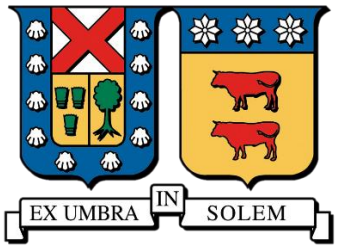
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO – CHILE



"Aplicación de perforaciones con láser de CO_2 en liofilización de platos preparados: efecto en tiempos de secado primario"

CAMILA IGNACIA SOTO LEIVA

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL QUíMICO

Profesor guía:
Dr. Sergio Almonacid

Profesores co-guía:
Ing. Marlene Pinto
Ing. María Jesús Melej

Octubre, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Aplicación de perforaciones con láser de CO2 en liofilización de platos preparados: efecto en tiempos de secado primario

Nombre del candidato(a): Camila Ignacia Soto Leiva

Carrera / Grado: Ingeniero Civil Químico

Campus: Casa Central **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

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

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

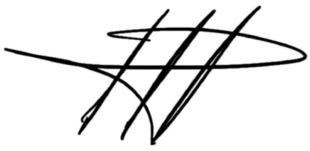
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28/10/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026 **Firma:** 

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

Agradecimientos

A mis padres, Patricio y Cecilia, quienes con esfuerzo y sacrificio dieron todo para que pudiésemos tener lo que ellos no tuvieron. Gracias por guiarme, por el amor incondicional, por las risas cuando más lo necesité, por darme la confianza de que puedo lograr todo lo que pueda llegar a soñar.

A mis hermanos, Paulo, Victor y Cristián. Desde pequeña fueron mi ejemplo, gracias a ustedes estoy donde estoy. Gracias por siempre tener un consejo, un abrazo apretado, una conversación caótica con gusto a infancia.

A mi Sebastián, Amparo y Olivia, verlos crecer es el mejor regalo que me dio la vida. Gracias por dejarme ser parte de sus risas, sus pasos, sus logros y sus mundos mágicos. En ustedes encuentro una razón para ser mejor y seguir siempre adelante. Gracias por traer a mi vida un amor incomparable.

A todos los que fueron parte de este proceso, en especial a mis amigos Deborah y Matías, su apoyo y compañía fueron indispensables para superar esta etapa. Gracias por siempre estar.

A mis profesores, Dr. Sergio Almonacid e Ing. Marlene Pinto, gracias por guiarme en este camino, por la paciencia y las enseñanzas.

Por último, agradezco a la empresa Daff-Desarrollos Alimenticios, por su disposición y colaboración, especialmente a María José Melej, por aceptar sumarse a este proyecto y representar a la empresa durante su desarrollo. Su apoyo y disposición fueron muy valiosos para llevar a cabo este trabajo de titulación.

Índice

Agradecimientos 2
Resumen ejecutivo 6
1. Introducción 7
Objetivos 9
Objetivos específicos 9
2. Antecedentes 10
2.1. Selección del plato 10
2.2. Selección de alimentos a procesar 11
Papa 11
Carne de vacuno 11
2.3. Congelación 12
2.4. Liofilización: secado primario y secundario 13
2.5. Perforaciones con láser de CO_2 15
2.6. Formas de reducción de tiempo de procesamiento 15
3. Metodología 17
3.1. Diagrama de flujo 17
3.2. Metodología general 17
3.3. Materia prima 19
3.4. Equipos 19
3.5. Método 23
3.5.1. Estandarización de los alimentos 23
Pretratamiento de las muestras 23
Estandarización de la cocción 24
Proceso de perforación con láser de CO_2 26
Congelación 26
3.5.2. Reconstitución del plato 27
Liofilización 27
Reconstitución del plato preparado 28
Rehidratación del plato preparado 29

3.5.3. Cálculo del consumo energético 30
4. Resultados 32
4.1. Resultados experimentales 32
Estandarización de las muestras 32
Determinación de tiempos de congelación 33
Determinación de parámetros de laser CO_2 33
Determinación de tiempos de secado primario 34
- Tiempos de secado primario de papas 35
- Tiempos de secado primario de carne 36

Reconstitución del alimento 38
Cálculo de consumo energético 41
5. Conclusión 43
6. Anexos 45
6.1. Gráficos de tiempos de secado primario inicial 45
6.2. Gráficos de dureza de platos preparados 47
Referencias 51

Índice de tablas

Tabla 1. Información nutricional de papas 19
Tabla 2. Información nutricional carne 19
Tabla 3. Parámetros de uso texturómetro 20
Tabla 4. Parámetros de uso Láser CO_2 21
Tabla 5. Valores de rendimiento del liofilizador 22
Tabla 6. Resumen de recetas utilizadas 25
Tabla 7. Valores obtenidos para dureza en 15 [min] de cocción 32
Tabla 8.Valores obtenidos para dureza en 20 [min] de cocción 32
Tabla 9. Valores obtenidos para dureza en 25 [min] de cocción 32
Tabla 10. Valores obtenidos para tiempos de congelación de la papa 33
Tabla 11. Valores obtenidos para tiempos de congelación de la carne 33
Tabla 12. Experimentos realizados para selección de parámetros de Láser de CO2 34
Tabla 13. Tiempos de secado primario inicial en papas sin perforaciones 35
Tabla 14.Tiempos de secado primario inicial en papas con perforaciones 35
Tabla 15. Observaciones de experimentos para tiempo de secado de papas 35
Tabla 16. Resultados de textura plato de referencia empresa y liofilizado 41
Tabla 17.Comparación de la producción teórica con y sin perforaciones 43

Índice de figuras

Figura 1. Fases 12
Figura 2. Fases del proceso de liofilización (Babic, Cantalejo, & Arroqui, 2009) 14
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso (Elaboración propia) 17
Figura 4. Disposición de alimentos en platos. 18
Figura 5. Texturómetro 20
Figura 6. Ultracongeladora 21
Figura 7. Cámara de liofilización en uso 22
Figura 8. Papas liofilizadas por 16 horas, con y sin perforaciones. 37
Figura 9. Carne liofilizada por 8 horas, con y sin perforaciones 37
Figura 10. Carne liofilizada por 9 horas, con y sin perforaciones 38
Figura 11. Plato empresa colaboradora 39
Figura 12. Plato liofilizado sin rehidratar 39
Figura 13. Plato liofilizado rehidratado 40

Resumen ejecutivo

La preservación de alimentos constituye un desafío relevante para la industria, debido al creciente interés por productos de larga vida útil que mantengan sus propiedades nutricionales y sensoriales. En este contexto, la liofilización destaca como una tecnología que, mediante la sublimación del hielo en condiciones de vacío, permite preservar dichas propiedades de los alimentos. Sin embargo, su principal desventaja corresponde a los elevados costos operacionales asociados a los extensos tiempos de secado, lo que motiva la búsqueda de estrategias que permitan optimizar este proceso.

Una alternativa corresponde a la incorporación de perforaciones realizadas mediante un láser de CO_2, las cuales favorecen la difusión del vapor de agua generado durante la sublimación, facilitando su salida desde el interior del alimento y reduciendo el tiempo requerido para el secado.

Se desea evaluar el efecto de las perforaciones en un plato preparado, ya que, en caso de ser favorables, significaría la disminución los costos ligados a la liofilización. Por lo que se desarrolla un plato preparado liofilizado de estofado de vacuno para comparar sus características de textura con un producto comercial del mismo tipo, proporcionado por Daff-Desarrollos Alimenticios, empresa chilena del rubro alimentario. Las muestras son liofilizadas a 30 [ºC] y 0,1 [mbar], aplicando cinco perforaciones con el fin de evaluar que efecto tienen estas en los ingredientes con mayor tiempo de secado, en este caso, papa y carne.

Los resultados mostraron que las perforaciones redujeron el tiempo de secado primario de la papa de 18 [h] a 16 [h] y de la carne de 12 [h] a 9 [h], lo que representa disminuciones del 11% y 25%, respectivamente. Por otro lado, el plato liofilizado presentó una textura más parecida a la de un plato recién elaborado, ya que la carne liofilizada tiene una mejor conservación de su estructura interna al ser rehidratada.

Finalmente, se concluye que la incorporación de perforaciones favorece proceso ya que disminuye el tiempo de secado primario y, por ende, reduce el consumo energético y los costos operacionales asociados a la etapa de liofilización. Además, los resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica de elaborar un plato preparado liofilizado con características sensoriales comparables a las del producto comercial.

1. Introducción

La liofilización es una tecnología que se utiliza para la preservación de alimentos y farmacéuticos sensibles al calor, la cual se ha convertido en una de las técnicas más importantes y sofisticadas en este ámbito. Esto se debe a que este tipo de secado afecta de manera positiva a los productos, ya que, en el caso de los alimentos, estos mantienen su color, olor y sabor, evitando que se pierdan los nutrientes presentes en los ingredientes utilizados (Hua, Liu, & Zhang, 2010).

La liofilización se considera una tecnología relativamente nueva, que no tiene demasiados productos comunes en los supermercados, pero en realidad es un proceso milenario que fue utilizado en la antigua China y por los incas peruanos. Gracias a las bajas temperaturas en las montañas y las bajas presiones en zonas de gran altura, se liofilizaron alimentos de manera natural, como las papas, para obtener fécula de maíz, más conocida como “chuño” (BBC , 2017)

Los alimentos que se procesan con esta tecnología tienen un peso final bajo y una vida útil prolongada, dos cualidades que hacen de estos alimentos especialmente útiles para comidas de emergencia y raciones militares, las cuales pueden ser rehidratadas con el uso de agua caliente, motivo por la cual es conveniente en condiciones en que no se pueda acceder a algún tipo de combustible para cocinar o calentar estas porciones de alimentos (Lan T.T. Bui, 2018). Debido a los pesos finales bajos, los alimentos liofilizados presentan una ventaja en las operaciones de transporte de estos productos.

En Chile, existen marcas como Gufo Outdoor Food y Lio Explora, entre otras, las cuales ofrecen comidas preparadas liofilizadas para realizar actividades al aire libre como trekking y excursiones de larga duración, en las que se necesitan este tipo de soluciones alimenticias. Especialmente en un país donde el turismo en áreas silvestres protegidas es un gran atractivo, ya que según lo que registra Conaf en el reporte de visitas, se puede notar que al año 2024, 2 millones de chilenos y 660 mil extranjeros, aproximadamente, visitan los parques (CONAF, 2024).

Por otro lado, a pesar de tener ventajas que hacen que el producto final tenga beneficios, la liofilización es uno de los procesos más costosos para procesar el secado de alimentos. Esto se debe principalmente al prolongado tiempo de

duración de los procesos, lo que conlleva un elevado gasto energético. Además, hay un costo asociado a la tecnología que requiere el equipo para operar en las óptimas condiciones de temperatura y presión, ya que ambas son bajas, pero la segunda es más difícil de lograr.

Es por lo anterior que se realizar la comparación de dos platos preparados, uno realizado con los ingredientes liofilizados y otro del mercado, que haya sido preparado con otra tecnología. En este caso, el plato del marcado escogido es el estofado de carne, al ser una preparación común dentro de los platos que se comercializan con el objetivo de ser durables en el tiempo, el cual se ha fabricado mediante la esterilización térmica de sus ingredientes. Dicho plato consta de papa, carne, zanahoria, condimentos y agua, por lo que se fabricará un plato similar, esta vez con los ingredientes liofilizados.

Debido a las ventajas del proceso es que se desea establecer las diferencias de las texturas finales de cada plato, teniendo en cuenta que la liofilización debería constituir un beneficio para las propiedades organolépticas del producto final. Por otro lado, debido a la mayor desventaja del proceso, que corresponde a los extensos tiempos de secado, se implementa la realización de perforaciones realizadas con un láser de CO_2 en la preparación de los elementos a liofilizar, con el fin de comprobar que los tiempos de secado serán reducidos. Para dicho experimento, se considera la evaluación de los tiempos de secado solo para la papa y la carne, debido a que se considera que los tiempos de procesamiento de estos elementos es de mayor relevancia respecto de los demás ingredientes.

La fabricación de un plato liofilizado y con perforaciones, podría beneficiar notablemente la industria de este tipo de productos, debido a las ventajas que presentan los productos elaborados con esta tecnología, mencionadas anteriormente, como también por las facilidades en su almacenamiento, ya que no hay necesidad de refrigeración del producto terminado. Además, la duración de un plato liofilizado puede llegar a décadas según el alimento, debido a la ausencia de humedad en el alimento, por lo que los microorganismos no proliferan en dicho medio. Esto si se tiene un correcto manejo de los productos luego de la liofilización, para asi evitar la reabsorción de agua y deterioro, lo que puede causar daños a la estructura, contenido nutricional y vida útil. Para ello se debe utilizar un empaque de alta calidad, como láminas de papel de aluminio. (Uwineza & Zhang, 2026)

Desde un punto de vista operacional, es factible realizar un plan de elaboración en el que la fabricación de los platos se realice en un periodo inicial, para luego conservar el producto terminado y comercializarlo sin la necesidad de mantener una producción constante, lo cual se consideraría de gran provecho en vista de la mantención de los equipos y su desgaste, como también de los costos asociados a la producción.

Objetivos

- Determinación del efecto de las perforaciones con láser de CO_2 en el proceso de liofilización de platos preparados.

