



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**INFLUENCIA DEL MÉTODO DE CONGELAMIENTO EN EL
DAÑO MICROESTRUCTURAL DE ARÁNDANOS
LIOFILIZADOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO IVÁN KARELOVIC MARTÍNEZ

**PROFESOR GUÍA:
MARCO ANTONIO BÉJAR VEGA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ LUIS ÁRIAS BAUTISTA
RODRIGO PALMA HILLERNS**

**SANTIAGO DE CHILE
JUNIO DE 2012**

La liofilización es un proceso de secado utilizado principalmente en la industria alimentaria y farmacéutica, en el que el agua de un producto se extrae por sublimación. De esta manera se elimina el agua desde el estado sólido al gaseoso, sin pasar por el estado líquido. Para ello, el producto debe ser congelado e introducido en una cámara de vacío (liofilizador). Esta técnica, al trabajar a bajas temperaturas, evita en gran medida las pérdidas nutricionales y el deterioro organoléptico provocado con los otros tipos de secado (aire caliente, hornos, micro-ondas, etc.), obteniéndose productos de mayor calidad nutricional, sabor y textura.

El principal objetivo de este trabajo experimental fue estudiar la influencia del método de congelamiento en el daño microestructural de arándanos liofilizados. Para ello, se congelaron arándanos mediante diferentes métodos de congelación, para así variar el tiempo empleado en congelar las muestras. El método más rápido utilizado fue el HPSF (High Pressure Shift Freezing), que destaca por generar un congelamiento volumétrico de muy alta velocidad. También se congelaron arándanos en cámaras frigoríficas convencionales a -20°C y -80°C , que por sus características fueron considerados de baja y mediana velocidad respectivamente.

Una vez congeladas y liofilizadas las muestras, se tomaron micrografías SEM de su interior y exterior, y se realizaron pruebas de rehidratación y de firmeza, con el fin de caracterizar el daño interno que provocan los cristales de hielo formados con los distintos métodos.

En el congelamiento a -20°C , se observaron poros (dejados por los cristales de hielo) de gran tamaño, generando rupturas importantes en los tejidos y separación de la piel con el resto del fruto. Además, los resultados de las pruebas de rehidratación y de firmeza descartan, que a dicha temperatura, un arándano pueda restituir su apariencia original. A medida que aumenta la velocidad de enfriamiento, el daño interno disminuye y a su vez, aumenta la capacidad de rehidratación y la firmeza. Es así como los mejores resultados fueron obtenidos en muestras congeladas mediante HPSF, registrándose una mejor conservación de la integridad del fruto.

Por lo anterior, el congelamiento por HPSF y posterior liofilizado se proyecta como método promisorio para la conservación de arándanos con características cercanas a un fruto natural.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos Generales	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
2	Antecedentes	4
2.1	Proceso de liofilizado	4
2.1.1	Etapas del proceso de Liofilización	6
2.2	Métodos de Congelamiento	9
2.1.1	HPSF	10
2.1.2	Congelamiento de tipo doméstico	11
2.1.3	Congelamiento con deshidratación parcial por osmosis:	12
2.2	Estructura del Arándano	12
2.3	Secado de Punto Crítico	13
2.4	Rehidratación	14
2.4.1	Factores intrínsecos del proceso de rehidratación	15
2.5	Pruebas de Firmeza	17
3	Metodología	17
3.1	Congelamiento	17
3.1.1	HPSF	18
3.1.2	Doméstico	18
3.1.3	Congelamiento con deshidratación por osmosis:	18
3.2	Deshidratación	19
3.3	Análisis microscópico	19
3.4	Capacidad de Rehidratación	19
3.5	Pruebas de Firmeza	19
3.6	Secado de punto crítico	20
4	Resultados	21
4.1	Micrografías	21
4.1.1	Muestras de control	21
4.1.2	Micrografías superficiales	23
4.1.3	Micrografías internas	28

4.2	Rehidratación	35
4.3	Pruebas de Firmeza	40
4.3.1	Penetración	40
4.3.2	Compresión	43
5	Discusión.....	50
6	Conclusiones	54
7	Bibliografía.....	55
8	Anexo A	56

Índice de Figuras

Figura N°1:	Diagrama de fases del agua	5
Figura N°2:	Enfriamiento rápido	7
Figura N°3:	Enfriamiento lento	7
Figura N°4:	Tipos de Hielo	11
Figura N°5:	Corte transversal de un arándano	13
Figura N°6:	: Diagrama de fases CO ₂	14
Figura N°7:	Dispositivo HPSF	18
Figura N°8:	Analizador de Textura	20
Figura N°9:	Piel de un arándano secado con punto crítico	21
Figura N°10:	Interior arándano deshidratado con SPC	22
Figura N°11:	Superficie arándano a -20°C	24
Figura N°12:	Superficie arándano a -80°C	25
Figura N°13:	Superficie arándano congelado por HPSF	26
Figura N°14:	Superficie arándano comercial	27
Figura N°15:	interior de un arándano congelado a -20°C	28
Figura N°16:	Acercamiento interior de un arándano congelado a -20°C	29
Figura N°17:	Semillas de arándano congelado a -20°C y liofilizado	30
Figura N°18:	Interior de un arándano congelado a -80°C	31
Figura N°19:	Interior de un arándano congelado por HPSF	33
Figura N°20:	Micrografía del interior de un arándano comercial	34

Índice de Gráficos

Gráfico N°1: Rehidratación muestras a -20°C.....	35
Gráfico N°2 :Rehidratación muestras a -80°C.....	35
Gráfico N°3:Rehidratación a -20°C con deshidratación previa	36
Gráfico N°4: : Rehidratación muestras a -80°C con deshidratación previa	37
Gráfico N°5: : Rehidratación muestras HPSF	38
Gráfico N°6: Rehidratación arándano comercial.	38
Gráfico N°7: Resumen de Rehidratación	39
Gráfico N°8: Firmeza arándano fresco	40
Gráfico N°9: Firmeza arándano -20°C	41
Gráfico N°10: Firmeza arándano -80°C	41
Gráfico N°11: Firmeza arándano HPSF	42
Gráfico N°12: Comparación de curvas de firmeza por penetración.....	43
Gráfico N°13: Firmeza arándano fresco	44
Gráfico N°14 Firmeza arándano -20°C, congelado y descongelado	45
Gráfico N°15: Firmeza arándano -20°C, liofilizado y rehidratado.	45
Gráfico N°16: Firmeza arándano -80°C, congelado y descongelado	46
Gráfico N°17: Firmeza arándano -20°C, liofilizado y rehidratado	46
Gráfico N°18: Firmeza arándano HPSF, congelado y descongelado.....	47
Gráfico N°19: Firmeza arándano HPSF, liofilizado y rehidratado	47
Gráfico N°20: Comparación de curvas de firmeza por compresión	48
Gráfico N°21: Comparación de curvas de firmeza entre C-d y L-R	48

Índice de Tablas

Tabla N°1: Simbología de las muestras ensayadas por compresión	43
--	----

1 Introducción

En la industria alimentaria se llevan a cabo diversos métodos de conservación de alimentos, con el fin de preservarlos por tiempos prolongados. Entre ellos destacan la deshidratación, congelación, salado y salmuera, encurtido, pasteurización, utilización de conservantes, tratamientos con almíbar, etc.

La deshidratación es un método muy antiguo utilizado para preservar alimentos, tuvo su origen en los campos de cultivo cuando se dejaban deshidratar de forma natural las cosechas de cereales, maíz, entre otros, antes de su recolección o mientras permanecían en las cercanías de la zona de cultivo.

El éxito de este procedimiento reside en que, además de proporcionar estabilidad microbiológica, debido a la reducción de la cantidad de agua, y fisicoquímica, aporta otras ventajas derivadas de la reducción del peso, en relación con el transporte, manipulación y almacenamiento. Además permite disponer de alimentos estacionales en cualquier época del año. Su aplicación se extiende a una amplia gama de productos, siendo las frutas el principal interés de este trabajo.

En la actualidad existen varios métodos de deshidratación de frutas, siendo los más frecuentes la deshidratación al aire libre, por rocío, por aire y microondas [1]. Para que este proceso sea lo más eficiente posible, es indispensable conocer la velocidad a la que va a tener lugar el proceso, ya que la eliminación de humedad excesivamente rápida puede provocar daños en las capas externas y pérdidas nutricionales importantes [2].

El problema de los métodos convencionales de secado, es que si se pretende eliminar el agua de manera rápida, será necesario un gran aporte de calor y por lo tanto trabajar a altas temperaturas, que pueden dañar y/o endurecer la capa externa del fruto. Otro factor a tener en cuenta es que al producirse la evaporación del agua, la concentración de sales disueltas en ella aumenta progresivamente, quedando las células y proteínas, que conforman el producto, rodeadas de una solución acuosa altamente concentrada, este choque osmótico, unido a las altas temperaturas, lleva a la desnaturalización de los productos alimenticios. Es por esto que la deshidratación convencional se considera como un proceso perjudicial para las propiedades de la fruta [2].

Por ello se ha querido trabajar con un método alternativo de deshidratación, mucho más complejo y costoso llamado liofilización. En él, el agua del alimento se extrae mediante sublimación. De esta manera se elimina el agua haciéndola pasar desde el estado sólido al gaseoso, sin pasar por el estado líquido, evitándose así los problemas de endurecimiento de la piel y el daño celular interno.

Para llevar a cabo la sublimación es necesario llevar el agua contenida en el fruto al estado sólido, es decir, se debe congelar. Este paso previo a la deshidratación, es de

gran importancia para las características finales del producto. La velocidad a la cual se produce la congelación juega un papel preponderante, ya que afecta directamente la cantidad y tamaño de cristales de hielo formados. Si la velocidad es lenta, se formaran cristales de gran tamaño que pueden llegar a destruir la estructura interna del fruto.

Existen distintos métodos de congelación que difieren entre sí en el tiempo que tarda en ocurrir el congelamiento total del producto. El HPSF (High Pressure Shift Freezing) es un método no convencional de congelamiento, en el cual el tiempo empleado en producir los cristales de hielo es menor que el tiempo necesario para congelar en cámaras frigoríficas convencionales. Para aumentar la velocidad a la cual ocurre el congelamiento, también se pueden realizar pre-tratamientos al producto, como por ejemplo, eliminar previo el congelamiento, parte del agua por osmosis, disminuyendo la cantidad de agua y por consiguiente el tiempo de congelación.

A nivel celular, si se daña la membrana plasmática, la célula pierde la capacidad de trabajar de manera semipermeable, es decir, ya no podrá controlar qué elementos salen y entran de ella, provocando pérdidas en las propiedades nutricionales y alterando su sabor. Además, al deteriorarse las membranas celulares, toda la red celular se debilita, y la estructura interna del alimento pierde rigidez, ocasionando pérdidas de firmeza de la fruta. La firmeza, es un parámetro muy utilizado en la industria frutícola y se relaciona directamente con la textura de éste

Por lo anterior, es que adquiere una especial importancia el estudio de la etapa de congelación en el proceso de liofilizado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Generales

El objetivo de este Trabajo de Título fue estudiar la influencia del método de congelamiento en la microestructura de arándanos liofilizados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Confirmar al liofilizado como una técnica de secado de frutos superior a las convencionales.
- Comparar el método HPFS, con métodos tradicionales de congelamiento como fase previa al liofilizado de arándanos, midiendo el tamaño de los poros provocados por los cristales de hielo.
- Caracterizar el daño microestructural provocado por los cristales de hielo formados mediante los distintos métodos de congelación.
- Estudiar la influencia de la deshidratación por osmosis, previa al congelamiento, en el proceso de liofilizado.
- Medir la capacidad de rehidratación de las muestras liofilizadas.
- Medir la firmeza de muestras liofilizadas y rehidratadas
- Comparar las mediciones de firmeza anteriores, con muestras congeladas y posteriormente descongeladas a temperatura ambiente.

2 Antecedentes

Chile, debido a su geografía, se encuentra naturalmente protegido contra plagas agrícolas y es considerada una “isla fitosanitaria” en el mundo. Esto, junto con sus condiciones de suelo, clima y agua hacen de Chile un proveedor confiable de fruta de la más alta calidad e inocuidad.

Con una gran diversidad de especies cultivadas, donde destacan la uva de mesa, manzanas, arándanos, paltas, peras, kiwis, nectarines, ciruelas y cerezas, Chile es hoy el principal exportador de fruta fresca del hemisferio sur.

Entre las frutas producidas, el arándano, se perfila con una interesante perspectiva de crecimiento, alcanzando una producción de 95 mil toneladas el año 2010, según la Federación de Productores Frutícolas (Fedefruta). Gran parte de la producción de arándanos es destinada a la exportación, por lo que se hace de gran interés encontrar un método de conservación, que mantenga el sabor, textura y propiedades nutricionales de la fruta fresca, que han llevado al arándano a ser apetecido en todo el mundo.

Cuando las frutas se someten a altas temperaturas para ser deshidratadas, los tejidos que las conforman se dañan indefectiblemente. Una de las causas son las fuerzas de tensión que se crean en cavidades de pequeñas dimensiones donde hay una interfase líquido/gas. En la medida que el tejido se seca, la interfase líquido/gas avanza a través de la superficie del material colapsando las cavidades entre estructuras y en el caso de frutos muy delicados, puede colapsar su estructura completamente [2]. Sin embargo, es posible deshidratar alimentos sin que se produzcan dichos daños, mediante la técnica de la liofilización. En dicho proceso, el agua se evapora por sublimación, evitando la formación de la interfase líquido/gas.

Con la tecnología actual, un alimento deshidratado mediante liofilización podría competir en sabor, olor y textura con el producto fresco. Se podría reconstituir fácilmente, reteniendo los valores nutritivos y con buena estabilidad de almacenamiento. Además, al perder su contenido de humedad, da como resultado un aumento de la concentración de nutrientes en la masa restante, es decir, los nutrientes están presentes en mayor cantidad por unidad de peso, en relación al producto fresco [1].

2.1 Proceso de liofilizado

El sistema de secado por vacío, llamado liofilización, ha resultado ser muy eficiente a la hora de preservar las características del fruto inicial [1]. Este método se diferencia de los convencionales ya que el secado no se produce por el cambio de estado de líquido a gas, sino que se realiza primero por el paso de fase líquida a sólida y luego directamente de sólido a gas (sublimación); evitando así que los componentes del

producto queden rodeados de soluciones hipertónicas durante la extracción del agua fuera de él [2].

Para que este fenómeno ocurra, la presión máxima a la cual puede estar la muestra es la presión del punto triple en el diagrama de fases del agua (0.006 atmósferas) y a una temperatura máxima de 0.01°C. Es por esto que el producto primero debe ser congelado y luego introducido en una cámara de vacío (liofilizador) para llevar a cabo la sublimación. Esta técnica, al trabajar a menores temperaturas, evita en gran medida las pérdidas nutricionales y organolépticas (perceptibles a través de los sentidos) que se producen con los otros tipos de secado. Así, al ser aplicada en la deshidratación de frutas, da como resultado productos de mejor calidad nutricional, sabor y textura.

Los cambios de fase sufridos por el agua durante la liofilización se muestran en la figura N°1.

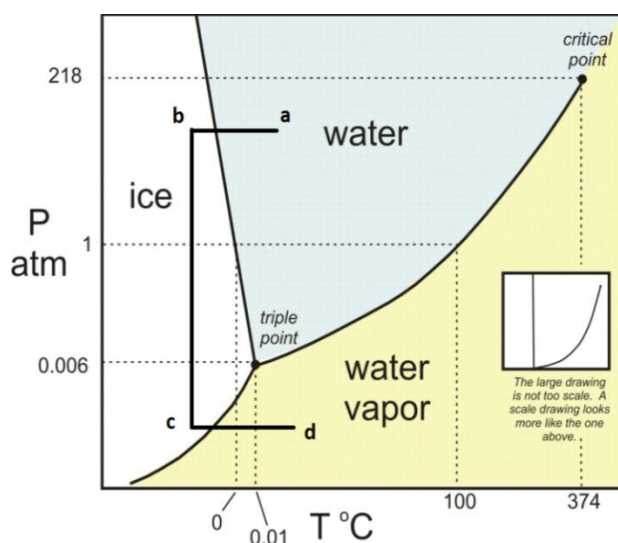


Figura N°1: Diagrama de fases del agua

a-b: Congelamiento del producto.

b-c: El Producto se lleva a un ambiente de baja presión mediante una cámara de vacío.

c-d: Mediante una fuente externa de calor o por la temperatura ambiente, se aumenta la temperatura y se produce la sublimación.

2.1.1 Etapas del proceso de Liofilización.

El proceso de liofilización puede subdividirse en 3 etapas: El pre-congelamiento, congelamiento primario y congelamiento secundario. Cada una de ellas tiene gran importancia en la calidad final del producto. Las etapas se detallan a continuación:

2.1.1.1 Pre-congelamiento

La liofilización es una técnica poco utilizada en el tratamiento de frutas debido los altos costos del proceso. En el pasado los estudios sobre optimización de este proceso se han centrado especialmente en las fases de secado, ignorando la etapa de congelación [4]. Sin embargo, el pre-congelamiento es un paso muy importante en la liofilización, ya que incide tanto en el rendimiento del proceso, como en la calidad del producto. Aunque parece simple, el paso de congelación es probablemente el paso más complejo en la liofilización [4] y puede llevarse a cabo mediante diversos métodos (capítulo 3).

En esta etapa ocurren varios fenómenos que juegan en contra de las propiedades de la fruta, los más importantes son:

a) El agua líquida presente en las células, para poder pasar a fase sólida (Hielo), debe cristalizar. Ello implica la nucleación y el posterior crecimiento de cristales de hielo. El tamaño de cristales está determinado en gran parte por la velocidad de enfriamiento: a menor velocidad, mayor es el tiempo que tienen los cristales para difundir, por esta razón los cristales más grandes crecen a expensas de los más chicos aumentando considerablemente el tamaño promedio de ellos. Si se considera el tamaño de los cristales de agua, dependiendo del tipo de hielo formado (ver Anexo A), estos pueden llegar a variar en volumen hasta un 9% en relación a su estado líquido, lo cual provoca presiones internas que generan daños estructurales al interior del fruto. Al dañarse las membranas celulares, pierden la capacidad de trabajar de manera semipermeable provocando su desnaturalización, lo que ocasiona pérdidas nutricionales y afecta severamente el sabor. Además, esto da lugar a la formación de grandes cristales de hielo extracelular que separa y rompe las células, provocando alteraciones en la textura del alimento y exudación de agua al momento de descongelar [1] [5]. Al deteriorarse las membranas celulares, toda la estructura interna del fruto se debilita, ocasionando pérdidas de firmeza que influyen directamente en la textura de la fruta. Dicho fenómeno se puede apreciar en las figuras 2 y 3, en donde las regiones brillantes corresponden a la pared celular y membrana plasmática y las zonas oscuras, a huecos donde se alojaron los cristales de hielo y todo el contenido celular.

b) El tamaño de los cristales de hielo también tendrá una influencia significativa en la permeabilidad de la capa seca al vapor que fluye desde la interfase producto congelado- producto seco (hielo-vapor) hacia el exterior, como en el tiempo de rehidratación del producto. Así de un gran número de granos pequeños resultará una capa seca que resulte en caminos intrincados para el paso del vapor, lo que significará una tasa de secado más baja. Por otra parte, significará una gran superficie expuesta al agua al momento de la rehidratación, lográndose esto en corto tiempo [5].

