

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL**  
**VALPARAISO – CHILE**



“Formación de Furano en el proceso de estabilización de colado de zanahoria mediante liofilización y esterilización comercial”

Nicolás Patricio Barría Barrientos

Memoria de titulación para optar al título de  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Profesor Guía:	Dr. Sergio Almonacid Merino
Profesores Correferentes:	Dr. Cristian Ramírez Bustos
	Ing. Marlene Pinto Fernández

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco en primer lugar a mis padres Patricio y Viviana, cuyo apoyo y paciencia fue fundamental en lograr la finalización de este trabajo, y este proceso universitario. Sin ellos, no imagino posible el llegar hasta este punto.*

*A mi pareja, Javiera, que me regalo su fiel compañía durante esta finalización de etapa, haciéndola mucho más llevadera.*

*Agradezco la paciencia y apoyo de mis profesores, Sergio, Marlene, y Cristian, por siempre responder mis dudas y ayudar con la gran disposición que en cada ocasión me regalaron.*

*Agradezco a los amigos que me acompañaron durante esta época universitaria, y por sobre todo a los que hice al final de este proceso.*

*Agradezco el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta memoria al Proyecto Fondecyt Regular 1211980.*

*Gracias a todos y cada uno de los que me siguen brindando su apoyo y cariño.*

## RESUMEN

Las zanahorias han sido un alimento que ha acompañado a la humanidad desde hace más de 2 milenios hasta la actualidad, formando parte del plato tanto de adultos, como ancianos, niños y bebés. Con propiedades beneficiosas como la protección a la pérdida de visión relacionada a la edad, o la prevención del sarampión en niños, entre otros tantos. La zanahoria como alimento para bebés comercial por lo general se presenta como una mezcla de distintos alimentos colados. Cuando a estos alimentos se les aplican procesos térmicos, como lo es la esterilización, e incluso la liofilización, se produce un compuesto orgánico llamado Furano. Este compuesto es un posible cancerígeno, que afecta en mayor medida a los infantes, debido a su sistema inmune en vías de desarrollo.

El proceso de secado utilizado para esta investigación corresponde al de liofilización, un tipo de secado a bajas temperaturas a comparación de los demás tipos de secado; y a bajas presiones. Este proceso cuenta con 3 etapas: congelación, secado primario (por sublimación), y secado secundario (desorción). Los experimentos fueron realizados para la etapa de congelación y secado primario. Habiendo entendido el tipo de secado a utilizar, se propone realizar un estudio de la cantidad de furano generado en un puré de zanahoria liofilizado, teniendo en cuenta la existencia de datos de cantidad de furano generado en el proceso de esterilización, se pretende comparar estos datos en ambos procesos.

Para esto primero se realizó una estandarización de la preparación de puré de zanahoria, donde los resultados de la prueba de textura de las rodajas de zanahoria arrojan un tiempo óptimo de cocción de 20 minutos; los resultados de la prueba de viscosidad al puré recién preparado proponen el agregado de 40 – 45 mL de agua para una viscosidad estándar. Habiendo obtenido un puré de zanahoria estándar se realizaron experimentos para la liofilización a 30 °C y 0,1 mbar por 72 horas de proceso. Los resultados de la etapa de congelación fueron de 62 minutos aproximadamente, con este tiempo el puré alcanza una temperatura de -26°C, menor a la temperatura de transición vítrea del alimento. Acto seguido se buscó una manera de conocer el tiempo de fin del secado primario, es decir, el punto donde termina de sublimar el agua congelada en el alimento. Este tiempo es complejo de determinar por lo que se aplicó la realización de 2 modelos que comparten un comportamiento similar al perfil de temperaturas experimental: el modelo de Gompertz, y el modelo Logístico. Al analizar ambos modelos se determina que el tiempo de fin del secado primario corresponde a las 50 horas de secado, y las temperaturas se estabilizan a las 53 horas en 25 °C aprox.

Los resultados de las pruebas de humedad realizadas al puré de zanahorias previo y posterior a la liofilización muestran que hubo un 83% de agua retirada, desde un 91% a un 8% de humedad. Los resultados en la prueba de rehidratación muestran que se recupera un 78% de agua, de lo que se concluye que el alimento liofilizado es de buena calidad.

Finalmente, los resultados de la medición de furano en el proceso de liofilización fueron en promedio de un **4,42 ±3,14**, un valor menor al observado por los datos entregados por esterilización en estudios anteriores, esto posiblemente debido a que parte del furano es retirado junto al vapor de agua de la cámara de liofilización. Finalmente se concluye que el proceso de liofilización genera menor cantidad de furanos que la esterilización, en el caso del puré de zanahorias. Vale decir además que al ser estas cantidades mínimas en relación con la cantidad aceptable de ingesta diaria de 2 µg/kg de peso corporal/ día, para los bebés mayores de 6 meses, estos están libres de padecer los efectos adversos que este compuesto representa.

# INDICE

## Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN .....	3
INDICE.....	4
Indice de figuras .....	6
Indice de tablas .....	7
INTRODUCCIÓN .....	9
OBJETIVOS .....	11
Objetivo Principal .....	11
Objetivos Específicos.....	11
Antecedentes Generales .....	12
Zanahoria.....	12
Que es, beneficios .....	12
La importancia de los betacarotenos .....	13
Producción Nacional de zanahorias .....	14
Relación del puré de zanahoria con bebés .....	15
Furanos.....	16
Que son .....	16
Cómo se producen .....	16
Relación con bebes.....	16
Esterilización .....	18
Que es.....	18
Liofilización.....	19
Que es (Descripción del proceso).....	19
Etapas del proceso .....	19
Comparativa (Ventajas /Desventajas).....	26
Parámetros importantes en liofilización .....	26
Sensor de Fibra Óptica Tipo Fiber Bragg Grating (FBG) .....	28
Que es.....	28
Relación con liofilización .....	29
Materiales y Método.....	30

Metodología General .....	30
Método y Equipos utilizados .....	31
Materia Prima.....	31
Preparación de la materia prima.....	32
Congelación.....	36
Liofilización.....	38
Toma de datos de temperatura .....	40
Determinación fin del Secado Primario .....	42
Pruebas de Humedad y rehidratación.....	44
Determinación de cantidad de furanos.....	44
RESULTADOS .....	47
Estandarización de puré de zanahorias .....	47
Textura del puré de zanahorias.....	47
Viscosidad del puré de zanahorias.....	47
Tiempo de congelación del puré de zanahorias.....	47
Perfil de temperatura en Liofilización.....	48
Determinación fin de secado primario.....	49
Puré de zanahoria a 18 y 48 horas de proceso .....	51
MEDICION DE HUMEDAD Y REHIDRATACIÓN .....	54
CANTIDAD DE FURANO .....	55
CONCLUSIÓN .....	57
RECOMENDACIONES .....	58
Bibliografía .....	59
ANEXOS .....	63
Anexo 1: Temperatura de transición Vítreo de algunos alimentos .....	63
Anexo 2: Pruebas de Textura en rodajas de zanahoria.....	64
Anexo 3: Pruebas de Viscosidad en puré de zanahorias.....	65
Anexo 4: Tiempo congelación puré de zanahoria.....	67
Anexo 5: Datos Temperatura de liofilización de puré de zanahoria.....	68
Anexo 6: Diagramas temperatura condensador y presión en proceso de liofilización .....	69
Anexo 7: Algoritmo de ajuste por modelo logístico.....	71
Anexo 8: Datos pruebas humedad.....	72

## Indice de figuras

Figura 1. Imagen Zanahorias Occidental y Oriental (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019).....	12
Figura 2. Anatomía de raíz de zanahoria. (a) Vista completa, (b) Corte longitudinal. Fuente (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019) .....	13
Figura 3. Ruta de síntesis de furano desde Ácido Poliinsaturado y carotenoides. (Javed et al., 2021) .....	16
Figura 4. Diagrama Punto Triple del agua. (Fellows, 2002).....	19
Figura 5. Visión esquemática de los procesos de congelación de una sustancia pura (agua) y un alimento, a dos velocidades de congelación. (Orrego-Alzate, 2008).....	20
Figura 6. Diagrama Temperatura vs Tiempo durante congelación. (Government College for Women Ghandi Nagar, 2018) (Fellows, 2002).....	21
Figura 7. Imagen ilustrativa de alimento en etapa de secado primario. (Orrego-Alzate, 2008) .....	23
Figura 8. Detección fin de secado primario por comparación de sensores Pirani y Capacitivo, y demás métodos. (Gaidhani et al., 2015).....	24
Figura 9. Diagrama indicador Fin de Secado primario por temperatura de producto. (Gaidhani et al., 2015).....	25
Figura 10. Diagrama Contenido de humedad vs Tg en chips de zanahoria. (Liu-Ping et al., 2007) ..	27
Figura 11. Curvas de Rehidratación de secado en aire (AD), secado por microondas en vacío (VMD) y liofilización (FD) en rodajas de zanahoria a 25 °C y 100 °C. (Lin et al., 1998).....	28
Figura 12. Desarrollo de pruebas para estandarización de puré de zanahoria. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Figura 13. Desarrollo de preparación de puré de zanahorias liofilizado. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Figura 14. Desarrollo de análisis de pruebas de furano en puré de zanahorias liofilizado. Fuente: Elaboración propia. ....	31
Figura 15. Rodajas cilíndricas de zanahoria. ....	32
Figura 16. Rodajas de zanahorias en agua fría, posterior a cocción. ....	33
Figura 17. Texturómetro <b>CT3-50 KG Brookfield Texture Analyzer</b> . ....	34
Figura 18. Puré de zanahoria previo a agregado de agua.....	35
Figura 19. Viscosímetro Visco Star. ....	35
Figura 20. Ultracongeladora, modelo MT 05. ....	36
Figura 21. Puré de zanahoria congelado. ....	36
Figura 22. Liofilizador Alpha 2-4 LSCPlus.....	38
Figura 23. Software LCSPlus Versión 1.5.1.7.0.....	39
Figura 24. Puré de Zanahoria liofilizado a 72 horas de proceso. ....	40
Figura 25. Imagen ilustrativa de fibra óptica y cilindro contenedor de puré de zanahorias. Fuente: elaboración propia. ....	40
Figura 26. Sensor de Fibra óptica.....	41
Figura 27. Interrogador de Fibra Óptica.....	41
Figura 28. Diagrama curva sigmoideal de crecimiento bacteriano. (Zwietering et al., 1990). ....	42
Figura 29. Imagen de cromatógrafo de gases utilizado para los análisis.....	45
Figura 30. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria durante congelación.....	48
Figura 31. Perfil de temperaturas durante proceso de liofilización.....	48

Figura 32. Diagrama temperatura de punto 8 del sensor de fibra óptica, utilizando algoritmo gráfico de modelo de Gompertz modificado para temperaturas. ....	50
Figura 33. Diagrama de temperatura en punto 8 del sensor de fibra óptica, utilizando modelo logístico. ....	51
Figura 34. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria a 18 horas de proceso de liofilización.....	52
Figura 35. Imagen de puré de zanahoria a 18 horas de proceso de liofilización. ....	52
Figura 36. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria a 48 horas de proceso de liofilización.....	53
Figura 37. Imagen de puré de zanahoria a 48 horas de proceso de liofilización. ....	54
Figura 38. Temperatura de transición vítrea de zanahoria y otros alimentos.(Hua et al., 2010) .....	63
Figura 39. Diagrama de pruebas de textura en rodajas de zanahoria. ....	64
Figura 40. Datos Pruebas de Viscosidad en puré de zanahorias.....	66
Figura 41. Tiempo Congelación puré de zanahoria en distintos puntos de la fibra óptica.....	67
Figura 42. Datos Temperatura Liofilización puré de zanahorias por 71 horas. ....	69
Figura 43. Diagrama Temperatura vs tiempo en condensador en proceso de liofilización de puré de zanahoria.....	69
Figura 44. Diagrama de presión en el inicio, 10 a 1 mbar en proceso de liofilización. ....	70
Figura 45. Diagrama de presión de 1 a 0,2 mbar en proceso de liofilización. ....	70
Figura 46. Diagrama de presión de 0,2 a 0,1 mbar en proceso de liofilización. ....	70
Figura 47. Algoritmo de uso de modelo logístico para curva de temperatura, a través de programa Python (Scipy).....	71

## Indice de tablas

Tabla 1. Superficie sembrada de zanahorias (hectáreas) a nivel nacional. Fuente (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2023).....	14
Tabla 2. Superficie sembrada de zanahoria (hectáreas) por región en año 2022. Fuente (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2023).....	14
Tabla 3. Cantidad y frecuencia de cada alimento a incorporar en puré para lactante de 6 a 12 meses. (Ministerio de Salud, 2015).....	15
Tabla 4. Ingesta de furano por grupo etario en Chile. (Mariotti et al., 2013).....	17
Tabla 5. Niveles de furano en alimentos con zanahoria, y frutas en Brasil, España y Chile. (Arisseto et al., 2010) (Altaki et al., 2017) Chile (Mariotti et al., 2013).....	17
Tabla 6. Media, máximos y mínimos valores de concentración de furano por grupo de comida. (Pugajeva et al., 2016).....	17
Tabla 7. Comparación ente ventajas y desventajas del proceso de Liofilización. (Gaidhani et al., 2015) .....	26
Tabla 8. Aporte en nutrientes y minerales de 100 g de zanahoria fresca. (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019) (Carrots: Benefits, Nutrition, Diet, and Risks, n.d.).....	31
Tabla 9. Aporte en vitaminas y pro-vitaminas en 100 g de zanahoria fresca. (Saavedra et al., n.d.)32	
Tabla 10. Parámetros de ingreso a Software de Texturómetro.(Vu et al., 2004b) (Franco et al., 2019). ....	34
Tabla 11. Características del Liofilizador. ....	38
Tabla 12. Cantidad de furanos para rodajas de zanahoria en proceso de esterilización. (Ramírez et al., 2022) .....	44

Tabla 13. Resultados pruebas de textura rodajas de zanahoria. ....	47
Tabla 14. Resultados prueba de viscosidad de puré de zanahoria. ....	47
Tabla 15. Parámetros gráficos y matemáticos de modelo de Gompertz, modificado para temperaturas.....	50
Tabla 16. Parámetros estimados de modelo logístico. ....	51
Tabla 17. Resultados Porcentaje de humedad de zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré liofilizado. ....	54
Tabla 18. Resultados porcentaje humedad de rehidratación al puré de zanahoria liofilizado. ....	54
Tabla 19. Resultados cantidad de furanos en zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré liofilizado. .....	55
Tabla 20. Resultados cantidad de furanos en zanahoria cruda, puré de zanahorias después de cocción, puré de zanahorias previo a liofilización, y puré de zanahorias liofilizado en segunda tanda de muestras.....	55
Tabla 21. Valores promedios de muestra cruda, muestra tipo puré, y muestra liofilizada.....	55
Tabla 22. Datos pruebas de textura en rodajas de zanahoria. ....	64
Tabla 23. Datos porcentajes de humedad en zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré de zanahoria liofilizada.....	72

## INTRODUCCIÓN

El cuidado de las nuevas generaciones ha sido desde siempre un tema de interés, desde las edades más hostiles hasta la actualidad. Entre los cuidados de los más pequeños se encuentra la alimentación, la cual es crucial en el buen desarrollo de sus funciones motoras. En sus primeros meses de vida luego del consumo de leche materna, los bebés deben adentrarse a nuevos alimentos, como es el caso de la ingesta de zanahoria molida o puré, la cual es ingresada a su dieta a los 6 meses de edad (Ministerio de Salud, 2015).

Las zanahorias (alimento ideal para el bebé en desarrollo), son vegetales ricos en carotenos, estos pigmentos naturales son precursores de la Vitamina A, presentando una vasta cantidad de beneficios a quien lo consume, en especial a los infantes. Son estos los que además de ser quienes reciben sus beneficios, también reciben con mayor facilidad los efectos negativos de ingerir los compuestos perjudiciales que se producen al cocinar este vegetal y otro tipo de alimentos. Entre estos el que se destaca en esta investigación corresponde a la generación de furanos.

Los furanos corresponden a un compuesto orgánico volátil que se genera al realizar procesos térmicos con alimentos que además contienen otros compuestos precursores capaces de formarlo, como los carotenoides. El aspecto perjudicial radica en que es considerado un posible cancerígeno, afectando al hígado y los riñones en particular. Los infantes y bebés en especial son vulnerables a esto debido a que no tienen un sistema inmune completamente desarrollado (Javed et al., 2021).

En la industria estos alimentos son en general sellados rápidamente, dejando este compuesto atrapado dentro del envase. Los productos comerciales en tarro de tipo colados para bebe, de donde viene a entrar el puré de zanahoria, son en su gran mayoría esterilizados, operando a altas temperaturas, de donde se genera una cierta cantidad de furanos, así como se ha descrito en distintos artículos al respecto. En base a esto se propuso observar la cantidad generada de furanos para otro tipo de secado, la liofilización.

La liofilización corresponde a un tipo de secado que opera bajo el principio del “punto triple del agua”, por lo que se utilizan bajas presiones (menores a 1 mbar), y temperaturas menores a las comúnmente utilizadas en otros tipos de secados (Fellows, 2002). La liofilización tiene como gran ventaja el mantenimiento de las propiedades organolépticas del alimento, su larga durabilidad en comparación a otros tipos de secado, y su buena capacidad de rehidratación (Gaidhani et al., 2015). Este proceso consta de 3 grandes etapas, cada una con condiciones propias y parámetros necesarios a cumplir para su correcto desarrollo. Estas son: congelación, donde el alimento es llevado a bajas temperaturas hasta un valor propuesto por un parámetro seleccionado como la temperatura eutéctica o de transición vítrea congelando el agua libre del alimento; secado primario, donde el agua congelada sublima dejando un producto seco poroso con generalmente un 10 – 25% de humedad removiendo el agua libre congelada, y siendo además la etapa más larga y costosa de este secado; y secado secundario o desorción, donde se remueve parte del agua ligada que no congela (Orrego-Alzate, 2008).

Así se propone para este caso obtener un puré de zanahoria estándar para realizar los experimentos, que tenga validez en relación con los tipos de experimentos realizados con zanahoria anteriormente; determinar el tiempo de finalización del secado primario; y en base a este puré de

zanahorias liofilizado obtener la cantidad de furanos que se generan, para luego compararla con los datos de cantidad de furanos generados en el proceso de esterilización comercial.

## OBJETIVOS

### Objetivo Principal

- Desarrollar proceso de liofilización de puré de zanahoria, realizando un estudio de producción de furano.

### Objetivos Específicos

- Desarrollar un proceso estándar de preparación de zanahoria, determinando parámetros necesarios para su desarrollo.
- Determinar tiempo de fin del secado primario en proceso de liofilización de puré de zanahoria.
- Analizar cantidad de furano generado en proceso de liofilización de puré de zanahoria.
- Comparar cantidad de furano entre proceso de esterilización v/s proceso de liofilización.

## Antecedentes Generales

### Zanahoria

Que es, beneficios

Originaria de del centro asiático y del mediterráneo, la zanahoria corresponde a un tipo de hortaliza Apiacea de mayor siembra y producción en el mundo. Su consumo data de la época de las antiguas civilizaciones Griega y Romana. A mediados del siglo XVIII en Holanda se realizaron selecciones que aportaron gran cantidad de caroteno, teniendo como consecuencia la zanahoria naranja conocida hoy en día (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019).



a) Zanahoria Oriental



b) Zanahoria Occidental

*Figura 1. Imagen Zanahorias Occidental y Oriental (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019).*

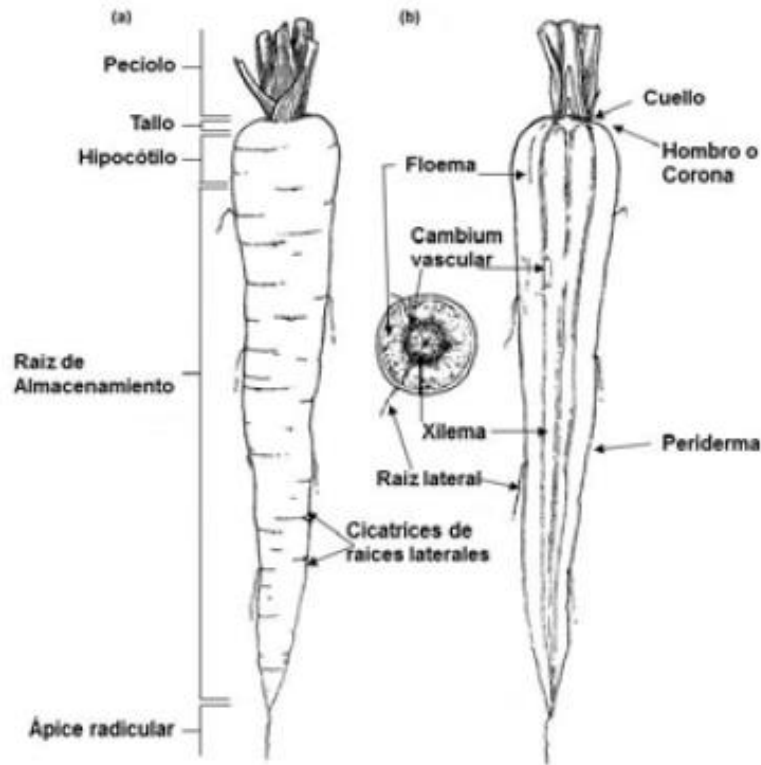


Figura 2. Anatomía de raíz de zanahoria. (a) Vista completa, (b) Corte longitudinal. Fuente (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019)

### La importancia de los betacarotenos

Los carotenos presentes en la zanahoria se dividen en alfa y betacarotenos, siendo estos últimos los de mayor cantidad en el vegetal, pudiendo representar más del 50% de los carotenoides totales, y generalmente duplicando a los alfacarotenos. (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019)

Los betacarotenos son un tipo de componente proveniente de los carotenos, habiendo una buena cantidad de estos como precursora de Vitamina A. Estos, por ejemplo, pueden ser convertidos enzimáticamente en la mucosa intestinal para generar retinol, el cual es requerido para la visión, secreción de mucosa, entre otros (Taylor, 1996) (Varshney & Mishra, 2022).

