de frutillas (ProChile, 2025).

La diferencia principal en el orden de magnitud de la producción se debe a la naturaleza de cada proceso, la congelación, valga la redundancia, congela el agua presente en la frutilla, que representa el aproximadamente el 90% del porcentaje en peso de la fruta. En cambio, en la liofilización se trata eliminar el agua presente en la frutilla. En la Tabla 9 se consolidan los rendimientos y producciones respectivas, de acuerdo con la estandarización de la capacidad, para cada una de las alternativas tecnológicas.

*Tabla 9. Rendimiento kg de fruta fresca por kg de producto y producción anual de cada proceso (Elaboración propia).*

| <b>Parámetro</b>            | <b>Fruta Fresca Por Procesar</b> | <b>Rendimiento</b> | <b>Producción Total</b> |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Unidad</b>               | <b>TON</b>                       | <b>kg/kg</b>       | <b>TON</b>              |
| <b>Proyecto Congelado</b>   | 3000                             | 1,05               | 2850                    |
| <b>Proyecto Liofilizado</b> |                                  | 10,5               | 286                     |

La demanda global de frutillas congeladas y liofilizadas justifican la capacidad a instalar. Si se produce liofilizado, anualmente se trataría de 29 contenedores, 2-3 mensuales, este volumen es el mínimo necesario para ser proveedor de cadenas como Costco, Trader Joe's, o Aldi, o para ser ingrediente de productos de Nestlé. Por otra parte, en cuanto a las frutillas congeladas, se trataría de 119 contenedores anuales. Este volumen permite cerrar contratos de programas anuales con importadores, asegurando el flujo de caja. Además, tener tal nivel de producción, otorga el poder de negociación con navieras para obtener mejores tarifas de flete por contenedor refrigerado, crucial para que Chile pueda competir con el hemisferio norte (Chopra, 2025).

En resumen, esta escala permite entrar al radar de los grandes compradores internacionales, optimizar costos operativos y logísticos, como, por ejemplo, en energía y transporte, a la vez que se mitigan riesgos, como, por ejemplo, el de suministro agrícola. Por tanto, bajo el escenario actual de demanda de alimentos saludables y la posición de Chile como plataforma exportadora, ambos proyectos son robustos y sólidos, financiera y estratégicamente.

En la Tabla 10, se presenta la estimación de contenedores necesarios para exportar cada uno de los productos, de acuerdo con la cantidad productiva.

*Tabla 10. Estimación de contenedores de transporte y exportación para cada proceso (Elaboración propia).*

| <b>Supuestos</b>                       | <b>kg/contenedor</b> | <b>Nº contenedores</b> |
|----------------------------------------|----------------------|------------------------|
| <b>Contenedor Producto Congelado</b>   | 24.000               | 119                    |
| <b>Contenedor Producto Liofilizado</b> | 10.050               | 29                     |

La limitación del producto congelado es el peso, en cambio, para el producto liofilizado, la limitación en los contenedores de exportación es el volumen.

## **5.2.5 Definición de los productos**

En este apartado se establecen las especificaciones técnicas detalladas para los dos productos finales objetos de este estudio. La definición de estos parámetros es crucial para estandarizar la calidad, orientar el análisis de los procesos técnicos y fundamentar la evaluación económica comparativa.

### **5.2.5.1 Frutilla Congelada**

El producto se define como una frutilla entera, sana, limpia y en su punto óptimo de madurez que ha sido sometida a un proceso de congelación rápida individual que asegura que las frutas no se adhieran entre sí, de manera de mantener su forma y características individuales. Se trata de la fruta entera, sin cáliz ni pedúnculo, lavadas, desinfectadas y congeladas. El producto debe estar libre de materia extraña, plagas y olores o sabores anómalos.

- Características Físicas y sensoriales (Codex Alimentarius, 1981):
  - Apariencia: Frutas enteras, bien formadas, no aplastadas. Se acepta un máximo de 5% de frutos rotos o dañados (porcentaje en peso)
  - Color: Rojo brillante y uniforme, característico de la variedad madura. Mínimo 90% de la superficie de cada fruta debe ser del color característico.
  - Sabor y olor: Característico de la frutilla fresca y madura. Libre de sabores amargos, ácidos o cualquier sabor u olor extraño.
  - Textura: Firme al tacto en estado congelado, tras la descongelación debe mantener una textura razonablemente firme, sin ser excesivamente blanda o acuosa, característica principal que le confiere el proceso de congelado individual rápido (Chevalier et al., 2000).
- Parámetros fisicoquímicos
  - Grados brix: 7,0 – 10,0 °Brix (USDA, 2019).
  - pH: 3,2 – 3,9.
  - Calibre: Típicamente entre 25-35 mm de diámetro (Codex Alimentarius, 1981).
- Parámetros microbiológicos
  - Recuento de Aerobios Mesófilos: < 50.000 UFC/g.
  - Coliformes totales: < 100 UFC/g.
  - Echerichia coli: < 10 UFC/g.
  - Mohos y levaduras: <1,000 UFC/g.
- Ingredientes
  - Frutilla 100%. Sin aditivos ni conservantes.
- Empaque y almacenamiento
  - Empaque primario: Bolas de polietileno de baja densidad, de grado alimentario.
  - Empaque secundario: Cajas de cartón corrugado.

- Condiciones de almacenamiento: Mantener una temperatura constante de  $-18^{\circ}\text{C}$  o inferior.
- Vida útil
  - Aproximadamente 24 meses desde la fecha de elaboración, bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

#### **5.2.5.2 Frutilla Liofilizada**

El producto se define como frutilla entera, que ha sido sometida a un proceso de liofilización, resultando un producto de muy bajo contenido de humedad, ligero, crujiente y con una alta retención de las propiedades nutricionales y sensoriales de la fruta fresca.

- Características físicas y sensoriales (Ratti, 2001):
  - Apariencia: Estructura porosa y bien definida.
  - Color: Rojo intenso y natural, característico de la frutilla.
  - Sabor y olor: Sabor a frutilla concentrado e intenso. Olor fragante y característico.
  - Textura: Crujiente y ligera, se disuelve fácilmente en la boca, no debe ser gomosa, dado que ello es indicativo de alta humedad, característica no deseada.
- Parámetros fisicoquímicos (Ciurzyńska & Lenart, 2011):
  - Humedad:  $< 3,0\%$ .
  - Actividad del agua:  $< 0,2$ .
  - pH: 3,3 – 4,0.
  - Calibre: Típicamente entre 25-35 mm de diámetro (Codex Alimentarius, 1981).
- Parámetros microbiológicos (MINSAL, 1997):
  - Recuento de Aerobios Mesófilos:  $< 10.000$  UFC/g.
  - Coliformes totales:  $< 100$  UFC/g.
  - Echerichia coli: Ausencia.
  - Mohos y levaduras:  $< 500$  UFC/g.
- Ingredientes:
  - Frutilla 100%. Sin aditivos ni conservantes.
- Empaque y almacenamiento:
  - Empaque primario: Bolsas de material de alta barrera a la humedad y al oxígeno, por ejemplo, trilaminado con capa de aluminio, selladas herméticamente.
  - Empaque secundario: Cajas de cartón corrugado.
  - Condiciones de almacenamiento: Almacenar en un lugar fresco y seco (temperatura inferior a  $25^{\circ}\text{C}$ , 60% Humedad Relativa), protegido de la luz solar directa. No requiere refrigeración.
- Vida útil (Ratti, 2001):
  - 18 a 24 meses desde la fecha de elaboración, con su envase original sellado y bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas. Puede ser mayor, depende de las características del empaque.

### 5.2.6 Impacto en la Calidad del Producto

Cada proceso tiene un impacto directo y profundo en las características finales del producto. Este apartado analiza comparativamente como la congelación IQF y la liofilización afectan los atributos sensoriales, las propiedades nutricionales y fisicoquímicas de la fruta.

#### 5.2.6.1 Análisis de Atributos Sensoriales

Los atributos sensoriales son determinantes en la aceptación del producto por parte del consumidor. Cada tecnología preserva estas características de manera muy diferente.

La congelación busca mantener los atributos de la fruta fresca lo más intacto posible. La congelación rápida minimiza la formación de grandes cristales de hielo, reduciendo el daño celular. Sin embargo, al descongelar, la textura se ve inevitablemente afectada.

En cambio, la liofilización transforma los atributos de la fruta. Al eliminar el agua, el sabor y el aroma se concentran, y la textura cambia de suave y jugosa a ligera y crujiente.

A continuación, en la Tabla 11, se presenta una matriz comparativa de los atributos sensoriales de cada uno de los productos.

*Tabla 11. Matriz comparativa de atributos sensoriales de cada producto.*

| Atributo       | Frutilla Congelada                                                                                                                  | Frutilla Liofilizada                                                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Color</b>   | Buen mantenimiento del color rojo brillante, similar al fresco. Con el tiempo, tiende a oscurecerse ligeramente.                    | Color rojo muy intenso y vivo. La ausencia de agua, sumado a que el proceso se desarrolla a baja temperatura, preserva excelentemente los pigmentos. |
| <b>Sabor</b>   | Sabor característico, pero puede percibirse ligeramente diluido tras la descongelación, debido principalmente a la pérdida de jugo. | Sabor a frutilla muy concentrado e intenso. La eliminación de agua potencia las notas dulces y ácidas naturales de la fruta.                         |
| <b>Aroma</b>   | Aroma agradable y similar al fresco, aunque menos intenso en comparación a la fruta recién cosechada                                | Aroma y fragancia potente. Los compuestos volátiles se conservan bien debido a que el proceso se realiza al vacío y a baja temperatura.              |
| <b>Textura</b> | Firme en estado congelado. Al descongelar, la textura es blanda y pierde firmeza debido al daño celular.                            | Textura única, ligera y muy crujiente. Estructura porosa que se disuelve en la boca.                                                                 |

### 5.2.6.2 Análisis de Propiedades Nutricionales y Fisicoquímicas

La principal diferencia nutricional entre los procesos radica en la conservación de compuestos termosensibles y en la estructura final del producto-

La congelación es un método de conservación robusto, sin embargo, el daño celular puede provocar la lixiviación de nutrientes solubles en agua durante la descongelación, como la Vitamina C.