De lo anterior, la situación ideal de congelamiento estará dada por una alta velocidad de congelamiento y que los cristales de hielo formados no tiendan a influir volumétricamente sobre el alimento.

c) La concentración de sales va aumentando a medida que aumenta la proporción de agua en estado sólido. Presentándose, al igual que en el secado convencional, soluciones hipertónicas que rodean las células del producto, con la diferencia que debido a la baja temperatura, la cinética de los fenómenos de lisis es menor y que el tiempo que dura esta situación puede hacerse lo suficientemente corto para evitar daños [4] .

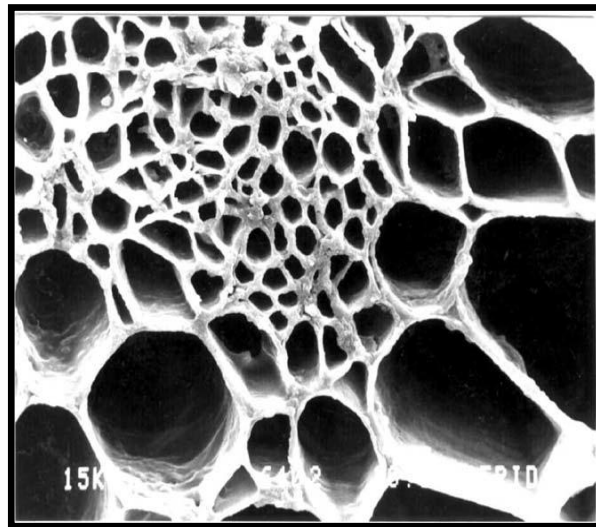


Figura N°2: Enfriamiento rápido.

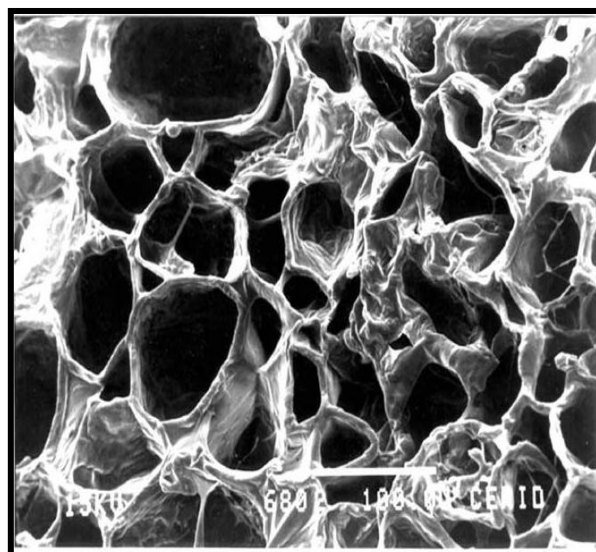


Figura N°3: Enfriamiento lento.

d) Quemadura por frío: Cuando entra aire caliente al interior de la cámara de congelación, produce un gradiente de temperatura entre el aire frío interno y el caliente que penetra. Cuando el aire se calienta aumenta su capacidad de absorción de humedad.

En una cámara de congelación, la única fuente de humedad disponible es el hielo contenido en los alimentos congelados. El aire caliente toma la humedad de los alimentos protegidos deficientemente, desecándolos. Luego, esta humedad es depositada al enfriarse el aire en las superficies frías del congelador.

La quemadura por frío es una gran desecación superficial en un alimento congelado, producido por la deshidratación anterior. Aparece en la superficie del tejido como manchas de color oscuro al ir concentrándose y oxidándose los pigmentos de las capas más superficiales. También aparecen zonas blanco-grisáceas debidas a los huecos dejados por el hielo después de su sublimación. Si el fenómeno se mantiene durante suficiente tiempo, las capas superficiales se van esponjando y empiezan a deshidratarse las inferiores.

Si la quemadura es pequeña, el fenómeno es reversible por exposición a la humedad y rehidratación. Si la quemadura ha sido por el contrario más profunda, se han producido oxidaciones, cambios químicos que ya no son reversibles. La quemadura por frío causa una merma importante en el producto y una pérdida de valor del mismo porque disminuyen sus cualidades organolépticas.

2.1.1.2 Secado primario

Durante el secado primario, los cristales de hielo formados durante la congelación son evaporados. La presión de la cámara de vacío se reduce por debajo de la presión de vapor del hielo, y la temperatura de almacenamiento se eleva al suministrar el calor, eliminado el hielo por sublimación. Al final de secado primario, el producto aún puede contener entre 15-20% de agua aproximadamente, que luego se elimina durante la etapa de secado secundario. Para llevar a cabo el proceso se deben considerar dos aspectos fundamentales:

Flujo de calor del ambiente a la interfase: Una vez descongelada el área superficial del producto esta se empezará a calentar por el efecto de la temperatura ambiente dentro de la cámara. Por lo que existirá una transferencia de calor entre la parte descongelada (seca) y la parte congelada mediante radiación.

Flujo de vapor desde la interfase: El vapor generado en la interfase fluye al exterior a través de la cáscara seca. Esto se debe fundamentalmente a los gradientes de presión parcial y total existentes a través de ella. El gradiente de presión total entre el exterior y la interfase depende de la tasa de sublimación y de la permeabilidad de la cáscara seca.

2.1.1.3 Secado secundario

Cuando el último cristal de hielo ha desaparecido, el producto se calienta hasta la temperatura máxima admisible por la parte seca. La deshidratación final

se realiza entonces bajo gran vacío para eliminar el agua que no se cristalizó previamente y que está ligada muy fuertemente a la masa parcialmente seca. Durante esta etapa la humedad residual disminuye progresivamente hasta obtener el nivel deseado, que dependerá del producto y del tiempo que se desee preservar.

2.2 Métodos de Congelamiento

El agua pura a presión ambiental cambia de fase líquida a sólida a los 0°C. Justo por debajo de esta temperatura comienza la nucleación de pequeños núcleos de hielo que son el centro de los cristales que se formaran a continuación. Técnicamente la nucleación se puede definir como la generación, dentro de un sistema metaestable o fase, de la partícula más pequeña de una fase extraña estable capaz de crecer espontáneamente. Luego de formados los núcleos comienza una segunda etapa llamada cristalización, en la cual los cristales comienzan a crecer por procesos difusivos.

Se conocen 2 mecanismos por los cuales ocurre el congelamiento, uno direccional y uno volumétrico y los factores que controlan la morfología cristalina difieren entre sí. En la solidificación direccional, presente en congelamiento convencional, la velocidad del frente de congelación y el gradiente de temperatura a través de éste, son los principales factores determinantes en el tamaño del cristal. En este tipo de congelamiento la nucleación es heterogénea dentro del volumen de producto a congelar, ya que la temperatura es menor en las zonas externas que están más expuestas al frío y por lo tanto la nucleación avanza desde la zona externa hacia la interna. Este tipo de congelamiento se caracteriza por la formación de grandes cristales de hielo.

El congelamiento volumétrico, en cambio, se produce cuando el agua se sobre-enfría, es decir, se encuentra por debajo de la temperatura de congelamiento pero se mantiene líquida, de esta manera es posible lograr nucleación homogénea dentro de un producto, no dejando tiempo suficiente para una cristalización mayor, formándose cristales de hielo muy pequeños. En este caso, el tamaño de los cristales es controlado por la temperatura de nucleación [5].

Para poder estudiar y comparar el efecto del método de congelamiento sobre la microestructura de fruta liofilizada, es necesario congelar la fruta mediante distintos métodos, ellos se detallan a continuación [5]:

2.1.1 HPSF

Cuando el agua es congelada a presión atmosférica, su volumen su incrementa. A esta presión el hielo formado es del tipo I (ver figura 4) y el aumento en volumen va desde 9% a 0°C hasta un 13% a -20°C. Este fenómeno es el principal causante del daño en los tejidos de los alimentos, ya que se produce un exceso de presión sobre las paredes celulares. En cambio, si se somete el alimento a alta presión y luego se enfría, como ocurre en el HPSF, se producen otros tipos de hielo (II- IX, ver anexo), estos son mucho más densos que el hielo tipo I, e incluso pueden llegar a ser más densos que el agua [6].

El HPSF, es considerado como un enfriamiento volumétrico, y no direccional como ocurre con el enfriamiento convencional. En este último, el congelamiento ocurre desde afuera hacia dentro en el alimento, primero se congela la capa más externa y expuesta al frío, luego la interfaz *producto congelado - producto no congelado* va avanzando hasta producir el congelamiento total del alimento.

En el congelamiento volumétrico, la morfología de los cristales de hielo es controlada por la temperatura de nucleación, que se refiere a la temperatura a la cual se crean los núcleos y que posteriormente deberían cristalizar mínimamente en este tipo de congelamiento. La mayoría de los estudios experimentales no señalan la relación directa entre la temperatura de nucleación y la morfología de hielo, sino que apuntan a la influencia de esta última en la transferencia de masa durante la liofilización posterior. Sin embargo, la relación entre la temperatura de nucleación, el tamaño del cristal y la tasa de transferencia de masa se ha demostrado mediante microscopía SEM [7].

De acuerdo con la Ley de Darcy, el tamaño de los cristales disminuye al disminuir la temperatura de sobre-enfriamiento, sin importar el método que induce la nucleación. Esto es consistente con la teoría de la nucleación, que prevé que la tasa de nucleación del hielo (medida del número de núcleos creados por unidad volumen y tiempo) aumenta con el sobre-enfriamiento. Una vez que los primeros núcleos se crean, el proceso de nucleación continúa y se inicia el proceso de crecimiento de los cristales. El enfriamiento rápido promueve la formación de cristales de hielo numerosos y pequeños [7].

El sobre-enfriamiento es un estado de equilibrio metaestable y es similar a una energía de activación necesaria para el proceso de nucleación. Debido a las fluctuaciones de densidad por el movimiento browniano en el agua líquida sobre-enfriada, las moléculas de agua forman grupos con enlaces de hidrógeno, con similares arreglos

moleculares que los cristales de hielo. Debido a que este proceso es energéticamente desfavorable, estos grupos se rompen rápidamente. La probabilidad de que estos núcleos crezcan en número y tamaño es más alta a temperaturas bajas [7].

Una vez alcanzada la masa crítica de núcleos, la cristalización del hielo se produce rápidamente en todo el sistema. La temperatura límite conocida como la temperatura de nucleación homogénea, es aproximadamente -40°C . A esta temperatura, el agua pura contendrá, al menos una forma espontánea núcleo formado de agua activa, capaz de iniciar los cristales de hielo [7].

El HPSF se realiza a una presión aproximada de 200[Atm], el agua a esta presión puede bajar su temperatura hasta -22°C sin congelarse (sobre-enfriamiento). Si se libera la presión de forma rápida, se producirá nucleación homogénea en todo el volumen del fruto que ahora está a presión ambiente y a temperaturas bajo cero. Como los núcleos están muy cerca uno de otros y además son de similares tamaños, la cristalización es muy escasa, por lo que bajo esta condición, la velocidad de congelamiento es alta, obteniéndose cristales de tamaño nanométrico [8].

2.1.2 Congelamiento de tipo doméstico

Se introduce la fruta en refrigeradores domésticos a una temperatura aproximada de -20°C . El enfriamiento es lento produciéndose cristales de hielo de un tamaño relativamente grande.

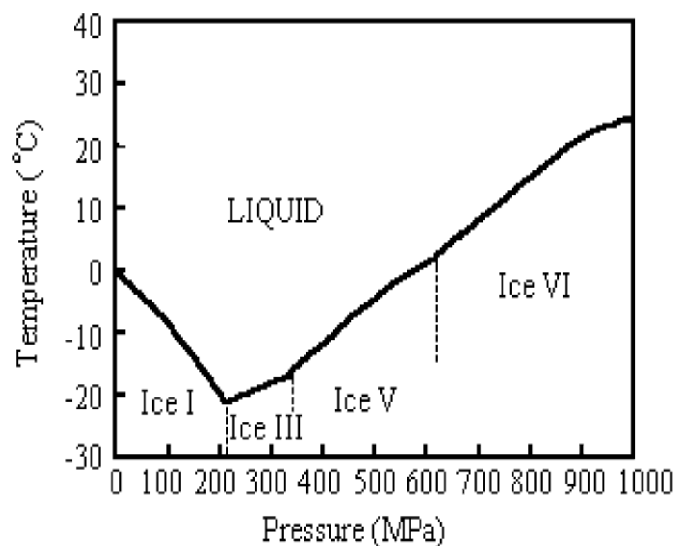


Figura N°4: Tipos de hielo [6].

2.1.3 Congelamiento con deshidratación parcial por osmosis:

Previo al congelamiento, se sumerge la fruta en una solución hipertónica, altamente concentrada de sal y/o azúcar a temperatura ambiente. A consecuencia del gradiente de concentración, el agua de la fruta fluye hacia la solución y, en sentido inverso, los solutos desde la solución hacia la fruta, de esta manera se seca previamente la fruta antes de ser congelada. Al no haber cambio de fase del agua, las propiedades intrínsecas del fruto no se ven alteradas significativamente. Luego, al momento de congelar la cantidad de agua es mucho menor, produciéndose así cristales de hielo más pequeños. En consecuencia, este método es más eficiente energéticamente por la menor cantidad de agua a congelar y además produce menos daño al fruto [9].

La aplicación del fenómeno de ósmosis en la deshidratación de frutas se puede lograr debido a que un buen número de ellas, incluido el arándano, cuentan con los elementos necesarios para inducir la osmosis. Estos elementos corresponden a la pulpa, que en estas frutas consiste en una estructura celular más o menos rígida que actúa como membrana semipermeable. Detrás de estas membranas celulares se encuentran los jugos, que son soluciones diluidas, donde se hallan disueltos sólidos que oscilan entre el 5 a 18% de concentración. Si esta fruta entera o en trozos se sumerge en una solución o jarabe de azúcar de 70%, se tendría un sistema donde se presentaría el fenómeno de ósmosis [9].

Los jugos en el interior de las células de la fruta están compuestos por sustancias disueltas en agua, como ácidos, pigmentos, azúcares, minerales, vitaminas, etc. Algunas de estas sustancias o compuestos de pequeño volumen, como el agua o ciertos ácidos, pueden salir con cierta facilidad a través de orificios que presenta la membrana o pared celular, favorecidos por la presión osmótica que ejerce la solución de alta concentración donde se ha sumergido la fruta.

La presión osmótica presente será mayor en la medida que sea mayor la diferencia de concentraciones entre la solución y el interior de los trozos de la fruta. El efecto de esta diferencia se ve reflejado en la rapidez con que es extraída el agua de la fruta hacia la solución [9].

2.2 Estructura del Arándano

El arándano, pertenece a la familia de los berries, se compone por 3 partes principales; la parte exterior o piel (exocarpo) que protege el interior del fruto de agentes externos, una zona intermedia donde se encuentra la parte carnosa del fruto (mesocarpo) y que otorga la textura y finalmente una parte central donde se alojan las semillas (endocarpo).



Figura N°5: Corte transversal de un arándano.

2.3 Secado de Punto Crítico

Para poder hacer un análisis sobre los efectos del congelamiento en la microestructura de los arándanos liofilizados, primero es necesario tener una referencia de cómo es la estructura interna del fruto fresco observándolo mediante SEM. Para observar una muestra por microscopía electrónica de barrido es necesario que esta esté completamente deshidratada, por lo tanto, no se puede observar directamente un arándano fresco. Por esta razón se utiliza el secado de punto crítico (SPC), que deshidrata un tejido, pero no produce un cambio de forma en él. En un arándano deshidratado mediante este proceso no se formarán arrugas ni pliegues en la piel, que lo asemejarán a una pasa, como sucede en los otros métodos incluida la liofilización, si no que mantendrá su forma esférica inalterada y por lo tanto se podrá observar tal cual se presenta en estado fresco, solo que sin agua.

El punto crítico es aquel estado particular de un gas en el cual todavía puede sufrir licuefacción, esto quiere decir que al cambiar de fase líquida a gas, debe necesariamente pasar por la interfase líquido/gas de su diagrama de fases. Este estado viene determinado por la presión crítica y la temperatura crítica. Por encima de este punto el gas no puede experimentar licuefacción debido a que el límite entre la fase gaseosa y la fase líquida ha desaparecido en el diagrama de fases (figura N°6). En este punto el estado líquido y el estado gas son igualmente densos y se denomina fluido supercrítico (FSC). Estos fluidos poseen las propiedades típicas de lo que habitualmente se denomina como “un híbrido entre un líquido y un gas”, es decir, puede difundir como un gas y disolver materiales como un líquido. Los FSC se caracterizan por el amplio rango de densidades que pueden adoptar. Por encima de las condiciones críticas, pequeños cambios en la presión y la temperatura producen grandes cambios en la densidad. La ventaja de este proceso es que el líquido pasa a la fase gas sin pasar por el límite de fases “líquido-gas”, y la muestra se seca sin los efectos dañinos del secado en aire. Si un tejido está totalmente inmerso en un líquido por debajo de su punto crítico y el líquido es entonces llevado a una temperatura y presión por arriba del

punto crítico, entonces, la muestra queda inmersa en gas (está seca), sin estar expuesta a las fuerzas de tensión de superficies que la pueda dañar [3].

Según los valores de presión y temperatura crítica del agua, 228.5 bar y 374 °C, si un espécimen contiene agua no puede ser secado mediante el método del punto crítico ya que los valores tan altos de presión y temperatura podrían destruirlo. Así la muestra debe ser transferida a un agente apropiado, llamado fluido transicional, como lo es el dióxido de carbono, cuyos valores de punto crítico son considerablemente más ventajosos, 73.8 bar y 31 °C. Para llevar a cabo este procedimiento a una presión y temperatura adecuadas, es normal remplazar el agua (que tiene un punto crítico muy alto) con otro líquido antes de efectuarse el secado. Más de una sustitución es necesaria si el líquido final no es miscible en agua; por ejemplo, el agua es primero sustituida por acetona, que sí es miscible en CO₂ y posteriormente, la acetona se sustituye por CO₂ líquido [3].

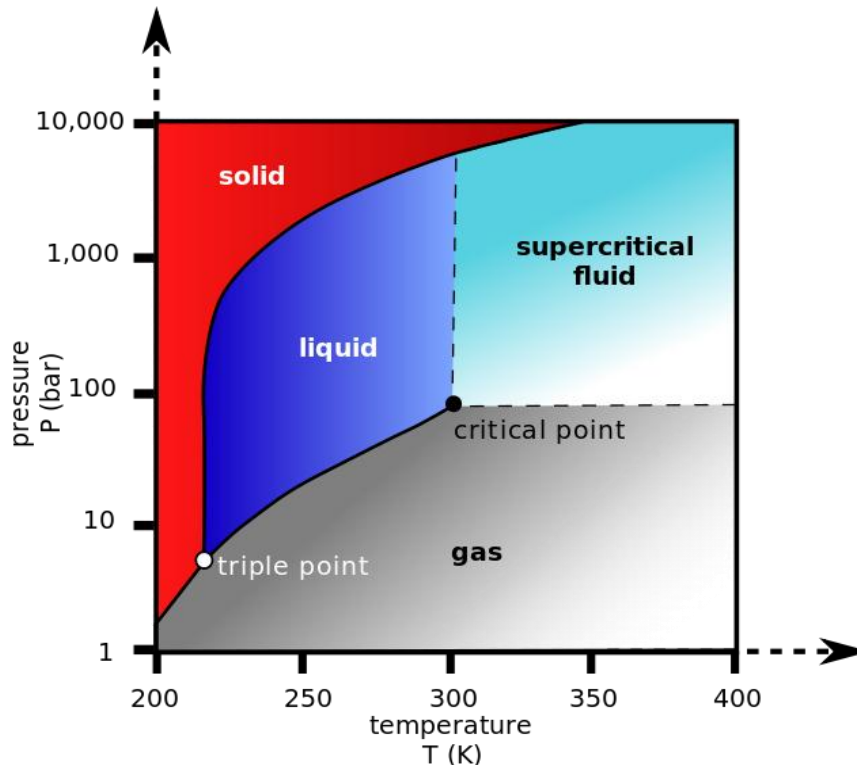


Figura N°6: Diagrama de fases CO₂

2.4 Rehidratación

La rehidratación es la absorción de agua por parte de los alimentos que han sido previamente secados. El objetivo es alcanzar un estado lo más parecido posible al

original. Los alimentos deshidratados que no han sido dañados durante el sacado, deberían rehidratarse de manera rápida y mostrar, en la medida de lo posible, las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, así como sus propiedades nutricionales y organolépticas. Así, un fruto deshidratado por liofilización debería mantener sus propiedades de mejor manera que si lo hiciera por los medios convencionales, lo que permitiría tener fruta similar a la fresca en cualquier lugar y cualquier época del año.

Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, entendiéndose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pre-tratamientos al secado. La velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, los que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal [4].

Es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Las operaciones previas a la deshidratación, llamadas pre-tratamientos, tienen marcada influencia sobre las características y la composición del producto finalmente rehidratado. Aquellos pre-tratamientos que contribuyen a mantener la integridad de los tejidos permiten evitar mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación, afectando la calidad nutricional del producto y su capacidad de imbibición de agua. Los pre-tratamientos que emplean altas presiones, previos a la deshidratación osmótica provocan cambios en la estructura de los tejidos, la compactación de las estructuras celulares y transformaciones de los geles de la pectina, modificando negativamente la posterior rehidratación del producto. Por otra parte la deshidratación a altas temperaturas provoca cambios que son irreversibles en el alimento: pérdida de textura, disminución de vitaminas, color y aroma, entre otros [4].

Varios estudios han tratado de explicar y de modelar la rehidratación de frutos mediante la segunda la Ley de difusión de Fick, sin embargo, trabajos recientes han demostrado que en ciertas frutas, otros mecanismos como la capilaridad y la imbibición son relevantes a la hora de explicar el ingreso de agua dentro de la fruta [10]. La imbibición se define como el desplazamiento de un fluido viscoso por otro fluido inmiscible con éste. Este proceso es controlado, y se ve afectado, directamente por la capilaridad.

2.4.1 Factores intrínsecos del proceso de rehidratación

a) Líquido de rehidratación: como se señaló, los alimentos deshidratados generalmente se rehidratan con agua, pero en algunos procesos se utilizan medios de rehidratación tales como leche, yogur, disoluciones azucaradas o salinas, entre otros, siempre con el fin de mejorar las características finales del producto rehidratado, como

son la textura, retención de color y aroma, aumento de la viscosidad, disminución de la actividad de agua, reducción de tiempos de proceso, entre otros. La velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, en cambio es menor por ejemplo en soluciones azucaradas, leche o yogurt, debido a la elevada viscosidad que presentan éstas, sin embargo pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros [4].

b) La temperatura de la solución de rehidratación: Un alimento deshidratado a temperatura constante, y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio cuanto mayor sea la temperatura de rehidratación, debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión, además la alta presión que se ejerce sobre los gases que pudiesen estar atrapados entre los espacios intercelulares, permite que se muevan por difusión o capilaridad, tomando ese lugar el líquido rehidratante.

Con el aumento de la temperatura del medio de rehidratación se incrementa la velocidad del proceso, debido principalmente al aumento de la difusividad de agua y de solutos, otorgando así una reducción sustancial del tiempo de rehidratación. Esto influye sobre ciertas características del producto, como son la estructura de la pared celular, produciendo la pérdida de nutrientes y colorantes, no obstante con algunos pre-tratamientos al secado se pueden evitar en parte estos problemas. Se ha demostrado que rehidratar con temperaturas menores a 40°C mantiene la estructura original de las pectinas presentes en la pared celular, mejorando la capacidad de absorción de agua por el tejido. En otras investigaciones se ha logrado acelerar el proceso de rehidratación por medio de técnicas combinadas, destacándose la rehidratación con impregnación al vacío, uso de ultrasonido, adición de aditivos en el agua de rehidratación, etc., aunque estas técnicas son de elevado costo operacional [4].

c) Agitación durante la rehidratación: la generación de turbulencia en el medio de rehidratación logra una mayor homogenización, aumentado la entropía del sistema y la facilidad del intercambio de materia (agua y solutos), siempre teniendo en cuenta la velocidad de agitación [4].

d) Características del producto: antes de aplicar rehidratación a alimentos deshidratados, se deben conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, ya que las propiedades físico-químicas, micro-estructurales, sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a uno deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación. En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De

esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos [4].

2.5 Pruebas de Firmeza

La firmeza, es un parámetro utilizado en la industria agroalimentaria para caracterizar la textura de las frutas. Se define como la rigidez mecánica de la estructura celular y se mide con un analizador de textura (FTA). El FTA somete el fruto a diferentes esfuerzos, deformaciones y velocidades de deformación, permitiendo obtener parámetros como firmeza, fragilidad, consistencia, adherencia, untabilidad, extensabilidad, masticabilidad, gomosidad, entre otros.

Hay dos formas de medir la firmeza, una destructiva y otra no destructiva. En la primera una aguja penetra la piel del fruto hasta una profundidad determinada, así se puede obtener la firmeza máxima. En la segunda, el fruto es comprimido con un émbolo, sin ser perforado hasta una profundidad determinada.

En ambos casos se registra la fuerza que se debe aplicar para mantener una velocidad constante predeterminada hasta la profundidad preestablecida. Los datos obtenidos se grafican en curvas de firmeza (Fuerza v/s Distancia).

3 Metodología

En el presente Trabajo de Título se utilizaron arándanos (*Vacciniumcorymbosum* L.) de entre 12 y 15mm de diámetro con similares fechas de cosecha y producidos por la empresa Hortifrut. La metodología a seguir es la siguiente:

3.1 Congelamiento

Se congelaron muestras de arándanos enteros, de forma y tamaño lo más similar posible mediante distintos métodos de congelamiento. Todas las muestras luego de congeladas, fueron mantenidas al menos 24 horas a una temperatura de -20°C para homogeneizarlas. Los métodos utilizados fueron:

3.1.1 HPSF

Mediante el congelador perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile y previas modificaciones y reparaciones efectuados por el alumno, se congeló arándanos a una presión de 2000 atmósferas, a una temperatura de -20°C .

3.1.2 Doméstico

Se utilizaron refrigeradores a -20°C y -80°C . Estos están dispuestos en el Centro para la Investigación Interdisciplinaria Avanzada en Ciencias de los Materiales (CIMAT) de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de Chile. Los arándanos estuvieron en ellos al menos 24 horas para asegurar la total congelación.

3.1.3 Congelamiento con deshidratación por osmosis:

Previo al congelamiento, se sumergieron los arándanos en una solución sobresaturada de agua desmineralizada y cloruro de sodio a una temperatura de 25°C . Un grupo de muestras se mantuvieron por 12 horas en dicha solución. Luego, estas muestras fueron congeladas a -20°C y -80°C , en los refrigeradores mencionados anteriormente. El objetivo de este ensayo es analizar el efecto en la firmeza, de la eventual disminución de agua del arándano, previo a ser congelado.



Figura N°7: Dispositivo de HPSF

3.2 Deshidratación

Se deshidrataron los arándanos en el liofilizador dispuesto en la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de Chile. El aparato es de marca Christ, modelo Alpha 1-4, con capacidad para 4 kilos de hielo y la temperatura del condensador es de -55°C. Este proceso demora aproximadamente 4 días para una muestra de 20 arándanos.

3.3 Análisis microscópico

Una vez deshidratadas las muestras, se procedió al análisis microscópico, con un microscopio de barrido marca TESLA, modelo BS 343A, en donde se observó la influencia del congelamiento en la microestructura de los arándanos. Para ello se realizó un corte transversal (figura 5) y se estudió y comparó el tamaño de los poros dejados los por cristales de hielo y el daño micro-estructural, tanto de la piel como del interior del arándano.

3.4 Capacidad de Rehidratación

Una vez deshidratadas las muestras, se procedió a sumergirlas en agua a una temperatura de 40°C. Cada 30 segundos y en un tiempo total de 4 minutos, se realizaron mediciones de masa para medir la capacidad de rehidratación. Antes de pesar el arándano, éste es secado con papel absorbente para evitar que el agua remanente en la superficie afecte las mediciones. La rehidratación se caracterizó como el aumento en porcentaje de masa, en comparación al peso del arándano totalmente deshidratado.

3.5 Pruebas de Firmeza

En un FTA, propiedad de Laboratorio de Mejoramiento Genético y Calidad de la Fruta de la Facultad de Ciencias Agronómicas, se midió la firmeza de los arándanos. Primero se midió firmeza con penetración, con una aguja de 1.5mm de diámetro, a muestras congeladas mediante los distintos métodos y que luego fueron descongeladas a temperatura ambiente (27°C aprox.). Se ensayaron 10 muestras por cada método de congelación, para así obtener un promedio representativo.

Luego se midió firmeza sin penetración, a muestras idénticas a las anteriores y a muestras que fueron congeladas, liofilizadas y luego rehidratadas.

Para el primer ensayo se estableció una profundidad de 3mm, la velocidad de avance de la aguja es de 30mm/seg y la velocidad de las mediciones es de 5mm/seg. Para el

segundo ensayo se estableció una profundidad de 1 mm y un émbolo de goma de 30mm. De esta manera se compararon las propiedades mecánicas de un fruto congelado y descongelado contra uno que fue Liofilizado y rehidratado. Además se midió firmeza a arándanos frescos que servirán como muestra de control.



Figura N°8: Analizador de Textura (FTA)

3.6 Secado de punto crítico

Primero se eliminó el agua del fruto, remplazándola por acetona. Para ello se sumergió un arándano de muestra en acetona al 10% por 24 horas, luego se retiró y se sumergió en acetona al 30% por la misma cantidad de tiempo. Este proceso se repitió para acetona al 70%, 90% y 100%. Una vez extraída toda el agua intercambié la acetona por CO₂ mediante un equipo marca EMS dispuesto específicamente para ello en el mismo CIMAT. Luego de varias repeticiones del proceso el arándano se encuentra completamente seco e inalterado. Dicha muestra sirvió como muestra de control para analizar el daño provocado por el congelamiento.

4 Resultados

A Continuación se presentan los resultados de los distintos ensayos realizados.

4.1 Micrografías

Se obtuvieron micrografías SEM, tanto de la parte externa del arándano, como también del interior de ellos.

4.1.1 Muestras de control

Las muestras de control fueron obtenidas mediante SPC, de esta manera se obtuvo como resultado un fruto seco pero de anatomía muy similar un fruto fresco. Dicho proceso evita que la extracción de agua arrugue la piel, quedando similar a una pasa. La figura N°9 presenta la piel de un arándano deshidratado. En las fotografías tomadas la piel presenta pequeños pliegues, pero no se ve daño, rupturas, quemaduras o cambios importantes de tonalidad en la superficie del fruto.

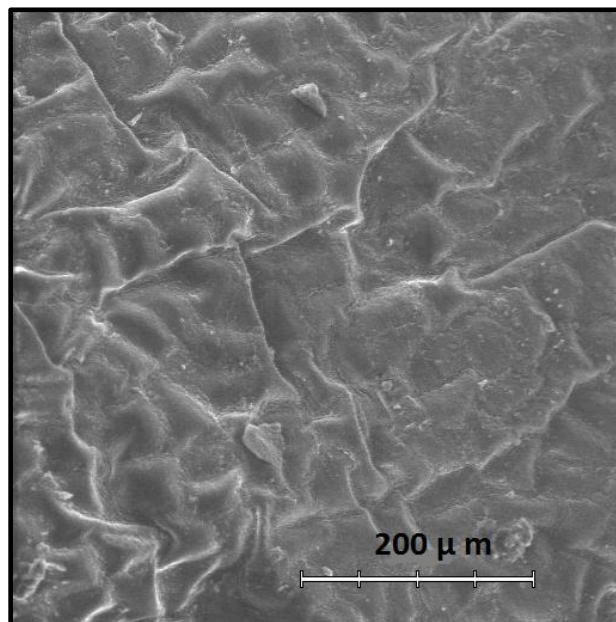


Figura N°9: Piel de un arándano secado mediante SPC

Como también se quiso caracterizar el daño interno provocado por el congelamiento, fue necesario también observar un corte transversal de arándano en estado lo más cercano al “natural”. Las fotografías obtenidas se muestran a continuación:

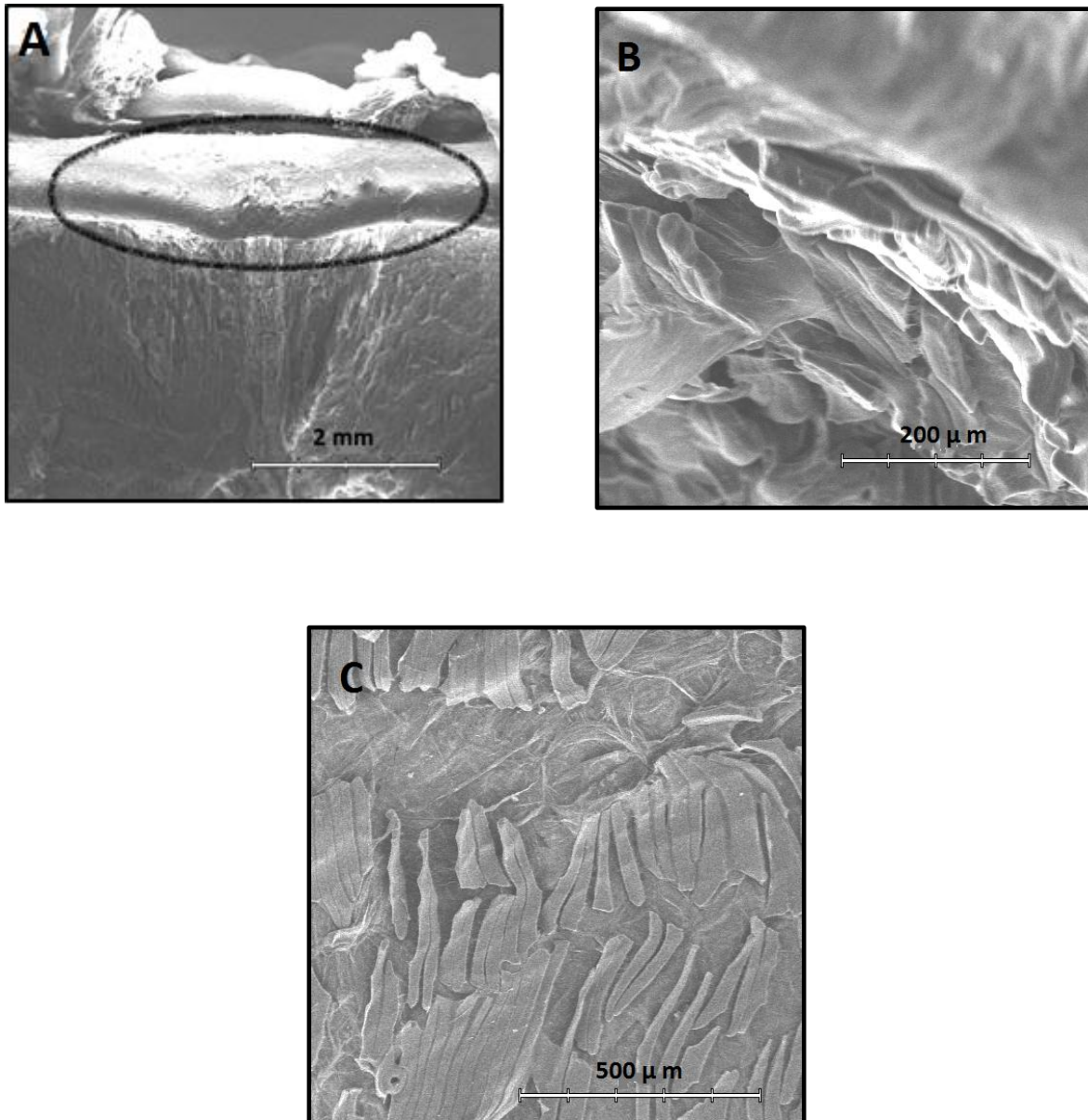


Figura N°10: Micrografía del interior de un arándano deshidratado mediante SPC

En 10.a se observa el interior de un arándano cortado transversalmente. Dentro de la zona demarcada, el sector brillante corresponde a la piel, la cual se encuentra unida completamente a la zona interior del arándano, el límite entre ambas zonas se distingue como una línea brillante, en todo el ancho de la fotografía. La zona carnosa o pulpa se aprecia muy compacta sin presencia de poros ni agujeros. En 10.b se observa un acercamiento sobre el límite entre las zonas que muestra la cohesión entre ella y 10.c muestra un acercamiento sobre la zona carnosa, donde se aprecian estructuras celulares laminares, finas y alargadas, unidas entre ellas.

4.1.2 Micrografías superficiales

La zona del arándano que está más expuesta a las bajas temperaturas es la piel, por lo que resultó interesante observar el efecto que el frío provoca sobre ella. La piel es la protección natural que tiene el fruto y protege el contenido interno contra todo agente externo. Si la piel se daña, el contenido interior del fruto queda expuesto a las condiciones ambientales y tenderá a salir por la fisura, lo que provoca daños irreparables tanto en la firmeza, como en las propiedades organolépticas.

A -20°C

Una vez obtenida la muestra de control mediante SPC, se observó la piel de arándanos congelados a distintas temperaturas y luego deshidratados. La figura N°11 muestra la piel de un arándano congelado a -20°C y luego liofilizado. En 11.a se aprecian importantes pliegues en la piel, provocados por el proceso de deshidratación, sin embargo, no se ve un daño excesivo que estropee la fruta. No hay presencia de quemaduras, ni cambio de coloración que demuestren daños severos. En la figura 11.b se observa un acercamiento de uno de los pliegues, en donde aparecen pequeñas fisuras justo en donde el pliegue cambia de curvatura, pero sin salida del contenido interno.

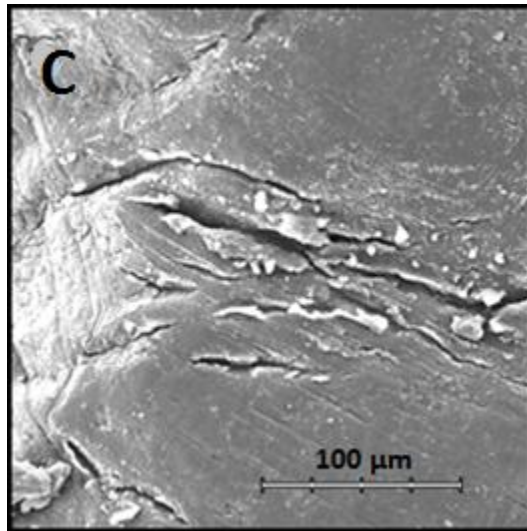
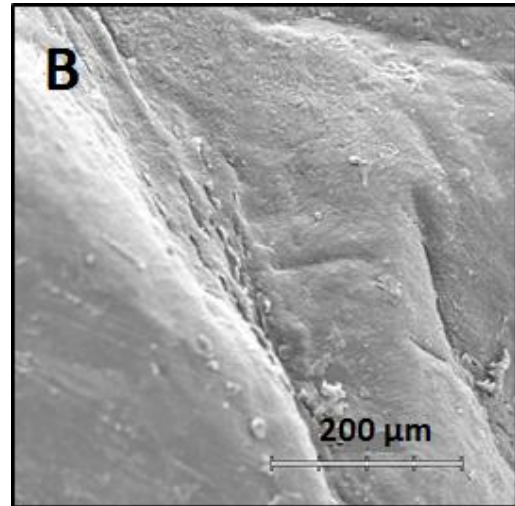
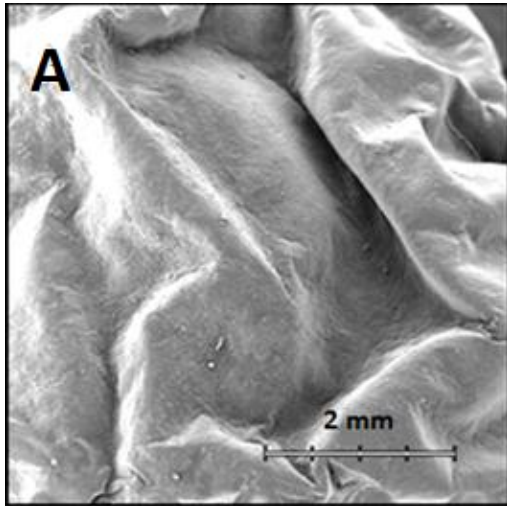


Figura N°11: Muestra la superficie de un arándano congelado a -20°C y luego liofilizado. A) Superficie, b) Acercamiento de uno de los pliegues. c) Detalle de uno de los pliegues

A -80°C

Este mismo comportamiento se observó en el caso de los arándanos congelados a -80°C (figura N°12), donde el daño observado es incluso menor. En los pliegues no hay presencia de fisuras y la piel se encuentra sin daños aparentes. Por esta razón, se puede decir que si bien la piel del arándano se pliega de manera considerable, no se producen daños severos en ella. Además no existen diferencias notorias en ambas temperaturas de congelamiento.