Objetivos específicos

- Determinar tiempos de proceso en experimentos con y sin perforaciones.
- Determinar el consumo energético en cada caso.
- Verificar las diferencias de textura entre los productos finales.

2. Antecedentes

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad de reemplazar el proceso convencional de la fabricación de un plato preparado para la comercialización, por un proceso de liofilización de este, con el fin de determinar si esta tecnología puede permitir obtener un producto que, al ser rehidratado, presente una conservación de sus propiedades organolépticas, tales como color, textura, aroma y sabor, manteniendo asi, las características de los alimentos antes de procesar.

Si bien el proceso de secado de un alimento mediante la liofilización presenta ventajas en la conservación de la calidad del producto, tiene una gran limitante, el prolongado tiempo de procesamiento, lo cual conlleva un gasto energético considerable y por ende costos asociados a este. Bajo este contexto se propone la incorporación de perforaciones en los elementos a liofilizar, mediante tecnología láser como estrategia para favorecer la salida del agua contenida en el alimento mediante el secado, lo que podría disminuir el tiempo de secado sin afectar la calidad del producto final.

Para llevar a cabo la investigación, se utiliza un plato preparado que es proporcionado por Daff-Desarrollos Alimenticios, empresa colaboradora del rubro alimentario, donde a partir de este, se reproduce a escala de laboratorio. El proceso consta de la estandarización de la cocción de los elementos, para luego realizar las perforaciones y el congelamiento de las muestras, con el fin de prepararlos para su liofilización. Finalmente se reconstituye el plato de acuerdo con la formulación entregada por la empresa, y asi poder evaluar las diferencias de aspecto y textura de los productos finales, como también el efecto de las perforaciones en los tiempos de secado.

2.1. Selección del plato

Para este proyecto, primeramente, se escoge una de las preparaciones de común elaboración en la industria de los platos preparados esterilizados, en este caso, estofado de carne. Para el desarrollo experimental se utilizó dicho plato preparado, el cual fue proporcionado por la empresa colaboradora. La empresa facilitó el producto de referencia, es decir un plato listo para la venta, como también los ingredientes secos, es decir los condimentos que se utilizan en su fabricación, con el objetivo de reproducir el producto en condiciones de laboratorio, con la diferencia de que los demás ingredientes serán liofilizados. El plato consta de papa, carne, zanahoria, cebolla, condimentos y agua, la

empresa también facilitó la receta confidencial de la elaboración del plato, para asi realizar una comparación fidedigna del producto comercial y del producto realizado en el laboratorio.

2.2. Selección de alimentos a procesar

Los elementos del plato elegidos para realizar la parte experimental de este proyecto son papa y carne de vacuno, ya que son los ingredientes que tienen mayor tiempo de proceso debido a su estructura y mayor tamaño respecto de los demás elementos presentes en el plato.

Papa

El comercio de la papa se encuentra ligado a un solo género, *Solanum tuberosum L.* que contiene casi 1000 especies, este se distribuye por todo el mundo, concentrando su diversidad mayoritariamente en Sur y Centroamérica, especialmente las especies de tubérculos por su resistencia a pestes y patógenos, además de su optima adaptación a climas extremos. (Hawkes, 1992).

En Chile la producción de papa se encuentra concentrada en las regiones de Coquimbo y Los Lagos, con una superficie promedio de cultivo de 42.931 [ha], alcanzando una producción de 1.102.939 [ton] en un periodo de 10 años, cosecha que consta de variadas formas, tamaños y colores. Las principales exportaciones de Chile el año 2023 fueron papa fresca, semilla de papa, papa sin congelar, puré, entre otros. Por otro lado, las importaciones corresponden a papas preparadas congeladas, puré, papas sin congelar y harinas, alcanzando un valor de 146.147.299 [kg]. (Ulibarry, 2024)

Carne de vacuno

El consumo de carne en Chile viene dado por la producción de carne en vara, es decir la carne que se extrae del canal del animal y es comercializada en supermercados y carnicerías. El canal se refiere al sector incluye el sistema óseo, muscular y graso de la vaca, excluyendo la cabeza, patas, cuero y sangre. En bovinos el rendimiento de canal es regularmente el 55% del peso de estos.

La producción de carne de origen bovino se encuentra en el tercer lugar en términos de cantidades, superada por la de aves y cerdo. Se producen alrededor de 200.000 [ton] al año, principalmente para las ventas en el mercado interno del país, donde hay sobre 120.000 productores. Sin embargo,

la producción nacional solo cubre alrededor del 35% de la demanda nacional, por lo que el resto es importado (Odepa, 2026). Las principales regiones productoras de carne de vacuno son Los Ríos y Los Lagos, cuyos productores lideraron la producción bovina con un crecimiento del 12,4% anual de carne de vacuno en vara, durante el año 2024. (Mundo Agropecuario, 2024).

2.3. Congelación

El proceso de congelamiento de un alimento conlleva cambios fisicoquímicos que afectan a la calidad del producto final. Para que se haga efectiva la cristalización del agua contenida en estos y se convierta en hielo, debe ocurrir un proceso conocido como nucleación. En los alimentos, el agua contenida en ellos no es pura, esta contiene solutos como azúcares, sales, proteínas, entre otros. La presencia de solutos afecta al punto normal de congelación del agua, ya que lo disminuye, generando que el agua contenida este lo suficientemente fría para congelarse, pero siga en estado líquido. Este fenómeno es conocido como *"undercooling"* o *"subenfriamiento"*. Como se puede ver en la figura 1, la línea inferior representa la disminución del punto de congelamiento (initial freezing point), como también las fases de congelación.

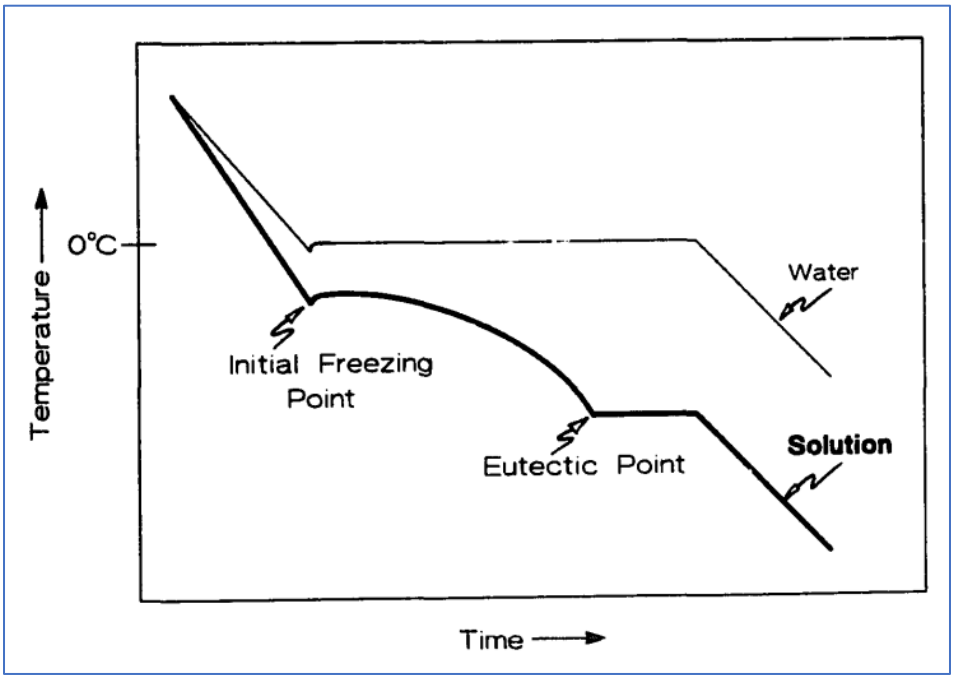


Figura 1. Fases del proceso de congelación

La transición de agua a hielo es diferente en los alimentos por esta razón, el concentrado de solutos, o como se le llama comúnmente, agua ligada,

permanece sin congelar una vez que el agua se cristaliza, lo que hace que el punto de congelamiento sea más bajo hasta que se alcanza un punto eutéctico, como se muestra en la figura 1, donde la línea superior corresponde a agua pura y la línea inferior corresponde a agua con un soluto.

Como se menciona anteriormente, el agua contenida en los alimentos tiene además partículas de otras moléculas, por lo que ocurrirá una nucleación heterogénea, donde estas partículas actuarán como pequeños sitios de nucleación, a diferencia de la nucleación homogénea donde los sitios de nucleación son menos y aleatorios. Posterior a la nucleación los cristales de hielo crecen según la velocidad en que se congele el alimento, lo cual tiene un efecto en la calidad de los productos finales.

En una congelación rápida, la rapidez de formación de cristales no es suficiente a medida que el alimento pierde calor, lo que resulta en subenfriamiento y como consecuencia una nucleación rápida, esto aumenta la cantidad de cristales que se forman y por lo tanto su tamaño es más pequeño. Por otro lado, en una congelación lenta, la propagación de los primeros cristales de hielo puede mantenerse constante a la perdida de calor, por lo que hay menos núcleos activos y como consecuencia se forman cristales más grandes (George, 1993).

En el proceso de liofilización, se prefiere que el alimento sea congelado de manera rápida, ya que el tejido se daña menos estructuralmente. Esto a pesar de que en la congelación lenta se generan cristales grandes, lo que favorece la formación de poros en la estructura del alimento y a su vez facilita el proceso de liofilización, ya que entrega al agua contenida en el alimento un camino más despejado para salir de este. (Saclier, Peczalski , & Andrieu, 2010).

2.4. Liofilización: secado primario y secundario

La liofilización es un proceso que en la actualidad ha sido reservado para productos de alto valor, como café, té e infusiones, ingredientes para comida instantánea y hierbas aromáticas (Adam, 2004). Es un proceso de secado que ha sido utilizado del siglo XIX, es un método que aumenta la vida útil promedio de los alimentos, ya que previene el crecimiento microbiano o la oxidación de estos. Además, la gran ventaja es que los productos rehidratados son similares a los productos frescos (Babic, Cantalejo, & Arroqui, 2009). En

el siguiente gráfico (figura 2) se pueden notar las diferentes fases del proceso de liofilización, donde se monitorean las temperaturas tanto del alimento como de los elementos del equipo utilizado. Las diferentes fases se diferencian de acuerdo con la temperatura del producto, donde se puede notar que el punto de corte entre secado primario y secundario viene dado por la estabilización de dicha temperatura.

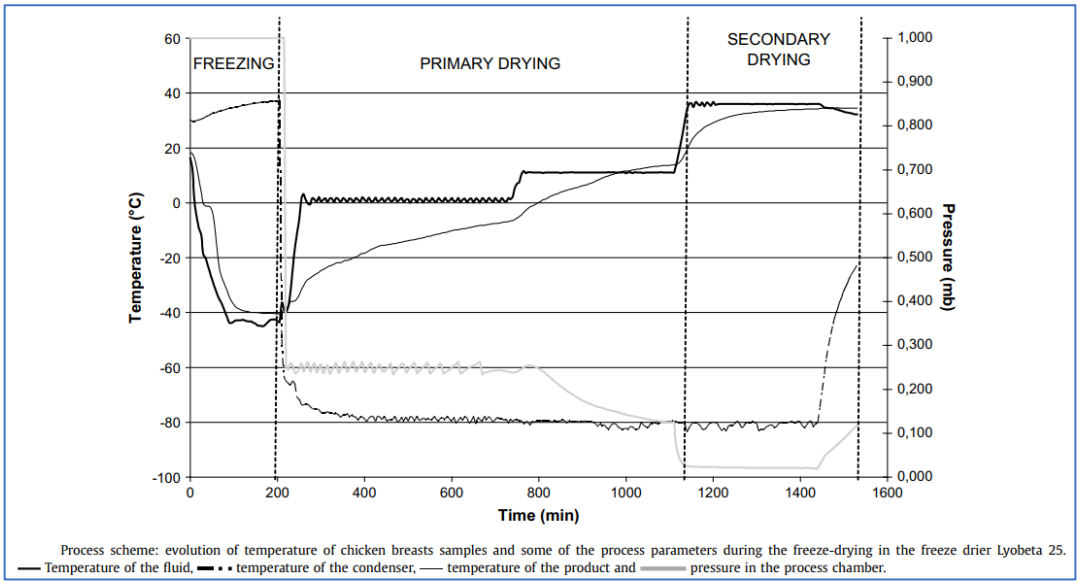


Figura 2. Fases del proceso de liofilización (Babic, Cantalejo, & Arroqui, 2009)

El secado primario corresponde a la sublimación del agua contenida en el alimento. El agua que se encuentra congelada es sublimada directamente a vapor de agua, gracias a las condiciones de presión y temperatura creadas en la cámara de liofilización, por lo que el producto se deshidrata. La sublimación empieza desde la superficie hasta el centro, formando una capa seca y una zona congelada, la cual se llama frente de sublimación.

El secado secundario o desorción, es el proceso en el que la temperatura es elevada para que el agua ligada se pueda secar en el producto, es decir se pueda vaporizar, además de secar algo de agua sin solutos o agua libre que pueda haber quedado en el alimento (Hua, Liu, & Zhang, 2010).

2.5. Perforaciones con láser de CO_2

Existen varios tipos de láseres que se pueden utilizar, pero el láser de CO_2 es el más adecuado para tratar con alimentos ya que la longitud de onda, de 10,6 [µm] es altamente absorbida por el agua. (Fujimaru, Ling, & Morrisey, 2012).