En cambio, el proceso de liofilización es considerado el método superior para la preservación de nutrientes. Al realizarse a bajas temperaturas y en condiciones de vacío, se minimiza la degradación de vitaminas, antioxidantes y otros compuestos bioactivos (Ratti, 2001).

En la Tabla 12, se presenta una comparación del perfil nutricional y fisicoquímico de cada producto (Chevalier et al., 2000; Ratti, 2001).

*Tabla 12. Comparación del perfil nutricional y fisicoquímico de cada producto.*

| <b>Propiedad</b>                  | <b>Frutilla Congelada</b>                                                                                                             | <b>Frutilla Liofilizada</b>                                                                                                                                |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vitamina C</b>                 | Buena retención, pero puede haber pérdidas de hasta un 20% durante el almacenamiento y descongelación                                 | Excelente retención, superior al 90%. La ausencia de calor y oxígeno durante el proceso protege esta vitamina.                                             |
| <b>Antioxidante</b>               | Buena retención de compuestos como las antocianinas                                                                                   | Retención superior de antioxidantes. El color intenso es un indicador clave de la alta concentración de estos compuestos                                   |
| <b>Estructura</b>                 | La formación de cristales de hielo puede dañar las paredes celulares, resultando en una estructura más blanda luego de descongelarla. | Estructura porosa y rígida. El agua se sublima sin pasar por el estado líquido, preservando la forma original.                                             |
| <b>Capacidad de rehidratación</b> | No aplica. Libera jugo al descongelarse.                                                                                              | Excelente y rápida rehidratación. La estructura porosa permite que el agua penetre, recuperando su textura suave característica. (Mastrocola et al., 2005) |

### 5.2.6.3 Nivel de Inversión Relativo

La diferencia en la inversión inicial para adquirir estos equipamientos principales de cada tecnología es uno de los factores más determinantes en la viabilidad económica de cada escenario.

El costo de un liofilizador industrial es drásticamente superior al de un túnel IQF por varias razones, como, por ejemplo, la complejidad y materiales, la tecnología auxiliar, la

instrumentación y control del proceso, y finalmente, el factor de procesamiento por lotes o batch. En la Tabla 13 se presenta una comparativa de inversión conceptual.

*Tabla 13. Comparativa de inversión conceptual.*

| <b>Parámetro</b>                           | <b>Túnel de Congelación IQF</b> | <b>Liofilizador Industrial</b> |
|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <b>Complejidad Tecnológica</b>             | Media                           | Muy alta                       |
| <b>Naturaleza del Proceso</b>              | Continuo                        | Por Lotes                      |
| <b>Nivel de inversión</b>                  | Medio – Alto                    | Exponencialmente más alto      |
| <b>Orden de magnitud relativo estimado</b> | 1x                              | 5x a 10x                       |

Si bien ambos procesos requieren de una inversión importante, la barrera de entrada económica para la liofilización es considerablemente más alta, lo cual deberá ser justificado o compensado con mayores precios de venta y márgenes del producto final en la evaluación económica.

## **5.2.7 Estructura de Inversiones y Estimación del CAPEX**

Una vez establecido el volumen de fruta a procesar, se detalla la estructura de la inversión para cada uno de los proyectos, utilizando una base de 3.000 toneladas anuales, en un entorno agroindustrial, ubicado en un sector estratégicamente cercano a las zonas de cultivo para minimizar el deterioro postcosecha. El propósito es cuantificar la inversión inicial y definir la estructura de capital que sostiene cada modelo de negocio. La metodología de estimación de costos corresponde a una Estimación conceptual Clase V según los estándares de la AACE International, con una precisión esperada para el cribado de alternativas de diseño. Los factores de instalación se determinaron mediante heurísticas de diseño de plantas de proceso.

### **5.2.7.1 Planta de Frutillas Congeladas**

La planta de frutillas congeladas es una instalación de procesamiento continuo de alto volumen. Su función principal es la conservación de la frutilla mediante frío. El CAPEX de esta planta es significativamente menor y se enfoca en la eficiencia logística y la capacidad de almacenamiento masivo en frío. En la Tabla 14, se presenta la tabla consolidada del CAPEX para la planta de frutillas congeladas.

*Tabla 14. CAPEX planta de frutillas congeladas.*

| <b>Categoría</b>                       | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|----------------------------------------|---------------|---------------------------|
| <b>Maquinaria de proceso</b>           | USD           | \$3.200.000               |
| <b>Obras Civiles y Terreno</b>         | USD           | \$5.700.000               |
| <b>Equipamiento de Soporte</b>         | USD           | \$3.000.000               |
| <b>Costos Indirectos de Ingeniería</b> | USD           | \$1.335.000               |
| <b>Subtotal</b>                        | USD           | \$13.235.000              |
| <b>Contingencia</b>                    | USD           | \$1.323.500               |
| <b>Total, sin IVA</b>                  | <b>USD</b>    | <b>\$14.558.500</b>       |

De acuerdo con las estimaciones, la mayor parte del capital de inversión se destina a Obras Civiles y Terreno de la planta, un 37%, principalmente justificado por la construcción de las cámaras frigoríficas masivas provistas de poliuretano inyectado para asegurar la estricta cadena de frío. (Para el desglose detallado del CAPEX, véase el Anexo A)

#### **5.2.7.2 Planta de Frutillas Liofilizadas**

En contraste, la planta de frutillas liofilizadas es una instalación de alta tecnología diseñada para la máxima creación de valor. Su objetivo es proveer la entalpía de sublimación bajo condiciones de vacío profundo, transformando la materia prima al sublimar el agua presente en la frutilla, convirtiéndola en un producto ligero, de larga vida y alto margen económico. Este proceso es discontinuo, por lotes, y consume una alta cantidad de energía eléctrica para sus sistemas criogénicos. El CAPEX de esta planta se concentra en los sistemas de vacíos y cámaras de liofilización, lo que resulta en una inversión inicial sustancial, con respecto al proyecto de frutillas congeladas. En la Tabla 15, se presenta la tabla consolidada del CAPEX para la planta de frutillas liofilizadas.

*Tabla 15. CAPEX planta de frutillas liofilizadas.*

| <b>Categoría</b>                       | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> |
|----------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| <b>Maquinaria Principal</b>            | USD           | \$15.200.000                |
| <b>Equipamiento de soporte</b>         | USD           | \$6.500.000                 |
| <b>Obras Civiles y Terreno</b>         | USD           | \$8.400.000                 |
| <b>Costos Indirectos de Ingeniería</b> | USD           | \$4.515.000                 |
| <b>Subtotal</b>                        | USD           | \$34.615.000                |
| <b>Contingencia</b>                    | USD           | \$5.192.250                 |
| <b>Total, sin IVA</b>                  | <b>USD</b>    | <b>\$39.807.250</b>         |

La maquinaria de proceso, liofilizadores, bombas de vacío y trampas de frío, representa su punto más crítico, constituyendo un 37% del capital de inversión directo. Esta alta barrera de entrada convierte a este proyecto en una inversión de mayor riesgo tecnológico, lo que

justifica financieramente la exigencia de un mayor retorno proyectado. (Para el desglose detallado del CAPEX, véase el Anexo B)

## 5.2.8 Estructura de Costos de Operación (OPEX)

El análisis de los costos variables es crucial ya que revela la sensibilidad térmica y comercial de cada tecnología. La principal diferencia entre ambos proyectos es el peso relativo del costo de la materia prima versus el costo de transformación (energía eléctrica).

### 5.2.8.1 Costos Variables

#### 5.2.8.1.1 Planta de Frutilla Congeladas

Este modelo muestra una estructura tradicional para *commodities* agroindustriales, dominada por la materia prima, el costo de transformación energética es relativamente bajo. Esto genera que su margen sea extremadamente sensible a las fluctuaciones del precio de la fruta. A continuación, en la Tabla 16 se presentan los costos variables para la planta de frutillas congeladas.

*Tabla 16. Costos variables planta de frutillas congeladas.*

| Categoría                    | Unidad     | Costo              |
|------------------------------|------------|--------------------|
| <b>Materia Prima</b>         | USD        | \$3.000.000        |
| <b>Energía Eléctrica</b>     | USD        | \$155.610          |
| <b>Materiales de empaque</b> | USD        | \$427.500          |
| <b>Insumos y servicios</b>   | USD        | \$90.750           |
| <b>Costo Variable Total</b>  | <b>USD</b> | <b>\$3.673.860</b> |

La adquisición de la materia prima representa más del 80% del costo variable total, dejando en evidencia la vulnerabilidad del proyecto ante fluctuaciones de rendimiento agrícola y la volatilidad precio de la frutilla fresca, lo que impacta directamente su margen de contribución. El costo de la transformación térmica es comparativamente marginal (0,39 kWh/kg). Para más información respecto a los costos variables de la planta de frutillas congeladas, consulte el Anexo C.

#### 5.2.8.1.2 Planta de Frutillas Liofilizadas

La estructura de costos variables de la liofilización está dominada por los costos de transformación, reflejando el valor agregado del proceso fenomenológico. El peso relativo del costo de la materia prima en el OPEX variable total es significativamente menor, en comparación al caso congelado. En la Tabla 17, se presenta el OPEX variable para la planta de frutillas congeladas.