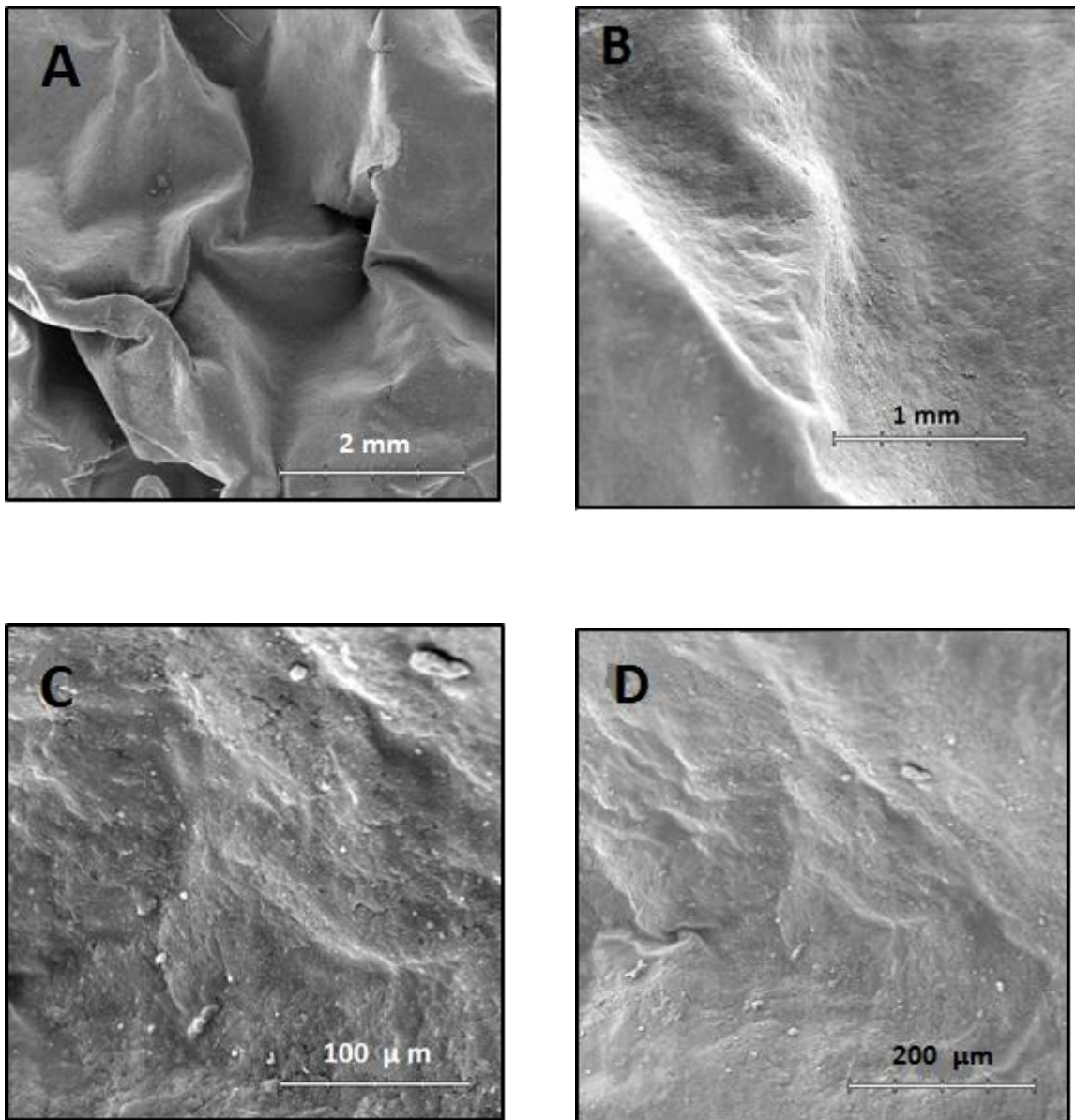


Figura N°12: la superficie de un arándano congelado a -80°C y luego liofilizado. A) Pliegues formados por efecto de la deshidratación, B), C) y D) muestran el nulo daño provocado en la piel a distintos aumentos

Por HPSF

Cuando el congelamiento es mediante HPSF, la conservación de la piel es mejor que en el caso del congelamiento convencional, ya que se producen menos pliegues (Figura N°13). En las muestras congeladas con este tipo de congelamiento se observan resultados similares a la muestra de control. Por todo lo anterior, se confirma al liofilizado como una buena técnica para deshidratar arándanos, al menos desde el punto de vista de la conservación de la piel.

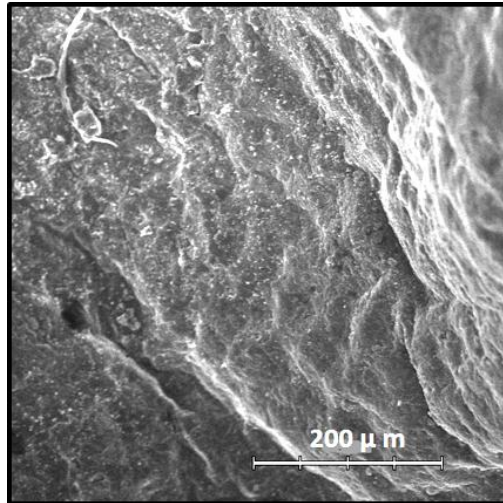


Figura N°13: muestran la piel dañada de un arándano congelado mediante HPSF y luego liofilizado

Distinto es el caso de arándanos secados a altas temperaturas, en donde la piel sí se daña. La figura N°14, representa la piel de un arándano comercial, producido por la empresa Hortifrut, la cual deshidrata sus arándanos en grandes hornos a temperaturas entre 60 y 65°C. En la figura 14.a se aprecia evidente daño superficial del arándano, con claros cambios de tonalidad que reflejan algún tipo de “quemadura” en la piel. La superficie es muy irregular, con grietas e imperfecciones. Dentro de la zona demarcada en la figura N°14.c, aparentemente el contenido interior del fruto salió por las grandes grietas presentes en la piel, lo que conlleva a una merma importante en la calidad de la fruta. Si se compara el método convencional de deshidratación con el liofilizado, las diferencias son muy notorias, ya que la conservación de la integridad de la piel observada es notablemente superior con este último proceso, independiente del tipo de congelamiento previo que se haya utilizado. Las altas temperaturas, evidentemente generan daños que el liofilizado no provoca

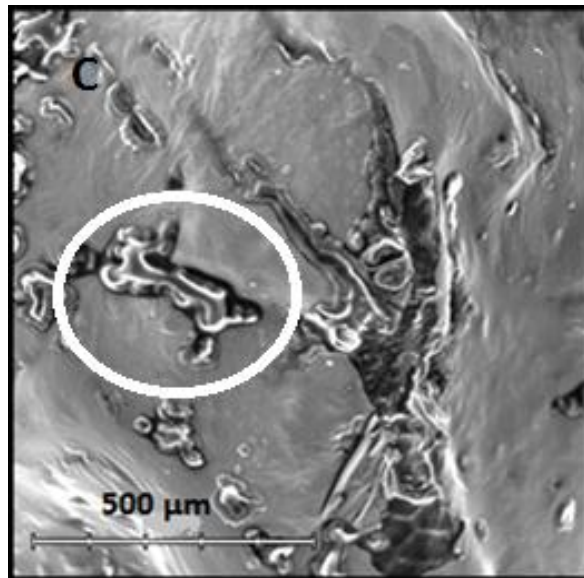
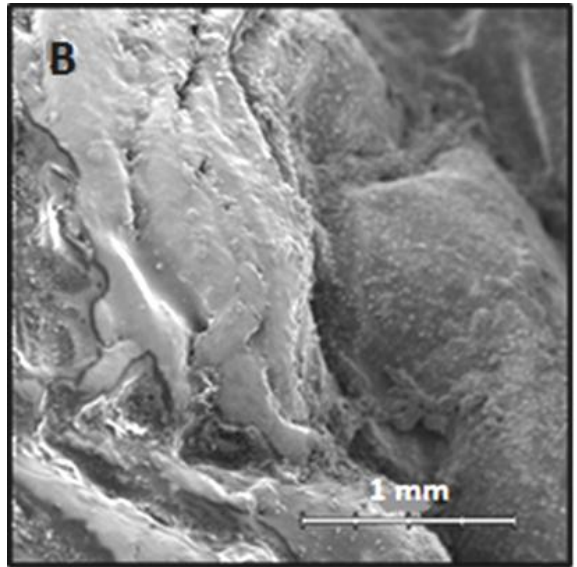
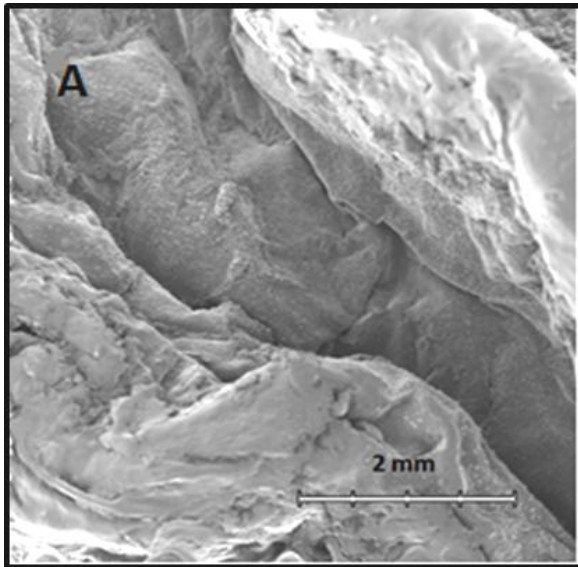


Figura N°14: A, B, C muestran la superficie dañada de un arándano comercial deshidratado

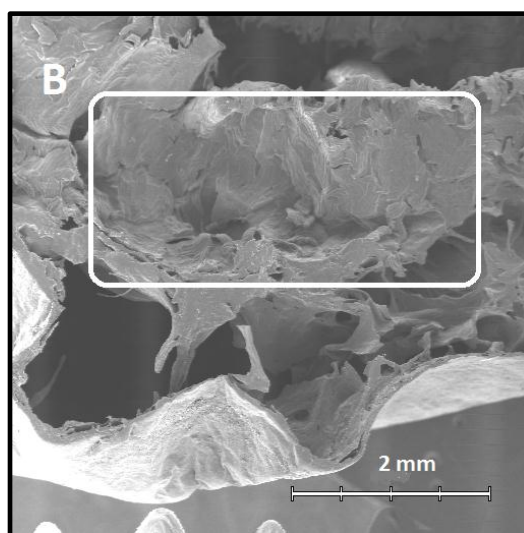
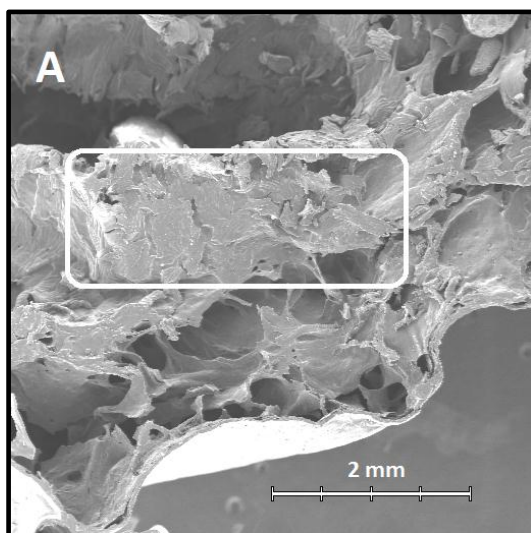
4.1.3 Micrografías internas

Luego de analizada la muestra de control, se a observó el interior de arándanos congelados a distintas temperaturas y luego liofilizados.

A -20°C

A una temperatura de congelamiento de -20°C, la nucleación es escasa y por lo tanto la cristalización y el tamaño de los cristales de hielo aumentan. El gran tamaño de dichos cristales rompe los tejidos del arándano, tal como se aprecia en la figura N°15.

La zona carnosa es aquella encerrada en los rectángulo de la figuras 15.a y 15.b y es ella la que le da la firmeza al fruto. Sobre el rectángulo, el gran espacio oscuro corresponde a la zona donde se alojan las semillas y bajo el rectángulo se tienen los poros dejados probablemente por los cristales de hielo luego de sublimar. La zona más brillante, en la parte inferior de las micrografías, corresponde la piel del arándano. Como se aprecia en dichas micrografías, los poros se disponen preferentemente entre la zona carnosa y la piel del arándano provocando la separación entre ambas. Estos poros al ser de gran tamaño ejercen grandes presiones que provocan importantes daños en la estructura interna, ya que en estas condiciones el agua aumenta su volumen al congelarse. Dentro del ovalo dibujado en la figura N°15.c, se puede apreciar la evidente ruptura de los tejidos y las partes más oscuras representan los espacios dejados por los cristales de hielo. Además se puede observar una gran interconexión entre los poros, lo que causa la evidente separación entre la piel y la pulpa del arándano, como se observa en el gran hueco bajo el rectángulo de la figura 15.b, que llega a medir 1 mm de largo aproximadamente. La figura 15.d muestras un acercamiento de uno de los poros, en ella se puede distinguir claramente la morfología de uno de estos poros.



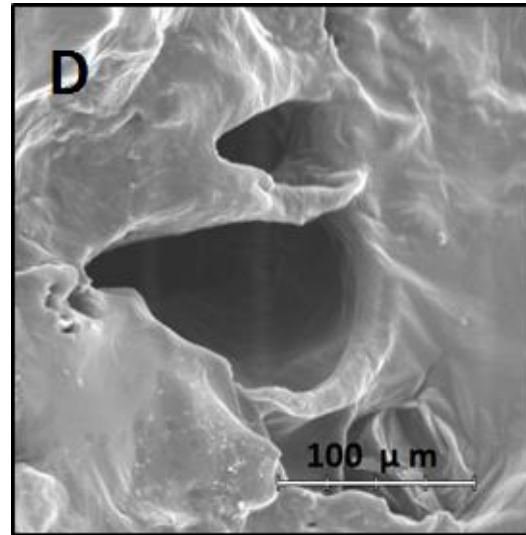
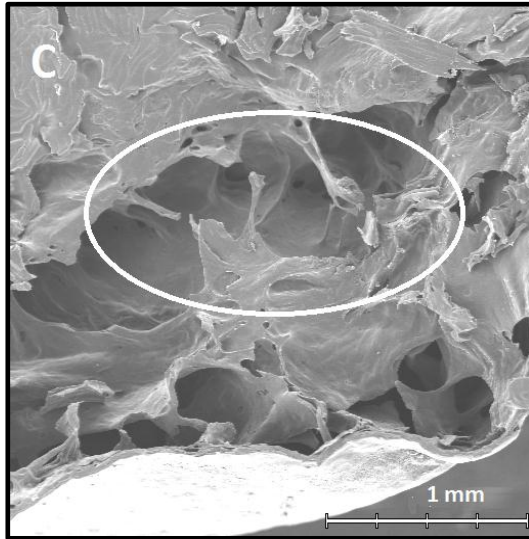
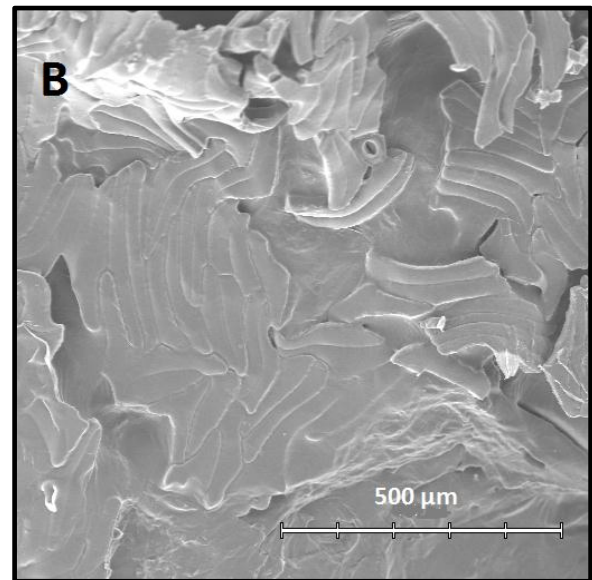
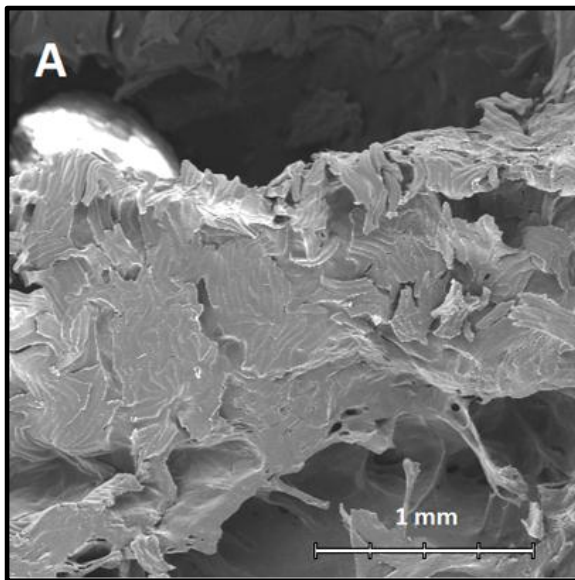


Figura N°15: Micrografía del interior de un arándano congelado a -20°C y luego liofilizado. a) y b) muestran dentro de los rectángulos la zona carnosa del fruto y la separación que se produce entre la parte carnosa y la piel. c) Muestra un detalle de las estructuras rotas por el gran tamaño de los cristales y d) Un acercamiento de uno de los poros

Hacia el interior del fruto, en la zona carnosa, se tiene una situación diferente. Si se aplica un aumento sobre los rectángulos anteriores, se aprecia una excelente conservación de los tejidos, observándose una clara estructura laminar muy compacta, que se ha mantenido casi intacta (figura N°16).