El láser puede ser incorporado a sistemas automatizados en la industria, debido a su alta precisión, alta productividad, flexibilidad y efectividad. Se ha utilizado para varias técnicas para el procesamiento de materiales, como remoción de partes pequeñas de estos, cortar sin causar daños por estrés de material, cortar o soldar sistemas complejos con poca aplicación de calor, y como en este caso, para perforar alimentos con el objetivo de disminuir los tiempos de secado. (Ferraz, Mittal, Bilanski , & Abdullah, 2007)

En investigaciones, se ha utilizado el láser para realizar modelos matemáticos basado en pelado y cortado de papas y asi poder predecir la profundidad con que es cortada (Ferraz, Mittal, Bilanski , & Abdullah, 2007). Como también se ha evaluado para modificar la superficie de tomates y asi obtener una alternativa al uso de lejía, que tiene un impacto negativo en el medioambiente. (Silva-Vera, y otros, 2020)

También se ha utilizado para investigar el efecto del láser en la perforación de arándanos para mejorar la absorción de azúcar como método de preservación de la fruta, con el fin de acelerar este proceso. En esta investigación se demuestra que el uso del láser si fue efectivo en la eficiencia, mejorando la calidad del producto. (Fujimaru, Ling, & Morrisey, 2012)

2.6. Formas de reducción de tiempo de procesamiento

Para hacer los procesos cada vez más eficientes, se han investigado variadas rutas. A nivel molecular, se ha investigado el efecto del tamaño de hielo adecuado que permita que tanto el secado primario como el secundario se realice con más eficiencia. Como se menciona anteriormente, se desea modificar el proceso de nucleación en el congelamiento de las materias primas ya que afecta directamente a la formación de cristales y su tamaño. Para esto se evalúan distintas posibilidades, como el uso de ultrasonido, electro-congelado, inducción de congelado superficial, entre otras (Saclier, Peczalski , & Andrieu, 2010).

Otro enfoque es reducir el tiempo de liofilización introduciendo otra tecnología de secado en el proceso, como el calentamiento por microondas ya

que este podría acelerar el calentamiento ya que afecta a la parte central del producto con la generación de vibración de las moléculas de agua.

En este caso, se quiere modificar la estructura del alimento mediante la generación de más superficies por las que el agua congelada pueda sublimarse y salir del material, a través de la generación de perforaciones, similar a las investigaciones realizadas en arándanos, con el pretratamiento de la fruta mediante la generación de micro perforaciones en su superficie, con el objetivo de mejorar la infusión en azúcar, como método de preservación, la cual tuvo resultados favorables (Fujimaru, Ling, & Morrisey, 2012).

3. Metodología

3.1. Diagrama de flujo

El diagrama del flujo a seguir para la realización de los experimentos que requiere este estudio se ve representado en la figura 3.

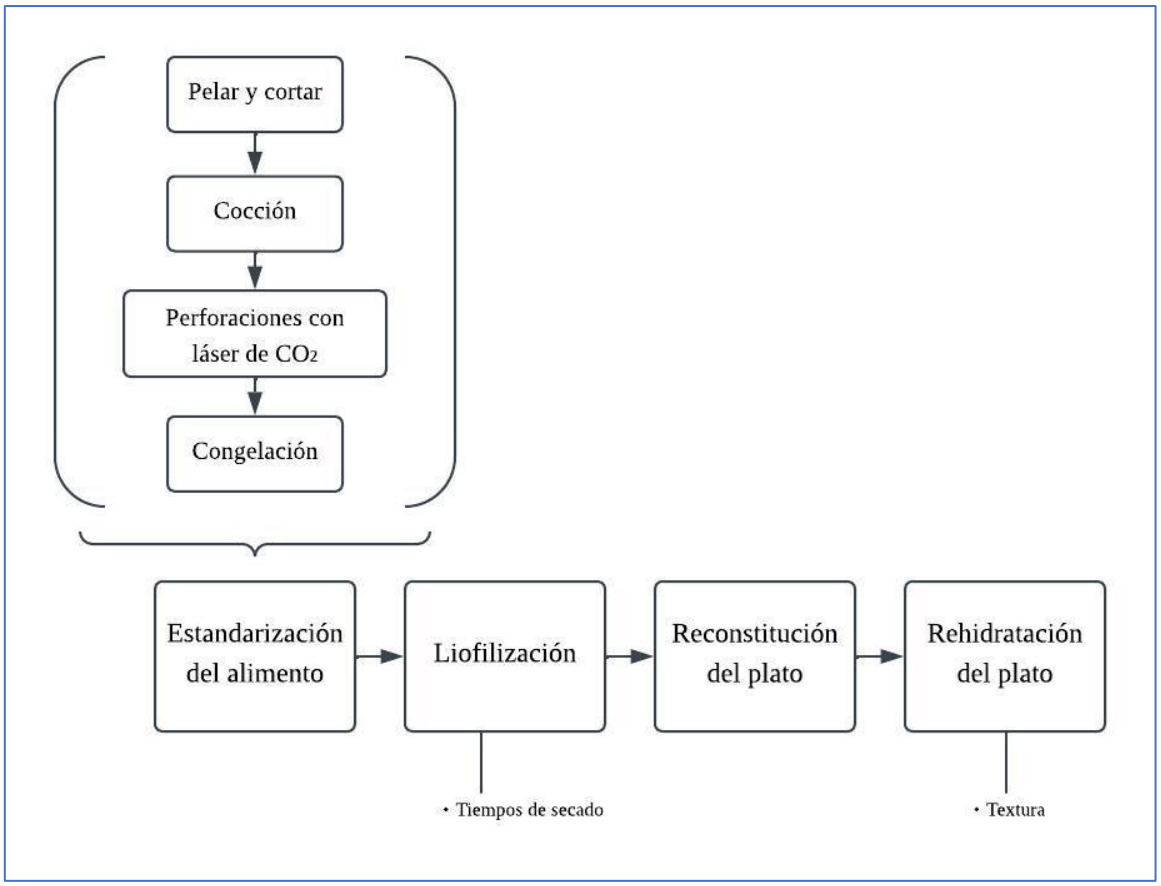


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso (Elaboración propia)

3.2. Metodología general

El objetivo de la metodología utilizada para realizar los experimentos es conseguir liofilizar los alimentos mencionados anteriormente en las geometrías requeridas para cada uno, para luego realizar la comparación de los tiempos de secado de los alimentos con y sin perforaciones, como también para utilizarlos como ingredientes en la constitución de un plato preparado.

Primeramente, se realiza el pretratamiento de los vegetales y la carne, esto consiste en seleccionar, limpiar, trozar, cocer y congelar (Hua, Liu, & Zhang, 2010). Luego se realiza la cocción de cada uno de estos ingredientes, trozados en cubos. Para garantizar que la papa se encuentre cocida de manera uniforme,

se realizan pruebas de textura para determinar un tiempo de cocción estándar. En el caso de la carne, se cuece hasta que logra una temperatura de 70 [ºC], ya que a esta temperatura se garantiza el punto en que se encuentra bien cocida. (Frigorifico Sada, 2024)

De esta manera se logra obtener los tiempos de cocción estándar de los ingredientes. Luego, se realizan las perforaciones con un láser de CO_2 en la mitad de las unidades del alimento a liofilizar, para luego procesarlos en un mismo experimento.

Posteriormente, se congelan los alimentos a -30 [ºC], por un tiempo que se determina mediante la utilización de termocuplas, hasta que la temperatura interna del alimento sea la requerida.

Una vez congelado el alimento, se procede a realizar su liofilización de estos, donde los parámetros utilizados con una temperatura de plano de 30 [ºC], con una presión de 0,1 [mbar]. Para garantizar que la comparación de alimento sin perforar con alimento perforado sea válida, se dispone del alimento en un plato en sus dos formas, mencionadas anteriormente, es decir con y sin perforaciones, como se muestra en la figura 4.

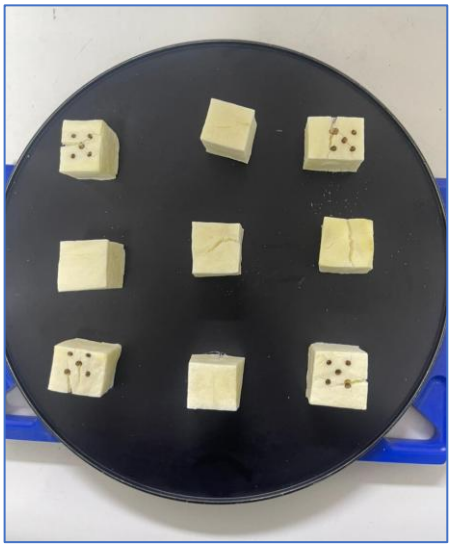


Figura 4. Disposición de alimentos en platos de liofilización.

Se realiza una comparación de los tiempos de secado de los ingredientes por separado, como también la comparación de textura de un plato preparado con ingredientes liofilizados y un plato preparado con alimentos procesados térmicamente de la empresa colaboradora. Así mismo, se analiza el efecto de

la realización de perforaciones, en comparación a la ausencia de perforaciones, en cada uno de los escenarios mencionados. De esta manera, se tienen cuatro tipos de experimentos;

1. Liofilización de ingredientes separados sin perforaciones.
2. Liofilización de ingredientes separados con perforaciones.
3. Medición de textura de plato preparado liofilizado.
4. Medición de textura de plato preparado empresa.

3.3. Materia prima

La materia prima utilizada en estos experimentos corresponde a papa y carne de vacuno. En el caso de la papa se utilizan papas en malla de la marca "Huertos del Ranco", en el caso de la carne, se utiliza posta negra, de la marca "PUL" la cual se obtiene en el supermercado Lider. Se utilizan estas marcas con el fin de estandarizar los experimentos, además de que la calidad de estos se considera óptima. A continuación, se presentan los valores nutricionales de la papa (tabla 1) y la carne de vacuno (tabla 2).

Valores medios	Por cada 100 [g/mL]	Por cada 1 porción
Energía [kCal]	86,4	129,6
Proteínas [g]	2.46	3.7
Grasas totales	0,2	0,3
Hidratos de carbono disponibles	18,8	28,2
Sodio [mg]	25	37,5

Tabla 1. Información nutricional de papas

Valores medios	Por cada 100 [g/mL]	Por cada 1 porción
Energía [kCal]	121	121
Proteínas [g]	23	23
Grasas totales	2	2
Hidratos de carbono disponibles	0	0
Sodio [mg]	50	50

Tabla 2. Información nutricional carne

3.4. Equipos

Texturómetro

En el caso de la papa se utiliza el texturómetro (figura 5) correspondiente al modelo CT3-50 KG Brookfield Texture Analyser, el cual es controlado por el

software Texture Pro CT v1.2. En este software se especifican los parámetros para deformar la papa en un 50%, con el fin de determinar un tiempo de cocción estándar para el alimento, mediante la medición de la fuerza utilizada para realizar dicha deformación. Dichos parámetros se indican en la tabla 3.

Parámetro	Especificación
Sonda	TA4/1000
Base	TABT KIT
% de deformación	50%
Carga de activación	0,07 [N]
Velocidad	1 [mm/seg]

Tabla 3. Parámetros de uso texturómetro



Figura 5. Texturómetro

Láser CO_2

Para realizar las perforaciones, se utiliza un láser de CO_2. El modelo utilizado es SYNRAD TI100, el cual tiene una longitud de onda de 9,3 a 10,6 [µm]. El láser y los parámetros son controlados por el software WinPro Mark, donde se utilizan 100 pulsos de 50 [Hz] de frecuencia, con un 50% de frecuencia, en un arreglo de cinco orificios, con el fin de perforar el alimento en la totalidad de su altura, para asi maximizar el efecto de las perforaciones en el tiempo de secado. Algunas características del láser se presentan en la siguiente tabla 4:

Parámetro	Especificación
Potencia de salida	100 [W]
Diametro haz	2 +/- 3 [mm]
Longitus de onda	9,3-10,6 [µm]
Carga máxima de calor	1700 [W]

Tabla 4. Parámetros de uso Láser CO_2

Ultracongeladora

Se utiliza la ultracongeladora de la marca Infrico (figura 6), donde se lleva el alimento a la temperatura interna de -30 [ºC], ya que se debe mantener el alimento a una temperatura menor a la temperatura de transición vítrea de este, que en el caso de la papa es de -16 [ºC], para asi mantener la estructura del alimento. Se utiliza el software Loggin Pro para registrar el congelamiento tanto de las papas como de la carne y asi obtener el tiempo de congelación de cada uno. En la primera fase se realiza un precongelamiento de la cámara, para luego en la segunda fase, generar una congelación rápida que evite la formación de hielos demasiado grandes, lo que mantiene la estructura del alimento y de las proteínas, además se logra una buena rehidratación posterior (Hua, Liu, & Zhang, 2010).



Figura 6. Ultracongeladora

Liofilizador

Para el proceso de liofilización, se utiliza el equipo de la marca Martin Christ, correspondiente al modelo Alpha 2-4 LSCplus. EL equipo se encuentra configurado con el software LCSplus versión 1.5.1.7.0. (figura 7), donde se registran las temperaturas y presiones, luego se genera un gráfico a partir de ellas, el cual permite conocer el tiempo en que termina el secado primario.