*Tabla 17. Costos variables planta de frutillas liofilizadas.*

| <b>Categoría</b>                 | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|----------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Materia Prima</b>             | USD           | \$3.000.000        |
| <b>Almacenamiento Industrial</b> | USD           | \$907              |
| <b>Empaque Retail</b>            | USD           | \$1.000.000        |
| <b>Energía Eléctrica</b>         | USD           | \$760.000          |
| <b>Vapor</b>                     | USD           | \$247.995          |
| <b>Costo Variable Total</b>      | <b>USD</b>    | <b>\$5.008.902</b> |

La materia prima del proceso representa aproximadamente 60% de sus costos variables. Esto se traduce en una rentabilidad más estable, debido a que este costo de materia prima se compensa con los altos costos de transformación: la energía eléctrica y el empaque representan un 35% de los costos variables. Esta diversificación del costo otorga una mayor resiliencia del producto frente a crisis en los precios agrícolas. Para más información respecto a los costos variables de la planta de frutillas liofilizadas, consulte Anexo D.

### **5.2.8.2 Costos Fijos**

Los costos fijos definen la carga financiera mínima que el proyecto debe soportar anualmente. Estos costos reflejan la inversión en personal, infraestructura y seguros. Mientras la liofilización tiene costos fijos más altos, producto de la necesidad de pagar por personal especializado y el mantenimiento costoso de la infraestructura. En cambio, la frutilla IQF, al tratarse de un proceso de menor complejidad técnica disminuye la necesidad de personal especializado 24/7 en comparación con la liofilización. Estos factores definen el punto de equilibrio operativo de cada planta. El mantenimiento asociado se calculó como porcentaje fijo sobre la inversión en maquinaria.

#### **5.2.8.2.1 Planta de Frutillas congeladas**

Los costos fijos en esta planta se caracterizan principalmente por la mano de obra y la logística. Respecto al último, se modeló en condición FOB (*Free on Board*), es decir, precio puesto a bordo del barco de exportación, limitando el riesgo de flete marítimo para el productor. En la Tabla 18, se presenta los costos fijos anuales de la planta de frutillas congeladas.

*Tabla 18. Costos fijos planta de frutillas congeladas.*

| <b>Categoría</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Mano de Obra</b>               | USD           | \$726.960          |
| <b>Técnicos y Administrativos</b> | USD           | \$363.480          |
| <b>Mantenimiento</b>              | USD           | \$96.000           |
| <b>Logística y Fletes</b>         | USD           | \$290.010          |
| <b>Servicios y Generales</b>      | USD           | \$175.000          |
| <b>Costo Fijo Total</b>           | <b>USD</b>    | <b>\$1.651.450</b> |

La mano de obra y el staff del proyecto congelado representan un 67% del costo fijo. El mantenimiento, dado que los túneles IQF son una tecnología estandarizada, es menos intensivo, reduciendo el costo de los servicios técnicos. El precio de logística se establece, como base, para el producto FOB, es decir, que el productor deja de asumir responsabilidades una vez el producto se embarque en el buque que lo transportará a destino. Se define un costo unitario de almacenamiento y se estiman los costos de transporte. Para más información respecto a los costos fijos de la planta de frutillas congeladas, consulte el Anexo C.

#### **5.2.8.2.2 Planta de Frutillas Liofilizadas**

En contraste con la planta de congelado, la planta de liofilizado tiene un costo fijo superior en cuanto a mano de obra. La complejidad del proceso requiere personal más especializado, lo que se refleja en el aumento del costo. En la Tabla 19, se presentan los costos fijos anuales de la planta de frutillas liofilizadas.

*Tabla 19. Costos fijos planta de frutillas liofilizadas.*

| <b>Categoría</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Mano de Obra</b>               | USD           | \$1.327.560        |
| <b>Técnicos y Administrativos</b> | USD           | \$796.536          |
| <b>Mantenimiento</b>              | USD           | \$456.000          |
| <b>Logística y Fletes</b>         | USD           | \$130.500          |
| <b>Servicios y Generales</b>      | USD           | \$650.000          |
| <b>Costo Fijo Total</b>           | <b>USD</b>    | <b>\$3.360.596</b> |

Dada la complejidad del proceso de liofilización, se requiere de mano de obra calificada para operar y proteger el sistema criogénico. Más de la mitad (52%) de los costos fijos se destinan al personal de la planta. El mantenimiento especializado de las bombas de vacío y

compresores exige un presupuesto anual alto. Los servicios y generales, como los seguros de inventario, son más costosos debido al valor del producto. Para más información respecto a los costos fijos de la planta de frutillas liofilizadas, consulte el Anexo D.

### 5.2.8.3 Estimación del OPEX consolidado

El proyecto liofilizado tiene un costo de operación 57% superior al proyecto congelado. Esta diferencia es la prima que se paga por la tecnología de valor agregado, es decir, mayor consumo energético, mayor costo de empaque y mayor base de costos fijos por la necesidad de especialistas. En la Tabla 20 se consolidan los costos de operación anuales para cada una de las plantas en estudio.

*Tabla 20. OPEX de ambos proyectos.*

| <b>Parámetro/Proyecto</b> | <b>Unidad</b> | <b>Congelado</b> | <b>Liofilizado</b> |
|---------------------------|---------------|------------------|--------------------|
| <b>OPEX</b>               | USD/año       | \$5.325.310      | \$8.369.498        |

Con casi la mitad de su OPEX como costo fijo, el proyecto liofilizado es menos sensible a los cambios en el volumen de producción. En cambio, el proyecto congelado es extremadamente sensible a los cambios de volumen de ventas y el precio de la materia prima, ya que esta última domina su costo variable.

Se puede observar el modelo de negocio de cada uno de los proyectos, el IQF es un negocio de materia prima y volumen, en cambio, el modelo de liofilización es un negocio de transformación y valor agregado, con costos variables mejor balanceados y mayor capacidad para absorber el riesgo de precios agrícolas.

## 5.3 Evaluación Económica Comparativa

### 5.3.1 Premisas de evaluación

La evaluación económica comparativa se realiza utilizando las siguientes premisas de inversión y capital: Plazo de evaluación de 20 años, dada la larga vida útil de la infraestructura principal (+20 años), se captura el valor residual completo de la inversión inicial; Depreciación anual se calcula de forma lineal, permitiendo diluir el CAPEX en el tiempo; Tasa de descuento de 12%, que se justifica dada las características de estos proyectos agroindustriales en un mercado emergente, como el chileno, lo que a su vez refleja el costo de oportunidad de capital. En la Tabla 21, se presentan las premisas mencionadas.

*Tabla 21. Premisas de inversión y capital.*

| <b>Parámetro/ Proyecto</b> | <b>Liofilizado</b> | <b>Congelado</b> |
|----------------------------|--------------------|------------------|
| <b>Horizonte, años</b>     | 20                 | 20               |
| <b>Tasa de descuento</b>   | 12%                | 12%              |

Por otra parte, las premisas de OPEX son las siguientes: Tasa impositiva de 27%, correspondiente a la tasa del impuesto de primera categoría vigente en Chile; Costo de Materia Prima por kilogramo de 1.00 USD, justificado como el precio promedio anual de compra de frutilla fresca en zona rural, bajo la modalidad de contrato con agricultores, quienes ofrecen descuento sobre el precio de mercado para asegurar un volumen de venta, mitigando el riesgo de abastecimiento; Tarifa Eléctrica Industrial como cliente libre de alta tensión, ya que la alta demanda de potencia de la planta permite optar por dicho régimen, teniendo la posibilidad de negociar tarifas más bajas que las reguladas. A continuación, en la Tabla 22, se resumen las premisas de operación.

*Tabla 22. Premisas de operación.*

| <b>Parámetro</b> | <b>Tasa impositiva</b> | <b>Costo MMPP</b> | <b>Costo Eléctrico</b> |
|------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Unidad</b>    | %                      | USD/kg            | USD/kWh                |
| <b>Valor</b>     | 27%                    | 1,0               | \$0,14                 |

Finalmente, respecto a las premisas de ingresos por venta, se tiene que: El precio del producto liofilizado es de 100 USD/kg, justificado por la exclusividad del canal retail premium, donde la alta pureza y la vida útil prolongada permiten un sobreprecio masivo, además de la sustentación técnica que implica la retención superior de vitaminas y factores organolépticos, en comparación a la frutilla congelada; El precio de venta del producto congelado es de 3,5 USD/kg, justificado por su competitividad, pero optimizado para la exportación de frutilla congelada, manteniendo un margen sano ante los costos de la cadena de frío ; El rendimiento de ambos procesos se respalda desde artículos científicos, 10,5 y 1,05 kg producto/kg fruta fresca para la liofilización y para la congelación, respectivamente. En la Tabla 23, se resumen las premisas de ingresos por venta para ambos proyectos.