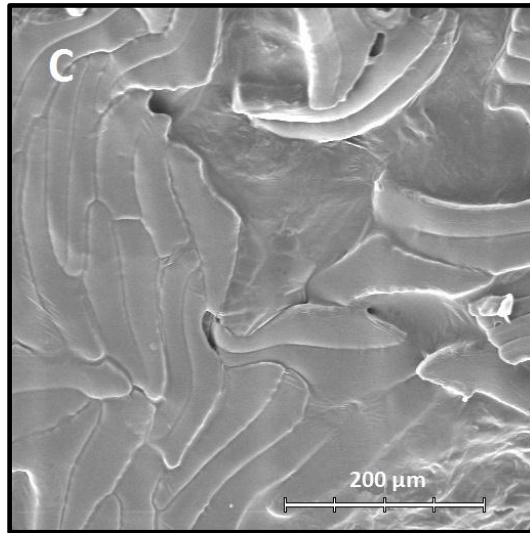


Figura N°16: Micrografía del interior de un arándano congelado a -20°C y luego liofilizado. A) muestra una panorámica de la zona carnosa. B) y C) Muestran la excelente conservación de la parte carnosa con forma laminar bien conservada.

En la figura 16.a, se muestra una vista general de la zona carnosa (mesocarpo) y la zona central (endocarpo). El gran espacio que se distingue en la parte superior, corresponde a la zona donde se alojan las semillas. Un acercamiento sobre la zona carnosa permite encontrar una estructura laminar muy bien conservada (figura 16.a y 16.c) que aparentemente no se vio afectada, en gran medida, por la formación de hielo.

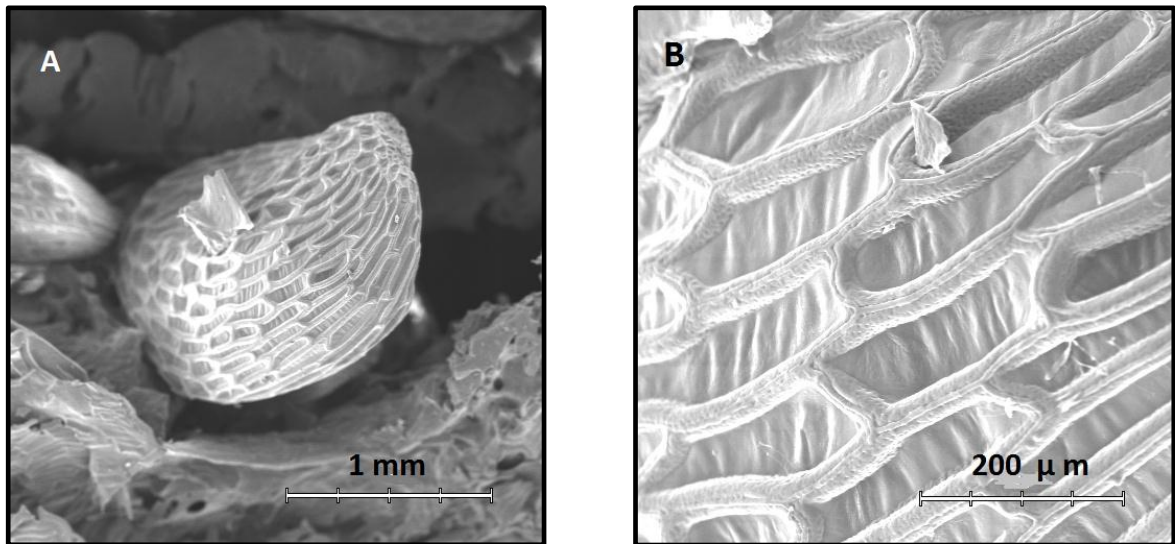
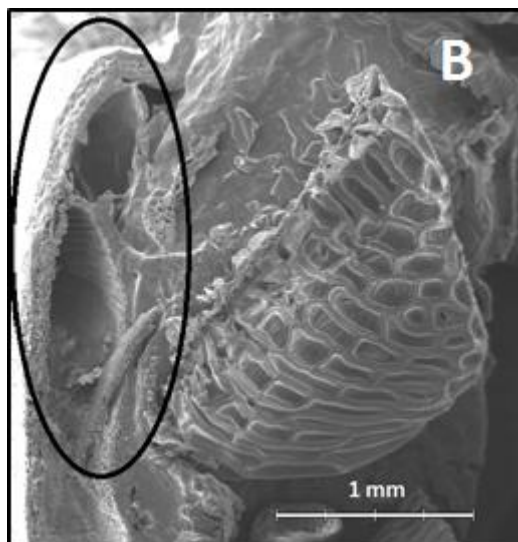
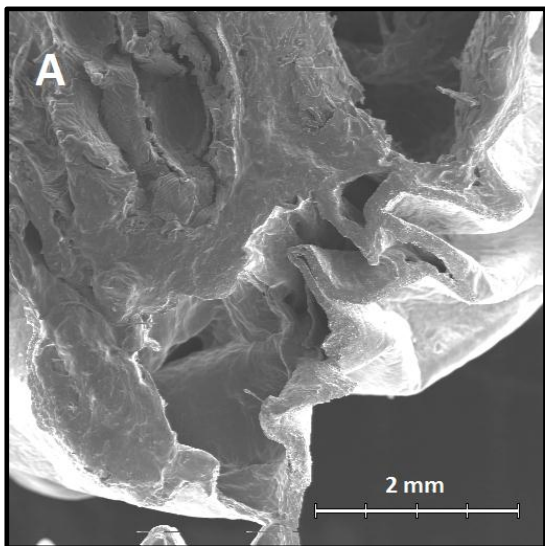


Figura N°17: Semillas de arándano congelado a -20°C y liofilizado, a distintos aumentos.

Otro componente de la estructura interna del arándano que permanece muy bien conservado son las semillas. Posee una capa externa semejante a un panal que se mantiene perfectamente conservada (Figura N°17). Es importante destacar que las semillas no pudieron ser distinguidas en las observaciones realizadas a los arándanos deshidratados a altas temperaturas, por su aparente desintegración.

A-80°C

A una temperatura de congelamiento de -80°C, es posible visualizar importantes diferencias con respecto a un enfriamiento lento. Si se observa el límite entre la parte carnosa y la piel (Figura 18.a), se ve una importante cohesión entre ambas y sin los grandes huecos que se presentaron en el caso de -20°C. La zona más brillante corresponde a la piel y si bien se pliega en ciertas partes, se mantiene adherida a la pulpa del fruto. En 18.b es posible notar la presencia de poros, especialmente dentro del óvalo dibujado, pero que son mucho más escasos dentro del fruto y de menor tamaño (menores a 1mm), tampoco se observa gran destrucción ni ruptura de tejidos, por lo tanto, se puede decir que el daño provocado en esa zona fue mucho menor que en el caso de congelamiento a -20°C, lo cual concuerda con la teoría. La figura 18.c da cuenta de la buena conservación de la estructura en general, ya que tanto las semillas, como la zona donde ellas se alojan se mantiene aislada de la zona carnosa, es decir, no hay colapso de estructuras. Si se analiza la parte carnosa del arándano (figura 18.d) se observa la misma estructura laminar anterior, conservada incluso de mejor manera.



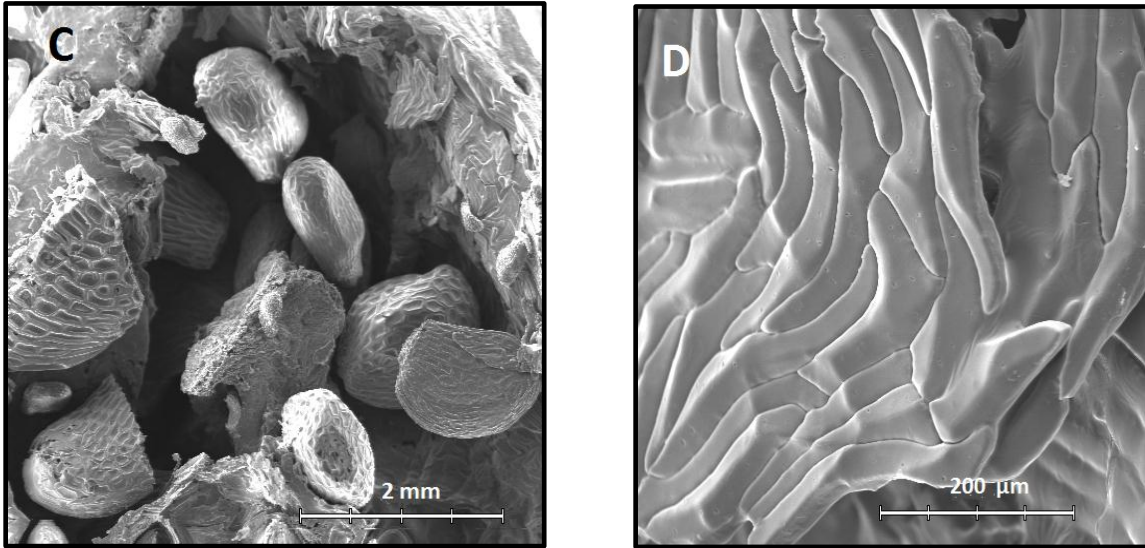


Figura N°18: Micrografía del interior de un arándano congelado a -80°C y luego liofilizado.

Por HPSF

Cuando el congelamiento es por HPSF, se aprecia todavía una mejor conservación de las estructuras internas que en los casos anteriores, siendo este congelamiento el que provoca efectos menos dañinos en el interior del arándano. En 19.a se muestra el interior del arándano, mostrando sus tres zonas bien conservadas y con muy escasa presencia de poros.

En 19.b, se tiene un acercamiento sobre el límite entre la zona carnosa y la piel del fruto. Ambas zonas se encuentra íntegramente ligadas, solo se aprecia un pequeño poro, de mucho menor tamaño que los vistos en los casos anteriores (300 μm aproximadamente). Además la estructura laminar se aprecia claramente desde el centro hasta el límite con la piel, con nula separación por presencia de poros (Figura 19.c).

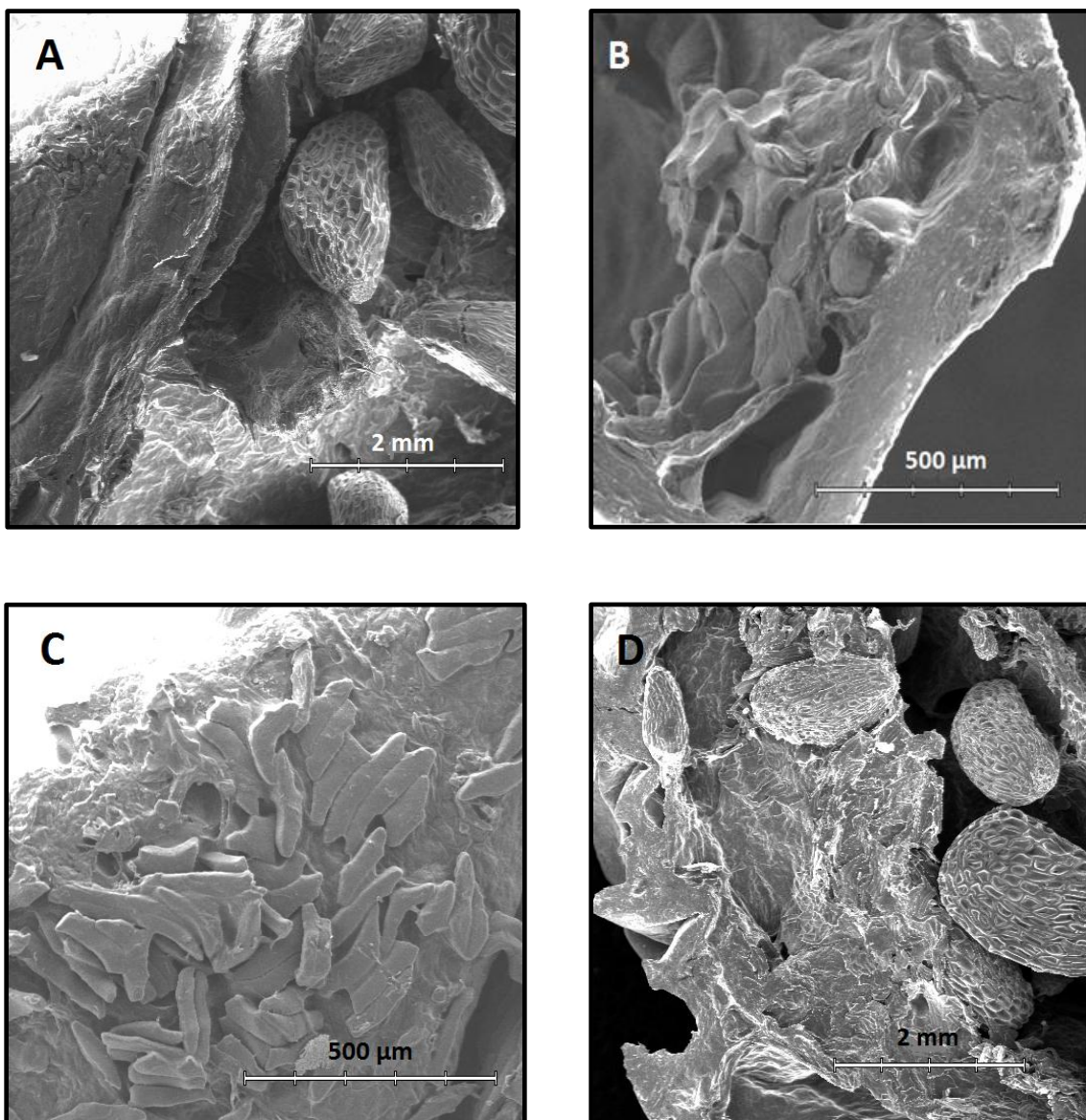


Figura N°19: Micrografía del interior de un arándano congelado por HPSF y luego liofilizado.

Por último, en la figura 19.d se distinguen claramente las zonas donde se alojan las semillas y la pulpa. Se puede notar que una semilla queda rodeada completamente por la pulpa, cosa que no se observó en el resto de los ensayos. Además se confirma la escasa presencia de poros y la cohesión de la pulpa con la piel, lo que es un claro indicio de que el tamaño de los cristales de hielo fue menor a los que se produjeron con congelamiento doméstico y por lo tanto la conservación del fruto también es mejor.

En todos los casos anteriores se aprecian, en cierta medida, estructuras coherentes y aparentemente bien conservadas. Caso contrario ocurre cuando la deshidratación se produce a altas temperaturas, como es el caso de los arándanos deshidratados comerciales de la marca Hortifrut. La estructura interna de estos frutos se presenta totalmente colapsada (figura N° 20), no se distingue la zona carnosa, la zona central ni las semillas. Esto lleva a suponer que el calor de los hornos y la rápida evaporación del agua, destruye los tejidos internos provocando el colapso de las estructuras celulares y obteniéndose así fruta que ha perdido parte importante de su valor nutricional y calidad organoléptica.

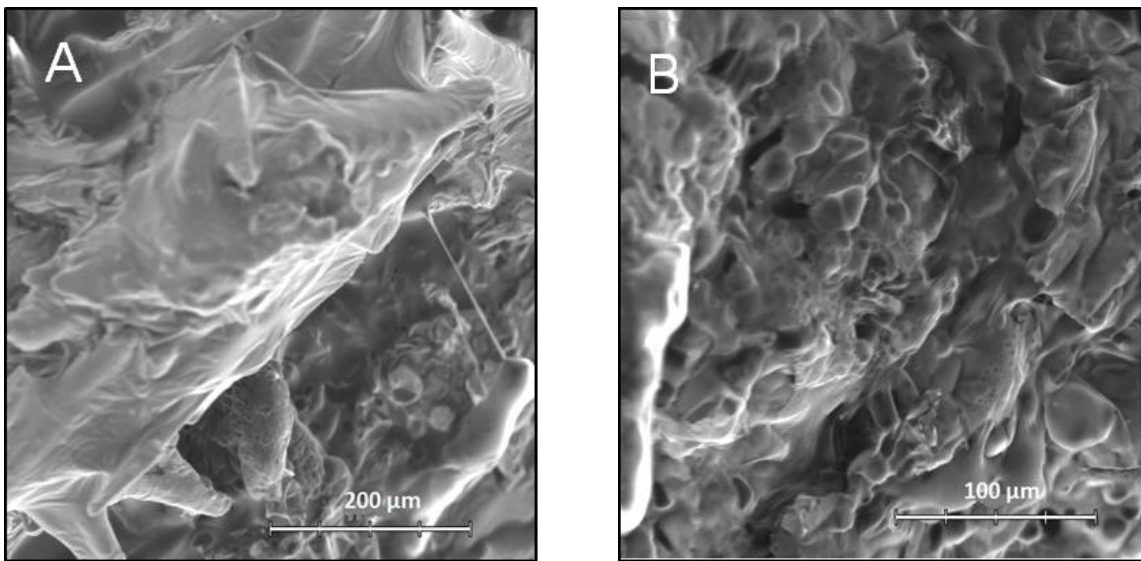


Figura N°20: Micrografía del interior de un arándano comercial.

4.2 Rehidratación

Los datos obtenidos representan el aumento de masa que experimenta el arándano deshidratado por liofilización al ser sumergido en agua a 40°C. Para cada uno de los medios de congelamiento se realizaron 10 experiencias, luego se calculó el promedio del aumento de masa en intervalos de 30 segundos.

Para el caso de congelamiento a -20°C el aumento de masa promedio llega a 4,6% en relación a la masa del arándano totalmente deshidratado (Gráfico N°1). A -80°C la capacidad de rehidratación aumenta considerablemente, llegando a un 11% (gráfico N°2).

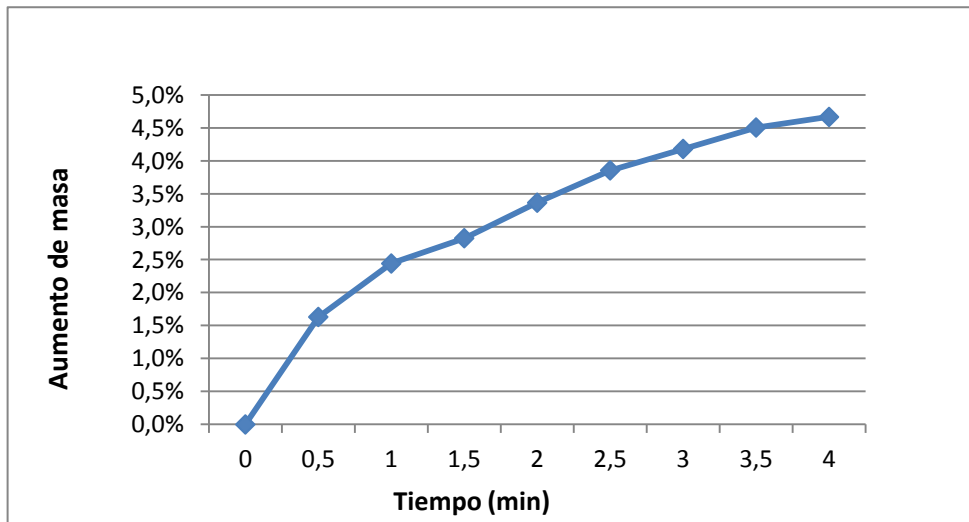


Gráfico N°1: Capacidad de rehidratación de muestras a congeladas a -20°C

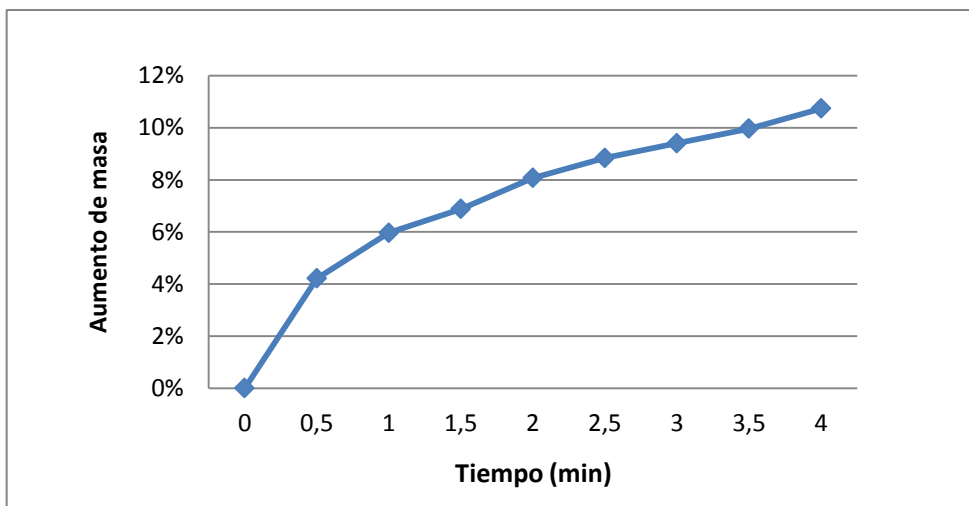


Gráfico N°2: Capacidad de rehidratación de muestras congeladas a -80°C

La mayor capacidad de rehidratación mostrada por los arándanos congelados a -80°C en comparación a los congelados a -20°C , tiene directa relación con el tamaño de los cristales formados, ya que éstos al sublimar dejan más poros pero de menor tamaño, lo que deja una gran superficie expuesta al agua al momento de la rehidratación, logrando una reabsorción de agua en un menor tiempo por los efectos de la capilaridad. Esta capacidad también se relaciona con el daño micro-estructural que provoca la solidificación del agua. A menores temperaturas, los cristales de hielo son de menor tamaño y provocan menos daño a la estructura interna del fruto. Si las células son dañadas no serán capaces de restablecer el agua perdida. Se puede notar también, que la rehidratación en ambos casos tiene una pendiente bastante pronunciada hasta el primer minuto, luego la tasa de rehidratación comienza a decaer a medida que transcurre el tiempo.