Una vez realizada la congelación de los alimentos, se realiza la liofilización en el equipo, donde los parámetros que se utilizan son; temperatura de plato de 30 [ºC] y presión de 0,1 [mbar], mientras que los tiempos de proceso dependen de cada alimento. En la tabla 5, se indican algunas de las características del equipo:

Alpha 2-4 LCSplus	Rendimiento
Capacidad condensador	4 [kg] / 24 [h]
Temperatura condensador	-85 [ºC] aprox.
Volumen de cámara	6,5 [L] aprox.
Temperatura de bandejas	-35 a 60 [ºC]
Nº de bandejas	5

Tabla 5. Valores de rendimiento del liofilizador

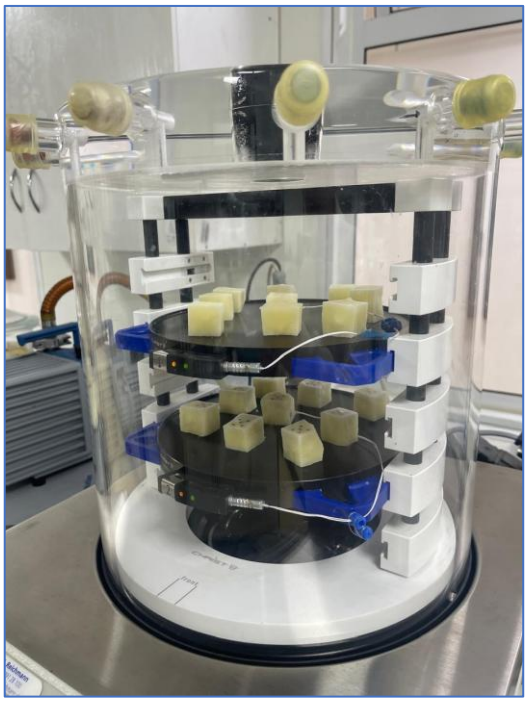


Figura 7. Cámara de liofilización en uso

Para utilizar el equipo se deben conocer sus principales partes, las cuales son:

- Cámara de liofilización: donde se encuentran los platos en los que se disponen las muestras a liofilizar, está construida para garantizar que los parámetros de temperatura y presión seleccionados se mantengan óptimos para realizar el proceso, ya que tiene un sistema de sellado hermético. Los platos tienen incorporadas las termocuplas para obtener los datos que se necesitan. Los gases fluyen hacia el condensador mediante una válvula que debe mantenerse abierta durante el proceso.
- Condensador: cumple la función de eliminar los posibles vapores condensables que puedan entrar al sistema de bombeo de generación de vacío, a este proceso se le llama "warm up", donde se disminuye la temperatura hasta -85 [ºC].
- Bomba de vacío: genera las condiciones de presión necesarias para producir la sublimación del vapor, logrando las bajas presiones que se necesitan.
- Sensores: el equipo cuenta con un sensor pirani y un sensor capacitivo.

3.5. Método

3.5.1. Estandarización de los alimentos

Pretratamiento de las muestras

- Pretratamiento de la papa:

  1. Se seleccionan las papas a utilizar, prescindiendo de los que se encuentren en mal estado, ya sea dañados o descompuestos. Por experimento se utilizan alrededor de 3 papas medianas.

  2. Realizar el lavado meticuloso de las papas, con el objetivo de remover la suciedad de la superficie, como polvo, tierra, microorganismos o residuos de pesticidas.

  3. Se retira la cascara de las papas, este paso no es necesario hacerlo con precisión, ya que al trozar se perderán las partes más esféricas o curvas de la papa.

  4. Se troza la papa en cubos de 2 [cm] de alto, 20 [cm] de ancho y 2 [cm] de espesor aproximadamente (Oikonomopoulou & Krokida, 2012), cuidando que no sea muy grande ya que aumenta el tiempo de proceso, ni muy pequeño ya que se genera perdida de los nutrientes en los jugos

generados. Este proceso es el que debe realizarse con mayor precisión, ya que la geometría del alimento afecta directamente en los tiempos de proceso.

- Pretratamiento de la carne:

  1. Primeramente se debe retirar la grasa que contenga el trozo de carne, ya que esta podría derretirse bloqueando los poros de la superficie, lo que impide optima sublimación de los hielos. Por lo que se elige un corte magro como lo es la posta negra.

  2. La carne se troza en cubos de 2 [cm] de alto, 2 [cm] de ancho y 2 [cm] de espesor, haciendo los cortes de forma perpendicular a la fibra, ya que acelera la sublimación de los hielos. La geometría escogida es la misma que se selecciona para las papas, con el objetivo de evaluar los tiempos de proceso sin cambiar esta variable.

Estandarización de la cocción

Se realiza la estandarización de la cocción de los alimentos a utilizar el proceso de liofilización, en este caso papa y carne. Este proceso se realiza con el objetivo de lograr un alimento que tenga las mismas condiciones de cocción en todos los experimentos, para asi tener la menor cantidad de variables que podrían afectar al secado, y de esta manera, poder comparar estos procesos.

La cocción como tal se realiza en una olla de cocina sobre una placa calentadora, ya que al realizar los experimentos se puede notar que al utilizar la olla se tiene una superficie mayor para cocer los alimentos, ya que los trozos se distribuyen de mejor manera en el fondo de la olla y todos son afectados por la misma temperatura. Además, la temperatura del agua se distribuye y mantiene de mejor manera gracias al material por el que se compone la olla.

- Tiempo de cocción de la papa:

  En el caso de la papa, se toman tres recetas, las cuales especifican la cocción de papas enteras. Las recetas utilizadas corresponden a las publicadas en los blogs Fine Dining Lovers (FDL), Directo al Paladar (DAP) y Nestlé. Una vez realizadas estas preparaciones, se realiza un

panel sensorial en el que se determina cual es la receta más apta, es decir, la que tiene una mejor textura y sabor.

En la tabla 6 se presenta un resumen de las recetas recopiladas.

Receta	**Tamaño de papa**	**Tiempo de cocción**	**Pelar**	**Tº agua inicial**	**Adición de sal**
FDL	Grande	30 min	No	100ºC	Al hervir
DAP	Mediana	25 min	No	Ambiente	Al hervir
NESTLÉ	No se especifica	20-25 min	No	Ambiente	Al principio

Tabla 6. Resumen de recetas utilizadas

Respecto al procedimiento, para comparar las recetas, se realizan pruebas de dureza a las papas cocinadas, seguidas de un panel sensorial en el que se determina que receta es la más adecuada, considerando que la papa no debe quedar cruda ni sobre cocida. Bajo este criterio se escoge la receta, y luego, teniendo en cuenta la dureza obtenida en dicha receta, se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Realizar el procedimiento de pretratamiento de los alimentos como se menciona anteriormente.

2. Realizar la cocción de las papas en cubos mediante ensayos a diferentes intervalos de tiempo. Para ello, se utilizaron tiempos de cocción inferiores a los establecidos en las recetas originales, considerando que el corte en cubos y la ausencia de cáscara favorecen una cocción más rápida.
   Los intervalos de evaluación se definieron disminuyendo el tiempo de cocción de la receta en intervalos sucesivos de 5 minutos. La dureza de las muestras obtenidas en cada intervalo se comparó con la dureza objetivo, determinada anteriormente, durante la selección de la receta, con el fin de identificar el tiempo de cocción que permita alcanzar una textura equivalente.

- <u>Tiempo de cocción de la carne:</u>
  En el caso de la carne, la estandarización se simplifica, ya que se toma como referencia que la temperatura interna de la carne bien cocida debe ser de 70 [ºC] o más (Frigorifico Sada, 2024).

Para determinar el tiempo de cocción se siguen los siguientes pasos:

1. Se realiza estandarización de las muestras de carne como se menciona anteriormente.
2. Se cocinan los trozos de carne en intervalos de 5 minutos, realizando al menos 3 ensayo.
3. Se mide la temperatura interna de las muestras de cada intervalo, hasta llegar a la temperatura objetivo.

Proceso de perforación con láser de CO_2

Una vez obtenidos los tiempos de cocción, se requiere conocer los parámetros que debe tener el láser para perforar las muestras. El objetivo es lograr que la muestra este completamente perforada, para asi maximizar la transferencia de materia entre el alimento y el medio en que se realiza el secado. Para ello se realizan experimentos donde se varía la cantidad de pulsos, la potencia y el delay entre pulsos. Para determinar el caso en que se obtiene un mejor resultado, se considerando que se necesita que la perforación sea completa y que se minimice la visibilidad de las perforaciones en la muestra.

Los pasos que se realizan para lograr este objetivo son:

1. Realizar los pasos ya mencionados anteriormente, para tener la muestra correctamente cocida.
2. Realizar los ensayos en las muestras, modificando los parámetros mencionados. En cada uno registrar la cantidad de pulsos, la potencia utilizada, la profundidad de la perforación, el delay entre pulsos y el tiempo total que toma realizar las perforaciones.

Congelación

Para determinar los tiempos de congelación de las muestras, se debe realizar este proceso monitoreando la temperatura interna de las muestras. Para ambos alimentos se siguen los siguientes pasos, separando los ensayos por tipo de alimento:

1. Preparar las muestras según los pasos descritos anteriormente para su cocción y perforación.
2. Para cada ensayo, se posicionan 12 muestras con una separación de 3-5 cm en una bandeja. Se inserta una termocupla tipo T en el centro geométrico de 3 de estas muestras, para registrar la temperatura interna durante el proceso. Las 9 muestras restantes se utilizan para el proceso

de liofilización más adelante, de esta manera se optimiza la utilización de los recursos disponibles en el laboratorio.

3.5.2. Reconstitución del plato

Una vez realizado el proceso de estandarización de las muestras, se da inicio a la etapa de reconstitución del plato preparado, es decir, las operaciones que se realizan desde que el alimento se estandariza hasta que compone el plato listo para consumir. En esta fase el alimento es sometido al proceso de secado que se quiere analizar en este proyecto, como también su rehidratación.

Liofilización

Las condiciones de liofilización que se utilizadas corresponden a; presión de 0,1 [mbar] y temperatura de bandeja de 30 [ºC], estas variables serán fijas para el procedimiento del secado primario.

Como primera etapa, para la determinación de dichos tiempos de proceso totales de muestras sin perforar, se toma como referencia el tiempo en el que la temperatura interna del alimento, en el centro, se acerca a la temperatura de plato (Patel, Doen, & Pikal, 2010). Para registrar estas temperaturas se utilizan termocuplas tipo T que se encuentran instaladas en la parte superior de la cámara de liofilización presente en el laboratorio y se comunican con el software disponible. Este proceso se realiza de la siguiente manera:

1. Congelar los platos de la cámara, con el fin de mantener las muestras en un estado de congelamiento.
2. Posicionar 9 muestras por plato, donde la muestra central lleva la termocupla en el centro.
3. Al terminar el proceso, observar el gráfico obtenido con el software, y estimar el momento en que la temperatura interna del alimento se acerca a la temperatura de plato.

Este proceso se realiza primeramente en los alimentos sin perforar, para obtener este tiempo como referencia para los demás experimentos, ya que posteriormente se realizará el mismo proceso de secado, pero finalizándolos una hora antes, lo cual se repetirá en los ensayos que sean necesarios, siempre disminuyendo una hora al proceso, hasta notar una diferencia visible al hacer un corte transversal de la muestra. De esta manera se puede observar la presencia o ausencia de hielos en las

muestras, y asi determinar el experimento en el que las muestras perforadas están completamente secas y las muestras sin perforar tienen presencia de hielos. Con dicho objetivo, se siguen los siguientes pasos:

1. Congelar los platos de la cámara, con el fin de mantener las muestras en un estado de congelamiento.
2. Posicionar 9 muestras por plato, intercalando un elemento perforado con un elemento sin perforar, con el fin de luego poder observar las muestras en un corte transversal de las mismas y compararlas. Además, es favorable que ambos tipos de muestras sean sometidos al mismo proceso, minimizando las variables que puedan afectar al secado.
3. Al terminar cada ensayo, hacer un corte transversal de cada muestra y observar la presencia de hielos.

Reconstitución del plato preparado

Como se menciona anteriormente, los platos realizados a nivel laboratorio, son comparados con uno entregado por la empresa colaboradora, por lo que se utiliza la formulación entregada por ellos respecto a la cantidad de cada ingrediente por plato.

La receta del plato escogido considera en las cantidades de cada uno el peso del agua contenido en los ingredientes, por lo que se calcula un aproximado del porcentaje de agua que pierde el alimento durante el proceso de secado, para luego al rehidratar, devolver el agua que ha perdido además de adicionar la cantidad de agua que indica la receta. Este valor aproximado de perdida de agua se obtiene pesando los elementos antes y después de la liofilización.

Los ingredientes se obtienen realizando el secado de ellos en un ensayo separado a los experimentos que se llevaron a cabo para determinar el tiempo de secado, debido a que a estos se les realiza un corte transversal, quedando inutilizable para el armado del plato, ya que se necesitan ingredientes que tengan la geometría indicada en la receta. Para llevar a cabo la reconstitución del plato preparado se deben seguir los siguientes pasos:

1. Obtener los ingredientes del plato a partir de los procesos indicados anteriormente, hasta la congelación.
2. Pesar los ingredientes antes de liofilizar, con el fin de conocer el peso total de cada muestra (masa húmeda).