*Tabla 23. Premisas de ingresos por venta.*

| <b>Parámetro</b>   | <b>Producción</b> | <b>Rendimiento</b>         | <b>Precio de venta</b> |
|--------------------|-------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Unidad</b>      | <b>kg</b>         | <b>kg fruta fresca /kg</b> | <b>USD/kg</b>          |
| <b>Liofilizado</b> | 285.714           | 10,5                       | 100                    |
| <b>Congelado</b>   | 2.850.000         | 1,05                       | 3,5                    |

Si bien el promedio histórico de la frutilla congelada ronda los 2,8 USD/kg, este proyecto asume una estrategia de diferenciación por calidad, es decir, calibre y grados Brix controlados, y venta directa a retail, capturando un margen superior al *commodity* tradicional, lo que permite evaluar el potencial máximo de la tecnología IQF frente a la liofilización

### 5.3.2 Proyección de ingresos y estrategia.

#### 5.3.2.1 Frutilla Congelada

La estrategia del proyecto IQF se basa en la necesidad de mover un alto volumen con una estructura de costo altamente optimizada para competir en el mercado. El precio no se justifica por la rentabilidad unitaria, sino por la demanda del mercado global y la necesidad de mover la masa de producto, en la Tabla 24 se presenta el costo económico unitario y el margen bruto unitario para la frutilla congelada

*Tabla 24. Costo económico unitario y margen bruto unitario frutilla congelada.*

| Proyecto/ Parámetro | Costo Económico Unitario | Margen Bruto Unitario |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| Unidad              | USD/kg                   | USD/kg                |
| <b>Congelado</b>    | \$2,18                   | \$1,32                |

Dado el Costo Económico Unitario, el precio de venta debe ser significativamente mayor para superar el costo, con el objetivo de recuperar el CAPEX e intereses. El margen bruto unitario es suficiente para lograr la viabilidad del proyecto. El precio de venta se justifica por la alta calidad de la frutilla chilena. Este hecho deja en evidencia la extremada sensibilidad al costo de la materia prima para la frutilla congelada. La estrategia de compra directa a agricultores permite que el precio asegure márgenes positivos.

El proceso continuo y la alta producción anual (2850 toneladas por año) aseguran un flujo de caja constante. Esto es crucial porque el margen unitario es bajo, por lo que la empresa debe compensar con volumen. En la tabla 25 se presenta la proyección de ingresos para la planta de frutilla congelada

*Tabla 25. Proyección de ingresos frutilla congelada.*

| Proyecto/ Parámetro | Ingreso por ventas |
|---------------------|--------------------|
| Unidad              | USD                |
| <b>Congelado</b>    | \$9.975.000        |

El proyecto IQF depende directamente del control de costos y la eficiencia operativa para asegurar que el margen bruto unitario no sea consumido por la cadena de frío. Es un proyecto sólido y seguro en términos de inversión y su éxito se basa en volumen producido.

### 5.3.2.2 Frutilla Liofilizada

La estrategia del liofilizado se basa en un modelo de alto margen/valor agregado versus un modelo de bajo margen/alto volumen, como en el caso de las congeladas. En la Tabla 26, se presenta el costo económico unitario y el Margen bruto unitario para el caso liofilizado.

*Tabla 26. Costo económico unitario y margen bruto unitario Frutilla Liofilizada.*

| <b>Proyecto/ Parámetro</b> | <b>Costo Económico Unitario</b> | <b>Margen Bruto Unitario</b> |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| <b>Unidad</b>              | <b>USD/kg</b>                   | <b>USD/kg</b>                |
| <b>Liofilizado</b>         | \$34,56                         | \$65,34                      |

En este caso, el precio es indispensable para cubrir los altos costos de inversión y operación. Este precio se sustenta en la creación de un producto funcional o snack premium. La liofilización, al ser una tecnología más cara, se traduce en un valor percibido superior para el consumidor final. El precio justifica la elección de venta retail, dado que el costo commodity ronda los 60 USD/kg. Además, este precio de venta retail de 100 USD/kg deja un margen saludable para los distribuidores y vendedores minoristas del producto, donde el precio final al consumidor puede oscilar entre los 130 y 210 USD/kg.

La inversión en tecnología y criogenia se justifica por el objetivo en sí de este proyecto, ser eficiente en generación de margen unitario. La eliminación de la cadena de frío, aísla al proyecto de la volatilidad del costo energético de fletes refrigerados y de almacenamiento externo. En la Tabla 27 se presenta la proyección de ingresos por venta para la frutilla liofilizada.

*Tabla 27. Proyección de ingresos Frutilla Liofilizada.*

| <b>Proyecto/ Parámetro</b> | <b>Ingreso por ventas</b> |
|----------------------------|---------------------------|
| <b>Unidad</b>              | <b>USD</b>                |
| <b>Liofilizado</b>         | \$28.571.429              |

La estrategia del producto liofilizado es un mandato de creación de valor, donde el alto precio es reflejo directo de la inversión y de la mitigación de riesgos logísticos y de mercado. El precio actúa como el impulso que convierte la inversión en un negocio robusto, sólido y rentable.

### 5.3.3 Flujos de Caja (FCF) y Métricas de Inversión

El flujo de caja de cada proyecto refleja los beneficios anuales del proceso productivo. En la Tabla 28 se presentan los flujos de caja apalancados para cada proyecto.

*Tabla 28. Flujo de caja libre apalancado anual de cada proyecto.*

|                      | <b>Liofilizado</b> | <b>Congelado</b> |
|----------------------|--------------------|------------------|
| <b>EBIT</b>          | USD 20.201.930     | USD 4.649.690    |
| <b>Depreciación</b>  | USD 1.505.000      | USD 595.000      |
| <b>EBITDA</b>        | USD 18.696.930     | USD 4.054.690    |
| <b>Utilidad Neta</b> | USD 13.648.759     | USD 2.959.924    |
| <b>Flujo de Caja</b> | USD 15.153.759     | USD 3.554.924    |

El EBIT corresponde al margen operacional, ingresos por venta menos costo operativo. La depreciación de los equipos se utiliza contablemente para rebajar la base imponible para el impuesto a la renta. La utilidad neta refleja la generación anual de dinero. La diferencia de magnitud de los flujos de caja deja en evidencia el modelo de negocio de cada proyecto.

En la Tabla 31 se presentan los principales indicadores financieros de la evaluación económica de ambos proyectos. La creación de valor agregado de la liofilización se manifiesta en un Valor Actual Neto (VAN) de 73.382.989 USD, con una tasa interna de retorno de 38% y un tiempo para el retorno de inversión de 3 años.

*Tabla 29. Indicadores financieros evaluación económica.*

| <b>Indicador</b>               | <b>Liofilizado</b> | <b>Congelado</b> |
|--------------------------------|--------------------|------------------|
| <b>Van USD</b>                 | USD 73.382.898     | USD 11.994.802   |
| <b>Tasa Interna de Retorno</b> | 38%                | 24%              |
| <b>Payback años</b>            | 3                  | 5                |

En cambio, el proyecto congelado, al ser un proyecto de bajo margen bruto y alto volumen, su Valor Actual Neto a 20 años es 11.994.802 USD, una tasa interna de retorno de 24% y un *payback* de 5 años.

El valor presente de los flujos de caja futuros supera la inversión en ambos casos. Sin embargo, si observamos la tasa interna de retorno es 14% superior respecto a la congelada, lo que refleja su margen de seguridad superior frente a los riesgos operativos. Esta diferencia, además de la diferencia de VAN, justifica financieramente el alto CAPEX de la opción liofilizada. El mercado paga una prima por el valor agregado, generando un margen que es más que suficiente para compensar la alta inversión y generar un excedente de riqueza.

### **5.3.4 Análisis de riesgo y sensibilidad**

#### **5.3.4.1 Sensibilidad a variables críticas**

Se selecciona como destino de exportación Estados Unidos, dada su representabilidad como escenario típico de exportación de productos agroindustriales chilenos. Para efectos del

cálculo, se considera que la totalidad de la producción anual se comercializaría en terreno estadounidense.

Para los costos logísticos de transporte local y almacenamiento en planta se mantienen los utilizados para la evaluación económica. Para el transporte marítimo a E.E.U.U. se toma como referencia 6.000 USD y 3.000 USD por contenedor para la frutilla congelada y la frutilla liofilizada, respectivamente. El costo del transporte congelado se ve influenciado por la necesidad de refrigeración. En cuanto al transporte en destino, se consideran los mismos costos locales utilizados para la estimación realizada previamente. Finalmente, se estima un costo unitario de almacenamiento en el centro de distribución, asociado al almacenaje congelado y seco para la frutilla congelada y liofilizada, respectivamente. Estos costos se evaluaron bajo la premisa temporal sustentándose en que cada kilogramo de producto liofilizado/congelado se almacena 30 días en la planta productiva, 30 días en el flete marítimo hacia destino de exportación y 30 días en el centro de distribución para la venta del producto (UNCTAD, 2023).

#### 5.3.4.2 Evaluación de escenario comercial y logístico

Para realizar el análisis de sensibilidad de la logística detrás de los proyectos de liofilización y congelación, es necesario definir, primeramente, los costos unitarios asociado a cada etapa de la cadena de suministro. En la Tabla 30, se presentan estimaciones de los costos del almacenamiento en planta, transporte local hacia puerto, flete marítimo hacia destino de exportación, transporte en destino y almacenamiento en centro de distribución.

*Tabla 30. Tabla consolidada de costos unitarios por kilogramo de la cadena de suministro.*

| <b>Costo/Proyecto</b>         | <b>Frutilla Liofilizada</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                               | <b>USD/kg</b>               | <b>USD/kg</b>             |
| <b>Económico Unitario</b>     | \$34,56                     | \$2,18                    |
| <b>Almacenamiento Interno</b> | \$0,003                     | \$0,03                    |
| <b>Transporte local</b>       | \$0,100                     | \$0,075                   |
| <b>Flete Marítimo</b>         | \$0,249                     | \$0,208                   |
| <b>Transporte Destino</b>     | \$0,100                     | \$0,075                   |
| <b>Almacén externo</b>        | \$0,080                     | \$0,055                   |
| <b>Costo Logístico Total</b>  | \$35,09                     | \$2,52                    |
| <b>% Costo Logístico</b>      | 1,54%                       | 21,17%                    |

Los resultados presentados en esta tabla dejan en evidencia la fragilidad sistémica del modelo IQF, que, en el caso que la empresa determinase asumir el costo de toda la cadena logística hasta el destino comercial de los productos, aumentaría 21% los costos, haciendo que el

precio de venta que se establezca o se negocie, determine la rentabilidad del proyecto. En cambio, para el liofilizado, se aprecia que el costo económico unitario prácticamente no varía, haciendo que este costo logístico en general se vuelva prácticamente despreciable.