Esta experiencia se repitió para muestras congeladas a las mismas temperaturas anteriores pero con un tratamiento previo de deshidratación por osmosis. La muestra congelada a -20°C presentó un leve aumento en la capacidad de rehidratación en comparación a la muestra sin tratamiento y congelada a la misma temperatura, alcanzando un aumento en masa de 6,8 % en promedio. Esto indica que extraer previamente el agua del fruto sin provocar cambio de fase (osmosis) ayuda a disminuir los daños estructurales provocados por el congelamiento, pero no en una cantidad considerable.

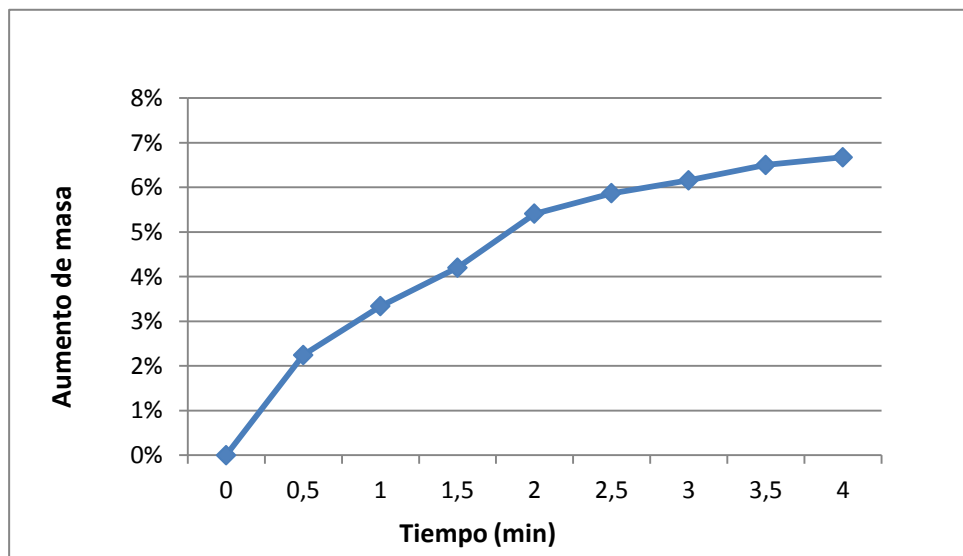


Gráfico N°3: Capacidad de rehidratación de muestras congeladas -20°C con deshidratación previa por osmosis

Algo similar ocurre con la muestra deshidratada previamente y congelada a -80°C . Si bien el tratamiento provocó un aumento de 11,7%, esto solo corresponde a una diferencia de 1,2% en comparación a la muestra sin tratamiento previo. Por los que las ventajas de realizar este tratamiento, en este caso, son mínimas.

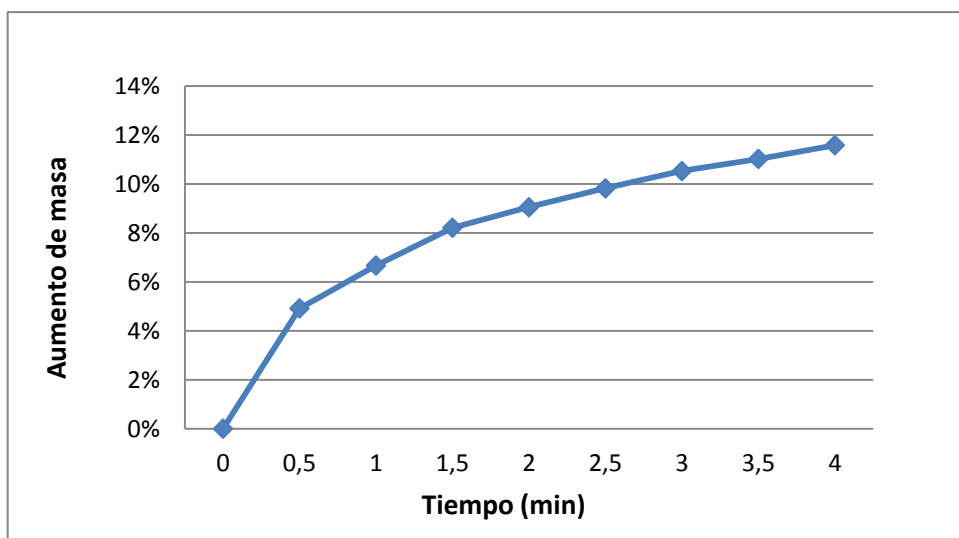


Gráfico N°4: Capacidad deshidratación de muestras congeladas a -80°C con deshidratación previa por osmosis

El mismo procedimiento se realizó para muestras congeladas mediante HPSF, resultando un aumento promedio de 21%, superando ampliamente las mediciones de las muestras congeladas de forma convencional (gráfico N°3), lo que indica que su capacidad de rehidratación es mucho mayor debido principalmente al menor tamaño de poros que favorece el ingreso de agua mediante el fenómeno de capilaridad y al menor daño producido en su microestructura. El aumento de masa que registra el arándano, en este tipo de congelamiento, llega a ser el doble de lo que pueden aumentar las muestras congeladas convencionalmente, lo que entrega una idea del escaso daño que se produce dentro de la estructura celular, favorecido por los pequeños cristales de hielo formados por nucleación homogénea y que lo lleva a ser capaz de restituir de excelente forma el agua que perdió previamente. En el gráfico también es posible apreciar que tasa de aumento de peso no disminuye a lo largo de los 4 minutos que duró el experimento, lo que sí sucedió en las muestras anteriores.

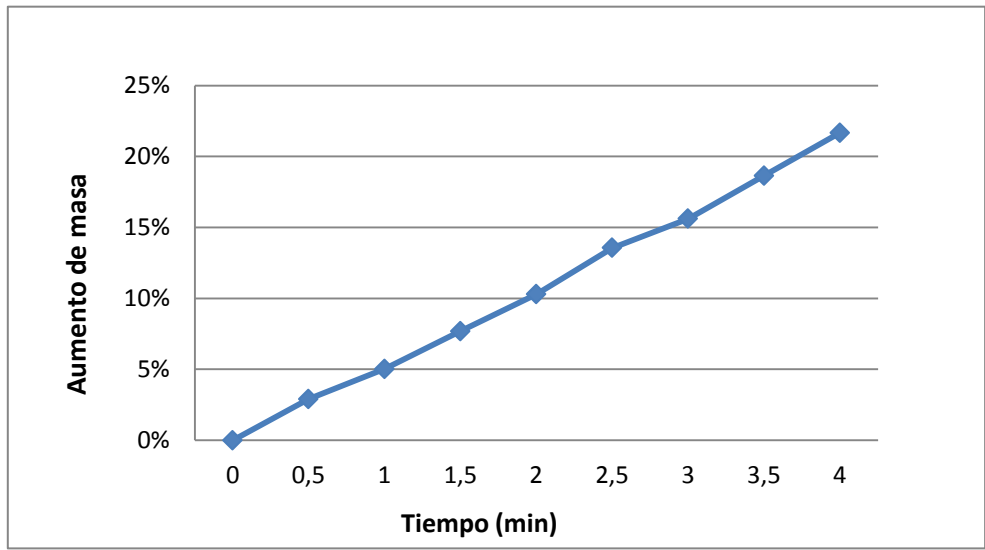


Gráfico N°5: Capacidad de Rehidratación de muestras congeladas por HPSF

Adicionalmente, se quiso comparar estos resultados con la capacidad de rehidratación de arándanos comerciales, deshidratados a altas temperaturas (Gráfico N°6).

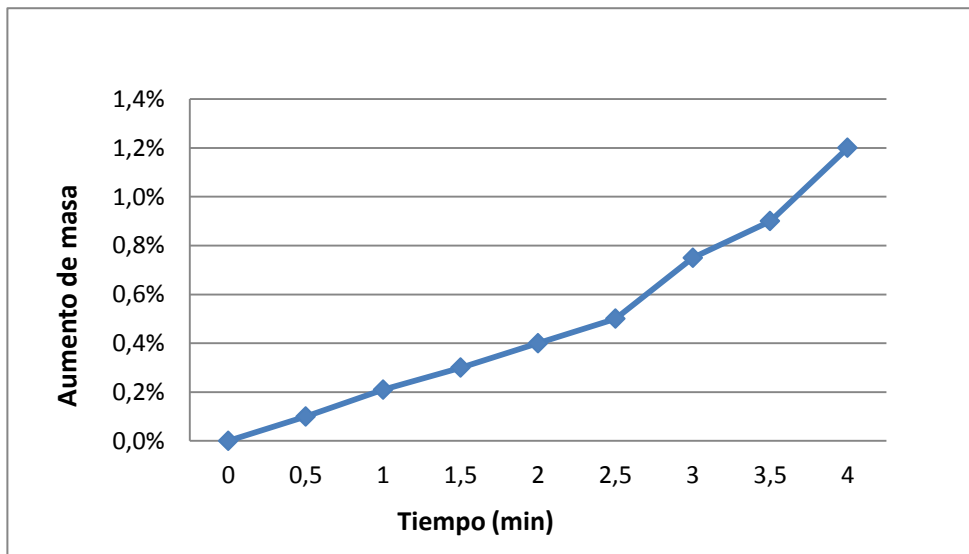


Gráfico N°6: Capacidad de Rehidratación de un arándano comercial.

El resultado fue bastante sorprendente ya que prácticamente no aumentaron su peso durante los 4 minutos, llegando solo al 1.2%. Esta incapacidad de recuperar el agua perdida, denota un severo daño interno del fruto dado que su estructura celular es incapaz de restablecer el agua que ha perdido. Además se observa una leve tendencia del arándano a aumentar su rehidratación luego del segundo minuto.

Finalmente en el gráfico N°7 se presenta una comparación de la capacidad de rehidratación de todas las muestras. Notoriamente la muestra HPSF resulto ser la que más absorbió agua, aumentando su peso en 21%, luego los congelados a -80 con pre-tratamiento y sin pre-tratamiento con un aumento de masa del 13% y 11% respectivamente, más atrás los congelados a -20 con pre-tratamiento y sin pre-tratamiento con 7 y 5% respectivamente. Finalmente se encuentra el arándano comercial con una rehidratación muy pobre de 1,2%.

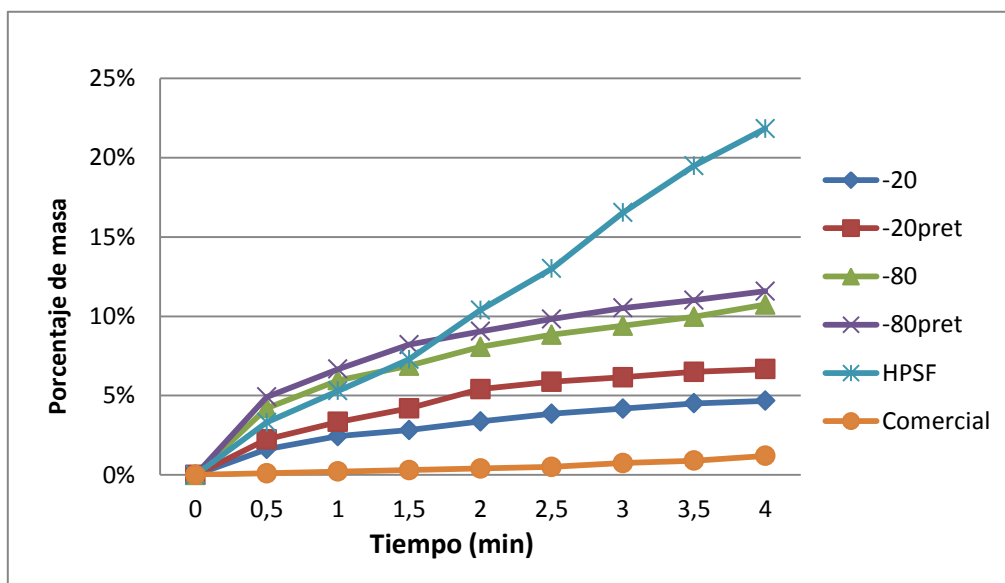


Gráfico N°7: Comparación de curvas de rehidratación de entre los distintos métodos de congelamiento.

4.3 Pruebas de Firmeza

Mediante un FTA se midió la firmeza mediante penetración y compresión.

4.3.1 Penetración

Mediante este método se midió la firmeza de arándanos frescos, arándanos congelados a -20°C , a -80°C y por HPSF que fueron luego descongelados. El fin de este ensayo es medir la firmeza máxima del fruto, que se obtiene justo antes de que se rompa la piel del arándano, además, este ensayo permite analizar el comportamiento de la pulpa una vez que se ha roto la piel.

Para las muestras de arándanos frescos (10), que servirán como muestra de control, la firmeza máxima promedio fue de 1.83 Newton (gráfico N°8) a una profundidad promedio de 1.3mm. La curva obtenida es la siguiente.

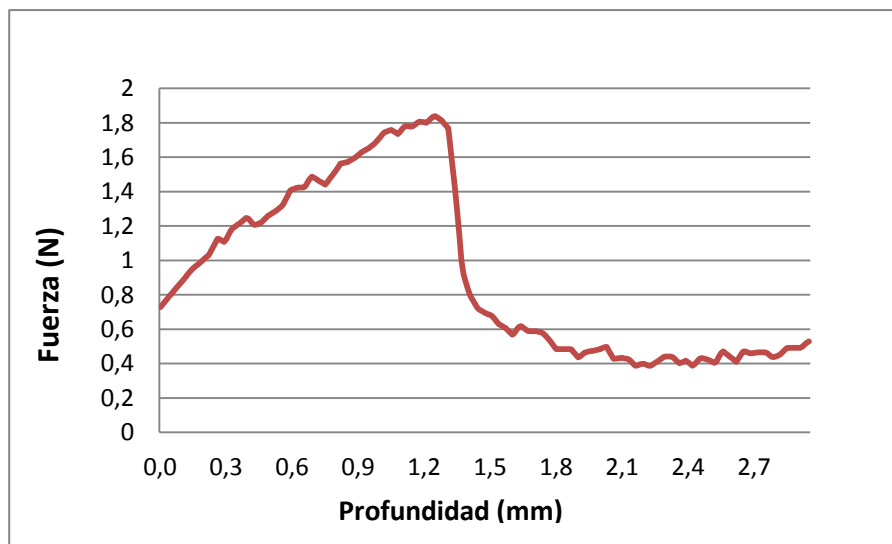


Gráfico N°8: Firmeza de un arándano fresco.

Al iniciar la prueba, la aguja comienza a avanzar a una velocidad constante. Al toparse con la piel, ésta ejerce una resistencia al avance que se hace cada vez más intensa, hasta que llega a un máximo de 1.83N. Justo después de ese momento la piel se rompe provocando una caída brusca de la fuerza, ya que ahora la resistencia al avance de la aguja es ejercida netamente por la estructura interna del arándano. En la muestra fresca, la estructura no ha sido alterada y por lo tanto mantiene su rigidez natural. Al romperse la piel, la pulpa se mantiene firme y el FTA debe ejercer una fuerza de entre 0.4N y 0.6N para poder atravesarla.

En el caso de los arándanos congelados a -20°C y -80°C (gráficos N°9 y N°10), ocurre algo diferente. Al llegar al máximo de firmeza, cuando se rompe la piel, la firmeza decae abruptamente a valores cercanos a 0.1N. Esto se debe a que la estructura no mantuvo su integridad luego del congelamiento y descongelamiento. Como la estructura está dañada, no tiene la capacidad de soportar esfuerzos y por lo tanto, la aguja no necesita ejercer mayor fuerza para poder avanzar a través de la pulpa. Si comparamos ambos puntos máximos de firmeza, la muestra congelada a -20°C llega a un promedio de 0,93N y las de -80°C a 1.15N. Esta diferencia, si bien es pequeña, muestra que el daño estructural es menor a mayores temperaturas de congelación. Además, ambos congelamientos presentan una importante baja en la firmeza máxima con respecto a la muestra de prueba.

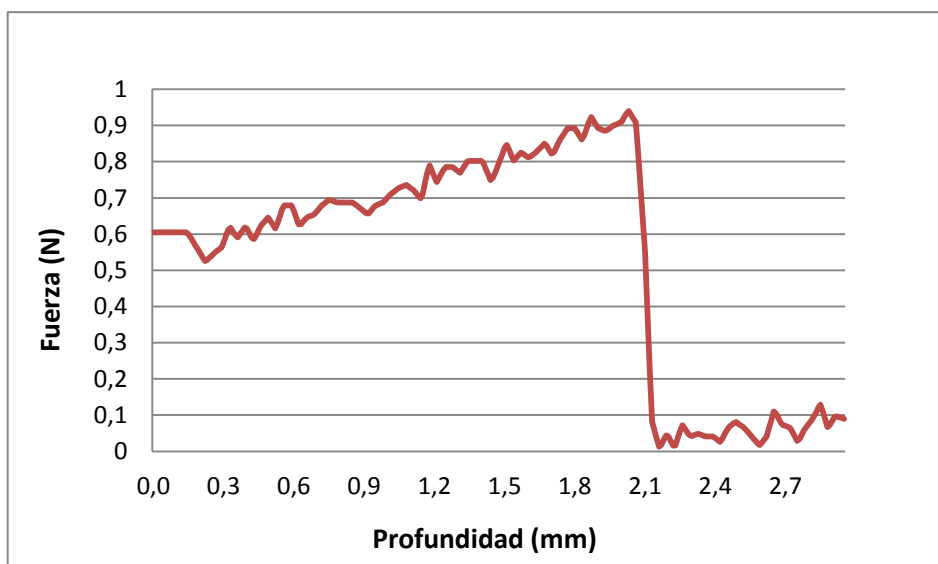


Gráfico N°9: Firmeza de arándano congelado a -20°C y luego descongelado.

