

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE CONSERVACIÓN PARA  
LA UVA DE MESA**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER  
EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOR:**

Marco Augusto Pacheco Callirgos

**ASESOR:**

Enrique José Barrantes Peña

Lima, diciembre 2020

## RESUMEN

En la actualidad, la producción de uva de mesa para la exportación en el Perú está en un continuo crecimiento. Este sector está marcado por fuertes competidores, es por ello que se necesita proporcionar ciertos requerimientos y características al producto para la exportación. El presente trabajo hace una revisión de los sistemas de cosecha y post cosecha que se siguen para la uva de mesa, con el fin de determinar parámetros para una adecuada conservación post-cosecha de la uva; es decir, el enfriamiento y la conservación en almacenes refrigerados para la uva de mesa. Se revisaron diversos estudios, guías y referencias para determinar parámetros de velocidad de aire en enfriamientos por aire forzado, velocidad de aire en los almacenes refrigerados, condiciones de humedad relativa, influencia del empaquetado en tiempo de enfriamiento y pérdida del agua en la uva. Finalmente, se concluyó que para un enfriamiento rápido y eficiente se necesita un enfriamiento de aire forzado con velocidades entre 2.0 a 3.5 m/s, 90 a 95% de humedad relativa y temperatura final de la uva de  $-0.5$  a  $-2^{\circ}\text{C}$ . Para las condiciones de almacén refrigerado, velocidades de 0.2 a 0.5 m/s, temperaturas de  $-0.5$  a  $-2^{\circ}\text{C}$ , con humedad relativa entre 90 a 95% de humedad relativa, además de un tratamiento periódico de  $\text{SO}_2$  para el control fungicida. Finalmente, se concluyó que usar bolsas de polietileno o envases rígidos de polietileno (*clamshell*) va a depender de las prestaciones de la instalación. Usar bolsas de polietileno favorecen a una mejor conservación de la uva, al tener una menor pérdida de agua que con envases rígidos de polietileno. Por otro lado, el uso envases rígidos de polietileno (*clamshell*) favorecen a un menor tiempo de enfriamiento que usar bolsas de polietileno. Estos parámetros van a ser esenciales a la hora de definir las condiciones de operación de un enfriador de aire forzado. En el análisis de tiempo enfriamiento para la uva Red Globe se obtuvo un tiempo de 7 horas y 36 minutos para enfriar la uva desde  $30^{\circ}\text{C}$  a  $-2^{\circ}\text{C}$  con una temperatura de medio de  $-15^{\circ}\text{C}$  y velocidad de aire de 2.0 m/s.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	viii
<b>1 CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA UVA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Características de la uva.....	1
1.1.1 Generalidades taxonomía y clasificación .....	1
1.2 Valor nutricional de la uva .....	2
1.2.1 Características de la uva de mesa o uva fresca.....	3
1.3 Variedades de uva de mesa .....	4
1.3.1 Variedades de uva de mesa en el Perú.....	5
1.3.2 Producción nacional de Uva .....	6
1.3.3 Comercialización de la uva de mesa.....	8
1.3.4 Marco legal.....	10
1.4 Sistemas de cosecha y empaquetado de la uva de mesa .....	11
1.4.1 Cosecha de la uva de mesa .....	11
1.4.2 Sistemas de cosecha de las uvas de mesa .....	12
1.4.3 Materiales del Empaquetado .....	15
1.5 Deterioraciones comunes en las uvas de mesa.....	16
1.5.1 Factores bióticos .....	16
1.5.2 Factores abióticos .....	18
<b>2 CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.....</b>	<b>20</b>
2.1 Tipos de pre-enfriamiento comerciales .....	20