3. Realizar la liofilización de los alimentos hasta cumplir el tiempo de secado ya determinado. Se utilizan ingredientes perforados y sin cortes transversales, ya que en este punto se conoce el tiempo necesario para asegurar que se encuentran completamente deshidratados.
4. Pesar las muestras secas (masa seca), con el fin de realizar la comparación con las masas pre-secado, para asi estimar la perdida de agua. En este punto se debe establecer una constante (α) para facilitar el cálculo de la masa equivalente liofilizada que se debe agregar al plato más adelante, esta constante se calcula de la siguiente manera:

$$\propto = \frac{masa\ húmeda - masa\ seca}{masa\ húmeda}$$

   Donde α representa una constante de perdida de agua.
5. Realizar la liofilización de los ingredientes complementarios (zanahoria y cebolla) por un tiempo prolongado, para asegurar su secado.
6. Pesar los ingredientes y condimentos. Añadirlos a una bandeja con tapa, según lo indicado en la formulación entregada por la empresa.
   Se debe reconstituir el plato empleando la masa equivalente de alimentos liofilizados. Esta masa se calcula a partir del porcentaje de perdida de agua estimado anteriormente, de modo que la cantidad de alimento liofilizado corresponde a la masa seca de la porción original. La masa que se debe agregar se puede calcular con la siguiente expresión:

$$masa\ equivalente\ liofilizada = masa\ original\ receta * (1 - \propto)$$

   Este paso se realiza para los ingredientes liofilizados por separado.

Rehidratación del plato preparado

En esta etapa del proceso, se debe agregar el agua que fue retirada del alimento en el proceso de secado, como también el agua que corresponde a la indicada en la receta. Esta agua debe estar caliente, para que al mismo tiempo que hidrata los alimentos, los caliente con el fin de que el plato se pueda consumir inmediatamente. Para esto, se llevan a cabo los siguientes platos:

1. Una vez se tiene la bandeja con los ingredientes y condimentos secos, se agrega la cantidad de agua que el alimento perdió en el secado, esto

se calcula a partir de la masa original de la formulación y la masa equivalente liofilizada que se calcula anteriormente.

$$masa\ de\ agua = masa\ original\ receta - masa\ eq.liofilizada$$

Este paso se realiza para cada uno de los ingredientes liofilizados, ya que se debe agregar el agua que pierde la papa como también la que pierde la carne.

2. Agregar la cantidad de agua que se indica en la receta original.
3. Tapar y dejar reposar por 15 [min].

Posteriormente, se realiza la preparación del plato de acuerdo con el procedimiento descrito por la empresa en el envase del producto, obteniéndose un alimento listo para el consumo. Se requiere este plato como muestra para comparar la dureza con el plato reconstituido. Para esto se realizan 3 experimentos por muestra utilizando la celda de Kramer, con el fin de determinar la dureza de cada muestra de manera distribuida en todos los alimentos, ya que esta celda comprime y cizalla la totalidad de la muestra, simultáneamente. Para cada ensayo se emplea el siguiente procedimiento:

1. Pesar 10 [g] de papa, 10 [g] de carne y 10 [g] de zanahoria y cebolla aproximadamente, para formar una muestra de aproximadamente 30 [g].
2. Medir la dureza en el texturómetro, utilizando la celda de Kramer. Registrar los resultados.

3.5.3. Cálculo del consumo energético

El secado por liofilización consiste en 4 fases importantes, congelación, despresurización, sublimación y condensación, donde la sublimación se lleva casi la mitad del consumo energético. (Ratti, 2001)

El consumo energético del proceso en su totalidad se centra en la energía consumida por el proceso de liofilización, ya que el tiempo de secado es elevado. En este caso, dicho consumo se calcula según la potencia del equipo que se utilice para llevar a cabo el proceso de secado, ya sea a nivel de laboratorio o industrial, el consumo lo determinará el tiempo de proceso. En el caso de este experimento, el equipo utilizado considera dos gastos energéticos

importantes, la bomba de vacío y el sistema utilizado para condensar el vapor de agua.

Como se menciona anteriormente, el consumo energético del proceso se considera asociado a la liofilización, al ser la operación de mayor demanda energética dentro del proceso productivo. Bajo este criterio, una disminución del tiempo de secado, producto de las perforaciones realizadas en los alimentos, implica que el consumo energético disminuya proporcionalmente a la baja en el tiempo, asumiendo que las condiciones de operación y potencia del equipo permanecen constantes durante el proceso. Se tiene la siguiente ecuación:

$$E = P\ x\ t$$

Donde E corresponde al consumo energético, P a la potencia y t al tiempo. Si la potencia permanece constante, el consumo solo depende del tiempo de proceso. Es por esto que, en el presente estudio, se realizará un cálculo aproximado de la disminución del consumo energético, ya que los procesos son esencialmente iguales, con la diferencia de que en uno las muestras están perforadas y en el otro no. Finalmente, se realiza el siguiente calculo, para conocer a que porcentaje corresponde el tiempo de secado de las muestras perforadas respecto al de las muestras sin perforar, para posteriormente estimar el porcentaje de disminución de consumo energético.

$$\%\ disminución\ tiempos\ de\ secado = \frac{t_{cp}\ x\ 100}{t_{sp}}$$

Donde t_{cp} corresponde al tiempo de proceso de las muestras con perforaciones y t_{sp} corresponde al tiempo de proceso de las muestras sin perforaciones.

Luego, la disminución del consumo energético será proporcional a este porcentaje.

4. Resultados

4.1. Resultados experimentales

Estandarización de las muestras

- Tiempo de cocción de la papa:

Se utiliza la receta del blog Fine Dining Lovers (FDL) donde la dureza obtenida es de 10 [N]. Se necesita que las papas tengan la dimensión de un cubo de 2x2 [cm], con la dureza objetivo de la receta seleccionada. Para esto se realiza la cocción de las papas en esta geometría en una olla de cocina, ya que de esta manera se genera una cocción más uniforme. La dureza se mide a tres tiempos, 15, 20 y 25 [min], donde se obtiene que el mejor resultado es a los 25 [min], con una desviación estándar de 2,18 entre los experimentos. Estos resultados se ven reflejados en las siguientes tablas:

Tiempo [min]	15	Varianza	Desv. Estándar
1	43,25	0,03	15,13
2	28,39	226,10	
3	58,64	231,45	
Promedio	43,43	457,58	

Tabla 7. Valores obtenidos para dureza en 15 [min] de cocción

Tiempo [min]	20	Varianza	Desv. Estándar
1	17,50	0,79	7,31
2	8,88	90,39	
3	26,33	63,08	
4	20,84	6,01	
Promedio	18,39	160,28	

Tabla 8.Valores obtenidos para dureza en 20 [min] de cocción

Tiempo [min]	25	Varianza	Desv. Estándar
1	11,96	0,55	2,18
2	10,25	6,00	
3	13,14	0,19	
4	15,45	7,56	
promedio	12,70	14,31	

Tabla 9. Valores obtenidos para dureza en 25 [min] de cocción

Finalmente, el tiempo de cocción de las papas para todos los experimentos es de 25 [min] con agua tratada a 100 [ºC]

- Tiempo de cocción de la carne:

Se realizaron las pruebas a 5, 10 y 15 [min] de cocción, con la carne trozada en la geometría deseada. De esto se obtuvo que a los 5 [min] la carne se encuentra a la temperatura objetivo.

Determinación de tiempos de congelación

Se desea que los alimentos lleguen a una temperatura interna de -30 [ºC], para esto se realiza la congelación de la papa y de la carne midiendo su temperatura interna con termocuplas tipo T, hasta que lleguen a la temperatura deseada. Estos experimentos se realizan en triplicado, como se muestra en la tabla 10 para las papas y en la tabla 11 para la carne.

Nº de experimento	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Varianza	Desv. Estándar
1	2700	45	0,444	0,577
2	2760	46	0,111	
3	2760	46	0,111	
promedio	2740	45,667	0,667	

Tabla 10. Valores obtenidos para tiempos de congelación de la papa

Nº de experimento	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Varianza	Desv. Estándar
1	3097	51,52	0,892	0,942
2	3154	52,57	0,00003	
3	3210	53,5	0,882	
promedio	3153,67	52,561	1,774	

Tabla 11. Valores obtenidos para tiempos de congelación de la carne

Finalmente, el tiempo de congelación de las papas es de 46 [min] y el de la carne es de 53 [min].

Determinación de parámetros de laser CO_2

Se realizan 15 experimentos en los que se varían la cantidad de pulsos, el porcentaje de la potencia y el delay entre pulsos, se registra la profundidad de perforación en cada caso. Los resultados obtenidos se encuentran registrados en la tabla 12.

Variable modificada	N° de experimento	Pulsos	Potencia	Profundidad de perforación [cm]	Delay entre pulsos [s]	tiempo total [min]
Pulso	1	600	50%	2	0	0
	2	300	50%	2	0	0
	3	150	50%	1,5	0	0
	4	100	50%	1	0	0
Potencia	5	100	25%	1	0	0
	6	100	15%	0,5	0	0
Potencia baja, subiendo pulsos	7	150	25%	1,3	0	0
	8	300	25%	1,5	0	0
	9	600	15%	1,5	0	0
	10	600	10%	1,5	0	0
Delay entre pulsos	11	600	5%	1	0	0
	12	600	5%	1	0,5	5
	13	600	10%	1	0,5	5
	14	600	10%	0,5	1	10
	15	100	25%	1	1,5	2,5

Tabla 12. Experimentos realizados para selección de parámetros de Láser de CO2

Finalmente, se eligen los parámetros indicados en el experimento 2, ya que la profundidad de perforación es de 2 [cm], es decir de la totalidad del alimento, para asi maximizar su efecto en el proceso de secado.

Determinación de tiempos de secado primario

Los tiempos de secado primario se determinan de manera experimental, utilizando como base o punto de partida el tiempo que el alimento demora en alcanzar la temperatura de plato en proceso de liofilización, considerando ese tiempo como tiempo total de secado primario. Luego, se terminaron los experimentos en distintos tiempos de proceso, para luego observar la presencia de hielo en cada elemento liofilizado. Se realiza de esta manera para asegurar que el tiempo se secado no se vea afectado por la perforación que se realiza por la misma termocupla, ya que esta podría facilitar la salida del agua del alimento, disminuyendo su tiempo de secado.

Para ello, se realizan tandas de liofilización para cada alimento, posicionando los elementos como se detalla en la metodología, es decir 9 elementos por plato intercalando entre elementos con perforaciones y sin perforaciones. En las tres primeras tandas se controla la temperatura del elemento que se encuentra en el centro del plato. Los gráficos de cada experimento se pueden

revisar en el Anexo. En las siguientes tablas se encuentran los tiempos de secado primario iniciales, según los gráficos:

- Tiempos de secado primario de papas

Nº de experimento	Fecha	Tiempo [h]	Varianza	Desv. Estándar
1	28/08	18,5	0,00	0,50
2	29/08	19	0,25	
3	10/09	18	0,25	
promedio		**18,5**	0,50	

Tabla 13. Tiempos de secado primario inicial en papas sin perforaciones

Nº de experimento	Fecha	Tiempo [h]	Varianza	Desv. Estándar
1	12/09	10	25	4,36
2	25/09	18	9	
3	26/09	17	4	
promedio		**15**	38	

Tabla 14.Tiempos de secado primario inicial en papas con perforaciones

Como se menciona anteriormente, a partir de estos resultados se terminan los procesos de secado a las 18, 17, 16, 15 y 14 horas, para observar los hielos en cada elemento. A continuación, se detallan los resultados para cada tiempo (tabla 15):

Nº de experimento	Tiempo [h]	Observaciones
1	18	Papas con y sin perforaciones con secado completo
2	17	-Papas con perforaciones con secado completo -Papas sin perforaciones con secado incompleto
3	16	-Papas con perforaciones con secado completo -Papas sin perforaciones con secado incompleto
4	15	-Papas con perforaciones con secado incompleto -Papas sin perforaciones con secado incompleto
5	14	-Papas con perforaciones con secado incompleto -Papas sin perforaciones con secado incompleto

Tabla 15. Observaciones de experimentos para tiempo de secado de papas

Finalmente, se observa que el tiempo de secado primario para las papas sin perforaciones es de 18 [h], mientras que para las papas con perforaciones es de 16 [h], por lo que la realización de perforaciones disminuye el tiempo de secado en un 11%.

- Tiempos de secado primario de carne

Al igual que para la papa, se realiza un experimento inicial controlando la temperatura interna del alimento, donde según el gráfico (Anexo) se observa que a las 12 [h] el alimento se encuentra liofilizado.

Luego se fueron terminando los procesos a las 12, 11, 10, 9 y 8 horas, observando los hielos presentes en cada elemento. A continuación, se detalla lo observado:

Nº de experimento	Tiempo [h]	Observaciones
1	12	Carne con y sin perforaciones con secado completo
2	11	-Carne con perforaciones con secado completo - Carne sin perforaciones con secado incompleto
3	10	-Papas con perforaciones con secado completo -Papas sin perforaciones con secado incompleto
4	9	-Carne con perforaciones con secado completo -Carne sin perforaciones con secado incompleto
5	8	-Carne con perforaciones con secado incompleto -Carne sin perforaciones con secado incompleto

Se puede observar que, para el caso de la carne, al realizar perforaciones, el tiempo de secado primario disminuye a 9 [h] con respecto a la carne sin perforaciones, cuyo tiempo de secado primario corresponde a 12 [h], es decir, se disminuye el tiempo de secado en un 25%.