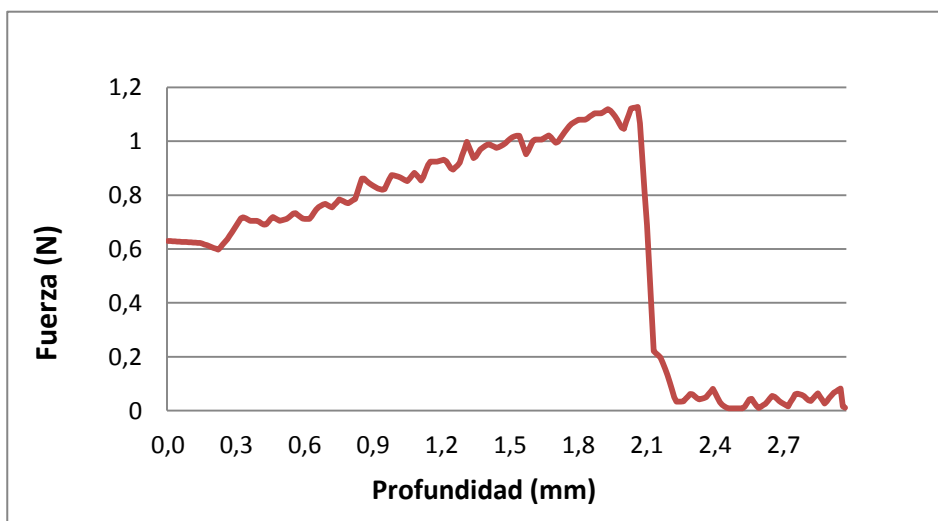


Gráfico N°10: Firmeza de un arándano congelado a -80°C y luego descongelado.

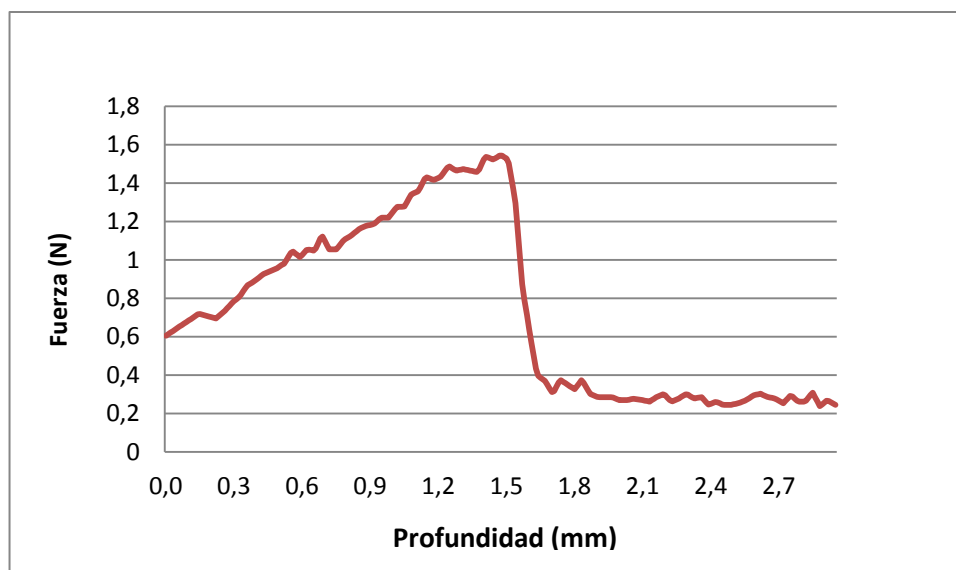


Gráfico N°11: Firmeza arándano HPSF

Finalmente, los arándanos sometidos a congelamiento por HPSF (gráfico N°11), mostraron los mejores resultados en pruebas de firmeza por penetración, ya que mantienen dicha propiedad de mejor manera que los métodos convencionales, sin embargo, no alcanza los valores de un fruto fresco llegando solo a 1.55 N en comparación a los 1.83N que registró este último. Un análisis de la curva, permite afirmar que el comportamiento de la piel es un intermedio entre el del fruto fresco y el de los congelados por los métodos convencionales, ya que la estructura interna no ha sufrido mayores daños que le permiten ejercer una aceptable resistencia al avance de la aguja, pero no llega a alcanzar los valores del fruto fresco. Por esta razón, se puede afirmar que el la muestra congelada por HPSF es capaz de conservar la firmeza de los arándanos de mejor manera que los métodos convencionales, sin embargo, este proceso sí afecta de manera negativa la firmeza del fruto.

En el gráfico N°12 se muestra una comparación de las curvas de firmeza por penetración de todas las muestras ensayadas. En él se observa que la firmeza máxima más cercana a la muestra fresca la obtuvo la muestra congelada por HPSF. Además, esta última es la que mayor firmeza luego de que la piel se rompe. Otro aspecto interesante, es que los puntos máximos se van trasladando hacia la derecha en la muestras con menores “peaks” de firmeza. Esto se debe principalmente a que la piel, cuando más íntegra está la estructura interna, más tensa y rígida se encuentra, volviéndose más dura, pero a la vez más frágil. En el caso contrario, el arándano se vuelve blando, dando la sensación de un fruto “chiclosa”

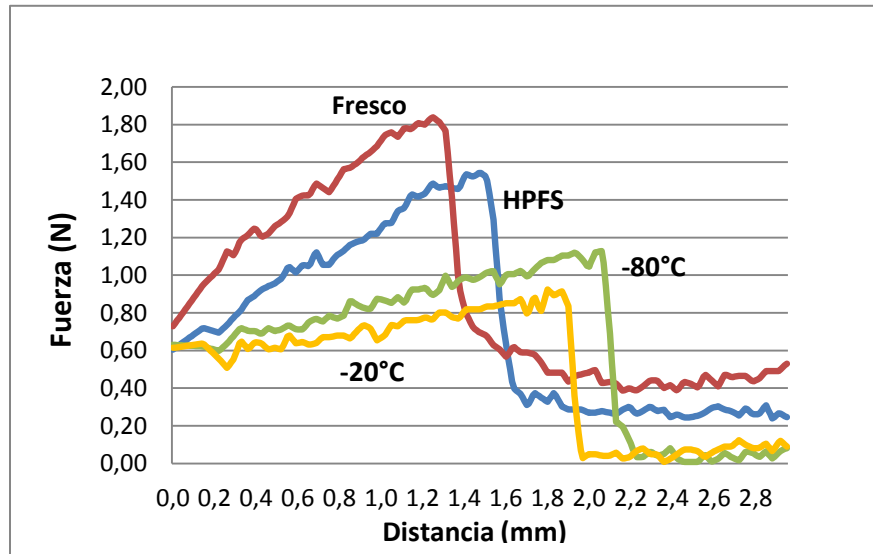


Gráfico N°12: Comparación de curvas de rehidratación entre los distintos métodos de congelamiento.

4.3.2 Compresión

Mediante este método se midió la firmeza de frutos frescos, frutos congelados y que luego fueron descongelados y de frutos liofilizados que luego fueron rehidratados (ver tabla 1).

Tabla N°1: Simbología de las muestras a la que se midió firmeza por compresión.

MUESTRA	DESCRIPCIÓN
C-D	Arándanos que han sido congelados, descongelados y luego se ha medido su firmeza
L-R	Arándanos que han sido liofilizados, rehidratados y luego se ha medido su firmeza

La firmeza para el fruto fresco a 1mm de profundidad y que servirá como muestra de control se observa en siguiente gráfico:

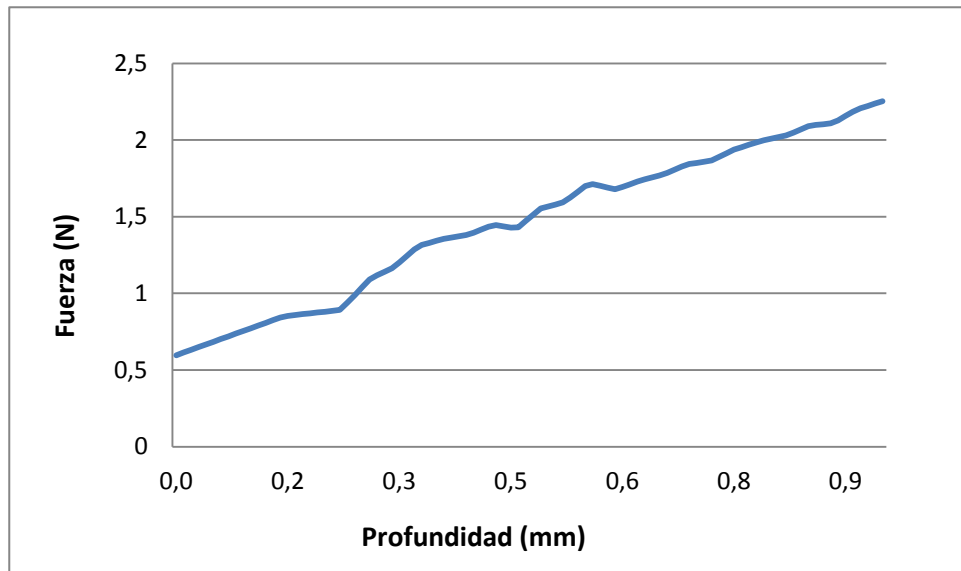


Gráfico N°13: Firmeza de un arándano fresco

La firmeza va aumentando por la resistencia que ejerce la piel y el interior del fruto al avance del émbolo siendo máxima al milímetro de profundidad (límite impuesto previamente al FTA). Este mismo comportamiento se observa en toda las muestras ensayadas. La firmeza máxima promedio obtenida en la muestra de control es 2.2N.

En el caso de las muestras congeladas a -20°C (gráficos N°14 y N°15), las C-D mostraron mayor firmeza que las L-R (1.4N y 1.2N respectivamente), evidenciando que el liofilizado y la rehidratación afectó de manera negativa la firmeza del arándano. Si comparamos ambas muestras con la muestra de control, se observa una merma importante en esta propiedad ya que para igual profundidad la resistencia disminuyó a casi la mitad.

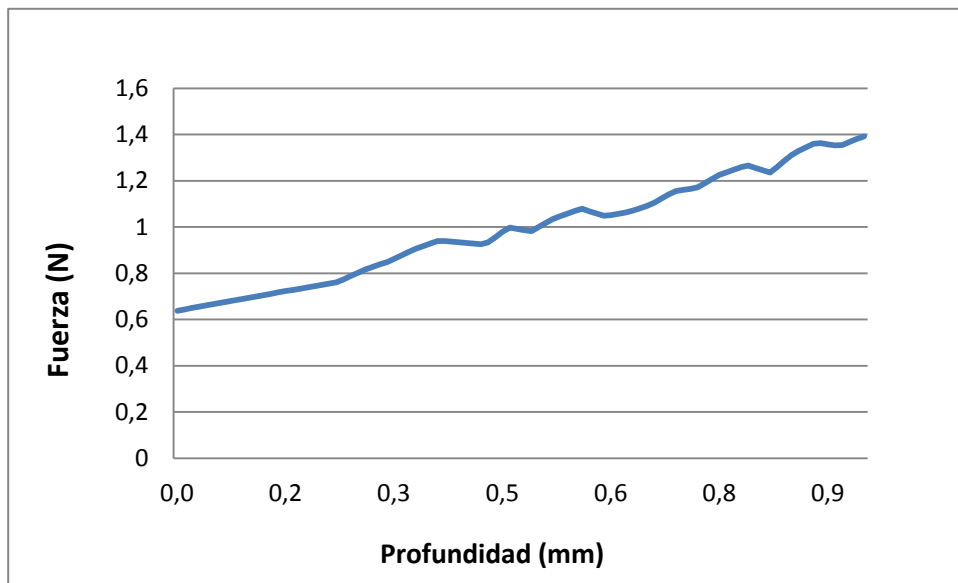


Gráfico N°14: Firmeza arándano congelado a -20°C y luego descongelado

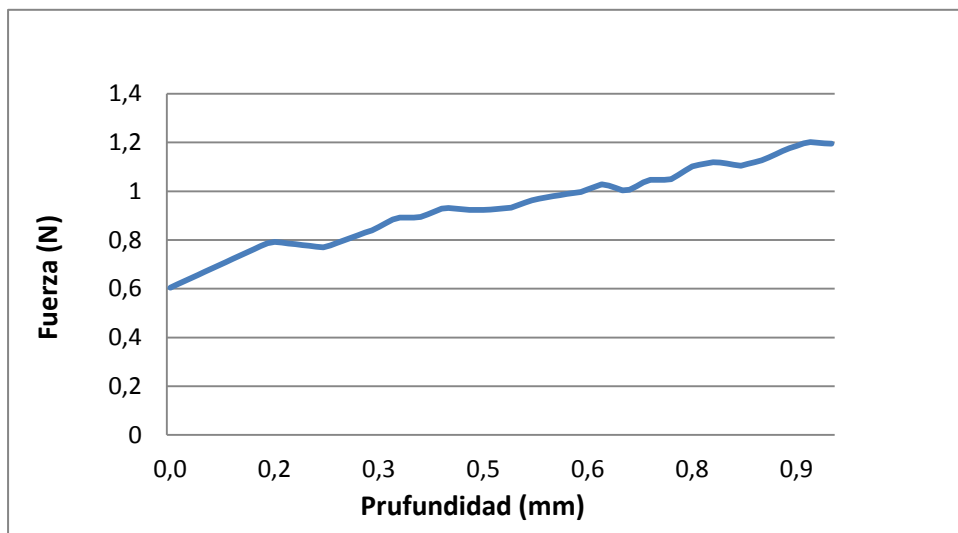


Gráfico N°15: Firmeza arándano -20°C, liofilizado y rehidratado.

Aquellas muestras congeladas a -80°C (Gráfico 14 y 15) se comportaron de manera similar a aquellas enfriadas lentamente, mostrando una importante baja en la firmeza con respecto a la muestra de prueba y mejores resultados en firmeza para las muestras C-D. Sin embargo, no se aprecian diferencias notorias en la firmeza al compararlas con las muestras congeladas a -20°C, a pesar de las distintas velocidades de congelación. Los valores para ambas temperaturas son similares tanto en la muestra deshidratada previamente como en la sin deshidratar.

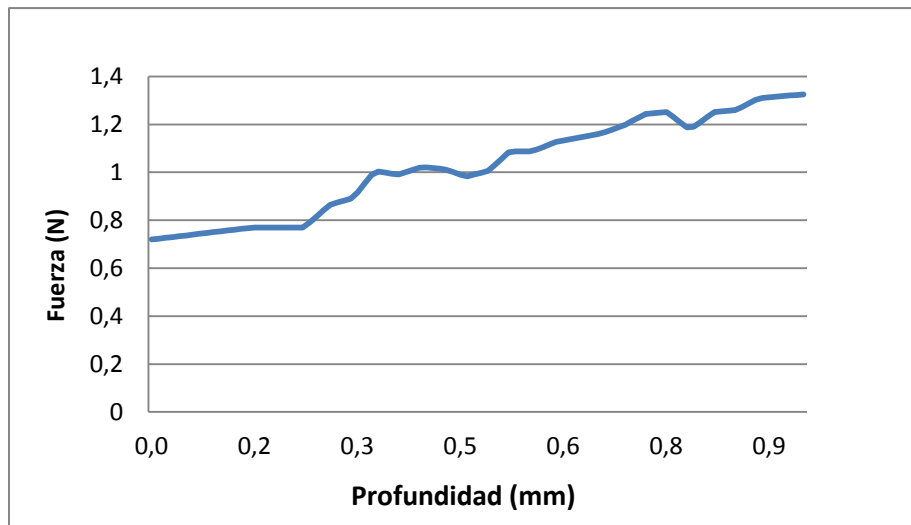


Gráfico N°16: Firmeza de arándano congelado -80°C, congelado y descongelado.

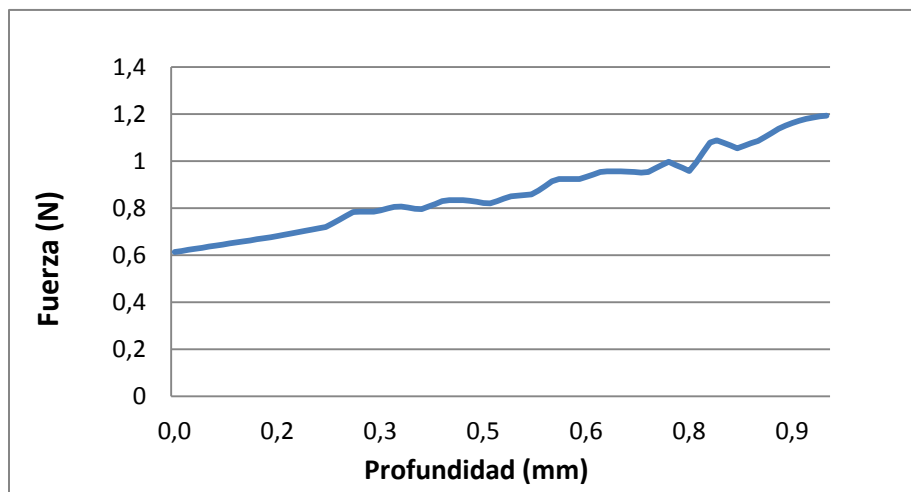


Gráfico N°17: Firmeza de arándano congelado a -80°C, liofilizado y rehidratado.

Finalmente se realizó el ensayo de firmeza por compresión a muestras congeladas por HPSF, las cuales tuvieron un comportamiento más cercano a la muestra de control, tal como se aprecia en los gráficos N°18 y N°19. La muestra C-D marcó una firmeza de 1,9N y la L-R alcanzó los 1,8N, en comparación a los 2,2N que registró el arándano fresco.

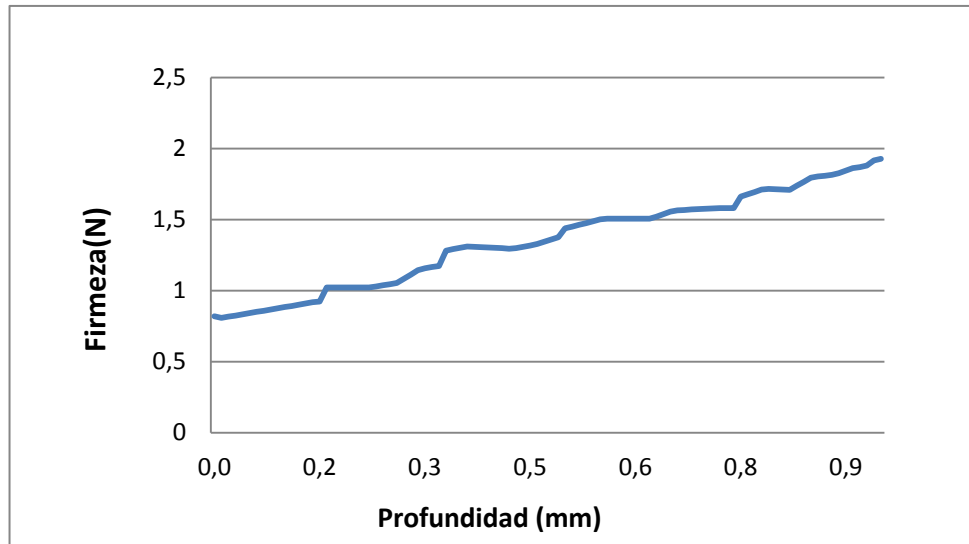


Gráfico N°18: Firmeza arándano congelado por HPSF y descongelado.