2.1.1	Enfriamiento por <i>Hydro-Cooler</i> .....	20
2.1.2	Enfriamiento al vacío.....	22
2.1.3	Enfriamiento por convección natural de aire.....	24
2.1.4	Enfriamiento por aire forzado.....	25
2.2	Tipos de congelamiento comerciales .....	27
2.2.1	Congeladores por contacto directo .....	27
2.2.2	Congeladores criogénicos.....	29
2.2.3	Congeladores por aire forzado.....	30
2.3	Tratamiento de frío para la uva de mesa .....	32
2.3.1	Propiedades térmicas de la uva.....	32
2.3.2	Velocidad de enfriamiento y almacenamiento en frío.....	33
2.3.3	Influencia del empaquetado.....	35
2.3.4	Tratamiento de dióxido de azufre ( <b>SO<sub>2</sub></b> ).....	36
3	CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.....	38
3.1	Caracterización de la uva .....	38
3.2	Tiempo de enfriamiento .....	40
3.3	Análisis de resultados.....	48
	CONCLUSIONES.....	50
	BIBLIOGRAFÍA .....	53
	ANEXO A: Cálculo de propiedades térmicas de la uva .....	57.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Racimo de la uva Carbenet Sauvignon (izquierda) y racimo de la uva Red Globe (derecha).....	3
Figura 1.2 Principales departamentos de producción de uva de mesa en Perú en el 2018. .....	7
Figura 1.3 Empaquetado de uvas Red Globe, Del Sur Perú.....	10
Figura 1.4 Tendero en forma de Y .....	12
Figura 1.5 Empaquetado en campo .....	13
Figura 1.6 Esquema de mesa de trabajo en el empaquetado en “sala”.....	14
Figura 1.7 Materiales de embalaje de la uva de mesa .....	15
Figura 1.8 Uva infectada por el hongo Botris Cinérea.....	17
Figura 1.9 Rajado en las uvas (Thompson Seedless) por la sobreexposición de SO <sub>2</sub> ...	19
Figura 2.1 Esquema de un hidrocóler de tipo aspensor. ....	21
Figura 2.2 Esquema de un hidrocóler de inmersión.....	22
Figura 2.3 Cámara de enfriamiento a vacío para vegetales.....	23
Figura 2.4 Cuarto grande de enfriamiento por convección natural.....	25
Figura 2.5 Esquemas de los tres tipos de enfriamiento por aire forzado.....	26
Figura 2.6 Congelador de placas horizontal.....	28
Figura 2.7 Congelador de placas vertical.....	28
Figura 2.8 Congelador criogénico (IQF).....	30
Figura 2.9 Esquema de congelador de lecho fluidizado.....	30
Figura 2.10 Esquema de congelador de aire forzado estacionario.....	31
Figura 3.1 Uva red globe empaquetada en bolsa de polietileno (polybag).....	38

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.1 Taxonomía de las especies de uvas dentro del género Vitis .....	1
Tabla 1.2 Valor nutricional general de la uva madura .....	2
Tabla 1.3 Principales variedades de uva de mesa.....	4
Tabla 1.4 Principales especies de uva de mesa en el Perú .....	5
Tabla 1.4 Principales especies de uva de mesa en el Perú (continuación).....	6
Tabla 1.5 Datos producción de cosecha de uva según departamentos en el Perú.....	7
Tabla 1.6 Ingresos de Uva según variedad (%) en el Mercado Mayorista, 2016.....	8
Tabla 1.7 Exportaciones (tn) de uvas frescas del Perú.....	9
Tabla 2.1 Composición y propiedades térmicas de la uva .....	32
Tabla 2.2 Valores de calor de respiración de la uva.....	33
Tabla 2.3 Parámetros para enfriar y almacenar la uva fresca.....	34
Tabla 3.1 Parámetros característicos de la uva Red Globe .....	39
Tabla 3.2 Propiedades térmicas de la uva .....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Bi$	-	: Número de Biot
$C_{unf}^v$	$J/m^3.K$	: Calor específico volumétrico por encima de $T_{fo}$
$C_{fro}^v$	$J/m^3.K$	: Calor específico volumétrico por debajo de $T_{fo}$
$c_{unf}$	$kJ/kg.K$	: Calor específico de la uva por encima $T_{fo}$
$c_{fro}$	$kJ/kg.K$	: Calor específico de la uva por debajo $T_{fo}$
$D$	$m$	: Longitud característica para una superficie infinita, espesor (m)
$E_{cil}$	-	: Factor de dimensión equivalente de transferencia de calor para un cilindro finito
$H_{-10^{\circ}C}$	$kJ/kg$	: Entalpia específica de la uva a $-10^{\circ}C$
$H_{30^{\circ}C}$	$kJ/kg$	: Entalpia específica de la uva a $30^{\circ}C$
$H_{fo}$	$kJ/kg$	: Entalpia específica de la uva en el punto de congelamiento
$h$	$W/m^2.K$	: Coeficiente convectivo del medio
$k_s$	$W/m.K$	: Conductividad alimento completamente congelado @ $-40^{\circ}C$
$L_1$	$m$	Dimensión más corta
$L_2$	$m$	Dimensión más larga
$L_3$	$m$	Segunda dimensión más corta
$L_f$	$J/m^3$	:Entalpia volumétrica de fusión del agua
$L_o$	$kJ/kg$	: Calor específico latente de fusión del agua
$Mr$	$kg$	:Masa Promedio Racimo
$P$	-	: Factor geométrico
$Pk$	-	: Número de Plank
$R$	-	: Factor geométrico
$Ste$	-	: Número de Stefan
$T_2$	$^{\circ}C$	: Temperatura referencia
$T_C$	$^{\circ}C$	: Temperatura final del centro térmico
$T_{fo}$	$^{\circ}C$	: Punto inicial de congelamiento
$T_i$	$^{\circ}C$	: Temperatura inicial
$T_m$	$^{\circ}C$	:Temperatura del medio
$T_{ref}$	$^{\circ}C$	: Temperatura de referencia de entalpia Zero
$W_1$	-	: Parámetro para el factor de equivalente de transferencia de calor