Sus propiedades benéficas incluyen. (Taylor, 1996), (National Institutes of Health (NIH), 2022).

- Reducción del riesgo de padecer cáncer, específicamente cáncer de pulmón, cáncer pancreático, cáncer de laringe, entre otros.
- Actúa como antioxidante para la protección de células ante radicales libres. Siendo los más comunes los rayos UV.
- Prevención de la degeneración macular relacionada a la edad, siendo la AMD (Age-related macular degeneration, en inglés) la causa principal de pérdida de visión en personas de avanzada edad, los alimentos con funciones antioxidantes como los betacarotenos son útiles para la prevención o el tratamiento de esta condición.
- Previene nuevos brotes de sarampión en niños, estos debidos a la insuficiencia de vitamina A en su cuerpo.

Es importante notar que, como consecuencia el exceso de Vitamina A preformada (en medicamentos y algunos suplementos) se producen distintos síntomas como: dolores de cabeza severos, visión borrosa, náuseas, dolor muscular, entre otros. Al contrario, el consumo elevado de betacarotenos puede hacer que la piel presente un color amarillo-anaranjado, pero no es un efecto dañino y desaparece al disminuir su consumo (National Institutes of Health, 2022).

#### Producción Nacional de zanahorias

En Chile, la zanahoria es producida durante todo el año, destacando algunas regiones por sobre otras debido a mayores superficies de cultivo, como se presenta en Tabla 2, donde la mayor cantidad de hectáreas de siembra se encuentra en la región Metropolitana.

Tabla 1. Superficie sembrada de zanahorias (hectáreas) a nivel nacional. Fuente (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2023).

Región	2019	2020	2021	2022
<b>Total</b>	3.951,5	3.630,7	2.554,7	3.038,5

Tabla 2. Superficie sembrada de zanahoria (hectáreas) por región en año 2022. Fuente (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2023).

Región	Hectáreas (2022)
<b>Coquimbo</b>	864,4
<b>Valparaíso</b>	632,7
<b>Metropolitana</b>	931,7
<b>Ñuble</b>	31,7
<b>Biobio</b>	106,4
<b>Araucanía</b>	136,0
<b>Resto País</b>	335,6

La cantidad de superficie sembrada de zanahorias en los últimos 4 años es variable, teniendo una disminución el año 2021, y recuperándose al año 2022, por lo que es una industria estable, sin embargo, la producción de zanahorias en territorio nacional corresponde aproximadamente a solo un 3%, con una superficie total de siembra para hortalizas de 94.828 hectáreas en el año 2022 (Marcelo Muñoz Villagrán, 2023).

#### Producción Nacional de frutas y verduras liofilizadas

South Am es una empresa fundada en el año 2004, encargada de generar alimentos bajo distintos tipos de secado, entre ellos la liofilización. Esta empresa se dedica a la producción de distintos tipos de frutas y verduras liofilizadas tipo snacks. En el caso particular de las zanahorias, estas son vendidas como un polvo liofilizado (South AM, n.d.).

La empresa distribuidora de estos snacks corresponde a Isofrut, quien los comercializa en bolsas de 10 gramos de fruta y verdura deshidratada.

### Relación del puré de zanahoria con bebés

La alimentación de los recién nacidos se basa inicialmente a partir de leche materna principalmente, sin recibir otro tipo de líquidos o sólidos, con excepción gotas o jarabes de suplementos de vitaminas o minerales o medicamentos (Ministerio de Salud, 2015).

Es a partir de los 6 meses aproximadamente, que se debe incorporar una alimentación sólida complementaria con el objetivo de cubrir los requerimientos nutricionales y estimular el desarrollo motor del bebé, debido a que la madurez morfo funcional del infante es ahora adecuada para una digestión y absorción de alimentos sólidos, en una medida controlada (Ministerio de Salud, 2015).

Por esto se recomienda una alimentación complementaria de papilla o puré suave, la cual debe contener cereales, más vegetales variados (verdes y coloreados) y carnes de preferencia bajas en grasa. Entre los vegetales coloreados se indica el consumo de zanahorias (Ministerio de Salud, 2015).

*Tabla 3. Cantidad y frecuencia de cada alimento a incorporar en puré para lactante de 6 a 12 meses. (Ministerio de Salud, 2015).*

Grupos de alimentos	Frecuencia	Alternativas	Edad Incorporación (meses)	Cantidad (g)	Medida casera	Energía (Kcal)	Proteínas (g)
<b>Vegetales verdes</b>	Diaria	Espinaca, acelga, zapallo italiano, apio, lechuga, repollo, porotos verdes, brócoli, otras.	6	15	¼ taza (en crudo)	3	0,23
<b>Vegetales coloreados</b>	Diaria	Zapallo, zanahoria, algas marinas, champiñones, betarragas, otras.	6	60	¼ taza (Cocida)	20	1,2

\*En 200 g de Sopa de Puré

## Furanos

### Que son

Furano ( $C_4H_4O$ ) corresponde a un compuesto orgánico tipo lipofílico y volátil, con una temperatura de ebullición de 31,37 °C, producido mayormente en los procesos térmicos de alimentos, como son la cocción, asado, horneado, esterilización (Javed et al., 2021). Este compuesto reside en distintos tipos de alimentos como el café, productos cereales, jugos de frutas, vegetales, etc. Entre estos están los alimentos para bebés (embotellados), ya sean de carne, vegetales y frutas, siendo los 2 primeros los mayores en presentar niveles de furanos, varios de ellos con zanahorias incluidas en sus recetas (Altaki et al., 2017).

Los furanos son considerados como “posible carcinógeno para los humanos” por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). En específico, posee efectos tóxicos en el hígado y riñón, que conducen a un cáncer en estos órganos, al ingerir este componente, o al inhalarlo mientras se prepara el alimento. Lamentablemente no existen guías aún en términos de cantidades permitidas en ciertos tipos de alimentos, por lo que se aplica el principio “ALARA” (As Low As Reasonably Achievable) (Javed et al., 2021).

### Cómo se producen

En el caso de alimentos, este compuesto es producido mayormente en los procesos térmicos de alimentos, como son la cocción, asado, horneado, esterilización (Javed et al., 2021). Proviene de precursores como, carbohidratos, aminoácidos, ácidos grasos poliinsaturados, y carotenoides. Cada precursor tiene su forma particular de generar Furano a través de distintas reacciones. En el caso particular de los ácidos grasos poliinsaturados y carotenoides, producto de un proceso de oxidación y posterior ciclación del 4-hidroxi-2-butanal a 2,5-dihidro-2-furanol a finalmente, furano (Javed et al., 2021) (Perez Locas & Yaylayan, 2004).

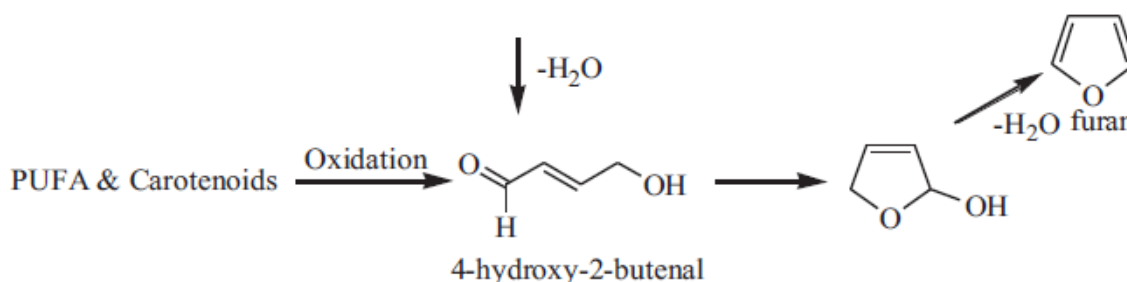


Figura 3. Ruta de síntesis de furano desde Ácido Poliinsaturado y carotenoides. (Javed et al., 2021)

### Relación con bebés

Debido a que los carotenoides presentes en el puré de zanahorias para consumo de bebés se realizan bajo procesos térmicos como escaldado, o cocción, la liberación de furanos se produce en los alimentos para bebés ya sean industriales, o hechos en casa.

Estudios realizados en España(Altaki et al., 2017), Brasil(Arisseto et al., 2010), Chile (Mariotti et al., 2013), entre otros, dan a conocer la cantidad producida de furanos en alimentos para bebés bajo

procesos térmicos, presentando así una mayor cantidad de este compuesto en aquellos de origen vegetal (Pugajeva et al., 2016).

Además, según investigaciones hechas por (Mariotti et al., 2013) los bebés de 9 meses corresponden al 3er grupo de mayor ingesta diaria de furanos en Chile, siendo estos un grupo de riesgo para este componente. Vale decir también, según (Javed et al., 2021) la ingesta diaria aceptable de furano para bebés no debería exceder los 2,0  $\mu\text{g}/\text{kg}_{\text{peso corporal}}/\text{día}$ .

Tabla 4. Ingesta de furano por grupo etario en Chile. (Mariotti et al., 2013)

Grupo por Edad	Total de ingesta ( $\text{ng kg}_{\text{pesocorp}}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )
Niños de nivel socioeconómico medio – alto	496
Niños de nivel socioeconómico bajo	510
Adultos tercera edad (Hombres)	94
Adultos tercera edad (Mujeres)	109
Adultos	72
Bebés de 9 meses	250

Tabla 5. Niveles de furano en alimentos con zanahoria, y frutas en Brasil, España y Chile. (Arisseto et al., 2010) (Altaki et al., 2017) Chile (Mariotti et al., 2013)

Producto	País	Media Furano ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )
Zanahoria	Brasil	23,8
Zanahoria, papas, arroz, raíz de remolacha, frijol (Brasil)	Brasil	77,4
Crema de vegetales con pasta (zanahoria, cebolla, frijol verde, guisante)	España	29
Alimento para bebés (frutas) en frasco	Chile	8,5

Tabla 6. Media, máximos y mínimos valores de concentración de furano por grupo de comida. (Pugajeva et al., 2016)

Grupo de comida de bebé	Media ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )	Min-Max ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )
Frutas	6,2	0,45 - 12,2
Vegetales	55,5	29,1 – 81,9
Mix de frutas y vegetales	33,2	27,6 – 38,8
Carne y vegetales	31,2	4,5 – 52,7
Pescado y vegetales	44,6	23,5 – 51,5
Cereales (con leche o frutas)	12,6	8,7 – 16,5

\*Datos en 5 g de Muestra

## Esterilización

### Que es

Corresponde a la completa eliminación de organismos en el producto alimenticio. La esterilización elimina levaduras, mohos, bacterias vegetativas, esporas, permitiendo que los productos se distribuyan a temperatura ambiente, con una larga vida útil (CRC Press, 2007).

El proceso de esterilización consiste en 4 etapas. Primero, el producto es calentado a una temperatura entre 110 – 125 °C para asegurar la esterilización. Segundo, el producto requiere algunos minutos para equilibrarse, debido a que la superficie es más caliente que el centro, causando un gradiente de temperatura. Tercero, el producto se mantiene a la temperatura elegida por un cierto periodo de tiempo para asegurar la esterilización en base al valor de  $F_0$  (tiempo requerido a una temperatura de 121°C, para reducir la población microbiana presente en un alimento hasta un nivel deseado) designado. Finalmente, el producto es enfriado (CRC Press, 2007).

Como resultado de este proceso, los alimentos esterilizados poseen una duración de 6 meses a temperatura ambiente. (Fellows, 2002).

Los principios básicos de la esterilización aplicados al procesamiento de alimentos consisten en (CRC Press, 2007).

- El producto procesado debe estar libre de microorganismos capaces de producir toxinas que causen envenenamiento, o aquellos microorganismos que reducen la vida útil del alimento, hasta que sea consumido.
- Las esporas de *Clostridium Botulinum* son capaces de crecer en productos de baja acidez (pH > 4,6) durante el almacenamiento, por lo que se realizan tratamientos térmicos equivalentes a 121,1 °C por 3 min.
- Las condiciones de proceso debiesen ser aplicadas al menor punto calorífico referido como “punto frío”. Esto facilita la suposición de que, cuando la parte menos caliente está esterilizada, al ser expuesta al tiempo requerido, el resto del producto estará esterilizado a su vez.

## Liofilización

### Que es (Descripción del proceso)

Corresponde a un proceso de deshidratación por medio de la sublimación del hielo contenida en el producto a secar, logrando retirar entre un 95 – 99% de la humedad en el producto (superficial y ligada), generando un producto que puede ser mantenido por largos periodos de tiempo (Hua et al., 2010).

Este proceso aprovecha el uso del punto triple del agua (6,13 mbar; 0,01 °C), donde se encuentran los estados sólido, líquido, y gas en equilibrio. Si la presión de vapor es menor a la del punto triple, y el agua está congelada, al calentar el alimento el hielo sublima directamente a vapor (Fellows, 2002).

En el caso particular de los alimentos, este tipo de secado ofrece al alimento una notable mejora con relación a sus propiedades organolépticas finales, a comparación de los tipos de secado convencionales, como sería la mantención del color, olor y sabor frescos; previene la pérdida de ingredientes nutricionales y el endurecimiento de la superficie (Hua et al., 2010).

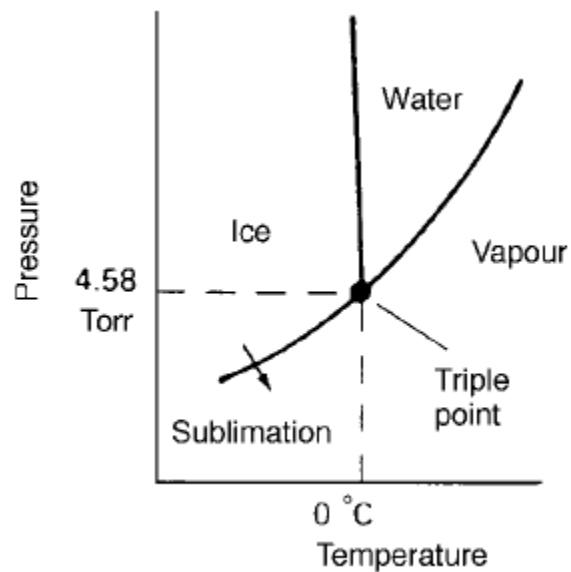


Figura 4. Diagrama Punto Triple del agua. (Fellows, 2002)

### Etapas del proceso

#### Congelación

La etapa de congelación, previa al secado, es crucial para el proceso, debido a que en esta se basa la posterior calidad del alimento y de la cual depende directamente el tiempo de secado. Esta se puede realizar en el mismo liofilizador (condensador interno), o de forma externa, en un congelador. La congelación realizada consigue cristalizar un 90 – 95% del agua para materiales biológicos, el resto corresponde a agua ligada al alimento, que no cristaliza (Orrego-Alzate, 2008).

En el caso de alimentos, esta etapa inicia con un descenso aproximadamente lineal hasta el punto de fusión de la mezcla, generalmente menor al punto de fusión del agua pura (0 °C), produciéndose

además el cambio de fase a una temperatura variable, desde este punto se generan los cristales de hielo puro. Al continuar el descenso de temperatura, comienzan a producirse cristales de soluto (alimento), llegando así a un punto de equilibrio entre ambos, también llamado punto eutéctico en sólidos con forma definida; en el caso de los sólidos amorfos este punto eutéctico no se genera, en cambio se produce la temperatura de transición vítrea (Depaz et al., 2016). A este tipo de congelación con una zona de cambio de estado definida se le llama “congelación lenta”.

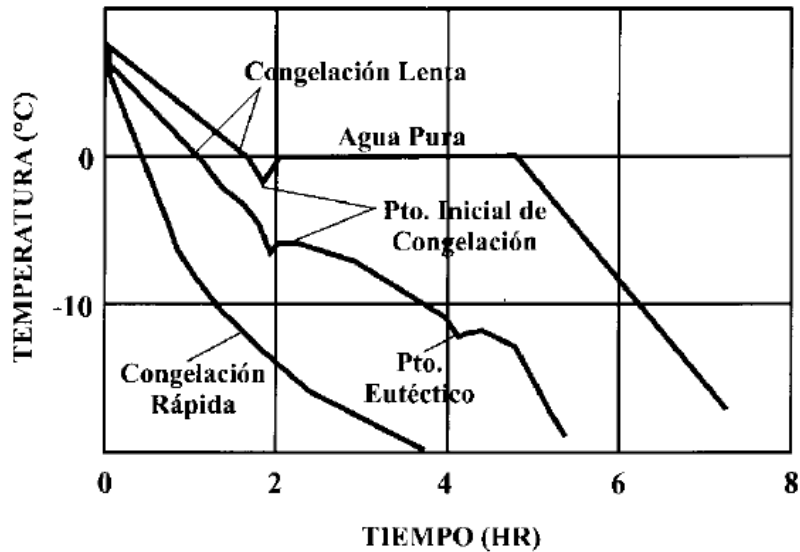


Figura 5. Visión esquemática de los procesos de congelación de una sustancia pura (agua) y un alimento, a dos velocidades de congelación. (Orrego-Alzate, 2008)

Para una buena congelación, la temperatura final de congelación debería ser menor a la temperatura del punto eutéctico o menor a la temperatura de transición vítrea (Hua et al., 2010). Al operar en estas temperaturas, se evita un daño estructural por parte del alimento. La temperatura de transición vítrea corresponde a al punto donde el material pasa a ser un sólido amorfo, reduciendo la movilidad del agua con cristalizada en el alimento (Roos, 2010).

En figura 6 se presenta el avance de la temperatura durante la congelación (Government College for Women Ghandi Nagar, 2018) (Fellows, 2002).

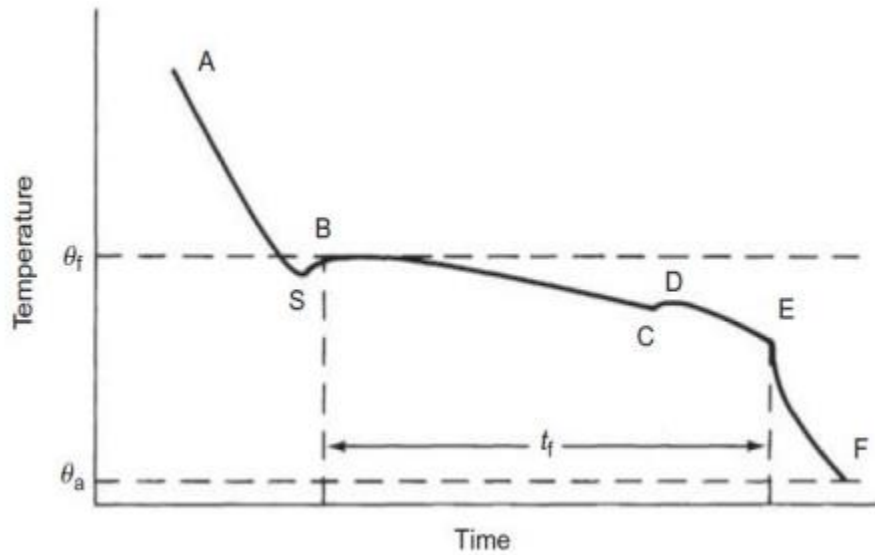


Figura 6. Diagrama Temperatura vs Tiempo durante congelación. (Government College for Women Ghandi Nagar, 2018) (Fellows, 2002).