Por tanto, se realiza la sensibilización, comparando los siguientes escenarios: FOB Origen, que representa el precio de venta que tendría el producto en caso de venderse ‘libre a bordo’, es decir, que el productor solo se haga responsable del producto hasta que esté a bordo del buque exportador; FOB destino, que es el precio que tendría el producto en el contexto donde el productor financia el transporte marítimo; y finalmente, escenario completo que corresponde a el caso en el que el productor se hace cargo de la cadena logística completa, hasta el centro de distribución minorista. En la Tabla 31, se presentan los distintos costos económicos unitarios asociado a cada uno de los escenarios descritos, para ambos proyectos.

*Tabla 31. Costos económicos unitarios según escenario de comparación para frutillas congeladas y frutillas liofilizadas.*

| <b>Costo/Proyecto</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                       | <b>USD/kg</b>               | <b>USD/kg</b>             |
| <b>COGS origen</b>    | \$34,66                     | \$2,18                    |
| <b>COGS Destino</b>   | \$34,91                     | \$2,39                    |
| <b>COGS Completo</b>  | \$35,09                     | \$2,52                    |

En esta tabla se puede evidenciar que el costo logístico en el caso liofilizado es prácticamente despreciable, representando un 1% del costo económico unitario. En cambio, el costo que induce la responsabilidad de la cadena logística helada afecta directamente la rentabilidad de la frutilla congelada. Con estos antecedentes, se realiza la evaluación económica para los escenarios mencionados. El precio de venta de cada uno de los escenarios, el flujo de caja apalancado (FCF), el valor actual neto y la tasa interna de retorno, se presentan a continuación, en la Tabla 32.

*Tabla 32. Tabla de resultados económicos de la sensibilización logística.*

| <b>Proyecto</b>               | <b>Frutilla Liofilizada</b> |                    |                 | <b>Frutilla Congelada</b> |                    |                 |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|-----------------|
| <b>Escenario</b>              | <b>FOB Origen</b>           | <b>FOB Destino</b> | <b>Completo</b> | <b>FOB Origen</b>         | <b>FOB Destino</b> | <b>Completo</b> |
| <b>Precio de Venta USD/kg</b> | \$100                       | \$105              | \$110           | \$3,0                     | \$3,5              | \$4,0           |
| <b>FCF USD/año</b>            | \$15.132.342                | \$16.123.316       | \$17.128.713    | \$2.303.295               | \$2.910.107        | \$3.680.100     |
| <b>VAN USD</b>                | \$73.222.928                | \$80.624.950       | \$88.134.708    | \$2.645.831               | \$7.178.383        | \$12.929.803    |
| <b>TIR</b>                    | 38%                         | 40%                | 43%             | 15%                       | 19,4%              | 25%             |

Los resultados expuestos en esta tabla permiten al inversor determinar la estrategia de ventas del producto congelado. Si asume el costo logístico, debe compensar con negociar contratos de venta que aseguren que el precio sea lo suficientemente superior para absorber el costo total de exportarlo, que se eleva a 2,52 USD/kg. Es relevante destacar que el caso base de la evaluación económica presenta un VAN de 11,9 MMUSD utilizando un precio de 3,5 USD/kg bajo condiciones de FOB Origen. Este escenario asume una gestión comercial exitosa donde la calidad del producto permite traspasar los costos de flete internacional al comprador. Por el contrario, en el análisis de sensibilidad, el escenario FOB destino, que utiliza el mismo precio de venta, incorpora explícitamente los costos de transporte marítimo en la estructura de costos. La disminución del VAN a 7,18 MMUSD aproximados en este escenario cuantifica el impacto de asumir la logística internacional, confirmando la alta sensibilidad del margen del producto congelado ante los costos de la cadena de suministro, a diferencia del producto liofilizado que mantiene su rentabilidad prácticamente intacta.

Por otra parte, para el caso liofilizado, se puede observar que asumir los costos logísticos permite aumentar el precio de venta, aumentando el beneficio, maximizando el valor actual neto. Además, considerando que los precios de venta minoristas se encuentran entre el rango de 130-180 USD/kg, permitiría generar un margen sano para los distribuidores y para quienes comercializarán el producto de forma minorista.

La liofilización, aunque es una tecnología con un OPEX más elevado por su intensidad energética, genera una eficiencia radical en la cadena de suministro que resulta en un costo total significativamente menor debido a la escala industrial. La alta inversión y el mayor costo de transformación se justifican plenamente, no solo por el mayor precio de venta del producto final, sino también por los ahorros masivos y la simplificación de la logística que requiere. Los ahorros en flete internacional, transporte en destino y almacenamiento demuestran que la principal ventaja competitiva de la liofilización reside en su capacidad de eliminar la cadena de frío requerida por la congelación.

#### **5.3.4.3 Análisis de sensibilidad: Almacenamiento doméstico, ciclo de vida energético**

Si bien el costo eléctrico por kilogramo no es parte de la responsabilidad del productor, se realiza el cálculo para estimar el consumo eléctrico del almacenamiento doméstico para analizar la totalidad del consumo de electricidad y así, compararlo con el consumo de producir liofilizado. De esta manera, se puede cuantificar la cantidad de energía real que se destina para conservar la frutilla congelada desde que se produce hasta que se consume. En este contexto, la diferencia de consumo eléctrico total de producción y logística de cada producto determinará la cantidad de días en el que el producto congelado almacenado en los hogares iguala el consumo eléctrico del producto liofilizado. La eficiencia energética de cada producto es crucial para reducir su impacto ambiental y contribuir a la sostenibilidad. En la

Tabla 33 se presentan los consumos eléctricos del procesamiento y la logística completa del producto congelado.

*Tabla 33. Consumo energético proceso y cadena logística del producto congelado.*

| <b>Parámetro</b>                  | <b>Valor</b>     | <b>Unidad</b>  |
|-----------------------------------|------------------|----------------|
| <b>Producción total congelado</b> | 2.850.000        | kg             |
| <b>Energía de Proceso</b>         | 570.000          | kWh/año        |
| <b>Almacenamiento Industrial</b>  | 541.500          | kWh/año        |
| <b>Reefer Marítimo</b>            | 428.400          | kWh/año        |
| <b>Almacenamiento Externo</b>     | 427.500          | kWh/año        |
| <b>Total</b>                      | <b>1.967.400</b> | <b>kWh/año</b> |

Se analizan estos valores comparándolos con el consumo energético total del producto liofilizado, en la Tabla 34 se muestra su consumo y la diferencia.

*Tabla 34. Consumo energético total del producto liofilizado y su diferencia respecto al producto congelado.*

| <b>Parámetro</b>                    | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>  |
|-------------------------------------|--------------|----------------|
| <b>Consumo eléctrico Producción</b> | 5.428.571    | <b>kWh</b>     |
| <b>Almacenamiento Industrial</b>    | 6.482        | <b>kWh</b>     |
| <b>Consumo eléctrico total</b>      | 5.435.053    | <b>kWh/año</b> |
| <b>Diferencia</b>                   | -3.467.653   | <b>kWh/año</b> |

Sustentándose de los antecedentes planteados, se procede a estimar el consumo energético del almacenamiento doméstico. Para esto, se considera que el consumo eléctrico típico de la parte congeladora de un refrigerador, con 150 L útiles, es de aproximadamente 50 kWh al mes. En base a este número, utilizando una densidad de 3,5 litros por kilogramo, 1 kg de frutilla congelada consumiría 0,039 kWh/día, considerando 30 días al mes. En la Tabla 35 se consolida dicha estimación, donde además se presenta el consumo total de la producción completa de la planta de frutilla congelada. Este valor unitario por kilogramo permite estimar el consumo total de electricidad que significaría almacenar cada kilogramo de frutilla durante una determinada cantidad de tiempo en 2.850.000 refrigeradores distintos, es decir, que, para efectos del cálculo, se asume que toda la producción anual de la planta de frutilla congelada se comercializa y almacena domésticamente de manera simultánea.

*Tabla 35. Consumo energético diario almacenamiento doméstico.*

| Parámetro               | Valor   | Unidad            |
|-------------------------|---------|-------------------|
| <b>Consumo Unitario</b> | 0,039   | <b>kWh/kg/día</b> |
| <b>Consumo Total</b>    | 110.833 | <b>kWh/día</b>    |

Por otra parte, se estima, a partir de la diferencia de consumo eléctrico entre ambos procesos, el tiempo de almacenamiento doméstico necesario para igualar el consumo eléctrico total, considerando la cadena logística del producto congelado. En la Figura 11, a partir de los datos presentados en la Tabla 34, se genera un gráfico de la diferencia de consumo eléctrico en GWh entre ambos procesos en función del tiempo, en días.