$W_2$	-	: Parámetro para el factor de equivalente de transferencia de calor
$x_b$	-	: Fracción de masa alrededor de sólidos
$x_{ice}$	-	: Fracción de hielo
$x_p$	-	: Fracción de proteína en contenido de masa
$x_s$	-	: Fracción de masa de sólidos contenidos en la uva
$x_{wo}$	-	: Fracción de agua en contenido de masa
$x_{wr}$	-	: Fracción de agua residual
$\beta_1$	-	: Ratio de corrección para formas irregulares
$\beta_2$	-	: Ratio de corrección para formas irregulares
$\Delta H_{10}$	$J/m^3$	: Diferencia de entalpía volumétrica entre la temperatura inicial del producto y la de referencia
$\theta$	$min$	: Tiempo de congelación para una geometría dada
$\theta_{cil}$	$min$	: Tiempo de congelación para un cilindro finito
$\theta_{slab}$	$min$	: Tiempo de congelación para una superficie infinita
$\rho_{unf}$	$kg/m^3$	: Densidad de la uva por encima $T_{fo}$
$\rho_{fro}$	$kg/m^3$	: Densidad de la uva por debajo $T_{fo}$



## Introducción

En los últimos años el Perú la producción de uva de mesa ha ido en incremento, este sector agroindustrial esta es continuo crecimiento la uva peruana se está haciendo conocer en todo el mundo. La necesidad definir de manera adecuada los parámetros que influyen en la calidad y conservación de la uva es muy importante para poder competir dentro de este sector. En ese sentido el presente trabajo de investigación se describe las características principales de la uva de mesa, además se describe el proceso de post-cosecha y se menciona las causas de las principales deterioraciones de la uva durante la cosecha y en la conservación en frío. Tener una rápida y adecuada refrigeración de la uva es primordial para evitar pérdidas de agua excesivas la uva; mejorando la calidad del producto y no teniendo perdida de materia prima. De aquí yace la importancia de un enfriamiento rápido y adecuado para la uva. Es necesario poder definir una serie de parámetros adecuados para la conservación de la uva en su cadena de frío como de porcentaje de humedad relativa, velocidad máxima de enfriamiento, temperatura del almacén de conservación, entre otros.

### **Objetivos:**

#### **Objetivo General**

- Determinar los parámetros adecuados de conservación post-cosecha de la uva de mesa.

#### **Objetivos Específicos**

- Determinar los factores que influyen en la conservación de la uva de mesa.
- Describir los sistemas de enfriamiento más usados en la actualidad en el sector agroindustrial
- Determinar el tiempo de enriamiento con el sistema de enfriamiento más adecuado.