En las siguientes imágenes, se pueden observar los hielos formados en algunos de los experimentos realizados.



Figura 8. Papas liofilizadas por 16 horas, con y sin perforaciones.

En la figura 8, se presenta el resultado del experimento 3 respecto al tiempo de secado de las papas, donde se puede notar la presencia de hielos (destacados en negro) en las papas sin perforaciones, mientras que las papas con perforaciones están completamente secas.



Figura 9. Carne liofilizada por 8 horas, con y sin perforaciones

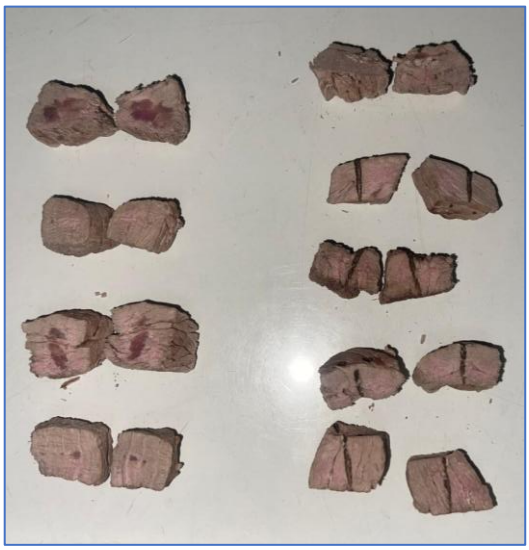


Figura 10. Carne liofilizada por 9 horas, con y sin perforaciones

En la figura 9 se puede observar que la carne liofilizada por 8 horas aún tiene hielos presentes en los elementos con y sin perforaciones, en cambio en la carne liofilizada por 9 horas, solo presenta hielos en los elementos sin perforar, como se muestra en la figura 10.

Reconstitución del alimento

Se requiere realizar la reconstitución o rehidratación de los alimentos, con el fin de comparar la textura que tienen como producto final. Para ello se realiza el armado de un plato similar al comercializado por la empresa colaboradora. Por otro lado, se prepara el plato entregado por la empresa siguiendo las instrucciones de calentado del producto (figura 11).



Figura 11. Plato empresa colaboradora

Se obtiene como resultado que se pierde aproximadamente el 80% de agua en el proceso de secado.

En las siguientes figuras se muestra el alimento previo a la rehidratación (figura 12) y luego ya rehidratado, listo para consumir (figura 13).



Figura 12. Plato liofilizado sin rehidratar



Figura 13. Plato liofilizado rehidratado

Posteriormente, se realizan pruebas de dureza en un texturómetro, utilizando celda de Kramer, la cual garantiza que la fuerza ejercida sea igual en la totalidad de la muestra. En la siguiente imagen se ve la muestra dispuesta en la celda de Kramer, donde será comprimida en sus rendijas por las paletas de la celda.



Los gráficos obtenidos se detallan en el Anexo, los cuales entregan los siguientes resultados (tabla 16):

Nº de experimento	Plato	Carga (N)	Observaciones
1	Empresa	299,1	-
2	Empresa	419,19	-
3	Empresa	411,24	-
4	Liofilizado	483,47	Excede carga máxima de texturómetro
5	Liofilizado	489,25	Excede carga máxima de texturómetro
6	Liofilizado	486,26	Excede carga máxima de texturómetro

Tabla 16. Resultados de textura plato de referencia empresa y liofilizado

De los resultados se puede observar que el plato constituido por alimentos liofilizados genera más resistencia, ya que se necesita una fuerza mayor para comprimir y atravesar la muestra.

Adicionalmente, el producto fue sometido a una evaluación informal, en la que se observó que la carne rehidratada presentaba una textura comestible, similar a la de la carne recién preparada, sin evidenciar una dureza que dificultara su masticación. No obstante, es importante señalar que el criterio de cocción empleado no buscaba reproducir las condiciones habituales de preparación de una comida para consumo, sino únicamente asegurar que la carne alcanzara una temperatura interna de 75 [ºC], asegurando la cocción de la carne.

En esta línea, se plantea como una oportunidad de investigación futura evaluar distintos tiempos de cocción y comparar la dureza obtenida con la del producto comercial utilizado como referencia. Esto permitiría identificar las condiciones de cocción, que favorezcan una textura más parecida a la del producto comercial, optimizando así las características de la textura en la formulación desarrollada.

Cálculo de consumo energético

Como se pudo observar de los experimentos realizados, el tiempo de liofilización con los elementos perforados disminuye en un 11.11% en las papas y un 25% en el caso de la carne, por lo que será proporcional en el caso del consumo energético. Es decir, realizar las perforaciones disminuirá el gasto de energía del proceso y, por consiguiente, sus costos, el cual se considera una de las desventajas de este proceso, al ser elevado.

A pesar de que el proceso también debe considerar el consumo energético del láser de CO_2, este gasto de energía es considerablemente inferior al de un proceso de liofilización, ya que el tiempo que demora este proceso es mucho menor al del proceso de secado.

Con el propósito de estimar el efecto de las perforaciones sobre el consumo energético a escala industrial, se consideró como referencia un equipo de liofilización con una capacidad nominal de 500 kg de producto fresco por lote y una potencia instalada aproximada de 90 [kW]. Para efectos del cálculo, se asumió una potencia media de operación de 35 [kW] y un tiempo de secado de 18 horas, que corresponde al tiempo de secado de papas sin perforar. Para este supuesto se utiliza como referencia el equipo industrial de liofilización *SJ-FFD-50*, que cuenta con 50[m^2] de superficie de bandejas. (SJ Scientific, s.f.). Cabe destacar que el consumo real dependerá del alimento, la humedad de este, de la carga y el ciclo especifico de operación. No obstante, se realiza el siguiente análisis:

1. Consumo energético sin perforaciones.

$$E = P\ x\ t$$

$$E_{s/perforaciones} = 35\ [kW] x\ 18[h]$$

$$E_{s/perforaciones} = 630\left[\frac{kWh}{lote}\right]$$

2. Estimación del consumo energético con perforaciones

Utilizando los resultados obtenidos en este estudio, se tiene que el proceso con perforaciones presenta una disminución del 12% aproximadamente en el caso de la papa, lo que corresponde a un tiempo de secado de 16 horas en papas con perforaciones, aproximadamente. Realizando el mismo calculo anterior:

$$E_{c/perforaciones} = 35\ [kW] x\ 16[h]$$

$$E_{c/perforaciones} = 560\left[\frac{kWh}{lote}\right]$$

Por lo tanto, el ahorro energético estimado corresponde a:

$$\Delta E = 630 - 560 = 70\left[\frac{kWh}{lote}\right]$$

Bajo estos supuestos, el consumo energético estimado durante el secado de las muestras sin perforaciones corresponde a 630 [kWh] por lote. A modo de ejemplo, aplicando los resultados obtenidos experimentalmente en este estudio el consumo estimado disminuiría a 560 [kWh] por lote, lo que representaría un ahorro de 70 [kWh], equivalente a una reducción del 12% del consumo energético asociado a esta etapa.

Ahora, si se llevan estos resultados a una producción diaria, bajo la suposición de que el equipo puede comenzar la siguiente producción inmediatamente, se puede calcular la carga producida diaria, dicha comparación se indica en la siguiente tabla:

Tabla 17.Comparación de la producción teórica con y sin perforaciones

Indicador	Sin perforaciones	Con perforaciones
Tiempo de secado por lote	18 [h]	16 [h]
Lotes por día (24[h])	1,33	1,50
Producción diaria	666,67 [kg/día]	750 [kg/día]
Producción anual	243.333 [kg/año]	273.750 [kg/año]

Considerando estos resultados se tendría un incremento en la producción de un 12,5%. Y si se considera la producción teórica anual, estos resultados pueden ser escalados, generando una diferencia de producción de aproximadamente 30 [ton].

Cabe considerar que son cargas y capacidades teóricas, proporcionales al tiempo estimado, ya que, en la práctica, se deben considerar tiempos de carga y descarga, limpieza de equipo y otros imprevistos del proceso.

5. Conclusión

Finalmente, se concluye que la incorporación de perforaciones tiene un efecto favorable sobre el tiempo de secado primario durante la liofilización, ya que permite reducirlo de manera considerable. Dado que el análisis se centró exclusivamente en la etapa de liofilización, esta disminución del tiempo se traduce en una reducción de los costos de operación asociados a dicho proceso, debido al menor consumo energético requerido en comparación con la liofilización de los ingredientes sin perforar. Por otro lado, al realizar una

comparación de la producción teórica anual, se puede concluir que, al disminuir los tiempos de secado, la producción puede aumentar considerablemente, lo que significaría que además de generar una mayor capacidad productiva, las perforaciones generan un menor costo en el procesamiento y una mayor disponibilidad del equipo, lo que entrega la posibilidad de aumentar la producción sin adquirir otro liofilizador.

Al comparar los productos obtenidos con un plato comercial disponible en el mercado, se observó que el producto liofilizado presentó una mayor firmeza, requiriéndose una fuerza superior para atravesarlo. Esta diferencia se atribuye principalmente al comportamiento de la carne, la cual conservó una textura más similar a la de un alimento recién preparado, además de mantener su forma y sabor tras la rehidratación. En contraste, el producto comercial presentó una textura más blanda. No obstante, se recomienda continuar el estudio con de los tiempos de cocción de la carne, con el objetivo de conocer las condiciones de cocción en las que la dureza de la carne se asemejaría más a la del producto comercial.

En términos generales, los resultados obtenidos demuestran que el desarrollo de un plato liofilizado mediante la incorporación de perforaciones es técnicamente factible. El producto obtenido presentó características sensoriales comparables o superiores a las del producto comercial, destacando por su mejor textura, un sabor similar al de un alimento fresco y una mayor vida útil, constituyéndose como una alternativa viable para la elaboración de platos preparados liofilizados.