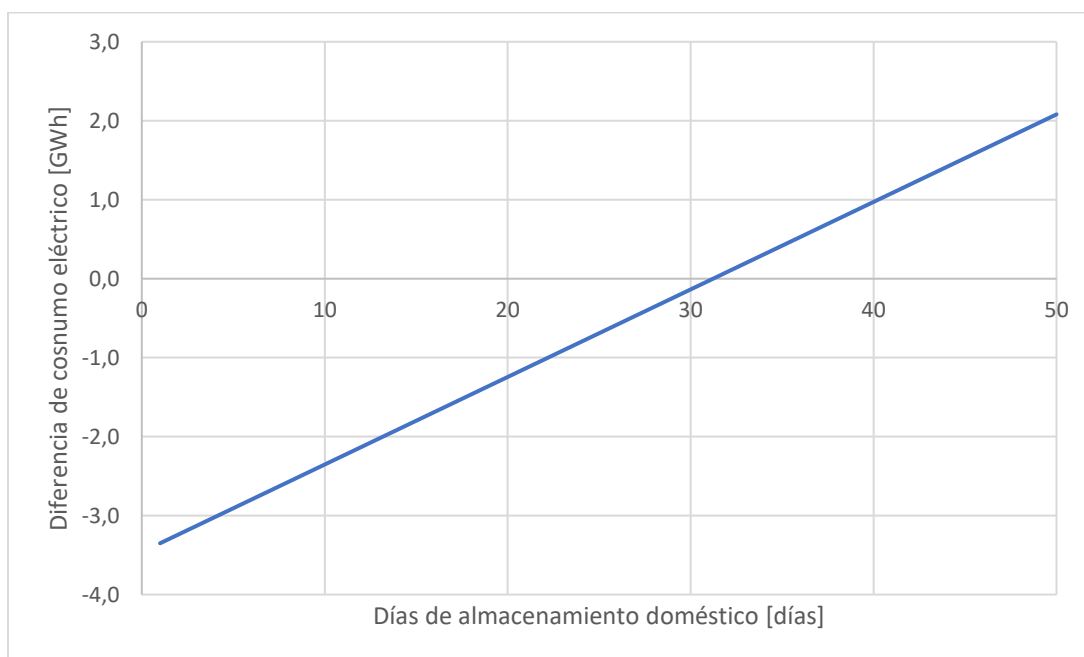


*Figura 11. Análisis de la diferencia de consumo energético del producto congelado en función de la cantidad de días almacenado en refrigeradores del consumidor.*

A partir de la Figura 11, se puede apreciar que aproximadamente al día 31, el consumo eléctrico de la producción total de frutilla congelada, considerando que se almacena simultáneamente 1 kilogramo en cada refrigerador de un consumidor, iguala al consumo eléctrico de la producción de liofilizado. Este número deja en evidencia que, a pesar de que la intensidad energética del liofilizado, bajo las consideraciones antes planteadas, se compensa su Huella de Carbono debido al consumo eléctrico que implica el almacenamiento doméstico de la frutilla congelada.

Por otra parte, el análisis planteado abre paso a otra evaluación, cómo influye el gasto energético del almacenamiento doméstico de la frutilla congelada respecto al requerimiento energético de producir frutillas liofilizadas. Para esto, el consumo eléctrico de la producción total anual de frutilla liofilizada se establece constante durante el período de estudio, correspondiente a 5.4 GWh, representada como la línea naranja de la Figura 12. Luego, se considera el consumo eléctrico de almacenamiento doméstico de la producción total anual de frutilla congelada en función del tiempo. Bajo la premisa de considerar que cada kilogramo de producto se almacena en un refrigerador de un consumidor distinto, de manera simultánea, se desarrolla el gráfico que se presenta a continuación, en la Figura 12.

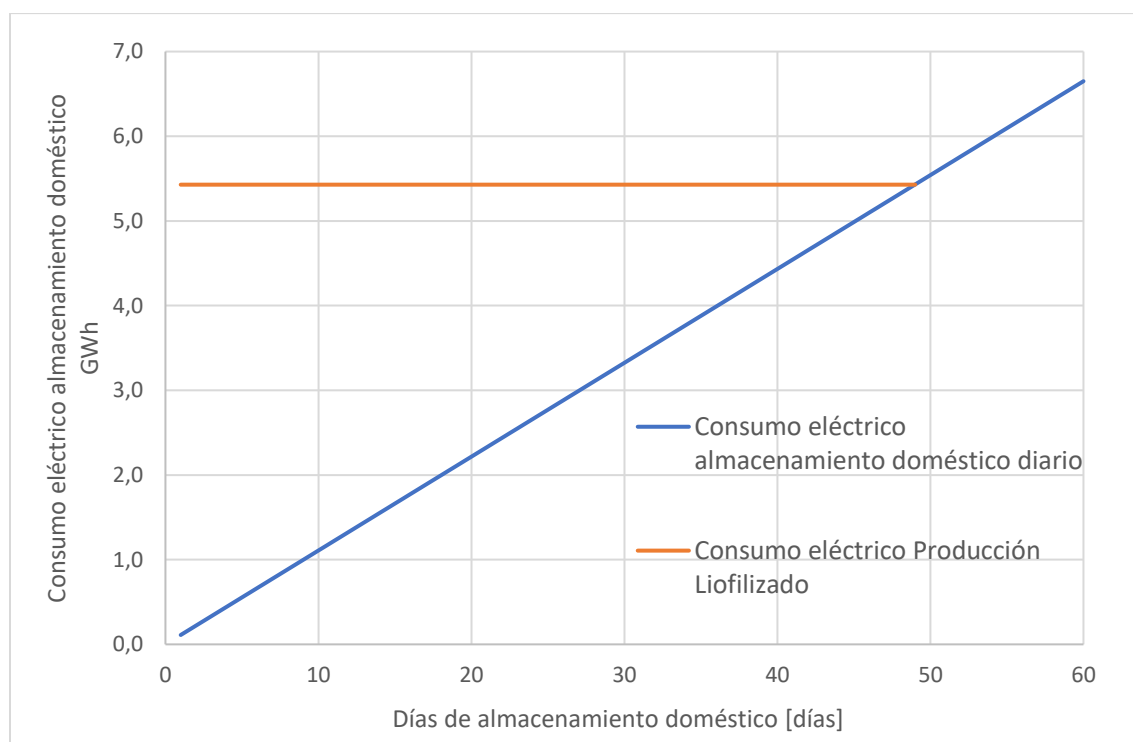


*Figura 12. Análisis del consumo energético del producto congelado en función de la cantidad de días almacenado en refrigeradores del consumidor.*

Los resultados son determinantes, si el producto congelado estuviera almacenado domésticamente en 2,85 millones de congeladores distintos durante 49 días, la cantidad total de electricidad consumida, sin considerar el procesamiento ni la logística asociada a la frutilla congelada, igualaría el consumo eléctrico del proceso de liofilización. Esclareciendo aún más, en términos de eficiencia energética, la ventaja de la liofilización, que, a pesar de ser un proceso intensivo, es eficaz en términos energéticos.

Al reducir el agua presente en las frutillas y eliminar la cadena logística congelada, la costosa Huella de Carbono de producción del liofilizado, considerando que la producción total anual de frutilla congelada se comercializa y almacena domésticamente de forma simultánea en

2.850.000 de refrigeradores distintos, se compensa en un plazo operativo muy corto, de aproximadamente un mes.

#### 5.3.4.4 Análisis de sensibilidad: Huella energética general durante la exportación.

El consumo energético total del transporte marítimo se define como la suma del trabajo eléctrico para mantener la cadena de frío y el trabajo mecánico para desplazar la masa del producto (propulsión del barco):

$$E_{\text{marítimo}} = E_{\text{refrigeración}} + E_{\text{propulsión}}$$

El trabajo eléctrico requerido por los contenedores refrigerados de la frutilla congelada depende del número de contenedores,  $N$ . La potencia eléctrica promedio  $P_{\text{eléctrica}}$  del equipo de refrigeración para mantener  $-18^{\circ}\text{C}$  es de típicamente 5 kW, para un contenedor de 40 pies. El tiempo de tránsito  $t$ , asumido para fines del cálculo, son 30 días, o 720 horas (Fitzgerald et al., 2011).

$$E_{\text{refrigeración}} = N \cdot P_{\text{eléctrica}} \cdot t$$

$$E_{\text{refrigeración proyecto congelado}} = 119 \cdot 5 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h} = 428.400 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

En cambio, dado que el proyecto liofilizado no requiere transporte refrigerado:

$$E_{\text{refrigeración proyecto liofilizado}} = 29 \cdot 0 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h} = 0 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

El trabajo mecánico del buque es proporcional a la masa transportada  $M$ , la distancia al puerto de destino  $D$ , es de 9.000 aproximadamente hasta la costa oeste de Estados Unidos y el consumo específico de energía del buque portacontenedores,  $CE_{\text{propulsión}}$ , es de 0,015 kWh/ton · km, valor estándar para la industria. Por tanto, se establece (Organización Marítima Internacional, 2020):

$$E_{\text{propulsión}} = M \cdot D \cdot CE_{\text{propulsión}}$$

$$E_{\text{propulsión congelado}} = 2850 \text{ ton} \cdot 9.000 \text{ km} \cdot 0,015 \frac{\text{kWh}}{\text{ton} \cdot \text{km}} = 384.750 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$E_{\text{propulsión liofilizado}} = 286 \text{ ton} \cdot 9.000 \text{ km} \cdot 0,015 \frac{\text{kWh}}{\text{ton} \cdot \text{km}} = 38.610 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Entonces, en la Tabla 36 se presenta la energía del transporte marítimo asociada a cada uno de los proyectos en estudio.