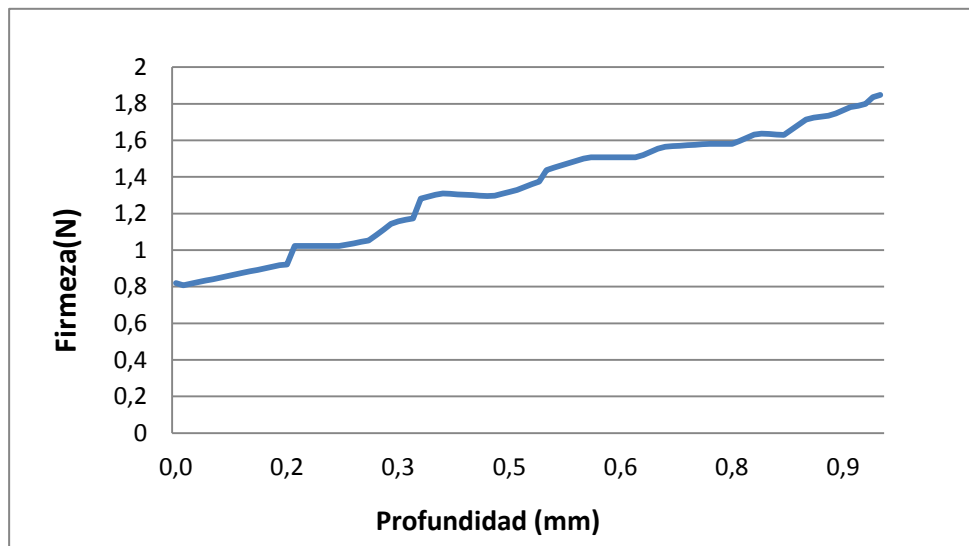


Gráfico N°19: Firmeza arándano HPSF, liofilizado y rehidratado.

Luego de medir la firmeza de cada una de las muestras, se presenta en el gráfico N° 20, un resumen de las curvas obtenidas para realizar las comparaciones pertinentes. Para una mejor visualización y para estudiar el efecto del liofilizado, sólo se muestran las curvas de muestras L-R.

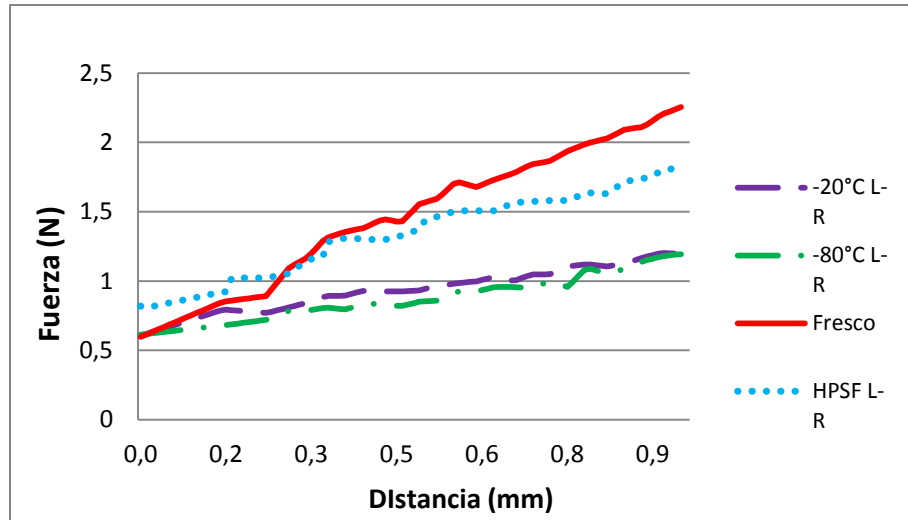


Gráfico N°20: Comparación de curvas de firmeza por compresión.

Mediante una simple observación del gráfico N°20, se puede notar que ninguna muestra llegó a los valores de la muestra fresca, sin embargo aquellas congeladas por HPSF y luego liofilizadas mostraron un mejor comportamiento que las congeladas convencionalmente. Estas últimas se comportan de manera bastante similar, siendo la congelada a -20°C la que registró una mayor curva de firmeza.

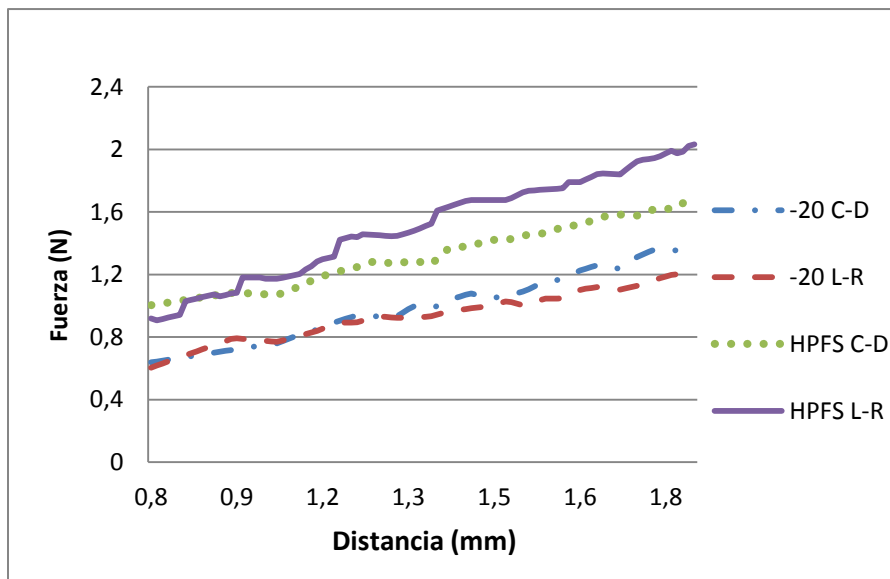


Gráfico N°21: Comparación de curvas de firmeza entre C-D y L-R.

Finalmente se compararon las curvas de firmeza por compresión de muestras C-D y L-R a distintas velocidades de congelamiento (Gráfico N°21). Los resultados demuestran que la firmeza se ve menos afectada cuando la muestras son congeladas y descongeladas que cuando son liofilizadas y rehidratadas, a temperaturas de congelamiento iguales.

5 Discusión

La liofilización, como proceso de deshidratación de frutas, es muy poco utilizada por los altos costos que implica, sin embargo, ha demostrado que las ventajas obtenidas mediante su utilización son sustancialmente mayores en comparación a las que se pueden lograr con los métodos convencionales de secado. Primero, en las micrografías obtenidas mediante SEM, se apreciaron notorios daños estructurales producidos por los métodos convencionales a alta temperatura, en el interior y exterior del fruto y que en cambio, son considerablemente menos notorios en las muestras liofilizadas, lo que marca una apreciable diferencia en el producto final de ambos procesos. Segundo, si se compara la capacidad de rehidratación (que es usada como parámetro para medir el daño celular), aquellas muestras que fueron secadas con métodos tradicionales, obtuvieron de manera categórica los peores resultados, con casi nula capacidad para restaurar el agua perdida. Estos hechos otorgan una motivación adicional al alumno para estudiar el proceso de liofilización, ya que con el avance de la tecnología éste puede llegar a ser, en el corto plazo, una solución viable para la conservación de frutos con calidad nutricional y organoléptica similares a las de un fruto fresco.

El estudio se enfocó específicamente en la etapa del congelamiento previo a la deshidratación del arándano, con el fin de encontrar el método de congelamiento que mejor preserve la estructura del arándano luego de finalizado el proceso de liofilización, ya que resulta ilógico utilizar un método de deshidratación muy sofisticado, si el fruto en la fase de congelación es destruido internamente por los cristales de hielo formados.

De los 3 métodos de congelación utilizados, con el HPSF se obtuvieron los mejores resultados, porque gracias a la nucleación homogénea los cristales de hielo formados dentro del fruto resultan ser mucho más pequeños en comparación a los otros dos métodos convencionales y por lo tanto, el daño provocado también fue menor. Los inconvenientes que posee el congelamiento rápido son su alto costo y el largo tiempo que demora en liofilizar, ya que el gran número de poros pequeños resultan ser obstáculos difíciles para el paso del vapor, lo que significará una tasa de secado menor.

Micrografías

Las micrografías presentadas en el informe corresponden a muestras congeladas a -20°C , -80°C y por HPSF, que fueron luego liofilizadas. A -20°C la velocidad de enfriamiento se considera baja, por lo que los cristales de hielo tienen mayor tamaño que aquellos presentes en las muestras congeladas a -80°C , en donde la velocidad de enfriamiento es mucho mayor. Dicha hipótesis queda confirmada luego del análisis de las micrografías. A -20°C los poros dejados por el hielo sublimado son de gran tamaño y se alojan principalmente entre la piel y la zona carnosa, haciendo que ambas zonas se separen notoriamente. Se aprecian además varias rupturas en la estructura interna del arándano causadas por la presión ejercida por el gran volumen de hielo formado.

En aquellas muestras congeladas a -80°C se ve una importante cohesión entre la piel y la zona carnosa y sin los grandes huecos que se presentaron en el caso de -20°C , evidenciando un menor daño interno. En ambos casos se conservó de excelente manera la estructura laminar de la zona carnosa del arándano, observándose estructuras bien formadas y ordenadas, lo que permite inferir que los cristales tienden a crecer cercanos a la piel del fruto, provocando allí los principales daños.

Las muestras congeladas mediante HPSF presentaron resultados aún mejores que aquellas congeladas convencionalmente, observándose poros mucho más pequeños y una estructura interna poco alterada, similar a la muestra de control.

Si ahora se comparan las muestras anteriores con una deshidratada convencionalmente, la diferencia es abismante, ya que en esta última no se puede distinguir ninguna estructura coherente u ordenada, todo el interior parece haberse destruido y colapsado por efecto de la alta temperatura. Lo que indica que dicho tratamiento provoca consecuencias devastadoras sobre la integridad del fruto.

Rehidratación

La capacidad de rehidratación resulto ser una propiedad bastante interesante y a la vez simple para medir el daño micro-estructural en el arándano. Además, fue una herramienta muy útil para corroborar las conclusiones obtenidas a través de micrografías ya que ambas experiencias arrojaron resultados similares en cuanto al daño interno provocado por los cristales de hielo, siendo las muestras congeladas con HPSF las con mejor capacidad de rehidratación. De esta forma se comprueba que a menores tasas de congelamiento el arándano pierde la capacidad de restituir su forma original debido principalmente a la pérdida capilaridad, la cual se ve aumentada por los pequeños poros característicos del enfriamiento rapido, que exponen mayor superficie al agua y por lo tanto el agua puede “mojar” con mayor facilidad las cavidades internas, permitiendo su ingreso dentro del fruto.

Este ensayo fue el que registró mayores diferencias entre los distintos métodos de congelamiento, produciéndose aumentos de masa 4,6%, 11% y 21% para las muestras congeladas a -20°C , -80°C y por HPSF respectivamente, lo que indica que se pueden lograr importantes mejoras el proceso de liofilizado, si se utilizan métodos de congelamiento rápido.

Se pudo comprobar también, que la eliminación del agua mediante osmosis, previo al congelamiento, afecta de manera positiva a la capacidad de rehidratación del arándano en cualquiera de los métodos de congelamiento ensayados, pues al haber menos agua, el volumen de hielo formado es menor y por lo tanto el daño micro-estructural también lo es.

Firmeza

La firmeza es una propiedad ampliamente utilizada en la industria frutícola para caracterizar la textura un fruto. La textura es una propiedad organoléptica primordial, si se tiene en cuenta que el objetivo de mejorar la calidad de la fruta es justamente que el producto sea más agradable para el consumidor.

La primera prueba se realizó mediante la penetración de la piel del arándano, lo que entrega datos interesantes tanto del comportamiento de la piel, como de la pulpa al momento de ser penetrada por una aguja. Las curvas obtenidas tienen primero una pendiente positiva mientras la piel ejerce resistencia al avance de la aguja, luego la piel se rompe haciendo caer abruptamente firmeza y la curva, luego de la caída, la curva se mantiene prácticamente constante, reflejando la resistencia que impone la pulpa por si sola. En un fruto fresco la piel es rígida y frágil, se rompe a altos esfuerzos y poca distancia de penetración de la aguja, esto debido a que el interior del fruto se encuentra bien estructurado e impide que la piel se deforme.

En esta prueba las muestras congeladas mediante HPSF fueron las con valores más cercanas a la muestra de control y luego lo hicieron las muestras congeladas a -80°C y -20°C . En el congelamiento HPSF los resultados fueron peores de lo esperado, ya que con este tipo de congelamiento se espera que el fruto no sufra daño alguno; esto puede deberse a la influencia del anticongelante en cual se debe sumergir las muestras dentro de la cámara de presión para el congelamiento volumétrico y que puede haber alterado la rigidez de la piel. Si bien la firmeza máxima registrada no alcanzó el valor de la fruta fresca, lo interesante fue el comportamiento de la pulpa, ya que a diferencia de los métodos convencionales, ejerce una resistencia considerable al avance de la aguja lo que evidencia que la microestructura se mantiene con aceptable rigidez. En los otros dos casos los resultados son bastante pobres y la firmeza se aleja bastante de la muestra de prueba, incluso, una inspección visual y táctil del alumno, comprobó que al congelar y descongelar un arándano, éste ve afectada su textura de manera severa, pues se ablanda y su textura se vuelve poco grata para el consumidor.

Las muestras liofilizadas y rehidratadas no pudieron ser ensayadas mediante penetración, pues en enfriamientos lentos la aguja no penetraba por la gran capacidad de deformación que presentó la piel.

El segundo prueba fue medir la firmeza demuestras C-D y L-R (ver tabla 1), mediante una prueba de compresión. Esta prueba a diferencia de la penetración, resulto de manera satisfactoria para todos los métodos de congelamiento. Dicha prueba limita el avance del émbolo a 1mm, por lo tanto la piel no se perfora. La forma que toman las cuervas de firmeza es distinta a las obtenidas en el caso de penetración ya que la pendiente es siempre positiva.

Los resultados obtenidos demuestran que el proceso de liofilizar y rehidratar provoca más daño que si solo se congela y descongela, lo que era predecible, pues el liofilizado lleva consigo la etapa de congelamiento y por lo tanto este proceso es más largo y con

más etapas. El fruto se ve sometido primero una transferencia de agua fuera de él, y luego otra transferencia para volverla a incorporar. Lo anterior, va ocasionando daños internos mucho más severos que si solo se congela y descongela, independiente de que velocidad de enfriamiento se haya utilizado.

Si se compara los métodos de congelamiento entre sí, nuevamente se presenta la tendencia de que el HPSF es el método que más se acerca a los valores de un fruto fresco, en cambio los métodos convencionales mostraron ser pocos efectivos en lograr dicho objetivo, obteniéndose arándanos muy blandos y poco agradables para el paladar.

Como conclusión global de este estudio se puede afirmar que el liofilizado es una técnica de deshidratación que da bastante buenos resultados en la conservación, tanto de la estructura interna del arándano, como de la parte externa de éste. Además, este proceso puede mejorarse bastante si es que es acompañado por un congelamiento HPFS, obteniéndose fruta seca que conserva de muy buena manera la micro-estructura y la firmeza una vez rehidratado. La microestructura bien conservada tendrá una directa relación con el valor nutricional del fruto, en tanto que la firmeza lo hará con la textura y la sensación del consumidor al momento de comer el fruto.

Finalmente, se debe acotar, que el haber desarrollado el tema del presente trabajo de título en un proceso innovador en la industria frutícola y abarcando una gran variedad de otras disciplinas que no se relacionan comúnmente con la Ingeniería Mecánica, resultó muy motivante y a la vez gratificante para el alumno. Además, para cumplir con los objetivos generales y específicos del trabajo, hubo que relacionarse con personas de variadas aristas de la ciencia, como Mecánicos, Químicos, Veterinarios, Agrónomos e Ingenieros, lo que resultó en una experiencia enriquecedora, tanto en el ámbito personal, como en lo académico.

6 Conclusiones

- El liofilizado conserva la estructura interior y exterior del arándano de mejor manera que el secado común. Por lo tanto, a medida que avance la tecnología y disminuyan los costos del proceso, éste podrá llegar a ser rentable para la producción de arándanos secos de alta calidad nutricional y organoléptica.
- Las micrográficas confirmaron que a mayor velocidad de enfriamiento el tamaño de los poros es menor, siendo el congelamiento HPSF el que mejor mantuvo la integridad interna y externa del arándano
- Los poros más grandes, provocados principalmente en el enfriamiento a -20°C , provocan daños estructurales considerables en arándanos liofilizados que no se presentan en el congelamiento HPSF. Se observan roturas de tejidos y separación de la piel y la carne del fruto producto de la presión ejercida por los cristales de mayor tamaño.
- La capacidad de rehidratación es mayor, mientras más rápido haya sido el congelamiento. Las muestras congeladas por HPSF resultaron ser las con mayor capacidad de rehidratación y presentaron curvas sustancialmente mejores que las demás muestras llegando a doblar la capacidad de rehidratación de las demás muestras
- La firmeza, medida por penetración y compresión, se vio menos afectada en las muestras congeladas por congelamiento rápido. Las muestras congeladas por HPSF mostraron las curvas de firmeza más cercanas a la de un arándano fresco. Sin embargo, no se logra llegar a los valores máximos que posee un arándano fresco.
- El congelamiento con deshidratación previa por osmosis, es una técnica útil para mejorar la firmeza de arándanos congelados. Tanto a -20°C , como a -80°C , las muestras con dicho pre-tratamiento presentaron mejoras en esta capacidad, sin embargo todavía con valores lejanos a un arándano congelado por HPSF y a uno fresco.

7 Bibliografía

- [1] J. Brennan, A. Grandison. Food Processing Handbook. Second edition, 2012.
- [2] O. Quiroga. Estudio teórico experimental en secado de frutas por liofilización. Universidad de Chile 1978.
- [3] http://www.2spi.es/catalog/instruments/dryers_technique.html
- [4] E. Marín, R. Lemus, V. Flores, A. Vega. The Rehydration Of Dehydrated Foods. Revista Chilena de Nutrición, 33 (2006) N°3.
- [5] L. Otero, M. Martino. Preservation of Microstructure in Peach and Mango during High-pressure-shift Freezing. Journal of Food Science, 65 (2000) 16-22.
- [6] B. Li, D. Sun. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review. Journal of Food Engineering, 54 (2002) 175–182.
- [7] M. Saclier, R. Peczaliski, J. Andrieu. Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals size and shape during freezing in vials. Chemical Engineering Science, 65 (2010) 3064 - 3071.
- [8] C. Duran. Diseño y construcción de un equipo experimental de congelado rápido. Universidad de Chile, 2010.
- [9] C. Marani, M. Agnelli, R. Mascheroni. Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. Journal of Food Engineering, 79 (2007) 121-133.
- [10] I. Saguya, A. Marabia, R. Wallachb. New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. Trends in Food Science & Technology, 16 (2005) 495–506

8 Anexo A

Los tipos de hielo conocidos son los siguientes [6]:

Hielo Ic: (baja temperatura, cúbica centrada en las caras, densidad aproximadamente 900 kg/m³).

Hielo II: (baja temperatura, ortorrómbica centrado, densidad aproximadamente 1.200 kg/m³).

Hielo III: (baja temperatura, tetragonal, densidad aproximadamente 1.100 kg/m³).

Hielo V: (alta presión, baja temperatura, monoclinica de base centrada, densidad aproximadamente 1.200 kg/m³).

Hielo VI: (alta presión, baja temperatura, tetragonal, densidad aproximadamente 1.300 kg/m³). Hielo VII (alta temperatura, alta presión, cúbico sencilla, densidad aproximadamente 1.700 kg/m³).

Hielo VIII: (alta presión, tetragonal centrada, densidad aproximadamente 1.600 kg/m³).

Hielo IX: (alta presión, tetragonal, densidad aproximadamente 1.200 kg/m³).

Hielo XII: (alta presión, baja temperatura, tetragonal, densidad aproximadamente 1.300 kg/m³).