En el punto:

- A-S, el alimento es enfriado bajo su temperatura inicial de congelamiento  $\theta_f$ , la cual es generalmente menor a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el punto S el agua se mantiene líquida, a pesar de estar a temperaturas bajo el punto de fusión del agua. Aquí ocurre el sobreenfriamiento, fenómeno donde se produce la nucleación de los cristales de hielo.
- S-B, la temperatura aumenta rápidamente al punto de fusión a medida que se generan los cristales y se libera el calor latente de cristalización.
- B-C, el calor latente es removido mientras se generan los cristales, por lo que la temperatura se mantiene constante en el punto de fusión. El punto de fusión decrece a medida que aumenta la concentración de soluto no congelado.
- C-D, El soluto se vuelve supersaturado y comienza a cristalizar. Se libera calor latente de cristalización y la temperatura aumenta al punto "eutéctico".
- D-E, Continúa la cristalización de agua y solutos.
- E-F, se continúa la cristalización hasta llegar a la "temperatura de transición vítrea" para alimentos amorfos, en este punto el alimento pasa de tener características similares a un líquido viscoelástico, a un sólido vídrioso.

La forma en que se producen los cristales es de suma importancia, debido a que influye directamente en la etapa de secado, específicamente debido a la velocidad de congelación del producto, siendo el parámetro que diferencia una congelación de tipo rápida a una de tipo lento, si supera o no el valor de  $1\left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}\right]$  (Orrego-Alzate, 2008).

- **Si la congelación es rápida** (mayor a  $1\left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}\right]$ ), se producen muchos cristales pequeños y su estructura es más densa. Genera un menor daño a la membrana celular y a las proteínas del alimento, la capacidad de rehidratación es mejor. Sin embargo, hay una mayor resistencia a la difusión del vapor por los poros del alimento.

- **Si la congelación es lenta** (menor a  $1 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right]$ ), los cristales producidos son de mayor tamaño, dañando la estructura del alimento. Sin embargo, se favorece la liofilización, teniendo una menor resistencia a la difusión del vapor, disminuyendo el tiempo de secado del proceso.

En el caso de alimentos líquidos, se usa la congelación lenta para formar una red cristalina, la cual provee canales para el movimiento del vapor de agua (Fellows, 2002).

Si bien una congelación rápida es mejor para un proceso de congelación, para una liofilización es preferible una congelación lenta, debido a que reduce el tiempo de secado del proceso, reduciendo así los costos asociados que este tipo de secado conlleva.

#### *Secado Primario*

Etapa siguiente a la congelación, donde se produce el secado por sublimación del agua libre congelada en el alimento, donde se logra un secado de entre un 75 – 90%. Esto se produce debido a que se trabaja operando bajo el punto triple del agua (6,13 mbar; 0,01 °C); para trabajar en estas condiciones la cámara de secado debe calentarse hasta una temperatura determinada, mientras que una bomba opera para remover el vapor generado continuamente; el calentamiento de la cámara se puede dar por conducción, por radiación, o por ambos. Al cumplirse estas 2 condiciones de operación, en el producto se genera una interfaz, o “frente de sublimación” que avanza a través del producto, separando la zona seca porosa de la zona congelada, a medida que el proceso se desarrolla, esta capa porosa funciona como resistencia a la salida del vapor del producto, ralentizando el término del secado primario. Debido a esto, el secado primario corresponde a la etapa de mayor duración. Se ha reportado que la elevación de la temperatura del producto en 1 °C puede reducir en un 13% el tiempo de proceso de esta etapa, sin embargo, se debe tener cuidado de no llegar a la temperatura máxima permitida (Orrego-Alzate, 2008) (Hua et al., 2010) (Gaidhani et al., 2015).

Se distinguen 2 sub-etapas del secado primario (Orrego-Alzate, 2008):

- Fase 1: Etapa conductiva, inicio del proceso donde la velocidad de sublimación crece hasta llegar a un máximo. Dura aproximadamente entre un 10 y un 15% del tiempo total del proceso.
- Fase 2: Etapa difusiva, descenso de la velocidad de sublimación producido por la capa porosa seca generada, ofreciendo resistencia al flujo de calor y al vapor en el alimento.

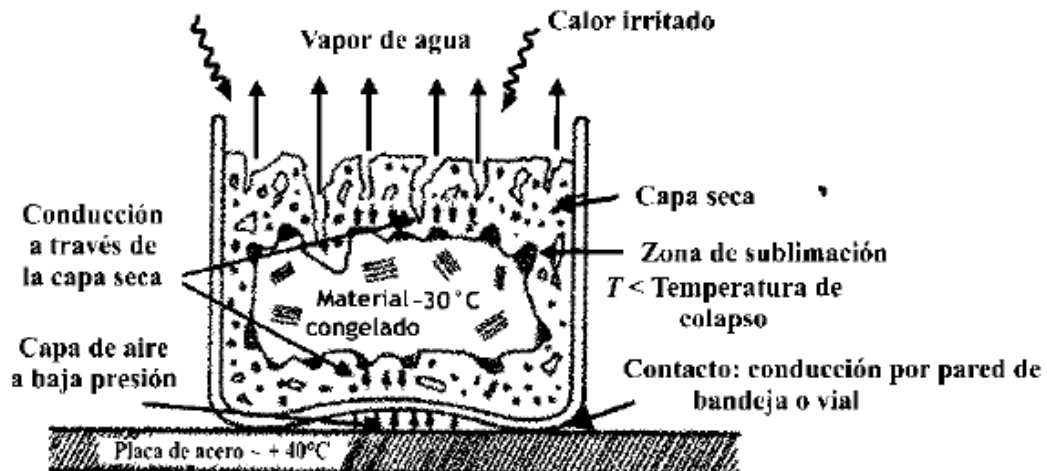


Figura 7. Imagen ilustrativa de alimento en etapa de secado primario. (Orrego-Alzate, 2008)

Algunas consideraciones para tener en cuenta para esta etapa son:

- La temperatura objetivo en la cámara debe ser al menos 2 – 3 °C menor a la temperatura máxima permitida. Esta puede ser la temperatura de transición vítrea para sólidos amorfos, o la temperatura del punto eutéctico; al superar esta temperatura se produce un colapso estructural, impactando la estabilidad de las proteínas, el tiempo de reconstitución, entre otros (Depaz et al., 2016).
- Se debe suministrar un flujo de calor variable, según se requiera durante la operación, de lo contrario el producto se calentará, superando la temperatura máxima permisible.

#### Secado Secundario

A pesar de haber retirado completamente el hielo, aún queda agua ligada al producto, al menos un 7 – 8 % de humedad. Por esto se requiere una segunda etapa de secado a mayor temperatura y el mínimo posible de presión, así mismo, porque requiere de mayor energía para remover esta agua ligada. Esta etapa suele llamarse “Desorción Isotérmica”. El secado secundario se realiza generalmente a temperaturas mayores que el secado primario, pero menores a la temperatura máxima permisible, siendo para el caso de los vegetales 60 – 70°C, o temperaturas mayores. Al terminar esta etapa la humedad remanente final debiese ser menor a un 5%. Este proceso dura aproximadamente 1/3 o 1/2 del tiempo requerido por el secado primario (Hua et al., 2010) (Gaidhani et al., 2015).

#### Fin del Secado Primario

Existen distintas maneras de comprobar el fin del secado primario, como las que se mencionan a continuación (Gaidhani et al., 2015):

- **Medición comparativa de presión** (entre sensor Pirani vs Capacitivo): La cámara de presión es controlada por un manómetro de capacitancia, que mide la presión absoluta de la cámara de secado. Mientras que el sensor Pirani mide la conductividad térmica del gas en la cámara de secado. El sensor Pirani es capaz de medir con un 60% de exceso respecto al sensor

capacitivo durante el secado primario, donde el total del gas en la cámara corresponde a vapor de agua. Esto se debe a que la conductividad térmica del vapor de agua es 1,6 veces mayor a la conductividad térmica del nitrógeno. Gracias a esto, el sensor Pirani puede ser usado para medir el fin del secado primario. El punto donde la presión medida por el sensor Pirani comienza a disminuir con fuerza indica que la composición del gas cambia de vapor de agua a Nitrógeno, por ende la sublimación ha llegado a su fin.

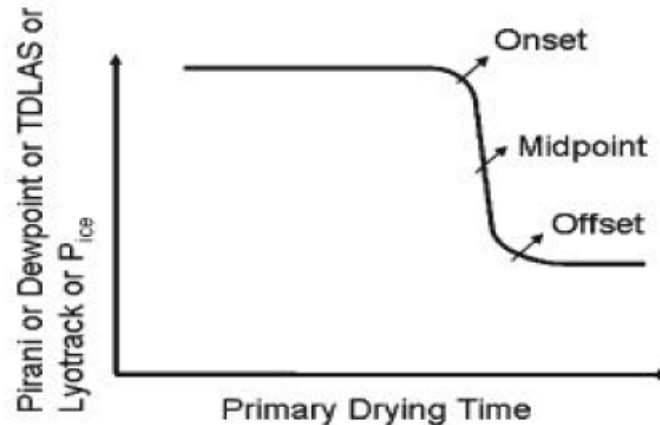


Figura 8. Detección fin de secado primario por comparación de sensores Pirani y Capacitivo, y demás métodos. (Gaidhani et al., 2015)

- **Presión del condensador:** Durante el secado primario como la mayor parte del gas en la cámara es vapor de agua, y como hay un flujo de vapor alto, existe una diferencia de presión considerable entre la presión de la cámara de secado y la presión del condensador. Esta diferencia de presión decrece a medida que se acerca el fin del secado primario; donde el punto en el que la presión del condensador aumenta mientras que la presión de la cámara de secado se mantiene constante, debido a que la transferencia de masa del proceso (salida del vapor) ha finalizado. Esto se lee con un manómetro de capacitancia instalado en el condensador.
- **Test de aumento de presión:** Método donde se aísla la cámara de secado del condensador por un breve periodo de tiempo ( $\approx 25$  s) y se analiza el aumento de presión. Este análisis se muestra el vapor de hielo en el frente de sublimación, la temperatura del producto, y la resistencia a la transferencia de masa del producto seco. Sin embargo, esto solo se da para el secado primario, debido a que no hay aumentos de presión debidas a que se eliminó todo el hielo durante esta etapa, por lo que la presión de vapor de hielo es igual a la presión de la cámara, si se vuelve a realizar este test.
- **Temperatura del producto durante secado primario:** En caso de que el sensor de temperatura usado representa el bien el perfil de secado dentro del producto. La temperatura del producto aproximándose a la temperatura del plato de la cámara de secado es un indicador del fin del secado primario.

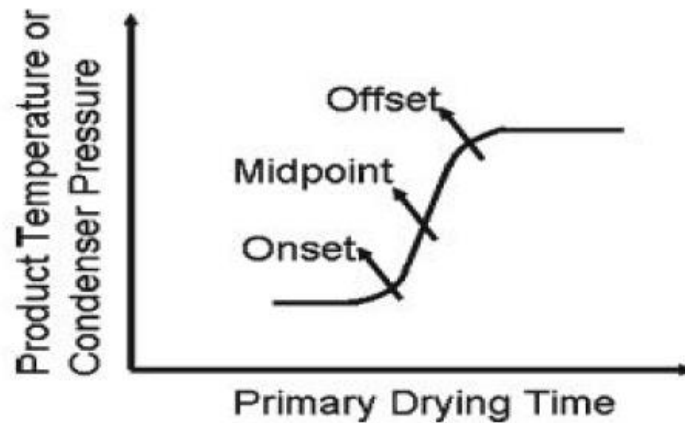


Figura 9. Diagrama indicador Fin de Secado primario por temperatura de producto. (Gaidhani et al., 2015)

- **Monitoreo del punto de rocío (con sensor electrónico de humedad):** Con un sensor electrónico de humedad se puede medir el punto de equilibrio entre la presión de vapor y la presión parcial del líquido. La medición se basa en la detección de los cambios en la capacitancia de una delgada película de óxido de aluminio dada por la adsorción de agua a una presión parcial determinada. Similar al sensor Pirani, el punto donde disminuye la presión indica el fin del secado primario, debido a que la composición del gas es principalmente nitrógeno.
- **Proceso de concentración de  $H_2O$  desde un espectroscopio de absorción laser personalizable (TDLAS en inglés):** El TDLAS mide directamente la concentración de vapor de agua  $\left(\frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^3}\right)$  en el tubo que conecta la cámara de secado con el condensador. Este equipo trabaja bajo principios de espectroscopia donde absorbe la radiación del vapor de agua para monitorear la concentración de este en tiempo real. El punto donde la concentración desciende bruscamente indica el cambio de la composición del gas, indicando así también el fin del secado primario.
- **Espectroscopia de gas por plasma:** Instrumento de monitoreo online, basado en espectrometría de emisión óptica donde mide la concentración de vapor de agua durante el proceso de secado. Las longitudes de onda de la luz emitida entregan formas características para la identificación del átomo o molécula. El punto en que la concentración de vapor de agua comienza a descender bruscamente, indica que la composición de gas está cambiando, determinando que la etapa de sublimación ha finalizado.

## Comparativa (Ventajas /Desventajas)

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas del proceso de liofilización:

Tabla 7. Comparación ente ventajas y desventajas del proceso de Liofilización. (Gaidhani et al., 2015)

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Sustancias oxidables se mantienen protegidas bajo condiciones de vacío.	Componentes volátiles pueden ser removidos por bombeo fuerte.
Largos periodos de preservación debido al 95-99,5% de remoción de agua.	Operación unitaria muy costosa.
Poca contaminación debido al proceso aséptico.	Problemas de estabilidad asociados con algunas drogas.
Mínima pérdida de químicos volátiles, nutrientes sensibles al calor y componentes fragantes.	-
Cambios mínimos en propiedades debido a crecimiento microbiano y efectos enzimáticos no se aplican por bajas temperaturas.	-
Transporte y almacenamiento a temperatura ambiente.	-
Tiempo de reconstitución rápido.	-
Constituyentes del material seco se mantienen homogéneamente dispersos.	-
Esterilidad del producto puede ser lograda y mantenida.	-

## Parámetros importantes en liofilización

### *Temperatura de transición Vítreo (Tg)*

Referido al paso de un estado amorfo con una estructura molecular desordenada y una posición no definida en sus moléculas a algún tiempo determinado, a un estado sólido no cristalino que retiene el desorden previo a su congelación. Siendo un estado reversible y ocurriendo en un rango de temperaturas, cuando un producto se encuentra sobre este punto vítreo, se encuentra en el punto de subenfriado donde las moléculas poseen movilidad, mostrando un estado similar a un líquido con una apariencia viscosa. Bajo el punto de transición vítrea (Tg) el material amorfo pasa a un

estado sólido, transparente típico del estado vítreo. La formación de este estado en alimentos ocurre por (Roos, 2010) (Orrego-Alzate, 2008):

- La separación del hielo en una fase sólida dispersa.
- El descenso de temperatura y el aumento de la viscosidad en la fase no congelada. A medida que la fase congelada se acerca a un punto de alta concentración de sólidos y alta viscosidad, disminuye la tasa de cristalización del agua, hasta que finalmente cesa. **Roos & Karel (1991)** sugieren que la viscosidad en la que la formación de hielo cesa es a  $10^7 Pa \cdot s$ .

Además, en términos cinéticos la temperatura vítrea se define cuando un material alcanza un rango de viscosidades entre  $10^{10} - 10^{14} Pa \cdot s$  (Orrego-Alzate, 2008).

La transición vítrea corresponde a una de las características físico-químicas más importantes de los sólidos amorfos no cristalinos, responsable del procesamiento, estabilidad, y calidad de alimentos (Roos, 2010). Por ende, se estima que, durante el secado primario, la temperatura del producto debe mantenerse bajo 2 – 3 °C de la temperatura de transición vítrea, o se produce colapso estructural del producto, es decir, la estabilidad del alimento está estrechamente relacionada a este parámetro (Depaz et al., 2016). En el caso particular de las zanahorias, la temperatura de transición vítrea se encuentra a -25,5 °C (Hua et al., 2010).

La temperatura de transición vítrea se ve afectada por la humedad en el alimento, sin embargo, la presión aplicada no genera cambios significativos, aumentando en 1 °C por cada 50 bar presión (Hua et al., 2010) (Gangatirkar, 2021).

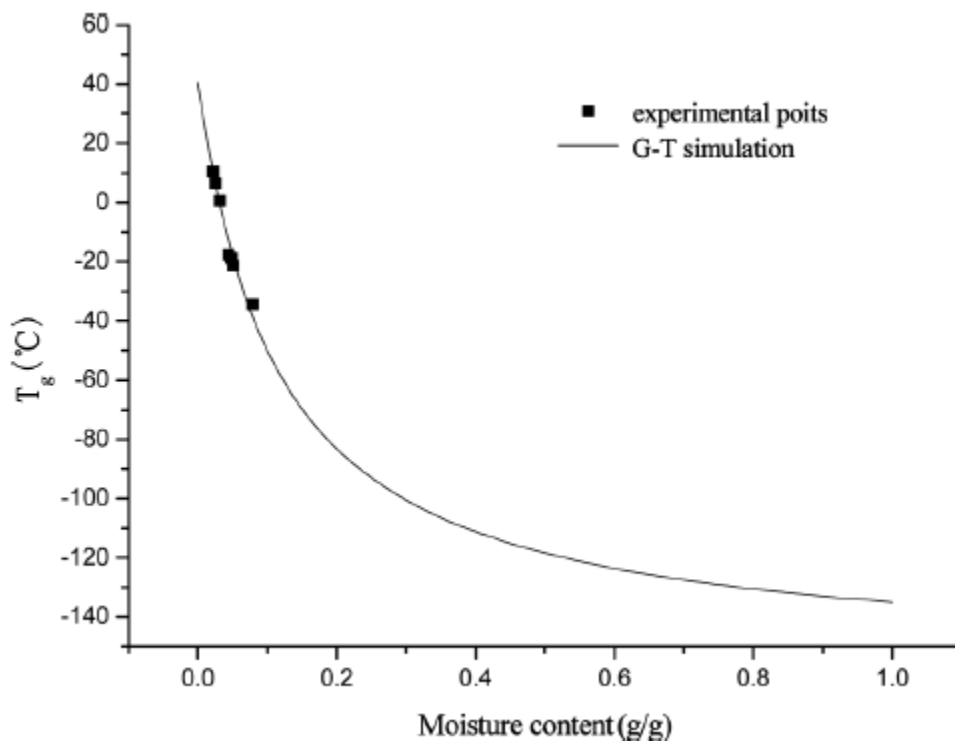


Figura 10. Diagrama Contenido de humedad vs Tg en chips de zanahoria. (Liu-Ping et al., 2007)

### Rehidratación del alimento

La rehidratación del alimento liofilizado es fácil y rápida de realizar, esto debido a los poros formados por la zona seca luego de sublimar (Hua et al., 2010). Corresponde, además, al parámetro de calidad más evaluado en la literatura, dado pues que ningún producto seco puede tener buena calidad a menos que su rehidratación sea aceptable, siendo entre un 80 y 90 % (Meda & Ratti, 2005) (Marques et al., 2009).

La tasa de rehidratación de alimentos liofilizados es en general 4-6 mayor que en alimentos secados por aire, aumentando esta tasa de rehidratación a medida que aumenta la temperatura (Lin et al., 1998) (Meda & Ratti, 2005).

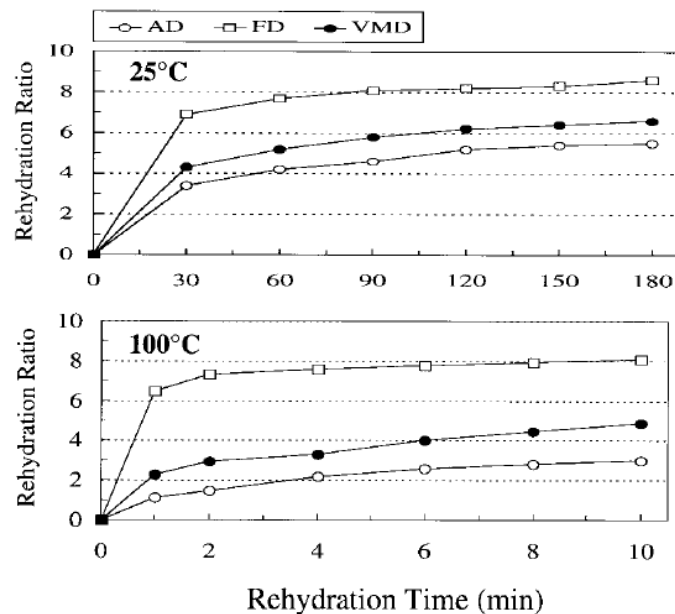


Figura 11. Curvas de Rehidratación de secado en aire (AD), secado por microondas en vacío (VMD) y liofilización (FD) en rodajas de zanahoria a 25 °C y 100 °C. (Lin et al., 1998)

### Sensor de Fibra Óptica Tipo Fiber Bragg Grating (FBG)

Que es

La fibra óptica es un filamento cilíndrico hecho de vidrio, capaz de guiar la luz por el montaje de tres regiones con diferentes índices refractivos. Debido a que el revestimiento es de un menor índice refractivo, el haz de luz atrapado en el interior de la fibra óptica y es guiado a través de la fibra vía reflexión total interna (Kasper, Wiggenghorn, et al., 2013).