*Tabla 36. Consumo energético durante el transporte marítimo.*

| <b>Proyecto/ Parámetro</b>                       | <b>Unidad</b> | <b>Congelado</b> | <b>Liofilizado</b> |
|--------------------------------------------------|---------------|------------------|--------------------|
| <b>Consumo eléctrico<br/>Transporte marítimo</b> | kWh/año       | 813.150          | 36.810             |

A partir de los resultados expuestos en esta tabla, se puede estimar que la exportación del producto congelado consume 21 veces más energía en altamar durante el transporte hacia el puerto de destino en comparación al producto liofilizado. El proyecto IQF gasta una gran cantidad de energía fósil para transportar aproximadamente 2.564 toneladas de agua congelada, evitando que esta se derrita durante el mes de tránsito oceánico.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

En el presente estudio comparativo se demuestra técnica, termodinámica y económicamente que, si bien ambos métodos de conservación son viables para la exportación de frutilla chilena, sus modelos de negocios y perfiles de riesgo son diametralmente opuestos. La evaluación económica, realizada a un horizonte de 20 años bajo un escenario de precios de venta de 100 USD/kg y 3,5 USD/kg, para el liofilizado y el congelado, respectivamente, demuestra que, si bien ambos procesos resultan económicamente viables bajo estos precios, el proyecto de liofilización es el óptimo económico absoluto. Dicho proyecto genera un VAN de aproximadamente 73,4 MMUSD, con una tasa interna de retorno de 38%, superando ampliamente al proyecto de congelación IQF (VAN de 11,9 MMUSD y TIR del 24%), lo que la posiciona como la alternativa de mayor creación de valor. La inversión se justifica por su capacidad de aislar el proyecto del riesgo logístico, al eliminar 2.564 toneladas de agua, a la vez que genera un margen bruto económico inalcanzable para modelos de volumen, como la frutilla congelada. Lo que demuestra que el mercado internacional paga una prima significativa por el valor agregado y la exclusividad del producto liofilizado.

La liofilización se basa en la sublimación del agua presente en las frutillas. Su logística se caracteriza por la cadena seca, alta densidad de valor y almacenamiento a temperatura ambiente. En cambio, la congelación se basa en la remoción de calor latente de fusión. Su logística requiere de una cadena de frío ininterrumpida, que es la fuente de su mayor vulnerabilidad económica. En este contexto, se cuantificaron los recursos más críticos, confirmando la alta intensidad energética del proceso liofilizado, 19 kWh/kg de frutilla procesada, debido a la necesidad de aportar el calor latente de sublimación en condiciones de alto vacío, haciéndolo casi 50 veces más intensivo que la remoción del calor sensible y latente del proceso de congelado individual rápido, que requiere de 0,39 kWh/kg. Este alto consumo eléctrico se traduce como el costo de generar valor agregado con un fruto altamente perecible, como lo es la frutilla.

El costo de producción y recuperación del capital es de 34,66 USD/kg para la frutilla liofilizada y 2,18 USD/kg para la frutilla congelada, lo que exige que los precios de venta sean capaces de absorber el costo y generar un margen saludable, incentivando la realización de acuerdos comerciales que permitan, por ejemplo, establecer precios de venta del producto, negociando costos de compra de materia prima con agricultores independientes.

El modelo matemático de la logística que implica la exportación de ambos productos demostró que la vulnerabilidad del IQF reside en los costos externos y no en la producción. El arrastre logístico de la frutilla congelada debido a la cadena de frío totaliza 2,52 USD/kg, lo que representa un 21% del costo de económico unitario. Mientras que, la liofilización, en contraste, al eliminar el agua y suprimir la necesidad de una cadena logística fría, reduce el costo logístico a 0,53 USD/kg producido, lo que representa apenas un 1,5% del costo

económico unitario, blindando al proyecto contra volatilidades en el precio del petróleo y fletes navieros.

Finalmente, se sensibilizó el consumo de energía eléctrica de ambos procesos. La intensidad energética de la cadena de frío de la frutilla congelada, considerando 30 días en planta, 30 días en flete marítimo y 30 días en almacenamiento de distribución en destino, genera que se necesiten tan solo 31 días de almacenamiento doméstico de la producción total, es decir, que en 2,85 millones de congeladores en simultaneo se almacene 1 kg de producto durante 31 días, para igualar el consumo eléctrico total del proceso de liofilización. Este hecho deja en evidencia que, a pesar del menor consumo energético durante la producción, el consumo eléctrico durante la cadena logística de suministro, sumado al almacenamiento doméstico del producto en instalaciones del consumidor, iguala el consumo de electricidad del producto liofilizado en tan solo 31 días.

El modelo de congelación rápida individual es un negocio de volumen consolidado, ideal para flujos de caja rápidos, pero sometido a una alta sensibilidad logística y de materia prima. En cambio, la liofilización se consolida como la estrategia tecnológica superior a largo plazo para la industria chilena, transformando la energía eléctrica local en un producto estable de alto margen que minimiza los riesgos asociados a su participación en el comercio y/o mercados internacionales.

## **6.2 Recomendaciones**

Ajustar los supuestos y estimaciones realizadas en función de valores empíricos reales provenientes de empresas y/o participantes del rubro de frutas congeladas y liofilizadas.

Realizar la evaluación económica para diferentes casos de exportación, comparar distintos precios de venta posibles.

Realizar un estudio técnico más robusto, que considere alternativas tecnológicas que permitan optimizar los tiempos de ciclo y a su vez, los requerimientos energéticos y auxiliares de ambos proyectos, evaluando su potencial de ventas y escenarios de exportación hacia mercados en particular donde se prime el valor agregado al producto.

## 7. REFERENCIAS

- Alvarado, J. (2014). *Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos (2da. ed)*. Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- ASHRAE. (2014). *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bascope, A. (2012). Realidad Productiva de la Frutilla en California. *Agrimundo: Inteligencia Competitiva para el sector Agroalimentario*.
- BoLaiKe. (2026). *JiangSu BoLaiKe Refrigeration Science and Technology Development Co., Lt*. Obtenido de JiangSu BoLaiKe Refrigeration Science and Technology Development Co., Lt: <http://lyo-freezedryer.com.br/1-6-500kg-industrial-lyophilization-freeze-dryer.html>
- Chevalier, D., Le Bail, A., & Ghoul, M. (2000). Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part I. Freezing at atmospheric pressure. *Journal of Food Engineering*, 46(4), 277–285. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00089-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00089-3)
- Ciurzyńska, A., & Lenart, A. (2011). Freeze-drying - application in food processing and biotechnology - a review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 61(3), 165–171. <https://doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5>
- Chopra, S. (2025). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Pearson.
- Codex Alimentarius. (1981). *Norma del Codex para fresas (frutillas) congeladas rápidamente (CXS 52-1981)*. FAO y OMS.
- Fitzgerald, W. B., Howitt, O. J. A., Smith, I. J., & Hume, A. (2011). Energy use of integral refrigerated containers in maritime transportation. *Energy Policy*, 39(4), 1885–1896. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.015>
- Fellows, P. (2022). *Food Processing Technology 5th Edition*. Woodhead Publishing.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Crops and livestock products*. Obtenido de FAOSTAT: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fresh Plaza. (2019). *Key to successful IQF berry processing is efficient equipment*. Obtenido de Fresh Plaza: <https://www.freshplaza.com/north-america/article/9109483/key-to-successful-iqf-berry-processing-is-efficient-equipment/>
- Galetto, C. D., Verdini, R. A., Zorrilla, S. E., & Rubiolo, A. C. (2010). Freezing of strawberries by immersion in CaCl<sub>2</sub> solutions. *Food Chemistry*, 123(2), 243–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.018>

- Giampieri, F., Forbes, T., Gasparini, M., & Alvarez, J. (2015). Strawberry as a health promoter: An evidence based review. *Food & Function*.
- Gimeno, D. (2014). *Caracterización del funcionamiento de un deshidratador doméstico. Aplicación para el secado de fresas y comparación con otros métodos*. Universidad de Zaragoza. Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, Área de Producción Animal.
- Gualpa, A. (2021). *Evaluación del proceso de liofilización en fresa (Fragaria ananassa) para su aplicación en la industria alimentaria*. Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Hu, J., Sun, X., Xiao, H., Yang, F., Liu, C., Wang, H., Zhang, H., & Zhang, W. (2022). Optimization of Conditions for a Freeze-Dried Restructured Strawberry Block by Adding Guar Gum, Pectin and Gelatin. *Plants*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/plants11212809>
- Jakubczyk, E., Tryzno-Gendek, E., & Anna Kot, A. K.-D. (2025). *Pre-Treatment impact on freeze-drying process and properties of dried blueberry*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/2/537>
- Kamat, M. S., Lodder, R. A., & DeLuca, P. P. (1989). Near-Infrared Spectroscopic Determination of Residual Moisture in Lyophilized Sucrose Through Intact Glass Vials. *Pharmaceutical Research*, 6(11), 961–965. <https://doi.org/10.1023/A:1015997530367>
- Kramer, M. (1999). *Innovatives Einfrierverfahren zur Minimierung der Prozeßzeit von Gefriertrocknungszyklen Den Naturwissenschaftlichen Fakultäten*. Stuttgart: Den Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Friedrich- Alexander- Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Doktorgrades.
- Kusch, C. (2018). *Liofilización de frutillas enteras (Fragaria x ananassa duch): Efecto de micro-perforaciones realizadas con tecnología laser de CO2 en el tiempo de secado primario*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa Maria.
- Mastrocola, D., Sacchetti, G., Pittia, P., & Di Mattia, C. a. (2005). Rehydration of dried fruit pieces in aqueous sugar solutions: a review on mass transfer and final product characteristics. *Italian Journal of Food Science N°3, Vol 17*.
- Messineo, A. (2012). R744-R717 Cascade Refrigeration System: Performance Evaluation compared with a HFC Two-Stage System. *Energy Procedia*, 14(11), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.896>

- Ministerio de Salud de Chile. (1997). *Decreto Supremo N°977/96: Reglamento Sanitario de Alimentos*. Santiago de Chile: Diario Oficial de la Republica de Chile.
- Morales, C. (2017). *Manual de Manejo Agronómico de la Frutilla*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).
- Moran, M., Shapiro, H., Boettner, D., & Bailey, M. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics (8th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Mujumdar, A. (2014). *Handbook of Industrial Drying 4th Edition*. CRS Press.
- Ocaña, E. (2013). *Obtención de Uva Liofilizada*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- ODEPA. (2025). *Estadísticas de comercio exterior agropecuario: Exportaciones de frutilla 2020-2024*. Obtenido de Oficina de Estudios y Políticas Agrarias: <https://www.odepa.gob.cl>
- Organización Marítima Internacional. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*. Londres: Organización Marítima Internacional. Obtenido de <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
- Orrego, C. (2008). *Congelación y Liofilización de Alimentos*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Pardo, B., & Mauricio, J. (2002). *Modelling Studies on Freeze-drying of Coffee Extracts. A PhD Thesis*. The University of Reading. Faculty of Life Sciences. School of Food Biosciences.
- ProChile. (2025). *Agro & Alimentos*. Obtenido de ProChile: <https://www.prochile.gob.cl/sectores-exportadores/agro-y-alimentos>
- Ramirez, J. (2007). *Liofilización de Alimentos*. Cali: Universidad del Valle.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311–319. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4)
- Saclier, M., Peczalski, R., & Andrieu, J. (2010). Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals' size and shape during freezing in vials. *Chemical Engineering Science*, 65(10), 3064–3071. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.01.035>
- Sativri, A., Wibisono, S., & Siswandono, A. M. (2025). The comparison of antioxidant properties between frozen and freeze-dried strawberries (*Fragaria x ananassa*). *Tropical Journal of Natural Product Research*, 748-755.
- Savo, I., Dragan, M., Miladin, B., Ivancevic, P. S., & Miladin Brkic, P. (2012). SPECIFICITIES OF FRUIT FREEZE DRYING AND PRODUCT PRICES.