6. Anexos

6.1. Gráficos de tiempos de secado primario inicial

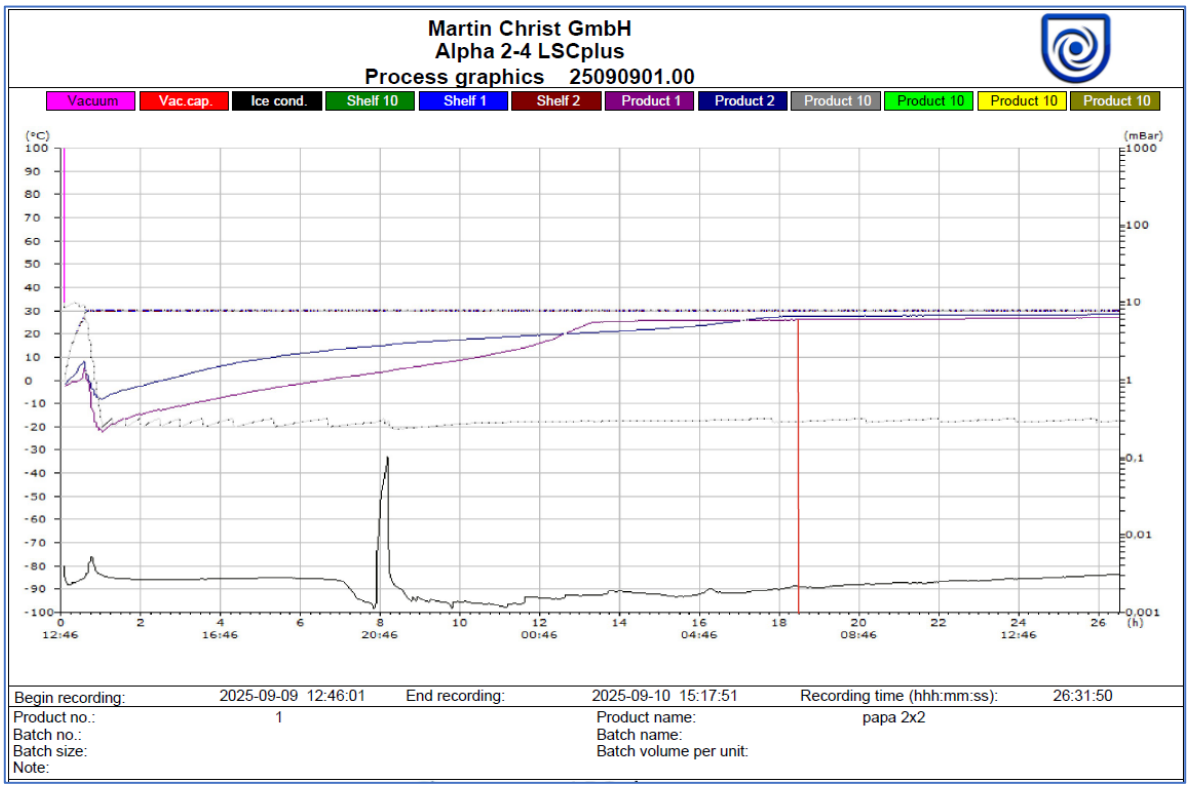


Gráfico 1. Liofilización papa 10/09

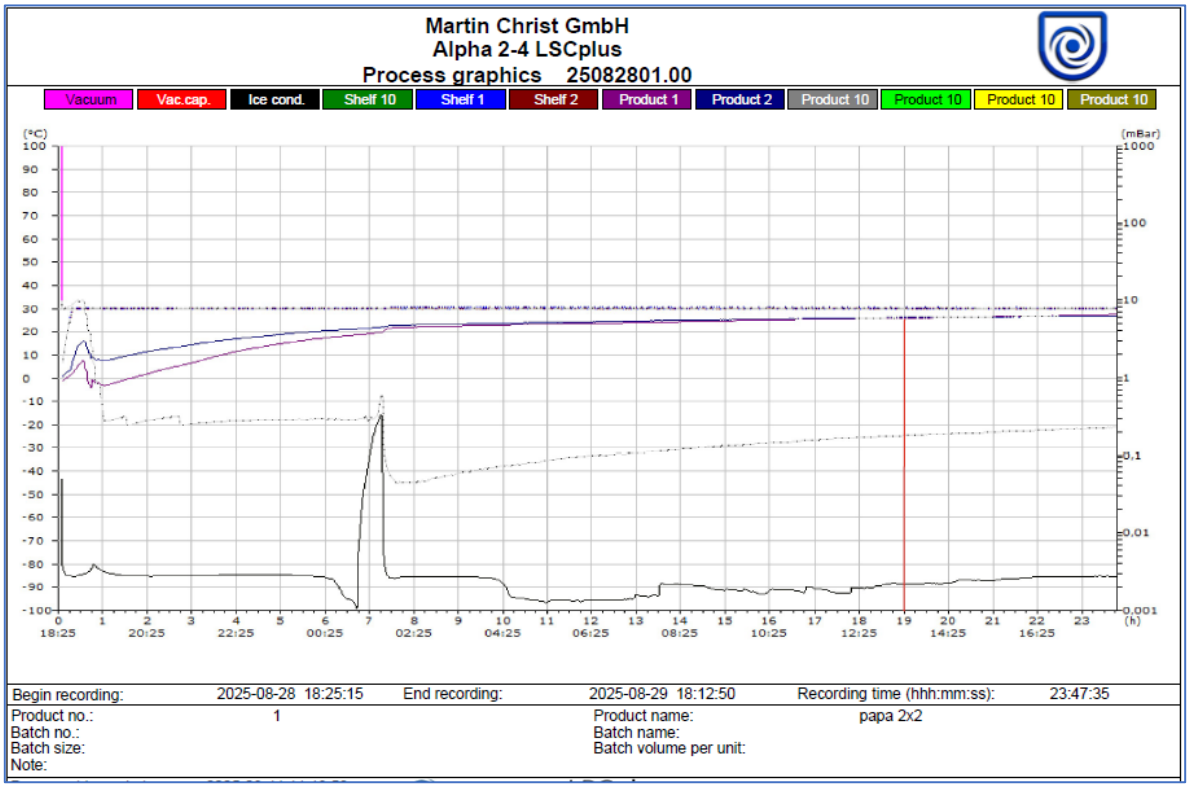


Gráfico 2. Liofilización papa 29/08

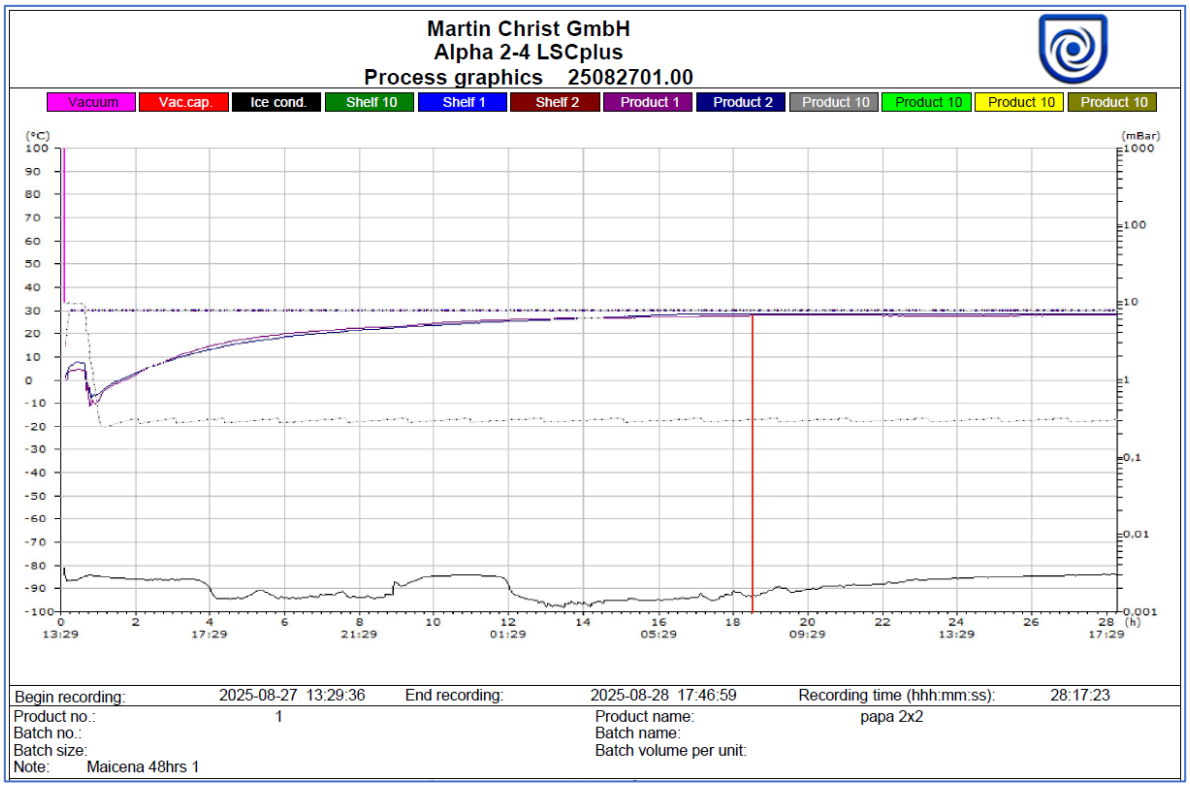


Gráfico 3. Liofilización papa 28/08

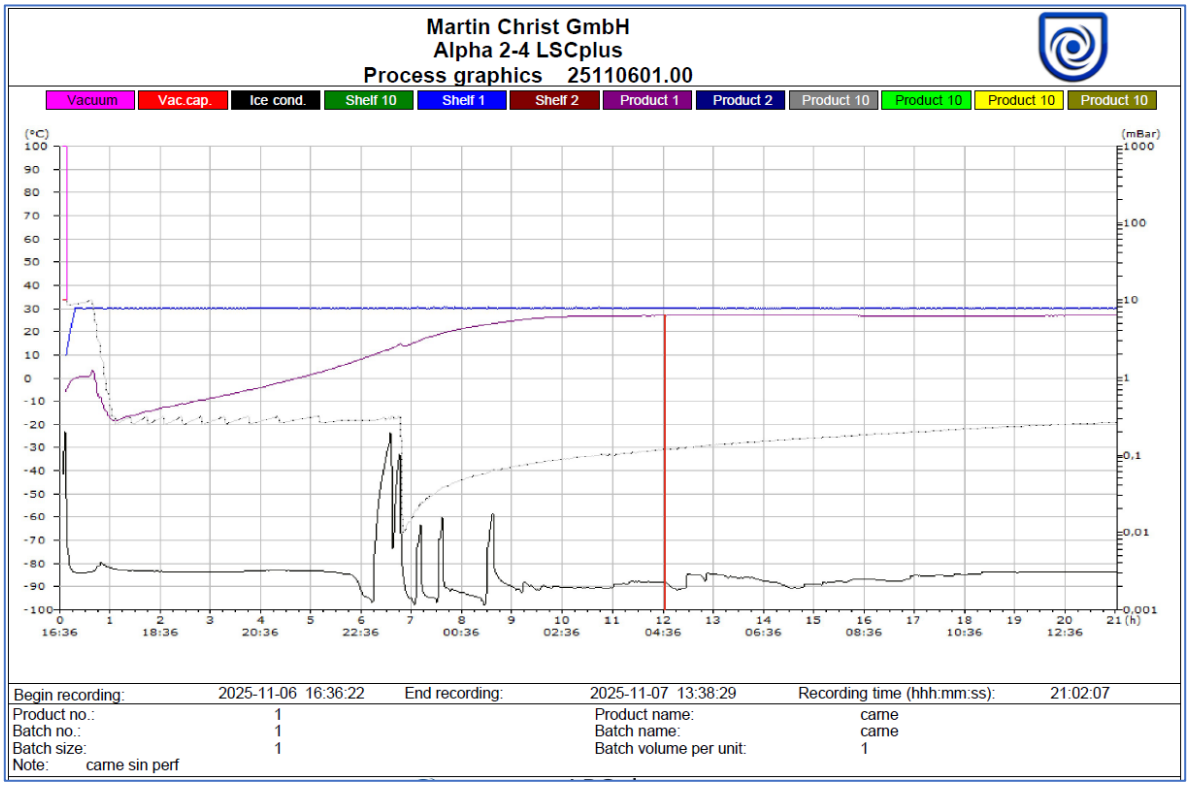


Gráfico 4. Liofilización carne 07/11

6.2. Gráficos de dureza de platos preparados

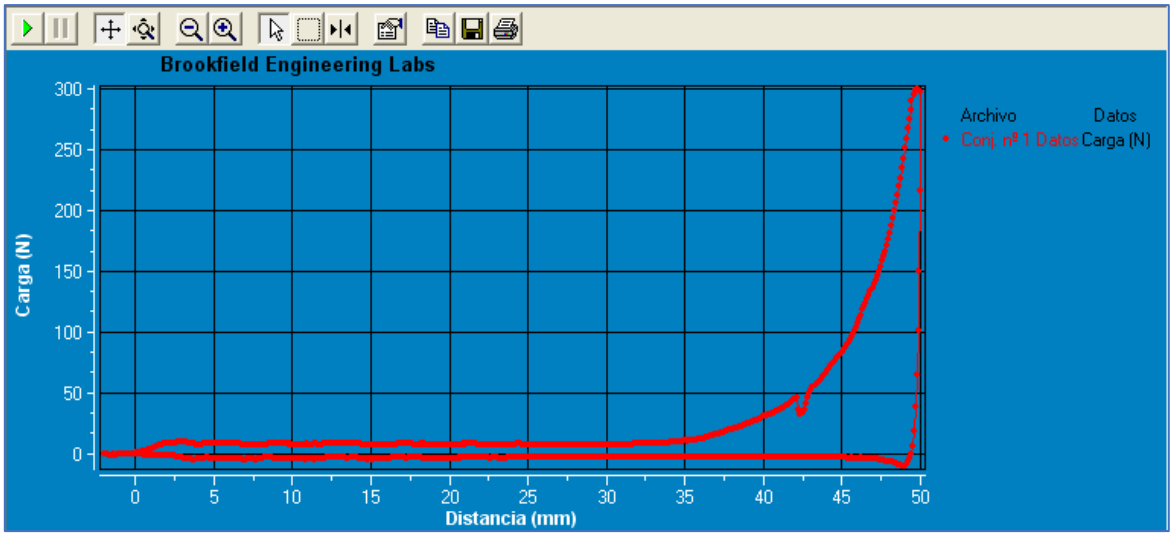


Gráfico 5. Dureza plato Empresa 1

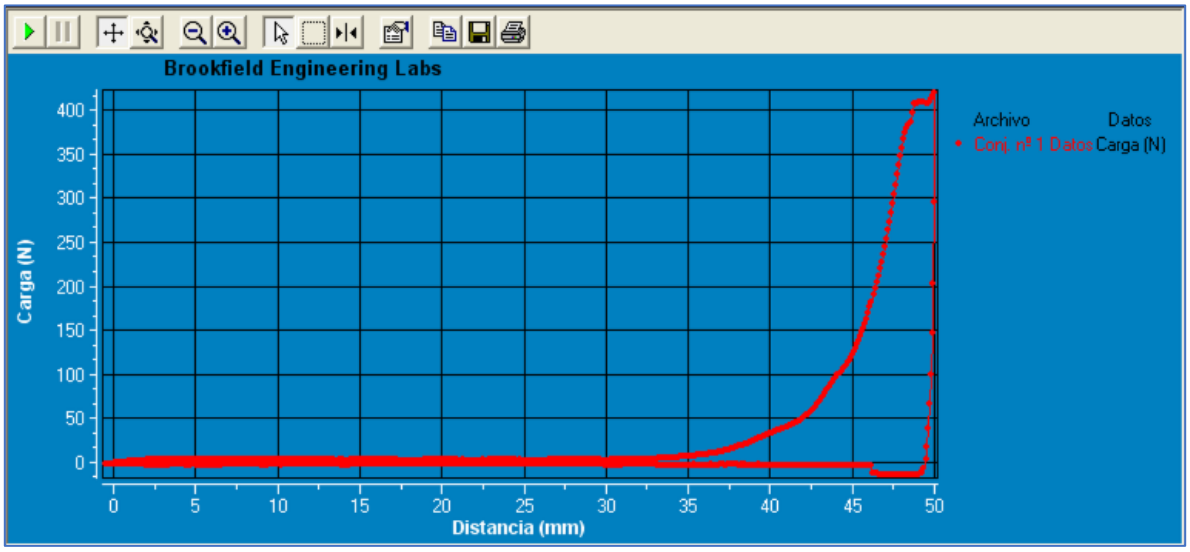


Gráfico 6. Dureza plato Empresa 2

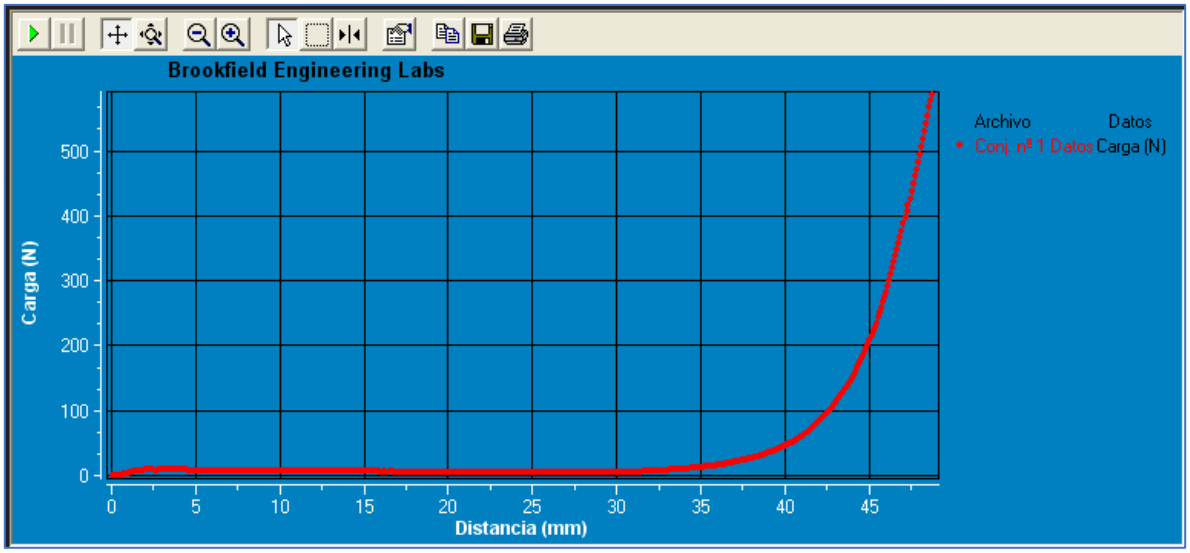


Gráfico 7. Dureza plato Empresa 3

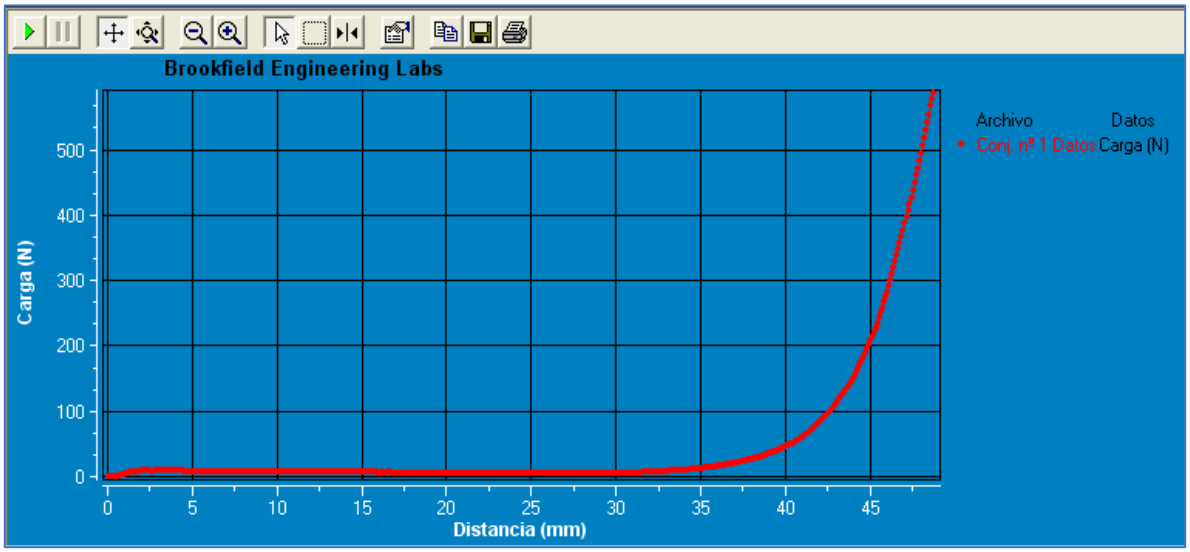


Gráfico 8. Dureza plato Liofilizado 1

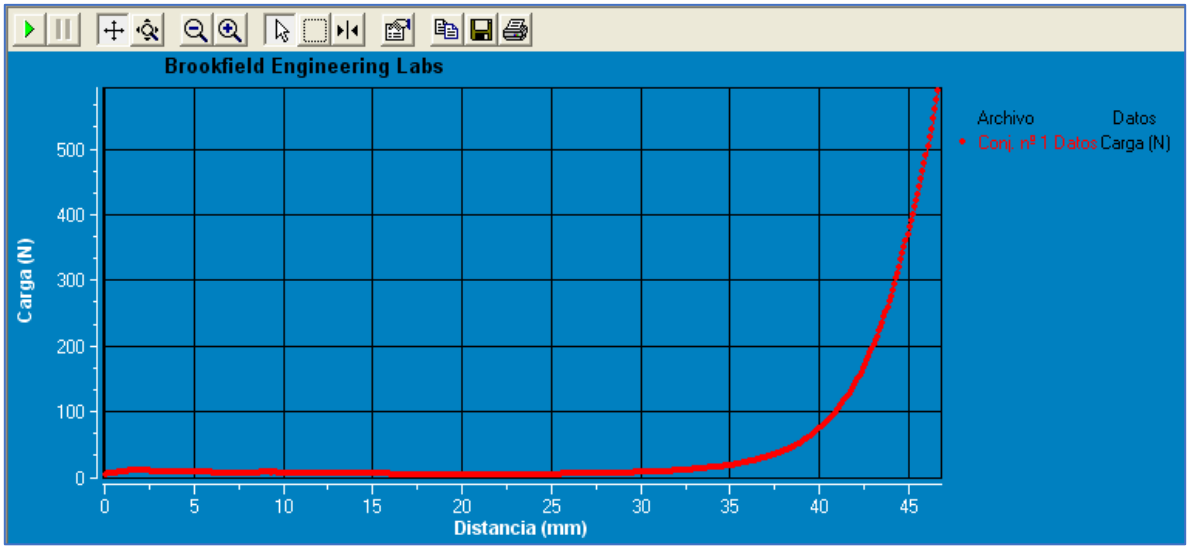


Gráfico 9. Dureza plato Liofilizado 2

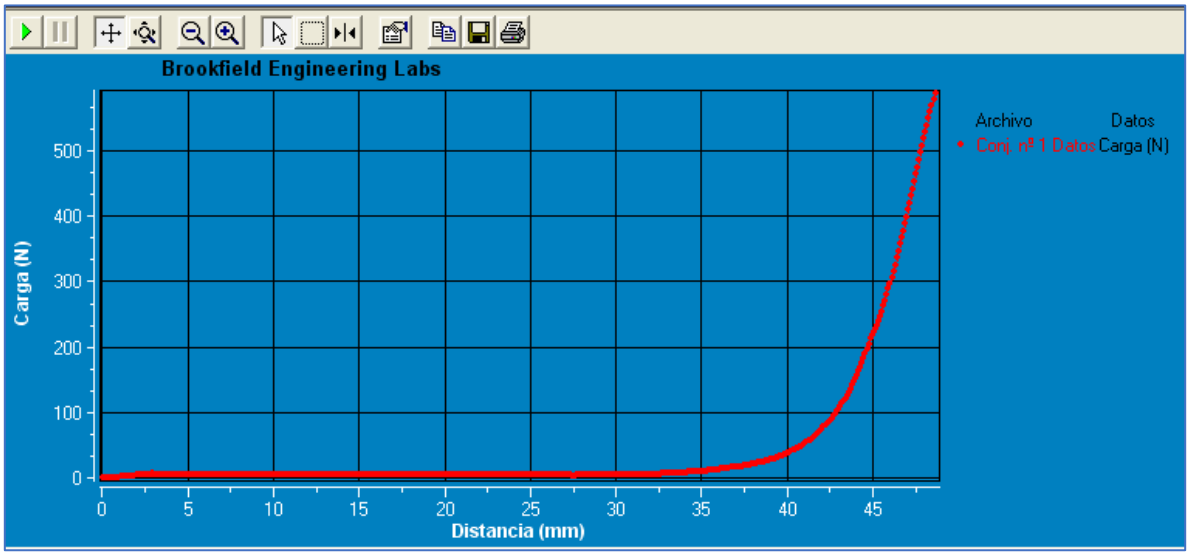


Gráfico 10. Dureza plato Liofilizado 3

Referencias

Adam, K. L. (2004). Food Dehydration Options. Value-added technical note. *ATTRA Nacional Sustainable Information Service*.

Babic, J., Cantalejo, M., & Arroqui, C. (2009). The effects of freeze-drying process parameters on Broiler chicken breast meat. *LWT - Food Science and Technology, 42*, 1325-1334. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.03.020

BBC . (2017). *BBC News Mundo*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias-40219883

CONAF. (2024). *SERNATUR.* Obtenido de Datos turismo: https://datosturismo.sernatur.cl/siet/reporteDinamicoSNASPE

Ferraz, C., Mittal, C., Bilanski , W., & Abdullah, H. (2007). Mathematical modeling of laser based potato cutting and peeling. *BioSystems, 90*, 602-613. doi:https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2007.01.004

Fine Dining Lovers . (15 de Diciembre de 2021). Obtenido de Fine Dining Lovers by Spellegrino: https://www.finedininglovers.es/explorar/noticias/cuanto-y-como-cocer-las-patatas-tiempos-y-metodos

Frigorifico Sada. (3 de septiembre de 2024). *Blog Frigorífico SADA* . Obtenido de Guía completa sobre los puntos de cocción de la carne Argentina. Todo sobre la Carne de Res y de Cerdo: https://www.frigorificosada.com.ar/blog/punto-de-coccion-de-la-carne/

Fujimaru, T., Ling, Q., & Morrisey, M. T. (2012). Effects of Carbon Dioxide (CO2) Laser Perforation as Skin Pretreatment to Improve Sugar Infusion Process of Frozen Blueberries. *Journal of Food Science, 77*(2). doi:https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02525.x