## 1 CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA UVA.

### 1.1 Características de la uva

#### 1.1.1 Generalidades taxonomía y clasificación

La vid (*Vitis Vinifera*) o también conocida como parra es una planta trepadora. Es originaria de Asia menor y en Europa en los bosques del Cáucaso y Cerdeña (Cuya, 2013). La Vid pertenece a la familia de las Vitáceas y al género *Vitis*, la cual fue descrita en 1753 en la publicación de Carlos Linneo en *Species Plantarum*. El libro de Manual de Viticultura tropical hace una revisión de la taxonomía de las uvas. El género *Vitis* se subdivide en dos subgéneros: Uno es el *Euvtis*, dentro de este género se encuentran variedades americanas y europeas; y el subgénero *Muscandia* que abarca zonas tropicales y subtropicales. (Almanza, Serrano y Fischer, 2012). A continuación, se muestra en la Tabla 1.1 la taxonomía de las variedades de uvas más cultivadas alrededor del mundo.

Tabla 1.1 Taxonomía de las especies de uvas dentro del género *Vitis*

Taxonomía	Especies	Procedencia
División: Espermatofitas		
Subdivisión: Angiospermas		
Clase: Dicotiledoneas		
Subclase: Archiclamideas		
Orden: Rhamnales		
Familia: Vitáceas		
Género: <i>Vitis</i>		
Subgénero: <i>Euvtis</i> (30 especies)	<i>Vitis vinifera</i> L.	Europeo-Asiática
	<i>Vitis silvestris</i>	Europeo-Asiática
	<i>Vitis riparia</i>	Americana
	<i>Vitis labrusca</i>	Americana
	<i>Vitis rupestris</i>	Americana
	<i>Vitis berlandieri</i>	Americana
Subgénero: <i>Muscadinea</i> (Tres especies)	<i>Vitis rotundifolia</i> .	American-Méjico

*Nota.* Tomado de “Manual tropical de Viticultura Tropical, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja”, por Almanza et al, 2012.

En especial la especie *Vitis Vinifera* L. es la que se emplea para el consumo fresco (CODEX, 2007), o también conocido como consumo en mesa. Además, la especie de *Vitis Rotundifolia* es usada para la agroindustria y como uva de mesa. Según la FAO, las uvas de

mesa o uvas fresca son producidas a partir de las variedades de vino; sin embargo, estas son destinadas para el consumo en fresco.

## 1.2 Valor nutricional de la uva

La fruta de la uva crece en racimos tiene un sabor dulce y textura carnosa. Su pulpa puede ser blanca y púrpura, existen cerca de 5000 variedades de uvas alrededor del mundo (Almanza et al, 2012). Este fruto tiene diversos consumos, como por ejemplo en la elaboración de vinos, consumo de mesa o lo que se suele conocer como uva fresca, además se puede consumir como zumos o en mermeladas. A continuación, se presenta la Tabla 1.2 con los principales nutrientes que contiene la uva.

Tabla 1.2 Valor nutricional general de la uva madura

Compuestos	Cantidad por 100g de porción
Agua	81.1 g
Energía	67 kcal
Proteínas	0.68 g
Hidratos de carbono	15.2 g
Lípidos	0.28 g
Fibra	
Fibra total	1.5 g
Vitaminas	
Vitamina A	5.5 ug
Vitamina E	0.63 mg
Vitamina B1	0.05 mg
Vitamina B2	0.03 mg
Vitamina B6	0.07 mg
Vitamina C	4.2 mg
Minerales	
Calcio	12 mg
Hierro	0.41 mg
Fosforo	19 mg
Magnesio	7.6 mg
Zinc	0.05 mg
Selenio	1.7 ug
Sodio	2 mg
Potasio	197 mg

*Nota.* Adaptado de “Manual tropical de Viticultura Tropical, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja”, por Almanza et al, 2012.

### 1.2.1 Características de la uva de mesa o uva fresca

Como anteriormente se mencionó las uvas de mesa son de la misma especie que las uvas para elaborar vino, las diferencias están en que las uvas de mesa tienen un fruto más grande y la pulpa es más firme, estas características hacen a la uva más atractiva al consumo y más resistente a posibles daños durante el traslado. Además, los racimos no son tan apretados como las uvas de vinos y cuentan con una piel más gruesa, lo que hace a esta uva fácil y apetecible de comer



Figura 1.1 Racimo de la uva Carbenet Sauvignon (izquierda) y racimo de la uva Red Globe (derecha)

Nota: Elaboración propia.