En particular el FBG, corresponde a un tipo de sensor de la fibra óptica donde las rejillas de Bragg son distribuidas en un segmento corto de esta, que refleja un tipo particular de longitud de onda y transmite todas las demás. Esta rejilla se genera a través de la modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra. La longitud de onda en las rejillas de Bragg es sensible a la deformación y la temperatura, ideales para registrar los cambios de temperatura en un alimento (Othonos et al., 2006) (Bai & Bai, 2014).

El sensor tipo FBG es una tecnología comercialmente popular debido a sus distintos usos, como dispositivos médicos, componentes para estructuras de aeronaves, aplicaciones militares, entre otros. (Othonos et al., 2006) (Bai & Bai, 2014).

#### Relación con liofilización

Al ser la temperatura del producto el parámetro principal de la liofilización es de vital importancia tener un sistema que monitoree el perfil de temperaturas en el producto. Estudios de (Horn & Friess, 2018) muestran que con un sensor de fibra óptica se detecta la temperatura de colapso en sistemas amorfos.

Otra razón viene dada por el uso recurrente de termocuplas tipo T, las cuales, si bien son capaces de leer un valor de temperatura, esta es puntual y no es capaz de mostrar un perfil del cambio de temperatura en el producto, así como además tiene un emplazamiento invasivo, una baja resolución (cercana a 0,1 °C), riesgo de corrosión (Kasper, Winter, et al., 2013).

## Materiales y Método

### Metodología General

Se realiza en primera instancia un procedimiento estándar de preparación del puré de zanahorias, por lo que se realizan cortes de rodajas cilíndricas de zanahoria, y pruebas de textura y viscosidad. Así se tiene un tiempo de cocción estándar, y una cantidad de agua adicional estándar para los experimentos posteriores. Se realizan además pruebas de humedad de las rodajas de zanahoria crudas, en triplicado, tal como se presenta esta descripción en figura 12.

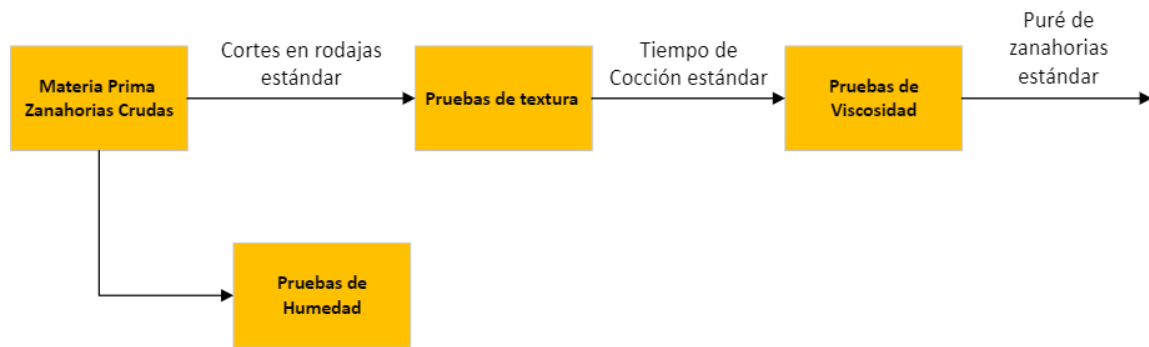


Figura 12. Desarrollo de pruebas para estandarización de puré de zanahoria. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo la preparación del puré estandarizada, se procede a conocer el tiempo necesario de congelación, para llegar a una temperatura entre  $-25 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obtenido este tiempo, se procede a realizar una liofilización de 72 horas, a una temperatura de plato  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a una presión de  $0,1\text{ mbar}$ , con el arreglo de fibra óptica. Así se obtiene el perfil de temperaturas necesarias para determinar un tiempo de fin de secado primario. Además, se realizan pruebas de humedad en el puré de zanahorias, en triplicado, tal como se presenta esta descripción en figura 13.

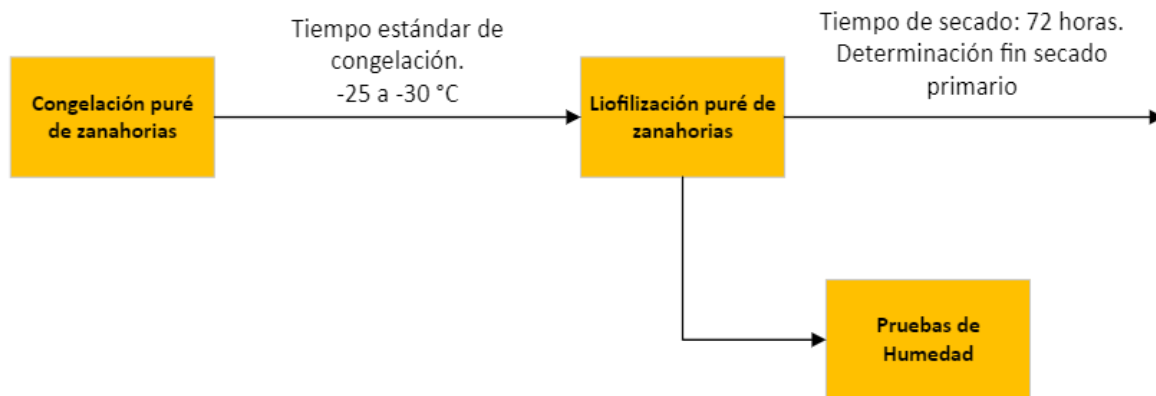


Figura 13. Desarrollo de preparación de puré de zanahorias liofilizado. Fuente: Elaboración propia.

Con el puré de zanahorias liofilizado, se realiza el análisis de cantidad de furanos en un cromatógrafo de gases. Además, se le realizan las pruebas de humedad al puré liofilizado, en triplicado, tal como se presenta esta descripción en figura 14.

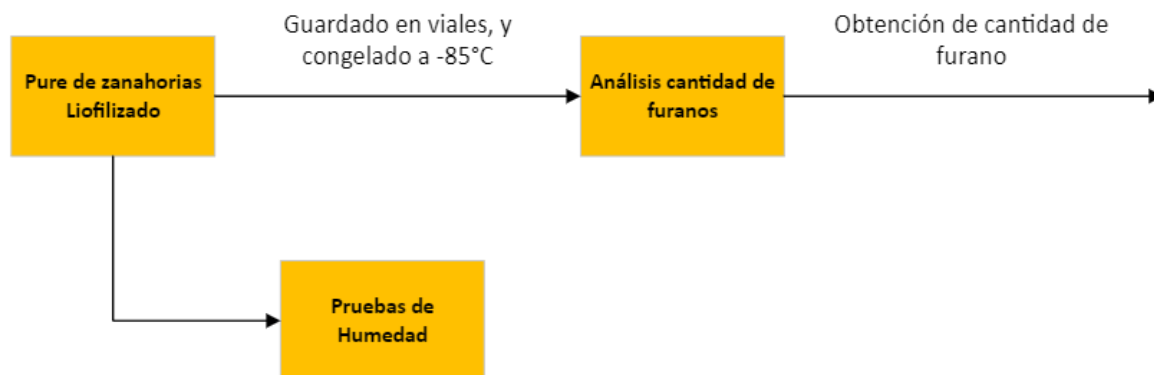


Figura 14. Desarrollo de análisis de pruebas de furano en puré de zanahorias liofilizado. Fuente: Elaboración propia.

## Método y Equipos utilizados

### Materia Prima

La materia prima utilizada corresponde al paquete de 1 kg de zanahorias de Huertos Carolina, compradas desde supermercado Jumbo, Valparaíso. Estas cuentan con el tamaño y la calidad suficientes para la realización de las pruebas. A continuación, se presenta la información nutricional de estas zanahorias.

Tabla 8. Aporte en nutrientes y minerales de 100 g de zanahoria fresca. (Saavedra Del Real & Kehr Mellado, 2019) (Carrots: Benefits, Nutrition, Diet, and Risks, n.d.).

Nutriente	Unidad	Contenido
Energía	Cal	25
Carbohidratos	g	5,8
Fibra	g	1,7
Mineral	Unidad	Contenido
Calcio	mg	27,24
Fierro	mg	0,47
Yodo	mg	6,53
Magnesio	mg	11,24
Zinc	mg	0,28
Selenio	mg	1,3
Sodio	mg	61,0
Potasio	mg	321,0
Fósforo	mg	19,0

Tabla 9. Aporte en vitaminas y pro-vitaminas en 100 g de zanahoria fresca. (Saavedra et al., n.d.)

Vitamina	Unidad	Contenido
B1 Tiamina	mg	0,06
B2 Riboflavina	mg	0,05
B6 Piridoxina	mg	0,14
Ácido fólico	µg	13,93
Ácido ascórbico	mg	6,48
Carotenoides (eq. a β-carotenos)	µg	8.731,0
A (eq. a Retinol)	µg	1.455,2

#### Preparación de la materia prima

Las zanahorias obtenidas fueron cortadas en rodajas cilíndricas (Ramírez et al., 2022) de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura. Al ser de un diámetro mayor estas rodajas, es necesario conocer el tiempo de cocción para el puré. La masa ideal para el total de rodajas a cortar corresponde entre 170 – 175 g.



Figura 15. Rodajas cilíndricas de zanahoria.

#### Prueba de Textura

La prueba de textura tiene como finalidad determinar un tiempo de cocción estándar para las rodajas de zanahoria de 25x15 mm, esto dado en base a la diferencia de fuerza necesaria para lograr el 30% de deformación de la rodaja.



Figura 16. Rodajas de zanahorias en agua fría, posterior a cocción.

El texturómetro utilizado para los análisis de textura corresponde al modelo **CT3-50 KG Brookfield Texture Analyzer**, controlado a por el software **Texture Pro CT v1.2** donde se indican los parámetros necesarios para la toma de datos, indicados en tabla 9, entregando las mediciones de dureza necesarias.



Figura 17. Texturómetro CT3-50 KG Brookfield Texture Analyzer.

Las rodajas de 25x15 mm fueron puestas en agua destilada a temperaturas entre 90 – 95 °C (Vu et al., 2004a) para ser retiradas a distintos tiempos: 10, 20, 30, 40, y 50 minutos. Luego, cada rodaja es colocada en agua destilada a 12 - 10 °C por 2 minutos (Vu et al., 2004a).

El análisis de textura se realizó bajo las siguientes condiciones:

Tabla 10. Parámetros de ingreso a Software de Texturómetro. (Vu et al., 2004b) (Franco et al., 2019).

Sonda	TA4/1000
Velocidad Test	1 mm/s
% Deformación	30 %
Carga Activación	0,1 N

Se realizaron pruebas en triplicado bajo las condiciones presentadas.

#### Prueba de Viscosidad

Se realizaron pruebas de viscosidad para 115 g de puré de zanahoria, para lo cual se usaron 130 g de zanahoria iniciales, a un tiempo de 5 minutos de molienda de las rodajas de zanahorias, en una mini- pymer marca Oster. El viscosímetro utilizado es tipo Visco Star, marca Fungi Lab. Se utilizó un huso n° 5 de 2 cm, y una velocidad de 5 rpm, una temperatura aproximada de 30 °C, se necesita obtener un valor cercano de viscosidad de literatura, correspondiente a 19.325,91 cP (Virues-Delgadillo Jorge-Octavio et al., 2017). Este valor objetivo de viscosidad se obtiene variando la cantidad de agua agregada al puré, a un tiempo de 5 minutos de molienda en la mini – pymer, como se mencionó anteriormente.

El valor de viscosidad objetivo es obtenido mediante la utilización de la ecuación de Arrhenius bajo los parámetros presentados en (Virues-Delgadillo Jorge-Octavio et al., 2017).

$$k(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Donde los parámetros son los siguientes, para una velocidad de 0,52 (1/s) equivalente a los 5 rpm, y un huso número 5 (2,1 cm).

Parámetro	Valor
A (Pa*s)	0,104
E (J/mol)	-13.032,195
R (J/mol*K)	8,314



*Figura 18. Puré de zanahoria previo a agregado de agua.*



*Figura 19. Viscosímetro Visco Star.*

## Congelación

La congelación se realizó en el equipo ultracongeladora (marca **ALASKA**, modelo **MT 05**) de refrigeración industrial, el cual fue operado a una temperatura de  $-40$  [°C].



Figura 20. Ultracongeladora, modelo MT 05.



Figura 21. Puré de zanahoria congelado.

En primera instancia se pretende lograr una temperatura de -18 °C en 115 g de puré de zanahorias, la temperatura elegida se debe a que en este punto se inhibe el crecimiento microbiano en su totalidad, y ambos cambios enzimáticos y no enzimáticos continúan a velocidad mucho menores en los periodos de almacenamiento a estas temperaturas. (CRC Press, 2007). Además, a esta temperatura la fracción de hielo en el alimento es prácticamente constante, según la ecuación empírica propuesta por Tchigeov (1979) que cuantifica la fracción de hielo en el alimento congelado, donde  $X_{Hielo}$  es la fracción de hielo final,  $X_{H_2O, inicial}$  es la cantidad de agua inicial del alimento,  $t_f$  es la temperatura de congelación del alimento,  $t$  es la temperatura del proceso (American Society of Heating, n.d.).

$$x_{Hielo} = \frac{1,105 \cdot x_{H_2O, inicial}}{1 + \frac{0,7138}{\ln(t_f - t + 1)}}$$

Sin embargo, finalmente se opta por tener una temperatura de entre -25 °C a -30 °C, debido a la necesidad de lograr una temperatura menor a la temperatura de transición vítrea de la zanahoria, correspondiente a -25,5 °C (Hua et al., 2010), esto debido a la necesidad de generar el mínimo colapso estructural en el puré.

## Liofilización

El equipo utilizado corresponde al modelo **Alpha 2-4 LSCplus**, marca Christ.



Figura 22. Liofilizador Alpha 2-4 LSCPlus.

Tabla 11. Características del Liofilizador.

<b>Capacidad condensador</b>	<b>4 [kg]</b>
<b>Temperatura condensador</b>	<b>-85 [°C]</b>
<b>Método</b>	<b>Doble cámara</b>
<b>Controlador</b>	<b>LSCplus</b>
<b>N° máximo de platos</b>	<b>5</b>
<b>Diámetro de plato</b>	<b>200 [mm]</b>
<b>Superficie total de plato</b>	<b>0,155 [m<sup>2</sup>]</b>
<b>Distancia entre platos</b>	<b>25 [mm]</b>

El liofilizador cuenta con las siguientes secciones:

- Cámara de liofilización: Sección donde se produce la liofilización, las muestras son colocadas en un plato propio del equipo, sellado casi herméticamente y con una salida de gases hacia el condensador para que se logre operar bajo las condiciones requeridas.

- Condensador: En esta sección se realiza la preparación previa del equipo a su utilización, llamada precalentamiento o “warm-up”. Disminuyendo la temperatura a  $-85^{\circ}\text{C}$ , al término de 15 minutos el equipo se encuentra listo para operar. Luego de iniciada la liofilización, esta sección funciona como una zona de condensación de los vapores retirados de la cámara de liofilización.
- Bomba de vacío: Bomba utilizada para producir las bajas presiones necesarias que logran producir la sublimación del vapor, mediante el retiro de este y demás gases que se liberan del producto liofilizado en la cámara de liofilización.

El programa utilizado para el ingreso de parámetros y toma de datos del liofilizador corresponde a LCSplus Version 1.5.1.7.0. Los parámetros necesarios son: temperatura del plato, presión de la cámara, tiempo de operación.



Figura 23. Software LCSPlus Versión 1.5.1.7.0.

Luego de realizada la congelación, el secado primario se ejecuta en el equipo Alpha 2-4 LCSplus, a una presión de 0,1 [mbar], una temperatura de plato de  $30^{\circ}\text{C}$ , y un tiempo de 72 [horas] (Hua et al., 2010). Como este equipo no solo avisa el periodo de tiempo de liofilización, el proceso debe terminar de forma manual.

Se realizaron pruebas de determinación de secado primario a un tiempo total de 72 horas de secado. Luego se realizaron pruebas a distintos tiempos de proceso de 18, 48 horas.



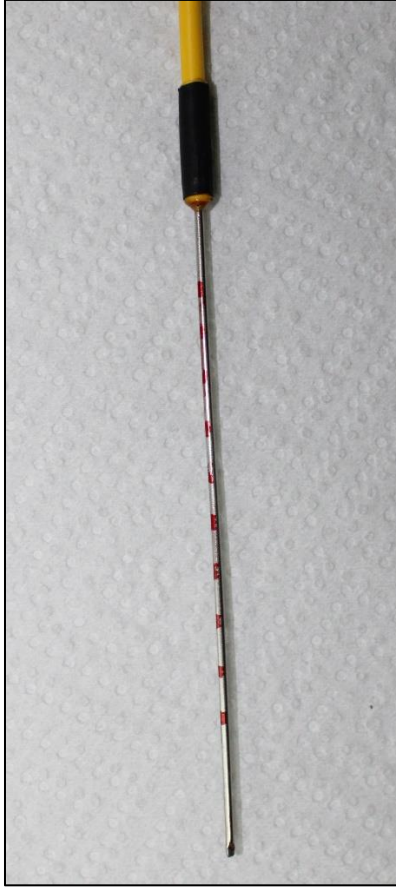
Figura 24. Puré de Zanahoria liofilizado a 72 horas de proceso.

#### Toma de datos de temperatura

Se realizó un arreglo al puré de zanahoria con la fibra óptica tipo FBG (marca TECHNICA S/N: 101082209018) en sentido vertical, con el fin de determinar la temperatura cada 3 mm por los 6 cm donde se encuentran los sensores (líneas rojas marcadas) la fibra óptica es capaz de tomar hasta 10 datos al mismo tiempo. se introdujo la fibra óptica hasta los puntos señalados, como se indica en figura 25, donde se observa la temperatura medida en los sensing spot (zonas donde aparecen los números) y de esta manera estimar el avance del frente de sublimación.



Figura 25. Imagen ilustrativa de fibra óptica y cilindro contenedor de puré de zanahorias. Fuente: elaboración propia.



*Figura 26. Sensor de Fibra óptica.*

La información obtenida por la fibra es transformada por el interrogador marca HYPERION, que entrega los valores de temperatura deseados a través del programa ENLIGHT.



*Figura 27. Interrogador de Fibra Óptica.*

### Determinación fin del Secado Primario

Según literatura, se puede tomar como indicador de fin del secado primario la zona en la que se acerca a la temperatura de plato. Incluso en viales monitoreados por termocuplas, se observa el fin del secado primario poco después del punto inicial de ascenso de la curva (Patel et al., 2010), por lo que el fin del secado primario se encuentra en un punto intermedio entre estas 2 zonas.

En el uso de termocuplas, el fin del secado primario se detecta luego de un fuerte aumento en la temperatura, debido a que el calor que se utilizó para la sublimación en esa zona ahora es utilizado como calor sensible (Pisano, 2022).

Debido al arreglo con fibras ópticas utilizado, el método para determinar el fin de secado primario es a través de las temperaturas. Se presupone que al pasar por los 0 [°C] el frente de sublimación ya debiese haber pasado por el punto del sensor.

El diagrama temperatura vs tiempo tiene el comportamiento de una curva sigmoïdal, similar a la de crecimiento microbiano, como se observa en figura 24.

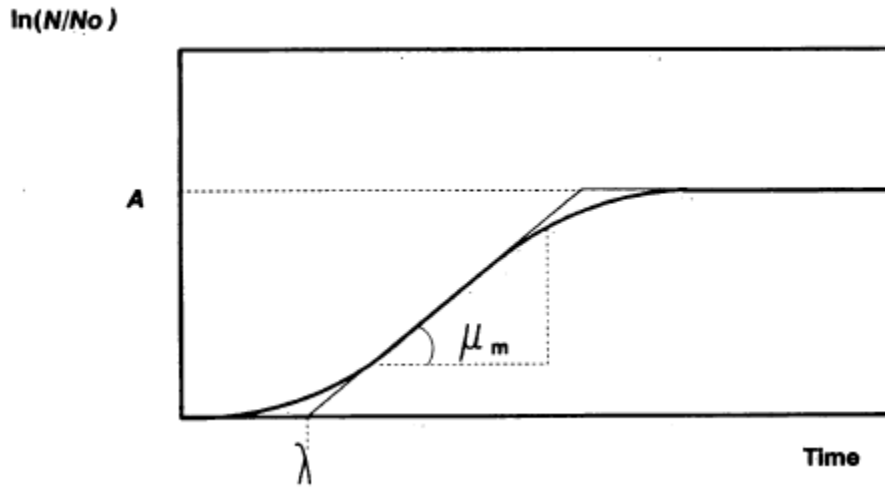


Figura 28. Diagrama curva sigmoïdal de crecimiento bacteriano. (Zwietering et al., 1990).