George, R. M. (1993). Freezing processes used in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 134-138. doi:https://doi.org/10.1016/0924-2244(93)90032-6

Hawkes, J. (1992). Biosystematics of the potato. En J. Hawkes, *The Potato Crop: The scientific basis for improvement* (págs. 13-64). Londres: Chapman & Hall. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-011-2340-2_2

Hua, T.-C., Liu, B.-L., & Zhang, H. (2010). Freeze-drying of pharmaceutical and food products . Beijing: Woodhead Publishing Limited, Science Press and CRC Press LLC.

Lan T.T. Bui, R. A. (2018). Properties of rehydrated freeze dried rice as a function of processing treatments,. *LWT*, 143-150. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.039

Mundo Agropecuario. (4 de Diciembre de 2024). Obtenido de ;undo agropecuario: https://www.mundoagropecuario.cl/new/produccion-bovina-en-auge-los-rios-y-los-lagos-lideran-el-crecimiento-nacional/

Odepa. (2026). *Odepa (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias)*. Obtenido de https://www.odepa.gob.cl/rubros/carnes

Oikonomopoulou, V., & Krokida, M. (2012). Structural Properties of Dried Potatoes, Mushrooms,. *Drying Technology: An International Journal*, 351-361. doi:https://doi.org/10.1080/07373937.2011.639475

Patel, S. M., Doen, T., & Pikal, M. J. (2010). Determination of End Point of Primary Drying in Freeze-Drying Process Control. *AAPS PharmSciTech*, 73–84. doi:https://doi.org/10.1208/s12249-009-9362-7

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: ar eview. *Journal of Food Engineering, 49*, 311-319. doi:doi:10.1016/s0260-8774(00)00228-4

Saclier, M., Peczalski , R., & Andrieu, J. (2010). Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals' size and shape. *Chemical Engineering Science, 65*(10), 3064-3071. doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.01.035

Silva-Vera, W., Avendaño-Muñoz, N., Nuñez, H., Ramírez, C., Almonacid, S., & Simpson, R. (2020). CO2 laser drilling coupled with moderate electric fields for enhancement of the mass transfer phenomenon in a tomato (Lycopersicon esculentum) peeling process. *Journal of Food Engineering*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109870

SJ Scientific. (s.f.). Obtenido de sjialab: https://www.sjialab.com/products/industry-food-freeze-dryer/ffd-50-industrial-food-freeze-dryer

Ulibarry, P. G. (2024). *Papa (Solanum tuberosum).* Santiago: BCN.

Uwineza, A., & Zhang, X. (2026). *Application of Freeze-Drying Technology in the Food Industry: A review.* Zhejiang Ocean University, Zhoushan . doi:https://doi.org/10.3390/foods15040790