- Economics of Agriculture, 59(3), 461–471.  
<https://doi.org/10.22004/AG.ECON.140875>
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). Introduction to food engineering: Fifth edition. Introduction to Food Engineering: Fifth Edition, 1–861.  
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-06101-X>
- Sinha, N. K., Sidhu, J. S., Barta, J., Wu, J. S. B., & Cano, M. P. (2012). Handbook of Fruits and Fruit Processing, Second Edition. Handbook of Fruits and Fruit Processing, Second Edition, 1–694. <https://doi.org/10.1002/9781118352533>
- Talavera, W. (2018). *Efecto de la liofilización en las propiedades fisicoquímicas y vida útil de la Carambola (Averrhoa carambola L.) en polvo*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia.
- Tang, C., & Pikal, M. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice. Pharmaceutical Research, 21, 191–200.  
<https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000016234.73023.75>
- U.S. Department of Agriculture (USDA). (2019). *FoodData Central: Strawberries, raw*. Obtenido de Agricultural Research Service: <https://fdc.nal.usda.gov/>
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport 2023*. Obtenido de United Nations: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>

## 8. ANEXOS

### ANEXO A. CAPEX planta frutilla congelada

En este anexo se presenta en detalle los resultados de las estimaciones de la inversión de capital para la planta de frutilla congelada.

*Tabla 37. CAPEX maquinaria principal planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                   | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Túnel IQF                          | USD           | \$1.400.000               |
| Sala de Frío                       | USD           | \$1.800.000               |
| <b>Total, Maquinaria Principal</b> | <b>USD</b>    | <b>\$3.200.000</b>        |

*Tabla 38. CAPEX equipamiento de soporte y utilidades planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                      | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|---------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Línea de Pretratamiento               | USD           | \$950.000                 |
| Línea de Empaque                      | USD           | \$450.000                 |
| Conexión Eléctrica y servicios        | USD           | \$1.600.000               |
| <b>Total, Equipamiento de Soporte</b> | <b>USD</b>    | <b>\$3.000.000</b>        |

*Tabla 39. CAPEX obras civiles y terreno planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                      | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|---------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Adquisición de Terreno                | USD           | \$350.000                 |
| Construcción Nave Industrial          | USD           | \$3.500.000               |
| Cámara frigorífica                    | USD           | \$1.250.000               |
| Planta de RILes                       | USD           | \$600.000                 |
| <b>Total, Obras Civiles y Terreno</b> | <b>USD</b>    | <b>\$5.700.000</b>        |

*Tabla 40. CAPEX consolidado planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Congelada</b> |
|---------------------------------|---------------|---------------------------|
| Maquinaria de proceso           | USD           | \$3.200.000               |
| Obras Civiles y Terreno         | USD           | \$5.700.000               |
| Equipamiento de Soporte         | USD           | \$3.000.000               |
| Costos Indirectos de Ingeniería | USD           | \$1.335.000               |
| Subtotal                        | USD           | \$13.235.000              |
| Contingencia                    | USD           | \$1.323.500               |
| <b>Total, sin IVA</b>           | <b>USD</b>    | <b>\$14.558.500</b>       |

## ANEXO B. CAPEX planta frutilla liofilizada

En este anexo se presenta en detalle los resultados de las estimaciones de la inversión de capital para la planta de frutilla liofilizada.

*Tabla 41. CAPEX maquinaria principal planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                   | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Liofilizadores                     | USD           | \$9.500.000                 |
| Sistema de Refrigeración Central   | USD           | \$4.500.000                 |
| Sistema de Vacío Central           | USD           | \$1.200.000                 |
| <b>Total, Maquinaria Principal</b> | <b>USD</b>    | <b>\$15.200.000</b>         |

*Tabla 42. CAPEX equipamiento de soporte y utilidades planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                      | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Línea de Pretratamiento               | USD           | \$1.950.000                 |
| Línea de Empaque Retail               | USD           | \$2.200.000                 |
| Calderas y Vapor                      | USD           | \$1.100.000                 |
| Subestación Eléctrica                 | USD           | \$1.250.000                 |
| <b>Total, Equipamiento de Soporte</b> | <b>USD</b>    | <b>\$6.500.000</b>          |

*Tabla 43. CAPEX obras civiles y terreno planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                      | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Adquisición de Terreno                | USD           | \$500.000                   |
| Construcción Nave Industrial          | USD           | \$5.500.000                 |
| Obra Civil Específica                 | USD           | \$1.800.000                 |
| Planta de RILes                       | USD           | \$600.000                   |
| <b>Total, Obras Civiles y Terreno</b> | <b>USD</b>    | <b>\$8.400.000</b>          |

*Tabla 44. CAPEX consolidado planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                | <b>Unidad</b> | <b>Frutilla Liofilizada</b> |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Maquinaria Principal            | USD           | \$15.200.000                |
| Equipamiento de soporte         | USD           | \$6.500.000                 |
| Obras Civiles y Terreno         | USD           | \$8.400.000                 |
| Costos Indirectos de Ingeniería | USD           | \$4.515.000                 |
| Subtotal                        | USD           | \$34.615.000                |
| Contingencia                    | USD           | \$5.192.250                 |
| <b>Total, sin IVA</b>           | <b>USD</b>    | <b>\$39.807.250</b>         |

## ANEXO C. OPEX planta frutilla congelada

En este Anexo se presentan los resultados de las estimaciones de los costos de operación para la planta de frutillas congeladas.

*Tabla 45. Costos variables planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                     | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio</b> | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|
| <b>Materia Prima</b>                 | kg            | 3.000.000       | \$1           | USD/kg        | \$3.000.000        |
| <b>Electricidad</b>                  | kWh           | 570.000         | \$0,14        | USD/kWh       | \$79.800           |
| <b>Almacenamiento industrial</b>     | kWh           | 541.500         | \$0,14        | USD/kWh       | \$75.810           |
| <b>Empaque</b>                       | kg            | 2.850.000       | \$0,15        | USD/kg        | \$427.500          |
| <b>Vapor</b>                         | ton           | 1.650           | \$55          | USD /ton      | \$90.750           |
| <b>Total, costo variable USD/año</b> |               |                 |               |               | <b>\$3.673.860</b> |

*Tabla 46. Costos fijos planta frutilla congelada.*

| <b>Categoría</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b>    |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Mano obra</b>                  | USD           | \$726.960          |
| <b>Técnicos y administrativos</b> | USD           | \$363.480          |
| <b>Mantenimiento</b>              | USD           | \$96.000           |
| <b>Logística y fletes FOB O</b>   | USD           | \$290.010          |
| <b>Servicios y Generales</b>      | USD           | \$175.000          |
| <b>Total, costo fijo USD/año</b>  | <b>USD</b>    | <b>\$1.651.450</b> |

## ANEXO D. OPEX planta frutilla liofilizada

En este Anexo se presentan los resultados de las estimaciones de los costos de operación para la plata de frutillas liofilizadas.

*Tabla 47. Costos variables planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                     | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio</b> | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|
| <b>Materia Prima</b>                 | kg            | 3.000.000       | \$1           | USD/kg        | \$3.000.000        |
| <b>Electricidad</b>                  | kWh           | 5.428.571       | \$0,14        | USD/kWh       | \$760.000          |
| <b>Almacenamiento industrial</b>     | kWh           | 6.482           | \$0,14        | USD/kWh       | \$907              |
| <b>Empaque</b>                       | kg            | 285.714         | \$3,5         | USD/kg        | \$1.000.000        |
| <b>Vapor</b>                         | ton           | 4.509           | \$55          | USD /ton      | \$247.995          |
| <b>Total, costo variable USD/año</b> |               |                 |               |               | <b>\$5.008.902</b> |

*Tabla 48. Costos fijos planta frutilla liofilizada.*

| <b>Categoría</b>                  | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|
| <b>Mano de obra</b>               | USD           | \$1.327.560        |
| <b>Técnicos y administrativos</b> | USD           | \$796.536          |
| <b>Mantenimiento</b>              | USD           | \$456.000          |
| <b>Servicios y generales</b>      | USD           | \$650.000          |
| <b>Logística y fletes FOB</b>     | USD           | \$130.500          |
| <b>Total, costo fijo USD/año</b>  | <b>USD</b>    | <b>\$3.360.596</b> |