Los parámetros matemáticos que describen las ecuaciones de crecimiento sigmoïdal son reparametrizados en otros con sentido biológico, o en este caso, con sentido en el secado de un alimento. Donde: " $\mu_m$ " corresponde al valor máximo de la tasa de crecimiento en un periodo de tiempo, dando a su vez un periodo de retraso " $\lambda$ ", finalmente la zona donde la tasa de crecimiento alcanza el valor 0, es decir, la asintota de la curva corresponde a "A" (Zwietering et al., 1990).

Se propone entonces utilizar el modelo de Gompertz, que describe un crecimiento más lento al inicio y al final. Con esto se planea determinar el punto de inflexión en la curva.

$$T(t) = a \cdot \exp(-\exp(b - c \cdot t))$$

Donde a, b, c corresponden a parámetros matemáticos, T es la temperatura del producto, y t corresponde al valor puntual del tiempo en el proceso.

El punto de inflexión, correspondiente a la aceleración del crecimiento de la curva se obtiene con la segunda derivada de la función respecto de t.

$$\frac{dy}{dt} = a \cdot c \cdot \exp[-\exp(b - c \cdot t)] \cdot \exp(b - c \cdot t)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = a \cdot c^2 \cdot \exp[-\exp(b - c \cdot t)] \cdot \exp(b - c \cdot t) \cdot [\exp(b - c \cdot t) - 1]$$

Luego en el tiempo  $t_i$  la segunda derivada es igual a 0, al valor máximo de crecimiento, como se observa a continuación.

$$\frac{d^2T}{dt^2} = 0 \rightarrow t_i = \frac{b}{c}$$

La expresión para la máxima tasa de crecimiento específico puede ser obtenida mediante la primera derivada de la expresión de temperatura, donde además el parámetro  $c$  puede ser arreglado para su obtención.

$$\mu_m = \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_i} = \frac{a \cdot c}{e} \rightarrow c = \frac{\mu_m \cdot e}{a}$$

El tiempo de retraso " $\lambda$ " se define como la intersección de la tangente en el punto de inflexión con el eje de las abscisas.

$$y = \mu_m \cdot t + \frac{a}{e} - \mu_m \cdot t_i \rightarrow 0 = \mu_m \cdot \lambda + \frac{a}{e} - \mu_m \cdot t_i$$

Entonces, utilizando las ecuaciones 4, 5, y 6 se despeja el tiempo de retraso y el parámetro  $b$ .

$$\lambda = \frac{(b - 1)}{c} \rightarrow b = \frac{\mu_m \cdot e}{a} \cdot \lambda + 1$$

El parámetro  $a$  se obtiene cuando el valor de  $t$  se aproxima al infinito, es decir, llega a la asíntota de la curva.

$$t \rightarrow \infty ; A = a$$

Obteniendo y relacionando los parámetros gráficos con los matemáticos, se puede determinar el paso por el frente de sublimación en cada punto de contacto de la fibra óptica con el producto, y además, el fin del secado primario.

Para corroborar este fin del secado primario con el modelo anteriormente descrito, se realizó además un ajuste extra al perfil de temperatura, utilizando el modelo logístico, que posee la siguiente expresión.

$$T(t) = \frac{L}{1 + e^{(-k \cdot (t - x_0))}}$$

Donde  $L$  corresponde a la asíntota superior de la curva,  $k$  corresponde a una constante de crecimiento constante, y  $x_0$  corresponde al punto medio de la curva. En los casos donde la curva tiene forma de una sigmoide, este punto medio corresponde además al punto de inflexión (Peleg, 1996).

El ajuste con el modelo se realizó utilizando un algoritmo en el lenguaje de programación Python.

#### Pruebas de Humedad y rehidratación

Se realizaron pruebas de humedad según la metodología **934.06** de la AOAC (**Association of Official Analytical Chemists**) modificada para utilizarla en zanahorias y polvo (puré liofilizado), con 1g de zanahoria liofilizada, y 5g de zanahoria cruda y puré en una balanza electrónica (Modelo N° JD400-3, capacidad máx 410g) con resolución del orden de milésima, para luego ser almacenados al vacío a una presión menor a 100 mmHg (13,3kPa) utilizando la bomba (modelo DVP – 1ª, 0,015 mmHg – 15 µmHg), para ser guardados en una estufa (marca EQUILAB) a 70 °C en un periodo entre 6 – 18 horas, periodo de tiempo donde la muestra alcanza un peso constante. Las pruebas de rehidratación para el puré de zanahorias liofilizado se realizaron de forma similar, a 1 g de muestra se agregaron entre 10,0 – 10,5 mL de agua, para llegar nuevamente a un 91% de humedad, repitiendo el proceso anteriormente mencionado (Zotarelli et al., 2022).

El cálculo de humedad se realizó en triplicado para la zanahoria cruda, el puré de zanahoria previo a la congelación, al puré de zanahoria liofilizado, y al puré rehidratado (posterior a la liofilización). Siendo el contenido de humedad el cociente entre la masa de agua  $m_{H_2O}$  y la masa total  $m_{H_2O} + m_{seco}$ .

$$\%Humedad = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{seco}} \cdot 100\%$$

#### Determinación de cantidad de furanos

Luego de realizada la liofilización, la muestra es almacenada en una ultra congeladora a -80°C (Marca Haier, Modelo DW-86W100J), con el fin de que el gas no escape en las muestras de puré de zanahoria (Ramírez et al., 2022).

Debido a que se tiene por objetivo realizar una comparación entre la cantidad de furano generada en el proceso de esterilización v/s el proceso de liofilización, se tienen los datos obtenidos de esterilización a distintos tiempos, como se presentan en la siguiente tabla 12.

Tabla 12. Cantidad de furanos para rodajas de zanahoria en proceso de esterilización. (Ramírez et al., 2022) .

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	ng/g de zanahoria
112	75	20
117	30	24
123	25	27

Se realizaron mediciones de la cantidad de furanos a 5g de rodajas de zanahorias crudas, 5g de puré de zanahoria previo a la congelación, y 1g de puré de zanahoria liofilizada. Cada medición se realizó en triplicado, para cada experimento. A continuación, se presenta el protocolo de análisis de furano utilizado por la profesional responsable.



Figura 29. Imagen de cromatógrafo de gases utilizado para los análisis.

#### *Materiales y método*

Se prepara una solución de stock con metanol enfriado, pipeteado a un vial de espacio de cabeza. Luego se agrega furano enfriado al solvente con una jeringa de bloqueo hermético al gas (P/N 007200, SGE, USA) a través del septum del vial. La diferencia en peso es usada para calcular la concentración de la solución de stock de furano en  $\text{mg mL}^{-1}$ . La solución de stock se almacenó a  $-20^{\circ}\text{C}$  por menos de 4 semanas. La solución de trabajo para furano fue preparada de la solución de stock en el mismo día de disolución en agua tipo HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*). Todas las operaciones fueron llevadas a cabo en una habitación a baja temperatura.

#### *Preparación de muestra*

La preparación de la muestra fue llevada a cabo en una habitación mantenida a  $4^{\circ}\text{C}$ . Se pesaron 5 gr de zanahoria cortadas en pequeños trozos e ingresados en viales de espacio de cabeza de 20 mL con un sello de tabique de PTFE (Politetrafluoretileno) /Silicona. Antes de cerrar el vial, se agregan 3 mL de una solución saturada de NaCl la cual además es diluida con agua tipo HPLC para obtener un volumen total de 5 mL. La solución con muestra fue guardada a  $4^{\circ}\text{C}$ , previa al análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS).

La curva de calibración fue preparada desde la solución de trabajo estándar, resultando en una curva de concentración en el rango de  $0 - 40 \text{ ng/g}$  de verdura fresca.

Se tomaron 6 puntos para realizar la curva de calibración generada por un detector que grafica la respuesta versus el peak de cantidad para cada punto estándar. Este procedimiento se realizó en triplicado para cada muestra.

*Análisis en Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS)*

El furano es identificado por un Cromatógrafo de Gases acoplado a Espectrometría de Masas (GC-MS) de espacio de cabeza de microextracción en fase sólida (SPME) (Thermo Scientific Trace GC 1310-PAL, Triplus RSH autosampler) con una columna (15; 0,32 mm i.d., película de 20- $\mu\text{m}$  de grosor: Agilent Technologies, USA). El análisis SPME se llevó a cabo usando una fibra de 50/30  $\mu\text{m}$  tipo DVB/CAR/PDMS.

Se aplicó el siguiente programa de temperatura al horno del Cromatógrafo de Gases: 50 °C por 5 minutos, luego se incrementó a 230 °C a una tasa de 25°C/min por 5 minutos. Como gas corriente se usó Helio a un flujo constante de 1,5 mL/min.

La regresión lineal obtenida de la curva de calibración fue utilizada para determinar la concentración de furano en las muestras procesadas usando el área pico de la tasa de iones.

## RESULTADOS

### Estandarización de puré de zanahorias

#### Textura del puré de zanahorias

Como se mencionó anteriormente, para estandarizar el tiempo de cocción de las rodajas de zanahorias, se realizó una cocción a 10, 20, 30, 40, y 50 minutos. Así, para una deformación de 4,5 mm (30%) se presentan en tabla 13 los resultados de dureza:

Tabla 13. Resultados pruebas de textura rodajas de zanahoria.

Tiempo [min]	Dureza [N]
10	122,31 ± 3,73
20	72,88 ± 3,89
30	47,81 ± 7,97
40	27,16 ± 10,34
50	18,35 ± 8,76

De acuerdo con tabla 13 se observa que el valor de dureza de la rodaja de zanahoria disminuye a medida que aumenta el tiempo de cocción. Así, entre las rodajas de zanahorias cocidas, a partir de los 20 minutos la diferencia de dureza a cada 10 minutos disminuye considerablemente, por lo que se considera que a partir de este tiempo (20 minutos) se termina la cocción de las rodajas.

#### Viscosidad del puré de zanahorias

La cantidad necesaria de agua viene dada por el valor de la viscosidad en el puré, esta además dada por lo obtenido por literatura (Virues-Delgadillo Jorge-Octavio et al., 2017), donde los resultados se observan en tabla 14.

Tabla 14. Resultados prueba de viscosidad de puré de zanahoria.

Prueba	Cantidad de agua agregada (mL)	Viscosidad (cP)
Objetivo	-	19.325,91
Prueba 1	0	59.940
Prueba 2	9	39.870
Prueba 3	30	22.530
Prueba 4	43±3,61	19.571,67 ±144,6

Al agregar entre 40 – 45 mL de agua se consigue un valor cercano al objetivo propuesto por (Virues-Delgadillo Jorge-Octavio et al., 2017), por lo que se utiliza esta cantidad para tener un puré de zanahorias estandarizado para las pruebas de congelamiento y liofilización.

#### Tiempo de congelación del puré de zanahorias

El tiempo de congelación es un paso crucial para realizar la liofilización, por ende, se necesita conocer este tiempo necesario para llegar a un valor cercano o inferior al de temperatura de transición vítrea, correspondiente a un valor entre – 25 a -30 °C.

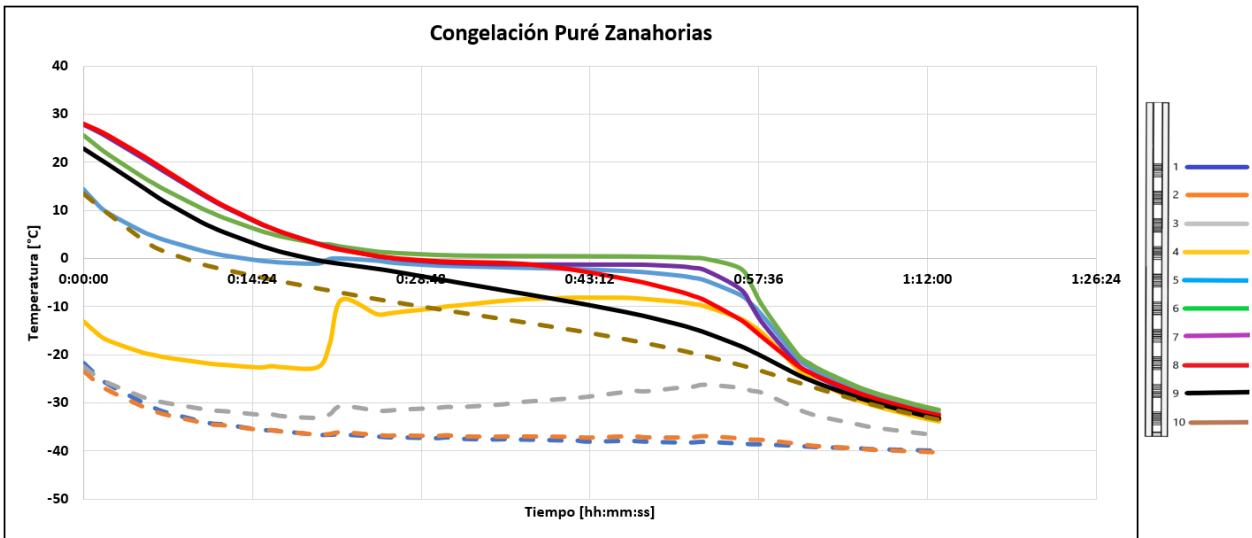


Figura 30. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria durante congelación.

Como se observa en Figura 26 las líneas entre cortadas corresponden a los puntos de la fibra óptica que no se encuentran en contacto con el puré de zanahorias. Ocurre una pérdida de calor sensible durante los primeros 30 minutos, para luego pasar a un tramo de generación de los cristales de hielo, en un rango entre los 0 a los  $-1,3$  °C, hasta aproximadamente los 55 minutos. Luego de esto prosigue el descenso de temperatura hasta los  $-30$  °C a los 70 minutos. Luego, el tiempo necesario para llegar a los  $-25$  °C corresponde a  $61 \pm 3,92$  minutos.

### Perfil de temperatura en Liofilización

Como se mencionó anteriormente, el puré de zanahoria fue monitoreado a través de un sensor de fibra óptica, puesto en sentido vertical del puré, de donde se obtuvo el perfil de temperaturas a través del secado primario, observando el avance del frente de sublimación debido al incremento pronunciado de la temperatura, y a la posterior resistencia generada por la zona seca, debido luego al menor aumento en la temperatura a través del tiempo.

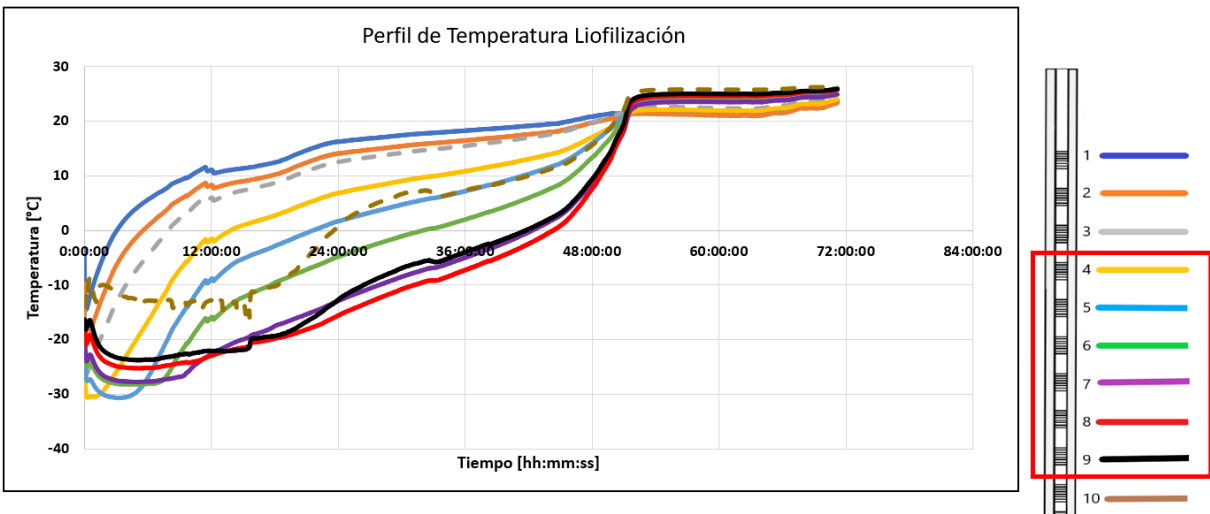


Figura 31. Perfil de temperaturas durante proceso de liofilización.

Así como se observa en Figura 27 el área interior del cuadrado rojo en la ilustración de la fibra óptica denota las zonas que se encuentran en contacto con el alimento, y se presentan como líneas continuas en el diagrama de perfil de temperatura; mientras que los puntos 1, 2, 3 están en contacto con el aire, y el punto 10 se encuentra en contacto con la placa de acero; estos puntos se muestran en el diagrama de perfil de temperatura como líneas discontinuas. El proceso de liofilización se realizó por 72 horas aproximadamente, y las temperaturas llegaron a un punto estable de aproximadamente 25°C en alrededor de las 53 horas.

Se observa, además, en figura 27 que los primeros puntos de contacto con el alimento (4, 5, 6) tienen un aumento pronunciado de la temperatura antes de llegar a los 0°C mientras que después de este punto existe una disminución notable en el aumento de la temperatura, por lo que sugiere que al llegar a los 0 °C en estos 3 casos el frente de sublimación ya pasó por estas zonas, y luego la disminución del aumento se debe al paso del vapor por los poros. Mientras que los últimos puntos (7, 8, 9) tienen un aumento lento durante la mayor parte del proceso, hasta el final, que es donde se observa el aumento pronunciado de la temperatura. Esto debido a la resistencia generada por la zona seca porosa genera por el paso del frente de sublimación en el puré de zanahoria.

#### Determinación fin de secado primario

Para determinar el fin del secado primario se tomó el punto 8 de los puntos que toman temperaturas en la fibra óptica, correspondiente al último tramo de temperatura en tener el incremento pronunciado de temperatura.

Para tener una aproximación del tiempo de secado primario se utilizó el algoritmo gráfico del modelo de Gompertz antes mencionado, como se muestra a continuación, donde A corresponde al valor de la asíntota superior,  $\mu_m$  corresponde al valor de la pendiente en la zona de mayor crecimiento de velocidad de temperatura, y  $\lambda$  corresponde al tiempo de retardo.

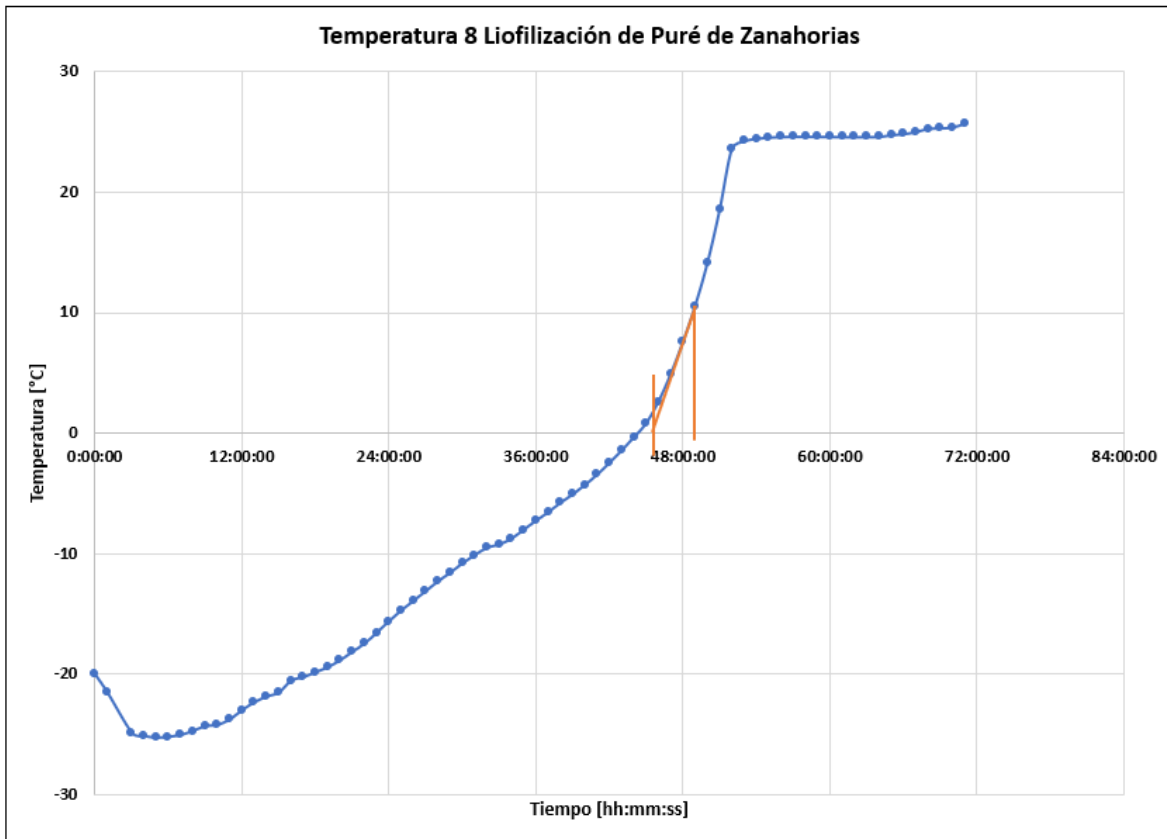


Figura 32. Diagrama temperatura de punto 8 del sensor de fibra óptica, utilizando algoritmo gráfico de modelo de Gompertz modificado para temperaturas.

Tabla 15. Parámetros gráficos y matemáticos de modelo de Gompertz, modificado para temperaturas.

Parámetro	Parámetro Gráfico	Parámetro Matemático
<b>A</b>	25	-
<b><math>\mu_m</math></b>	3,74	-
<b><math>\lambda</math></b>	46	-
<b>a</b>	-	25
<b>b</b>	-	16,59
<b>c</b>	-	0,23

Con estos parámetros se tiene que el punto de inflexión se encuentra a las 49 horas, sin embargo, como se aprecia que la curva sigue siendo pronunciada hasta llegar al punto donde se estabiliza, a los 25°C. Por ende, se emplea además el uso del modelo logístico, que se ajusta igual o mejor a los valores positivos, debido a que igual al modelo de Gompertz, no trabaja con valores negativos en el plano Y.

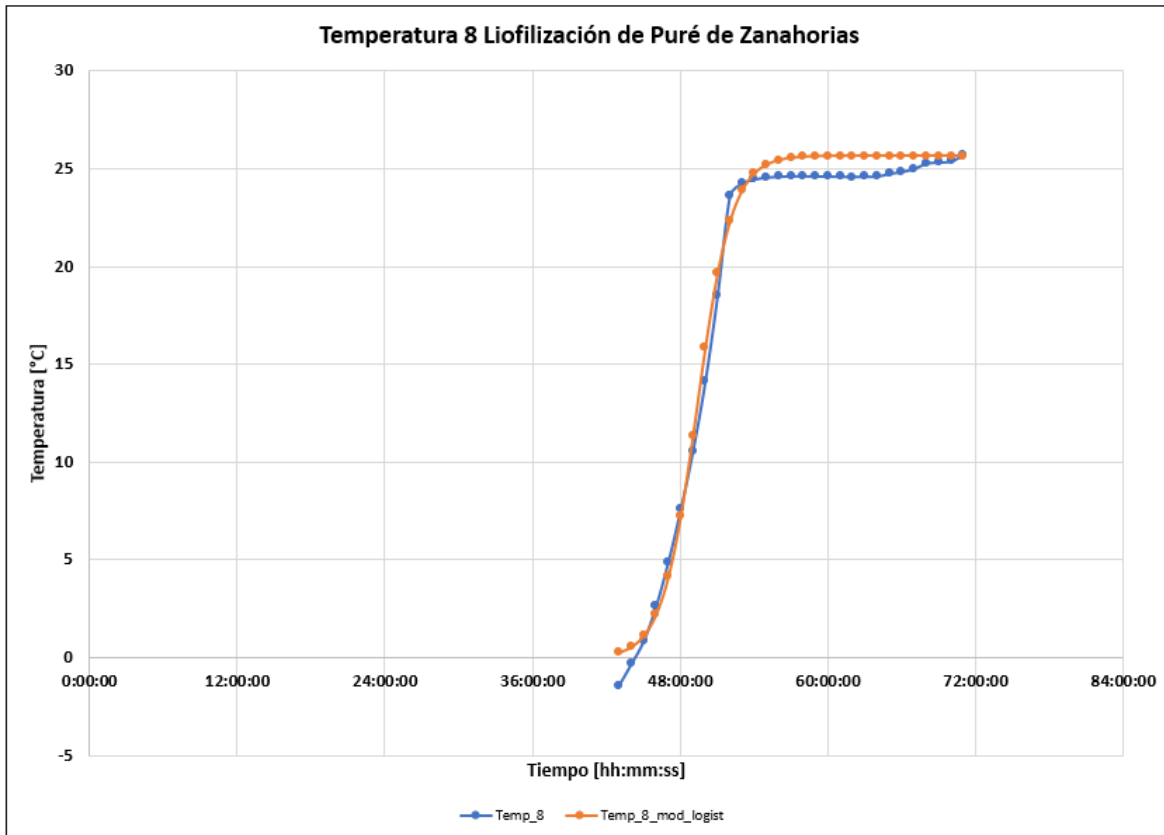


Figura 33. Diagrama de temperatura en punto 8 del sensor de fibra óptica, utilizando modelo logístico.

Donde se presentan a continuación los parámetros estimados para ajustar esta curva.

Tabla 16. Parámetros estimados de modelo logístico.

Parámetro	Valor
<b>L (parámetro dado)</b>	25
<b>K</b>	0,71
<b>X<sub>0</sub></b>	49,32
<b>R<sup>2</sup></b>	0,99

Por ende, se toma que el valor medio de este modelo corresponde al punto de inflexión, a las 49 horas, al igual que el modelo anterior.

Es así, que se determina que el tiempo de secado primario se encuentra entre las 49 - 50 horas, es decir, entre estas horas el producto sublima toda el agua libre presente.

#### Puré de zanahoria a 18 y 48 horas de proceso

Al usar el sensor de fibra óptica se puede observar el cambio de temperatura en los distintos puntos que este posee, por lo tanto, en el alimento se realizaron pruebas a distintas horas de proceso, como el siguiente, a las 18 horas de proceso.

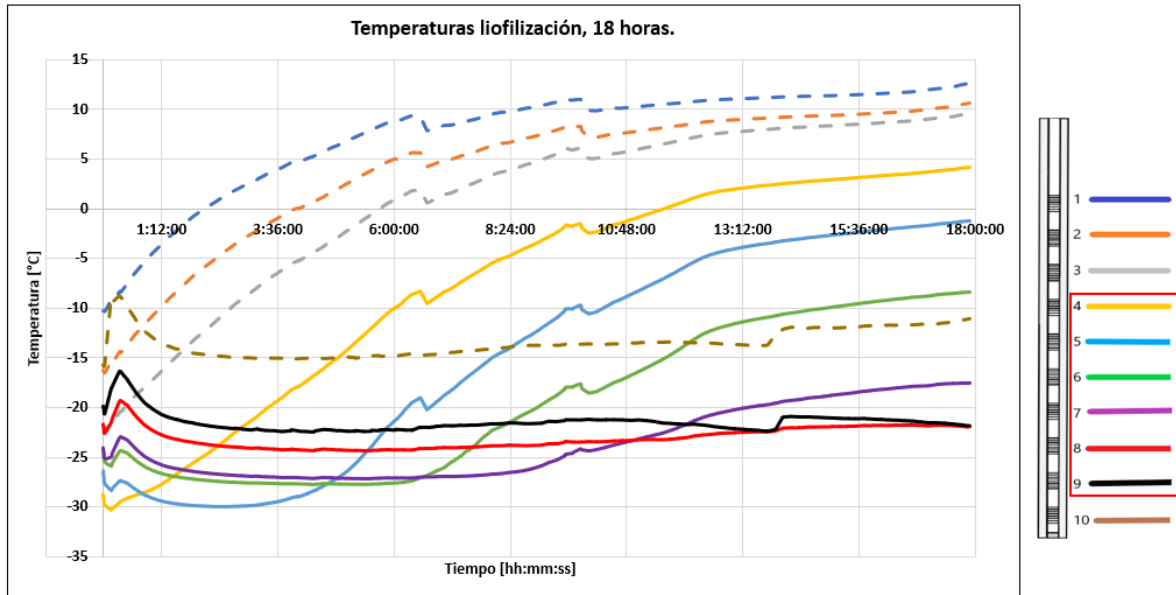
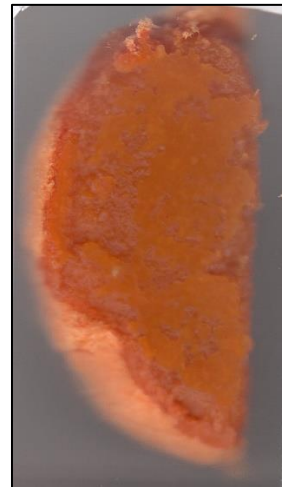


Figura 34. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria a 18 horas de proceso de liofilización.

Como se observa en figura 30 el tiempo de proceso fue de 18 horas, donde la temperatura 4, la primera en estar en contacto con el alimento, donde se considera que al superar los 0 °C ya paso el frente de sublimación, donde además se observa que el aumento de temperatura disminuye. Así, también se tiene la imagen de como se ve en este punto el alimento, y la diferencia entre la zona seca porosa y la zona congelada.



a) Imagen lateral puré zanahoria



b) Imagen zona baja puré de zanahoria

Figura 35. Imagen de puré de zanahoria a 18 horas de proceso de liofilización.

A las 18 horas de proceso el avance del frente de sublimación es considerable, por lo que debe haber pasado por otros puntos, como el punto 5, y 6 posiblemente, por lo que los pronunciados aumentos de temperatura correspondientes se deben a esto.

En figura 35 se observa la realización de 48 horas del proceso de liofilización en el puré de zanahorias. Se observa además que, a este tiempo todas las temperaturas en la fibra óptica han superado los 0°C, por lo que se podría considerar el proceso como finalizado. Sin embargo, como se observa en el círculo rojo demarcado en figura 36 el puré no se encuentra completamente seco por lo que se concluye que a las 48 aún no se acaba el secado primario, sin embargo, el tiempo se encuentra próximo.

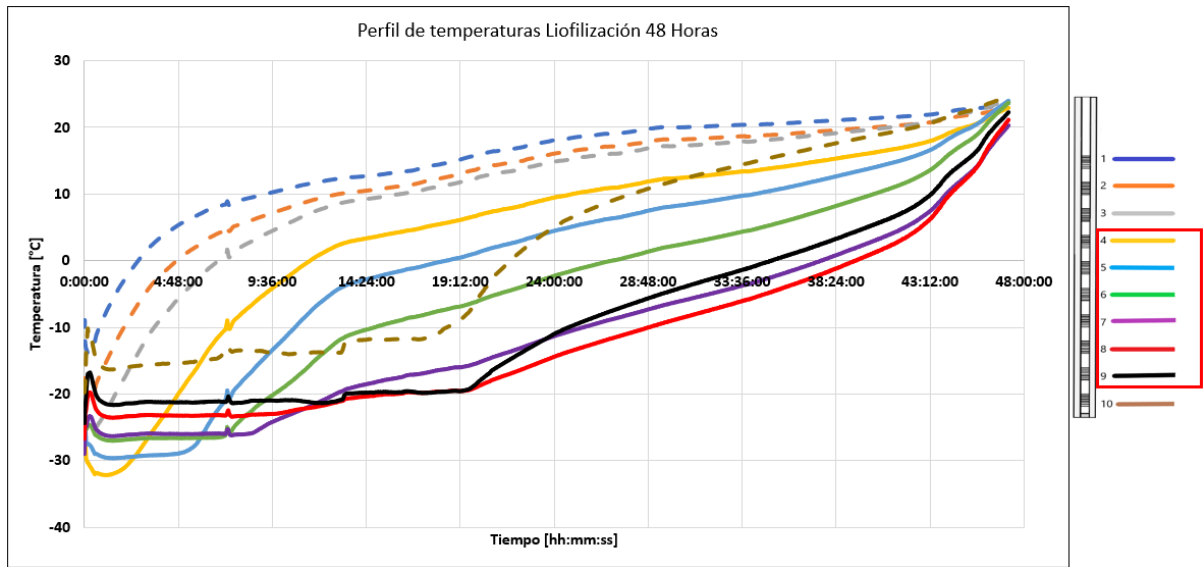


Figura 36. Perfil de temperaturas de puré de zanahoria a 48 horas de proceso de liofilización.



Figura 37. Imagen de puré de zanahoria a 48 horas de proceso de liofilización.

## MEDICION DE HUMEDAD Y REHIDRATACIÓN

Luego de cada etapa realizada, se proceden a realizar mediciones de humedad en la zanahoria cruda, el puré de zanahorias, y finalmente, el puré de zanahorias liofilizado.

Generalmente, la humedad de un alimento luego de terminado el secado primario corresponde a un rango entre 10 – 25 %, sin embargo, puede ser menor.

En el caso del puré liofilizado al realizar las mediciones de humedad no se observa un cambio en la forma ni color, esto debido al poco contenido de agua libre. Contrario a esto, la zanahoria cruda y el puré previo a la liofilización sufrieron un encogimiento considerable, y un cambio de color. A continuación, se presentan en tabla 16 los promedios de humedad de cada caso.

Tabla 17. Resultados Porcentaje de humedad de zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré liofilizado.

Tipo producto	% Humedad
Zanahoria Cruda	87,65 ± 1,05%
Puré de Zanahoria (previo a congelación y liof.)	90,73 ± 0,38%
Puré de Zanahoria Liofilizado	7,94 ± 1,68%

En promedio, la zanahoria cruda posee un porcentaje de humedad de  $87,34 \pm 0,92\%$ , el cual aumenta en el caso del puré a un  $90,73 \pm 0,38\%$  como debiese ser, debido a la cocción y agregado de agua para ajustar la viscosidad del alimento. Finalmente, el porcentaje de humedad del puré de zanahoria liofilizada es de un promedio de  $7,94 \pm 1,68\%$  correspondiente al agua ligada en el alimento, es decir, el secado primario se encarga de remover un 82,79% del agua en el puré de zanahoria.

Además, se realizó una rehidratación de la muestra de 1 g de pure de zanahoria liofilizado, hasta el 91% de humedad, en triplicado.

De la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 18. Resultados porcentaje humedad de rehidratación al puré de zanahoria liofilizado.

N° de muestra	% Humedad
N°1	78,18%
N°2	76,23%
N°3	79,27%
Humedad promedio	77,89 ± 1,54%

De acuerdo con los resultados, este valor de humedad es cercano a una buena rehidratación propuesta por literatura.

## CANTIDAD DE FURANO

Las mediciones de cantidad de furano se realizaron, como se mencionó anteriormente, en triplicado para cada experimento, con 5g de zanahoria cruda, 5g de puré de zanahoria, y 1g de pure de zanahoria liofilizada, la cual, en este último caso, fue rehidratada para lograr 5g en peso. De estos análisis se tiene la siguiente tabla:

*Tabla 19. Resultados cantidad de furanos en zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré liofilizado.*

<b>Muestra Experimento "0"</b>	<b>Muestra 1 (ng/g peso fresco)</b>	<b>Muestra 2 (ng/g peso fresco)</b>	<b>Muestra 3 (ng/g peso fresco)</b>
Zanahoria cruda	N/D	N/D	-
Puré de zanahoria (Posterior a cocción y agua agregada)	16,92	26,89	-
Puré de zanahoria liofilizado	6,25	8,03	-

*Tabla 20. Resultados cantidad de furanos en zanahoria cruda, puré de zanahorias después de cocción, puré de zanahorias previo a liofilización, y puré de zanahorias liofilizado en segunda tanda de muestras.*

<b>Muestra Experimento "1"</b>	<b>Muestra 4 (ng/g peso fresco)</b>	<b>Muestra 5 (ng/g peso fresco)</b>	<b>Muestra 6 (ng/g peso fresco)</b>
Zanahoria cruda	N/D	N/D	N/D
Puré de zanahoria (Posterior a cocción)	2,45	2,19	2,08
Puré de zanahoria (Posterior a cocción y agua agregada)	12,02	13,05	13,13
Puré de zanahoria liofilizado	5,56	0,98	1,28

*Tabla 21. Valores promedios de muestra cruda, muestra tipo puré, y muestra liofilizada.*

<b>Muestra</b>	<b>Valor promedio</b>
Zanahoria cruda	N/D
Puré de zanahoria (Posterior a cocción)	2,24 ± 0,19
Puré de zanahoria (posterior a cocción y agua agregada)	16,40 ± 6,15
Puré de zanahoria liofilizado	4,42 ± 3,14

Se observa que las cantidades presentadas en tabla 19 y tabla 20 son similares a las observadas en tabla 5 para los alimentos con zanahoria con menos agregados. Además, se observa que la cantidad de furanos generados por el proceso de liofilización es menor a las obtenidas por vegetales, asemejándose a las cantidades obtenidas en los alimentos para bebés a base de frutas.

Observando y comparando los resultados con los datos de tabla 12, los valores de furano generados en el proceso de liofilización son menores a los obtenidos por esterilización.

Comparando los valores de puré de zanahoria posterior a la cocción, y al puré al que se agregan los 45 mL de agua, la razón de que estos últimos sean mayores posiblemente viene dada por la disminución de temperatura generada por el líquido agregado, teniendo en cuenta que en un inicio se encontraba aproximadamente a 30°, por lo tanto, los furanos en estado gaseoso son retenidos.

Finalmente, debido a fugas del furano en algunas muestras, el cromatógrafo de gases detecto algunos niveles muy bajos de furano en 2 muestras. Mientras que en los demás experimentos se observa un valor de 5- 8 ng de furano/ g de peso fresco, lo cual corresponde a los valores esperados.

## CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, el proceso de preparación del puré de zanahoria se realizó con éxito, obteniendo un tiempo de cocción y una viscosidad estándar para los procesos de liofilización.

El proceso de liofilización se realizó para 72 horas, siendo a las 53 horas el tiempo en que las temperaturas se estabilizan a los 25°C. Al realizar la determinación del fin del secado primario por medio de los modelos de Gompertz y Logístico, ambas curvas de crecimiento de tipo sigmoideal, se llegó a la conclusión que el fin de esta etapa se encuentra entre las 49 – 50 horas de proceso.

Se corrobora, además, que el paso del frente de sublimación en las primeras zonas de contacto con el alimento se produce antes, o en un valor cercano a los 0 °C, seguramente en el fin del aumento pronunciado de temperatura.

La humedad del producto liofilizado se encuentra más bajo que el rango descrito por literatura, con un 8% aproximadamente, sin embargo, es un valor bueno para un alimento que posee una cantidad considerable de poros, como lo es un puré.

La humedad promedio de la rehidratación del puré corresponde a un  $77,89 \pm 1,54\%$ , siendo lo propuesto por literatura un rango entre 80 – 90% de humedad, por lo que, a pesar de no estar dentro del rango, es un valor cercano, por lo que se concluye que hubo una buena rehidratación del puré de zanahoria, posterior a ser liofilizado.

En base a los análisis de cantidad de furanos, en el caso particular del proceso de liofilización, el pure seco final (liofilizado) presenta una reducción en la cantidad de furano medido, esto debido a que parte de este componente debe escapar junto al vapor de agua retirado durante el secado primario, teniendo en cuenta la volatilidad de este componente, y la temperatura utilizada (30°C de temperatura de proceso).

Observando la cantidad de furano generada en el proceso de liofilización, y la cantidad máxima generada por el proceso de esterilización, la liofilización produce una menor cantidad de este compuesto, al igual que lo argumentado anteriormente, debido a la succión de los gases generados por sublimación, movidos por la bomba de vacío.

## RECOMENDACIONES

Si bien se realizaron los objetivos solicitados, el perfil de temperatura da una idea inicial de cómo se comporta el secado en el alimento, en su forma cilíndrica. Por lo cual se utilizaron los modelos propuestos para dar una respuesta al determinar el fin del secado primario, sin embargo, estos modelos no son los mejores para determinar el paso del frente de sublimación en los demás puntos, por lo que se infiere de forma visual el paso del frente de sublimación en la mayoría de los puntos de la fibra. Por lo cual se recomienda el uso de un modelo adecuado para determinar este paso del frente de sublimación en los demás puntos del sensor.

Las mediciones y pruebas se realizaron para 1 tipo de diseño de pure (cilíndrica, con dimensiones fijas, y peso fijo), por lo que una recomendación sería variar este tipo de configuración para probar los distintos tiempos de secado, y como varía el frente de sublimación.

Por otro lado, esta investigación se enfocó en específico en el puré de zanahorias, pero comercialmente los colados para bebés llevan más ingredientes, y son los distribuidos en los centros de comercios. Se recomendaría en este caso realizar estudios de furano a este tipo de alimentos, teniendo la información correspondiente que, lamentablemente es confidencial por parte de la empresa.

El furano generado por la cocción del puré de zanahoria es susceptible a tener fuga al ambiente en cada etapa de su preparación, incluso luego de la liofilización, por lo que también se recomienda realizar la cocción en un recipiente cerrado y los demás procesos, en lo posible, en un recipiente cerrado.

## Bibliografía

- Altaki, M. S., Santos, F. J., Puignou, L., & Galceran, M. T. (2017). Furan in commercial baby foods from the Spanish market: estimation of daily intake and risk assessment. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 34(5), 728–739. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1278080>
- American Society of Heating, R. and A.-C. Engineers. (n.d.). *2018 ASHRAE handbook : refrigeration*.
- Arisseto, A. P., Vicente, E., & de Figueiredo Toledo, M. C. (2010). Determination of furan levels in commercial samples of baby food from brazil and preliminary risk assessment. *Food Additives and Contaminants - Part A*, 27(8), 1051–1059. <https://doi.org/10.1080/19440041003801182>
- Bai, Y., & Bai, Q. (2014). Fiber Optic Monitoring System. In *Subsea Pipeline Integrity and Risk Management* (pp. 145–165). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394432-0.00007-x>
- CRC Press. (2007). *Handbook of Food Preservation Second Edition*.
- Depaz, R. A., Pansare, S., & Patel, S. M. (2016). Freeze-Drying above the Glass Transition Temperature in Amorphous Protein Formulations while Maintaining Product Quality and Improving Process Efficiency. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 105(1), 40–49. <https://doi.org/10.1002/jps.24705>
- Fellows, P. (Peter). (2002). *Food processing technology : principles and practice*. Woodhead Pub.
- Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C., & Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.001>
- Gaidhani, K., Harwalkar, M., Bhambere, D., & Nirgude, P. S. (2015). *LYOPHILIZATION / FREEZE DRYING-A REVIEW Transferrin conjugated nanoparticles for Sequential Blood-Brain Barrier Penetration and Glioblastoma Targeting View project Deepak Bhambere Mumbai Educational Trust*. [www.wjpr.net](http://www.wjpr.net)
- Gangatirkar, S. (2021, June 30). *Under Pressure? Here's why you need to check the glass transition temperature of your seal's material | Greene Tweed*. <https://www.gtweed.com/insights/under-pressure-heres-why-you-need-to-check-the-glass-transition-temperature-of-your-seals-material/>
- Government College for Women Ghandi Nagar. (2018). *Freezing of Food Materials*.
- Horn, J., & Friess, W. (2018). Detection of collapse and crystallization of saccharide, protein, and mannitol formulations by optical fibers in lyophilization. *Frontiers in Chemistry*, 6(JAN). <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00004>
- Hua, T.-C., Liu, B.-L., & Zhang, H. (2010). *Freeze-drying of pharmaceutical and food products*. Oxford.

- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2023). *Hortalizas*.  
<https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/hortalizas>
- Javed, F., Shahbaz, H. M., Nawaz, A., Olaimat, A. N., Stratakos, A. C., Wahyono, A., Munir, S., Mueen-ud-din, G., Ali, Z., & Park, J. (2021). Formation of furan in baby food products: Identification and technical challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2699–2715. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12732>
- Kasper, J. C., Wiggernhorn, M., Resch, M., & Friess, W. (2013). Implementation and evaluation of an optical fiber system as novel process monitoring tool during lyophilization. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 83(3), 449–459.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.10.009>
- Kasper, J. C., Winter, G., & Friess, W. (2013). Recent advances and further challenges in lyophilization. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 85(2), 162–169.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2013.05.019>
- Lin, T. M., Durance, T. D., & Scaman, C. H. (1998). *Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(98\)00070-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-9969(98)00070-2)
- Liu-Ping, F., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2007). Storage stability of carrot chips. *Drying Technology*, 25(9), 1537–1543. <https://doi.org/10.1080/07373930701539654>
- Marcelo Muñoz Villagrán. (2023, June 23). *Boletín de hortalizas, Junio 2023*.  
<https://Www.Odepa.Gob.Cl/Publicaciones/Boletines/Boletin-de-Hortalizas-Junio-2023>.
- Mariotti, M. S., Toledo, C., Hevia, K., Gomez, J. P., Fromberg, A., Granby, K., Rosowski, J., Castillo, O., & Pedreschi, F. (2013). Are Chileans exposed to dietary furan? *Food Additives and Contaminants - Part A*, 30(10), 1715–1721. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.815807>
- Marques, L. G., Prado, M. M., & Freire, J. T. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT*, 42(7), 1232–1237. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.02.012>
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). REHYDRATION OF FREEZE-DRIED STRAWBERRIES AT VARYING TEMPERATURES. In *Journal of Food Process Engineering* (Vol. 28).
- Ministerio de Salud. (2015). *GUÍA DE ALIMENTACIÓN DEL NIÑO(A) MENOR DE 2 AÑOS GUÍA DE ALIMENTACIÓN HASTA LA ADOLESCENCIA*.
- National Institutes of Health. (2022). *¿Qué son la vitamina A y los carotenoides y para qué sirven?*  
<http://ods.od.nih.gov/HealthInformation/RecursosEnEspanol.aspx>.
- National Institutes of Health (NIH). (2022, June 15). *Vitamin A and Carotenoids - Health Professional Fact Sheet*. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminA-HealthProfessional/>
- Orrego-Alzate, C. E. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. Gobernación de Caldas.
- Othonos, A., Kalli, K., Pureur, D., & Mugnier, A. (2006). *“Fibre Bragg Gratings”, Springer Series in Optical Sciences*.

- Patel, S. M., Doen, T., & Pikal, M. J. (2010). Determination of end point of primary drying in freeze-drying process control. *AAPS PharmSciTech*, 11(1), 73–84. <https://doi.org/10.1208/s12249-009-9362-7>
- Peleg, M. (1996). A Model of Microbial Growth and Decay in a Closed Habitat Based on Combined Fermi's and the Logistic Equations. In *J Sci Food Agric* (Vol. 71).
- Perez Locas, C., & Yaylayan, V. A. (2004). Origin and mechanistic pathways of formation of the parent furan - A food toxicant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(22), 6830–6836. <https://doi.org/10.1021/jf0490403>
- Pisano, R. (2022). Automatic control of a freeze-drying process: Detection of the end point of primary drying. *Drying Technology*, 40(1), 140–157. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1774891>
- Pugajeva, I., Rozentale, I., Viksna, A., Bartkiene, E., & Bartkevics, V. (2016). The application of headspace gas chromatography coupled to tandem quadrupole mass spectrometry for the analysis of furan in baby food samples. *Food Chemistry*, 212, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.159>
- Ramírez, C., Sanchez, E., Pinto, M., Nuñez, H., Fardella, M., Valencia, P., Angulo, A., Almonacid, S., & Simpson, R. (2022). Mathematical modeling to estimate furan formation in thermally processed foods: A preliminary analysis considering carrots as a model food. *Journal of Food Engineering*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111136>
- Roos, Y. H. (2010). Glass transition temperature and its relevance in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 469–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124139>
- Saavedra Del Real, G., & Kehr Mellado, E. (2019). *Zanahoria (Daucus carota L., var. sativus Hoffm.)*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6818/Capitulo%202.%20Zanahoria.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Saavedra, G., Real, D., & Agrónomo, I. (n.d.). *Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA / MINISTERIO DE AGRICULTURA 265 Zanahoria Daucus carota L., var. sativus Hoffm.*
- South AM. (n.d.). *Carrot | South AM*. Retrieved September 2, 2023, from <https://www.southamfreezedry.com/es/copy-of-butternut-squash>
- Taylor, S. (1996). *Beta-carotene, carotenoids, and disease prevention in humans*.
- Varshney, K., & Mishra, K. (2022). An Analysis of Health Benefits of Carrot. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 211–214. <https://doi.org/10.55524/ijirem.2022.9.1.40>
- Virues-Delgadillo Jorge-Octavio, Domínguez-Rendón Ana-Cristina, López-del-Castillo-Lozano Micloth, Domínguez-Cañedo Irma-Liliana, & Galán-Méndez Frixia. (2017). Temperature Effect on the Viscosity of Commercial Carrot Puree. *Journal of Food Science and Engineering*, 7(10). <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2017.10.005>

- Vu, T. S., Smout, C., Sila, D. N., LyNguyen, B., Van Loey, A. M. L., & Hendrickx, M. E. G. (2004a). Effect of preheating on thermal degradation kinetics of carrot texture. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.08.005>
- Vu, T. S., Smout, C., Sila, D. N., LyNguyen, B., Van Loey, A. M. L., & Hendrickx, M. E. G. (2004b). Effect of preheating on thermal degradation kinetics of carrot texture. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.08.005>
- Zotarelli, M. F., Durigon, A., da Silva, V. M., Hubinger, M. D., & Laurindo, J. B. (2022). Rehydration of mango powders produced by cast-tape drying, freeze drying, and spray drying. *Drying Technology*, 40(1), 175–187. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1777562>
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., Van ' K., & Riet, T. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. In *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*.

## ANEXOS

### Anexo 1: Temperatura de transición Vítrea de algunos alimentos

name	$T_g'$ (°C)	name	$T_g'$ (°C)
potato	-12— -16	strawberry	-33— -41
cauliflower	-25	banana	-35
carrot	-25.5	apple	-41

name	$T_g'$ (°C)	name	$T_g'$ (°C)
tomato	-41.5	peach	-36.5
green peas	-27.5	pineapple juice	-37.5
spinach	-17	apple juice	-40.5
sweet corn(blanchd)	-9.5	lemon juice	-43
orange juice	-37	white grape juice	-42.5

Figura 38. Temperatura de transición vítrea de zanahoria y otros alimentos. (Hua et al., 2010)

## Anexo 2: Pruebas de Textura en rodajas de zanahoria

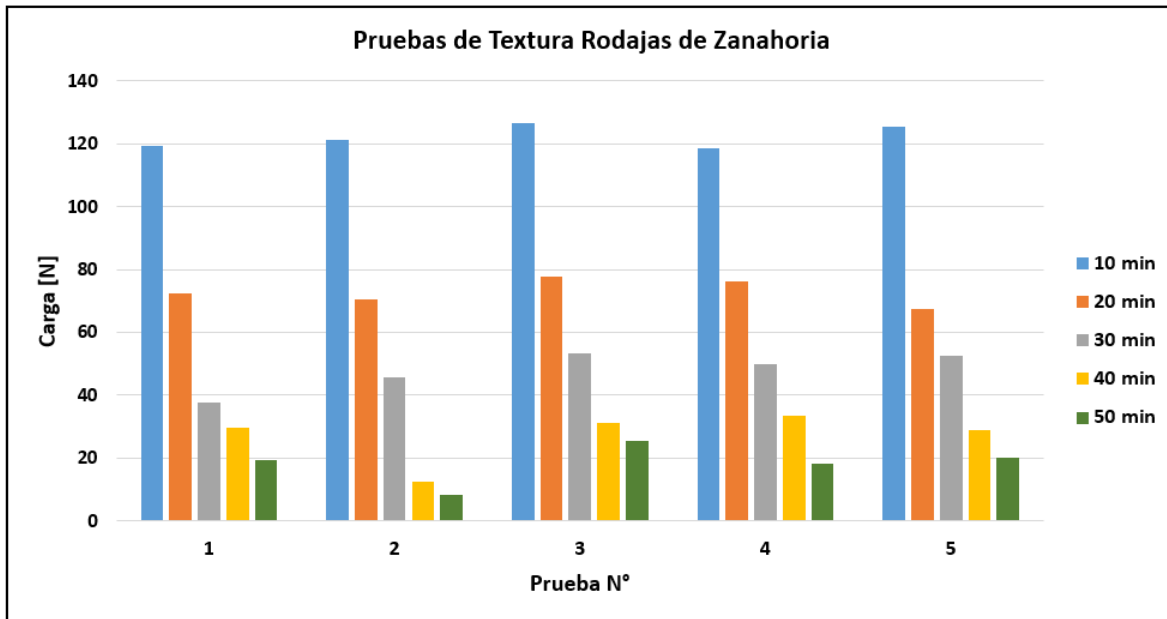


Figura 39. Diagrama de pruebas de textura en rodajas de zanahoria.

Tabla 22. Datos pruebas de textura en rodajas de zanahoria.

	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
Prueba 1	119,55	72,32	37,51	29,56	19,47
Prueba 2	121,43	70,5	45,76	12,55	8,24
Prueba 3	126,75	77,96	53,45	31,23	25,5
Prueba 4	118,51	76,3	49,72	33,61	18,4
Prueba 5	125,33	67,3	52,61	28,87	20,15
Promedio	122,31	72,88	47,81	27,16	18,35
Desv estand	3,73	3,89	7,97	10,34	8,76



Pruebas 4, 5, 6			
Viscosidad		Masa agua [g]	
prom	19571,67	prom	43
desv est	144,60	desv est	3,61

Arrhenius (Virues- Delgadillo Jorge-Octavio et al., 2017)

$$k(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

21,2025222

30°C 18,3515912 Pa\*s

27°C 19,3259179 Pa\*s

20°C 21,8952986 Pa\*s

Figura 40. Datos Pruebas de Viscosidad en puré de zanahorias.

## Anexo 4: Tiempo congelación puré de zanahoria

Hora	Tiempo	TEMP_B1	TEMP_B2	TEMP_B3	TEMP_B4	TEMP_B5	TEMP_B6	TEMP_B7	TEMP_B8	TEMP_B9	TEMP_B10
16:08:00	0:00:00	-19,303	-23,957	-24,809	-16,369	8,108	18,814	20,771	21,251	18,612	11,548
16:09:00	0:01:00	-21,94	-26,601	-27,016	-17,587	6,021	16,916	19,492	20,08	17,346	9,53
16:10:00	0:02:00	-24,282	-28,111	-28,065	-18,677	4,416	15,358	18,337	19,008	16,001	7,617
16:13:00	0:05:00	-28,997	-31,645	-30,709	-20,901	1,177	11,38	14,623	15,27	11,775	2,473
16:14:00	0:06:00	-30,088	-32,602	-31,398	-21,393	0,27	10,1	13,23	13,813	10,332	1,018
16:15:00	0:07:00	-31,384	-33,559	-32,034	-21,856	-0,502	8,905	11,839	12,32	8,967	0,03
16:18:00	0:10:00	-33,895	-35,445	-33,437	-23,142	-2,011	6,071	8,311	8,525	5,581	-1,816
16:19:00	0:11:00	-34,502	-35,788	-33,542	-23,269	-2,263	5,318	7,28	7,449	4,672	-2,323
16:20:00	0:12:00	-35,321	-36,389	-33,98	-23,412	-2,708	4,38	6,077	6,227	3,836	-2,796
16:23:00	0:15:00	-36,536	-37,286	-34,692	-24,154	-3,649	2,16	3,097	3,181	1,605	-4,236
16:24:00	0:16:00	-37,04	-37,633	-34,873	-24,154	-3,925	1,504	2,219	2,269	1,013	-4,665
16:25:00	0:17:00	-37,295	-37,932	-35,146	-24,411	-4,149	0,944	1,469	1,462	0,474	-5,072
16:28:00	0:20:00	-38,274	-38,581	-35,218	-21,087	-2,437	0,218	-0,372	-0,502	-0,725	-6,24
16:29:00	0:21:00	-38,4	-38,679	-35,181	-20,756	-2,371	-0,027	-0,913	-1,066	-1,03	-6,625
16:30:00	0:22:00	-38,626	-38,781	-34,963	-18,891	-2,389	-0,299	-1,383	-1,515	-1,281	-7,007
16:33:00	0:25:00	-38,777	-38,803	-34,445	-16,383	-2,379	-1,162	-2,416	-2,365	-2,098	-8,079
16:34:00	0:26:00	-39,036	-39,083	-34,683	-16,204	-2,523	-1,368	-2,685	-2,574	-2,419	-8,442
16:35:00	0:27:00	-39,19	-39,15	-34,499	-15,472	-2,638	-1,464	-2,864	-2,721	-2,747	-8,791
16:38:00	0:30:00	-39,274	-39,247	-34,381	-14,129	-3,021	-1,588	-3,173	-2,941	-3,853	-9,834
16:39:00	0:31:00	-39,333	-39,301	-34,315	-13,596	-3,159	-1,578	-3,211	-2,952	-4,219	-10,169
16:40:00	0:32:00	-39,32	-39,204	-33,974	-13,007	-3,256	-1,542	-3,208	-2,929	-4,595	-10,514
16:43:00	0:35:00	-39,42	-39,194	-33,629	-11,825	-3,558	-1,488	-3,225	-2,906	-5,737	-11,582
16:44:00	0:36:00	-39,311	-39,052	-33,22	-11,343	-3,588	-1,419	-3,163	-2,863	-6,114	-11,922
16:45:00	0:37:00	-39,459	-39,192	-33,176	-11,123	-3,722	-1,45	-3,203	-2,975	-6,486	-12,277
16:48:00	0:40:00	-39,413	-38,934	-32,16	-10,399	-3,875	-1,32	-3,052	-3,347	-7,647	-13,353
16:49:00	0:41:00	-39,488	-39,16	-32,423	-10,333	-3,944	-1,296	-3,035	-3,586	-8,052	-13,731
16:50:00	0:42:00	-39,306	-38,746	-31,621	-10,15	-3,945	-1,208	-2,932	-3,794	-8,442	-14,114
16:53:00	0:45:00	-39,551	-39,03	-31,421	-10,112	-4,16	-1,12	-2,804	-4,793	-9,732	-15,299
16:54:00	0:46:00	-39,679	-39,092	-31,232	-10,284	-4,43	-1,28	-2,934	-5,342	-10,188	-15,724
16:55:00	0:47:00	-39,618	-38,967	-30,828	-10,327	-4,563	-1,309	-2,943	-5,795	-10,67	-16,176
16:58:00	0:50:00	-39,785	-39,086	-30,347	-10,796	-5,109	-1,412	-3,027	-7,325	-12,259	-17,599
16:59:00	0:51:00	-39,949	-39,283	-30,346	-11,151	-5,401	-1,503	-3,143	-7,958	-12,862	-18,108
17:00:00	0:52:00	-39,853	-39,145	-29,999	-11,482	-5,739	-1,595	-3,328	-8,648	-13,508	-18,626
17:03:00	0:55:00	-40,044	-39,229	-29,594	-13,208	-7,55	-2,268	-4,831	-11,529	-15,895	-20,366
17:04:00	0:56:00	-40,086	-39,316	-29,793	-14,135	-8,645	-2,875	-6,055	-12,916	-16,859	-20,994
17:05:00	0:57:00	-37,201	-32,836	-22,542	-14,798	-10,167	-4,326	-8,302	-14,587	-17,933	-21,596
17:08:00	1:00:00	-39,766	-39,425	-31,67	-20,641	-18,268	-17,777	-20,118	-20,691	-21,042	-22,964
17:09:00	1:01:00	-40,035	-39,82	-32,722	-22,935	-20,586	-19,919	-21,951	-22,165	-22,137	-23,745
17:10:00	1:02:00	-40,419	-40,192	-33,574	-24,798	-22,475	-21,691	-23,541	-23,535	-23,184	-24,53
17:13:00	1:05:00	-41,079	-41,063	-35,55	-28,695	-26,535	-25,661	-27,274	-26,927	-26,033	-26,909
17:14:00	1:06:00	-41,33	-41,401	-36,18	-29,696	-27,622	-26,741	-28,337	-27,916	-26,897	-27,659
17:15:00	1:07:00	-41,492	-41,576	-36,589	-30,604	-28,587	-27,722	-29,301	-28,85	-27,723	-28,383
17:18:00	1:10:00	-39,786	-38,122	-33,828	-32,246	-30,759	-30,069	-31,683	-31,147	-29,933	-30,311
17:19:00	1:11:00	-38,46	-36,825	-33,116	-32,099	-30,899	-30,442	-32,187	-31,67	-30,375	-30,544
17:20:00	1:12:00	-41,229	-41,497	-37,503	-33,147	-31,5	-30,881	-32,574	-32,067	-30,726	-30,945

Figura 41. Tiempo Congelación puré de zanahoria en distintos puntos de la fibra óptica.

## Anexo 5: Datos Temperatura de liofilización de puré de zanahoria

Tiempo	TEMP_B1	TEMP_B2	TEMP_B3	TEMP_B4	TEMP_B5	TEMP_B6	TEMP_B7	TEMP_B8	TEMP_B9	TEMP_B10
0:00:00	-3,423	-9,656	-15,896	-22,298	-22,019	-21,684	-22,447	-20	-17,466	-14,08
1:01:00	-8,97	-15,923	-22,042	-30,452	-28,662	-25,698	-24,645	-21,522	-19,386	-12,653
3:01:00	-3,905	-10,771	-17,644	-25,96	-30,643	-28,065	-27,474	-24,864	-23,269	-10,062
4:01:00	-0,178	-6,444	-13,194	-22,797	-30,488	-28,186	-27,674	-25,126	-23,603	-11,259
5:01:00	2,364	-3,377	-9,744	-19,723	-29,481	-28,189	-27,738	-25,247	-23,752	-12,211
6:01:00	4,195	-1,07	-6,965	-16,642	-26,917	-28,089	-27,679	-25,181	-23,677	-13,062
7:01:00	5,624	0,807	-4,535	-13,385	-23,18	-27,829	-27,502	-25,023	-23,52	-12,841
8:01:00	6,86	2,518	-2,163	-10,155	-19,363	-26,002	-27,182	-24,687	-23,148	-13,131
9:01:00	8,072	4,171	0,134	-7,223	-15,966	-22,625	-26,8	-24,292	-22,74	-12,708
10:01:00	9,122	5,622	2,179	-5,01	-13,252	-19,977	-25,476	-24,193	-22,624	-13,188
11:01:00	9,944	6,715	3,7	-2,555	-10,287	-17,181	-23,838	-23,727	-22,253	-13,066
12:01:00	11,116	8,144	5,521	-1,571	-8,87	-15,9	-22,676	-22,963	-22,066	-13,59
13:01:00	11,094	8,314	5,99	-0,932	-7,778	-14,903	-21,627	-22,312	-22,035	-12,796
14:01:00	10,77	8,165	6,119	0,205	-6,207	-13,343	-20,682	-21,838	-22,029	-12,989
15:01:00	11,112	8,666	6,859	0,948	-5,182	-12,258	-19,962	-21,502	-21,871	-13,122
16:01:00	11,36	8,992	7,322	1,541	-4,356	-11,289	-19,041	-20,522	-19,797	-13,46
17:01:00	11,619	9,318	7,742	2,103	-3,651	-10,537	-18,45	-20,228	-19,546	-11,253
18:01:00	12,017	9,738	8,194	2,731	-2,845	-9,57	-17,513	-19,816	-19,329	-10,63
19:01:00	12,44	10,205	8,703	3,42	-2,088	-8,792	-16,83	-19,398	-18,809	-10,216
20:01:00	13,042	10,829	9,345	4,226	-1,255	-7,964	-16,087	-18,827	-17,923	-8,876
21:01:00	13,913	11,686	10,143	4,957	-0,476	-7,188	-15,351	-18,131	-16,674	-7,305
22:01:00	14,641	12,412	10,865	5,638	0,271	-6,417	-14,608	-17,43	-15,528	-5,005
23:01:00	15,315	13,085	11,526	6,304	1,017	-5,606	-13,78	-16,53	-14,08	-3,022
24:01:00	15,906	13,683	12,133	6,818	1,678	-4,814	-12,897	-15,573	-12,66	-0,93
25:01:00	16,235	14,052	12,537	7,236	2,241	-4,129	-12,098	-14,685	-11,422	0,886
26:01:00	16,456	14,31	12,855	7,612	2,747	-3,506	-11,362	-13,884	-10,406	2,353
27:01:00	16,643	14,541	13,122	8,006	3,266	-2,882	-10,638	-13,074	-9,433	3,468
28:01:00	16,856	14,798	13,435	8,353	3,753	-2,263	-9,896	-12,271	-8,547	4,497
29:01:00	17,033	15,003	13,681	8,718	4,234	-1,672	-9,206	-11,551	-7,763	5,264
30:01:00	17,238	15,233	13,965	9,061	4,716	-1,075	-8,488	-10,771	-6,904	5,914
31:01:00	17,426	15,453	14,212	9,414	5,176	-0,525	-7,859	-10,086	-6,225	6,67
32:01:00	17,61	15,67	14,48	9,677	5,565	-0,016	-7,256	-9,488	-5,718	7,166
33:01:00	17,728	15,81	14,657	9,949	5,918	0,372	-6,876	-9,211	-5,754	7,271
34:01:00	17,867	15,982	14,87	10,21	6,283	0,836	-6,357	-8,727	-5,423	6,451
35:01:00	17,986	16,127	15,053	10,531	6,745	1,42	-5,664	-7,98	-4,682	6,336
36:01:00	18,125	16,294	15,273	10,824	7,189	1,995	-4,969	-7,236	-3,982	6,881
37:01:00	18,243	16,44	15,461	11,178	7,67	2,584	-4,28	-6,54	-3,326	7,325
38:01:00	18,402	16,636	15,71	11,55	8,18	3,238	-3,519	-5,747	-2,598	7,784
39:01:00	18,554	16,831	15,977	11,865	8,642	3,83	-2,828	-5,059	-2,078	8,285
40:01:00	18,669	16,981	16,179	12,251	9,177	4,499	-2,059	-4,267	-1,375	8,475
41:01:00	18,815	17,184	16,446	12,672	9,75	5,205	-1,233	-3,412	-0,595	8,969
42:01:00	18,996	17,402	16,738	13,048	10,313	5,969	-0,296	-2,424	0,267	9,501
43:01:00	19,13	17,569	16,975	13,453	10,905	6,751	0,66	-1,41	1,184	9,959
44:01:00	19,267	17,759	17,24	13,925	11,578	7,605	1,697	-0,313	2,168	10,563
45:01:00	19,46	17,995	17,553	14,411	12,256	8,493	2,774	0,859	3,214	11,197
46:01:00	19,663	18,247	17,9	15,162	13,29	9,813	4,41	2,637	4,821	11,847
47:01:00	20,036	18,681	18,447	16,076	14,566	11,458	6,461	4,918	6,931	12,754
48:01:00	20,441	19,197	19,102	17,062	15,969	13,326	8,814	7,586	9,373	14,071
49:01:00	20,825	19,685	19,771	18,085	17,466	15,342	11,43	10,588	12,2	15,6
50:01:00	21,167	20,159	20,449	19,116	19,071	17,598	14,445	14,146	15,487	17,474
51:01:00	21,389	20,51	21,047	20,27	20,99	20,349	18,174	18,549	19,542	19,52
52:01:00	21,457	20,794	21,644	21,841	23,423	23,727	22,58	23,616	24,154	22,156
53:01:00	21,756	21,323	22,55	22,058	23,794	24,231	23,193	24,256	24,697	25,233

54:01:00	21,741	21,355	22,654	22,088	23,885	24,373	23,382	24,469	24,863	25,606
55:01:00	21,677	21,303	22,637	22,091	23,925	24,438	23,475	24,573	24,94	25,739
56:00:59	21,642	21,272	22,618	22,078	23,928	24,461	23,517	24,615	24,984	25,78
57:00:59	21,588	21,23	22,582	22,047	23,917	24,47	23,539	24,637	25,005	25,801
58:00:59	21,545	21,192	22,544	21,999	23,886	24,452	23,53	24,637	24,998	25,812
59:00:59	21,462	21,121	22,487	21,965	23,856	24,435	23,517	24,629	24,99	25,799
60:00:59	21,421	21,082	22,446	21,917	23,819	24,409	23,504	24,624	24,989	25,79
61:00:59	21,365	21,013	22,389	21,88	23,786	24,389	23,482	24,61	24,969	25,784
62:00:59	21,321	20,979	22,357	21,861	23,776	24,375	23,476	24,603	24,966	25,775
63:00:59	21,292	20,956	22,331	21,866	23,794	24,389	23,492	24,615	24,974	25,774
64:00:59	21,293	20,952	22,331	21,902	23,811	24,405	23,499	24,623	24,969	25,78
65:00:59	21,328	20,995	22,377	22,262	24,11	24,653	23,701	24,763	25,085	25,774
66:00:59	21,751	21,407	22,754	22,38	24,245	24,774	23,814	24,864	25,167	25,837
67:00:59	21,861	21,515	22,872	22,701	24,54	25,031	24,012	25,012	25,294	25,913
68:00:59	22,252	21,897	23,238	23,123	24,926	25,393	24,33	25,291	25,509	25,994
69:00:59	22,694	22,331	23,671	23,156	24,978	25,44	24,385	25,336	25,562	26,176
70:00:59	22,699	22,347	23,7	23,328	25,113	25,555	24,459	25,404	25,611	26,227
71:00:59	22,927	22,563	23,899	23,893	25,62	25,977	24,811	25,705	25,835	26,248

Figura 42. Datos Temperatura Liofilización puré de zanahorias por 71 horas.

## Anexo 6: Diagramas temperatura condensador y presión en proceso de liofilización

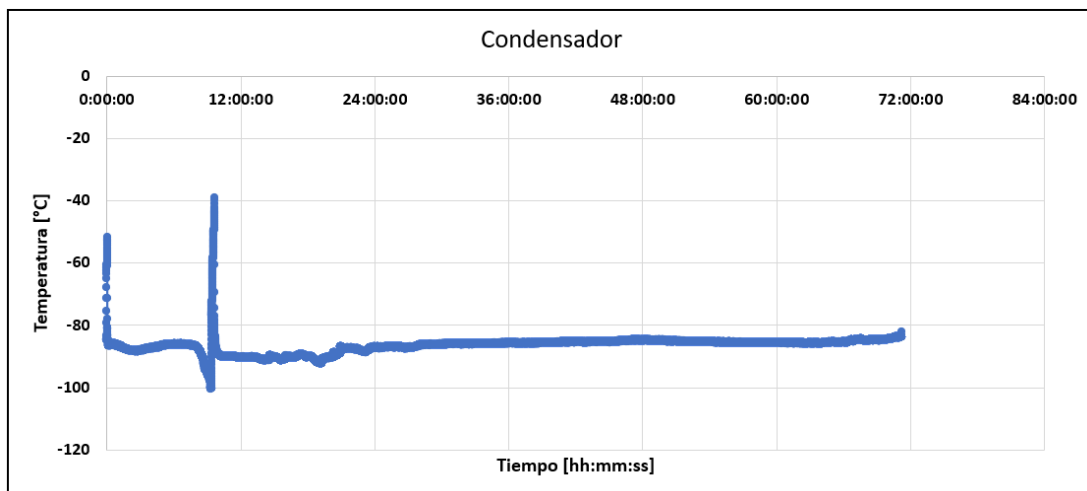


Figura 43. Diagrama Temperatura vs tiempo en condensador en proceso de liofilización de puré de zanahoria.

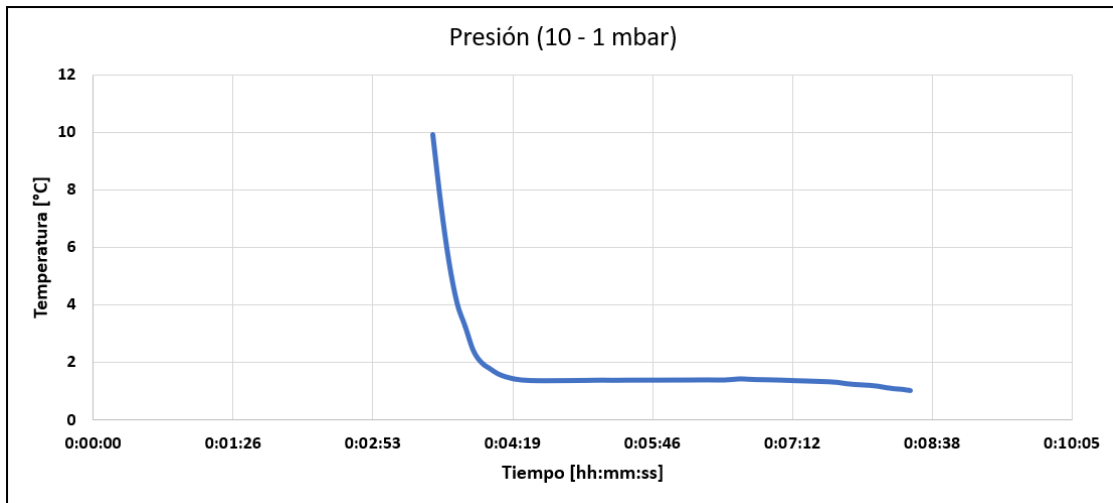


Figura 44. Diagrama de presión en el inicio, 10 a 1 mbar en proceso de liofilización.

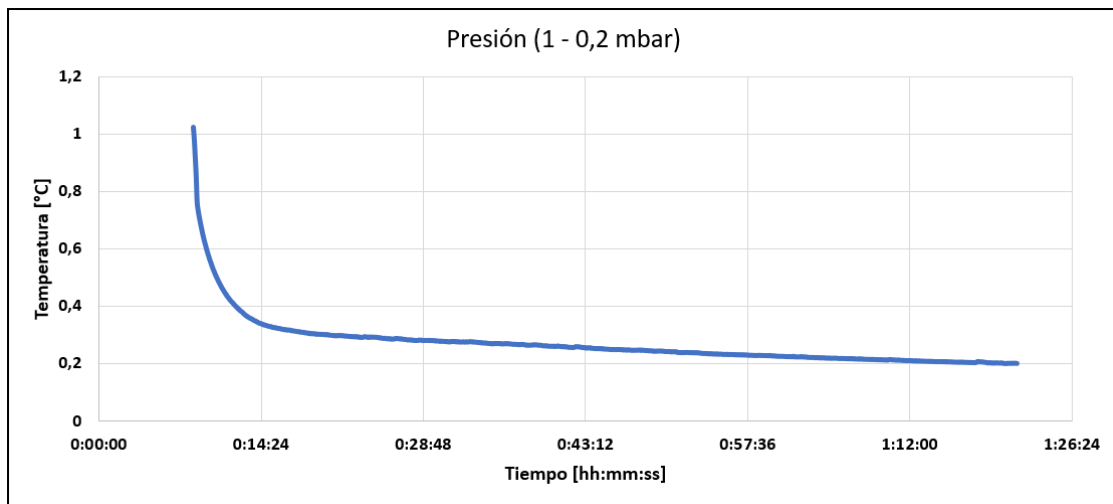


Figura 45. Diagrama de presión de 1 a 0,2 mbar en proceso de liofilización.

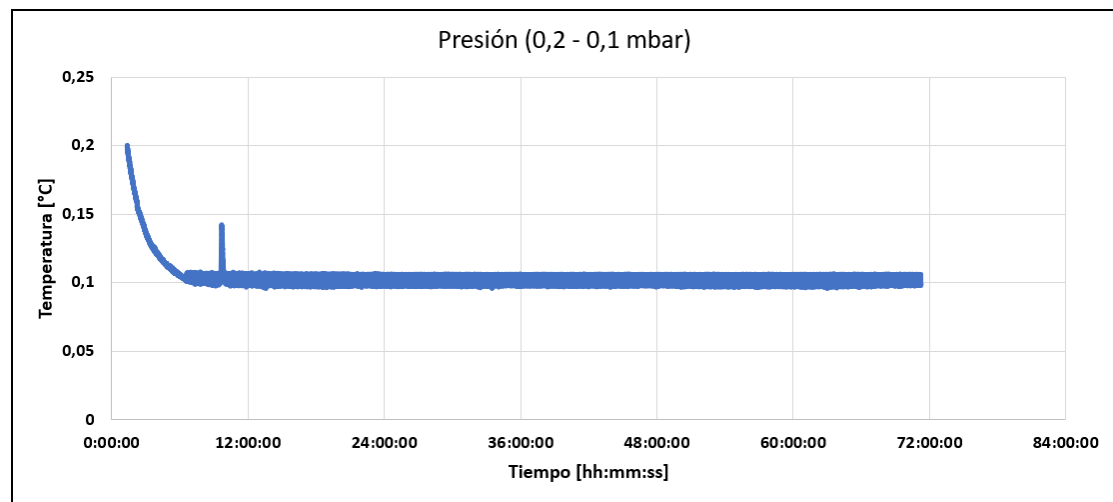


Figura 46. Diagrama de presión de 0,2 a 0,1 mbar en proceso de liofilización.

## Anexo 7: Algoritmo de ajuste por modelo logístico

```
'modelo logístico para datos temp'.py > ...
1  'modelo logístico para datos temp'
2
3  import numpy as np
4  from scipy.optimize import curve_fit
5  from sklearn.metrics import r2_score
6
7  t = np.loadtxt('Datos_tiempo_posit.txt')
8  y = np.loadtxt('Datos_temp_8_real_2da_liof_posit.txt')
9
10 def logistic_function(t, k, x0):
11     return 25 / (1 + np.exp(-k * (t - x0)))
12
13 guess_k = 0.46
14 guess_x0 = 48
15 params, covariance = curve_fit(logistic_function, t, y, p0=(guess_k, guess_x0))
16
17 k_estimado, x0_estimado = params
18 predicted_temp = logistic_function(t, k_estimado, x0_estimado)
19 r_squared = r2_score(y, predicted_temp)
20
21 print("Parámetros estimados:")
22 print("k:", k_estimado)
23 print("x0:", x0_estimado)
24 print("el R2 es:", r_squared)
25
```

Figura 47. Algoritmo de uso de modelo logístico para curva de temperatura, a través de programa Python (Scipy).

## Anexo 8: Datos pruebas humedad

Tabla 23. Datos porcentajes de humedad en zanahoria cruda, puré de zanahoria, y puré de zanahoria liofilizada.

06-09 de Junio de 2023						30 de Junio - 03 de Julio de 2023						01 - 04 de Agosto de 2023					
Zanahoria cruda		Pure de zanahoria		Pure de zan. Liofilizado		Zanahoria cruda		Pure de zanahoria		Pure de zan. Liofilizado		Zanahoria cruda		Pure de zanahoria		Pure de zan. Liofilizado	
Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]	Muestra n°	masa [g]
<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>		<b>Sin muestra</b>	
n°1	19,808	n°1	19,205	n°1	19,918	n°1	19,308	n°1	18,334	n°1	19,43	n°1	13,403	n°1	18,989	n°1	18,581
n°2	19,27	n°2	13,601	n°2	19,95	n°2	19,874	n°2	18,91	n°2	19,04	n°2	19,945	n°2	19,861	n°2	19,039
n°3	12,792	n°3	19,331	n°3	18,64	n°3	18,792	n°3	19,266	n°3	18,65	n°3	18,939	n°3	19,331	n°3	19,54
<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>		<b>Con muestra</b>	
n°1	24,891	n°1	24,283	n°1	20,925	n°1	24,358	n°1	23,379	n°1	20,45	n°1	18,523	n°1	24,059	n°1	19,584
n°2	24,175	n°2	18,675	n°2	20,964	n°2	24,994	n°2	24,023	n°2	20,05	n°2	25,025	n°2	24,872	n°2	20,038
n°3	17,865	n°3	24,375	n°3	19,642	n°3	23,882	n°3	24,336	n°3	19,65	n°3	24,019	n°3	24,291	n°3	20,552
<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>		<b>Con muestra (después de secado)</b>	
n°1	20,355	n°1	19,675	n°1	20,858	n°1	19,974	n°1	18,782	n°1	20,39	n°1	14,038	n°1	19,447	n°1	19,481
n°2	19,917	n°2	14,08	n°2	20,901	n°2	20,545	n°2	19,421	n°2	19,97	n°2	20,629	n°2	20,322	n°2	19,971
n°3	13,408	n°3	19,809	n°3	19,559	n°3	19,332	n°3	19,743	n°3	19,55	n°3	19,563	n°3	19,763	n°3	20,456
<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>		<b>% Humedad</b>	
n°1	89,24%	n°1	90,74%	n°1	6,65%	n°1	86,81%	n°1	91,12%	n°1	5,88%	n°1	87,60%	n°1	90,97%	n°1	10,27%
n°2	86,81%	n°2	90,56%	n°2	6,21%	n°2	86,89%	n°2	90,01%	n°2	7,92%	n°2	86,54%	n°2	90,80%	n°2	6,71%
n°3	87,86%	n°3	90,52%	n°3	8,28%	n°3	89,39%	n°3	90,59%	n°3	10,00%	n°3	87,72%	n°3	91,29%	n°3	9,49%
<b>Humedad prom.</b>	87,97%	<b>Humedad prom.</b>	90,61%	<b>Humedad prom.</b>	7,05%	<b>Humedad prom.</b>	87,70%	<b>Humedad prom.</b>	90,57%	<b>Humedad prom.</b>	7,93%	<b>Humedad prom.</b>	87,28%	<b>Humedad prom.</b>	91,02%	<b>Humedad prom.</b>	8,82%
<b>Desviación est.</b>	1,22%	<b>Desviación est.</b>	0,12%	<b>Desviación est.</b>	1,09%	<b>Desviación est.</b>	1,47%	<b>Desviación est.</b>	0,56%	<b>Desviación est.</b>	2,06%	<b>Desviación est.</b>	0,65%	<b>Desviación est.</b>	0,25%	<b>Desviación est.</b>	1,87%

	Zanahoria Cruda	Puré zanahoria	Puré zan. Liof.
<b>Promedio general</b>	87,65%	90,73%	7,94%
<b>Desv est general</b>	1,05%	0,38%	1,68%