A la izquierda se muestra un racimo de la uva Cabernet Sauvignon, muy usada en la elaboración de vino tinto. A la derecha se tiene un racimo de la uva Red Globe una uva muy común para el consumo fresco o de mesa. Como se puede observar en la Figura 1.1 las uvas de vino son más pequeñas que las de consumo en fresco o de mesa, incluso se puede observar que el racimo de la uva Cabernet Sauvignon es más estrecho, esto es muy característico en las uvas destinadas a la elaboración de vino; por otro lado, el racimo de la Red Globe es más suelto y sus bayas son más grandes, estas son características comunes entre las uvas de consumo fresco pues hace que su consumo sea más fácil. La FAO ha establecido algunas características que identifican a las variedades de uvas aptas para consumo fresco las cuales son: a) Cantidad de semillas, b) Forma de la uva, c) Color de la uva, d) Grosor de piel, e) Periodo de maduración,

f) Resistencia contra plagas y enfermedades, e) Fácil de transportar y periodo de almacenamiento, d) Aroma (FAO,2016). Estas características hacen que las uvas de consumo fresco sean más resistentes a golpes durante el transporte, Otra característica importante es la presencia del aroma dulce que desprende la uva fresca, el cual hace a este fruto más apetecible para el consumo. Existen diversas variedades de uvas para el consumo fresco, que se diferencian en sabor, color de piel, tamaño de la uva, presencia de semillas, etc. estudios de mercado han determinado que en China hay una tendencia al consumo de uvas con gran tamaño y sabor dulce como la Red Globe; por otro lado, en Europa hay mayor demanda por uvas sin presencia de semillas y de tamaño regular de la uva (FAO,2016).

### 1.3 Variedades de uva de mesa

Existen diversas especies de uvas que se pueden clasificar según su consumo o uso en la industria, uvas de vino, uvas de pasas, uvas de mesa, etc. en este documento se expondrá acerca de las últimas. Las producciones de uva de mesa representan el 30% de la producción total en el mundo. Se conocen más de 50 variedades de uvas para consumo fresco (Zoffoli y Latorre, 2011). A continuación, se presenta en la Tabla 1.3 las principales variedades de uva de mesa en Europa, Asia y América. Variedades de uvas como la Muscat de Alexandria o Muscadoule son usadas tanto para elaborar vino como para su consumo fresco en Europa.

Tabla 1.3 Principales variedades de uva de mesa

Algunas Especies de uva de mesa alrededor de Asia, América y Europa	Alohonse Lavallée, Moscatel Negro, Muscat de Alexandria*, Ribier, Thompson Seedless, Tinta Paris, Verdello Tinto, Crimson Seedless, Flame Seedles Cardinal, Muscadoule*, Red Globe, Superior Seedless, Baco Noir*, Moscatel Italica
---	---

\*Variedades de uvas que también son usadas para elaborar vino

*Nota.* Adaptado de “Nutritional Compisition of Fruit Cultivars”, ” Ch. 12. Grape (Vitis species), p.257-286, por Fortes y Pais.

### 1.3.1 Variedades de uva de mesa en el Perú

El Perú ocupa los primeros lugares en exportación de uva de mesa, los principales países a los que Perú exporta la uva son Estados Unidos y China. El Perú tiene la capacidad de producir Uva de mesa todo el año, lo que permite aprovechar la ventana de abastecimiento de Estados Unidos que es durante los meses noviembre – abril. Esto se debe al que el estado de California, principal productor de Estados Unidos, solo tiene una estacionalidad de producción de mayo – diciembre. Por lo que existe un gran mercado fuera de esa estacionalidad. En el Perú existen diversas variedades de uvas de mesa. Sin embargo, las variedades más comunes para la exportación y/o comercialización son: Red Globe, Crimson Seedless, Flame Seedless, Thompson Seedless y la Superior White Seedless (MINAGRI,2019). A continuación, se presenta en la Tabla 1.4 descripciones de las principales especies de uva de mesa que el Perú comercializa.

Tabla 1.4 Principales especies de uva de mesa en el Perú






Imagen	Variedad	Características
	Red Globe	Color: Rojo oscuro ligeramente brillante Baya redonda 24-28 mm Cascara firme, con semilla, pulpa crujiente y carnosa
	Superior Seedless	Color: Verde claro Baya elptica-ovoidal No tiene semillas y tiene una pulpa crujiente
	Thompson Seedless	Color: Verde Baya cónica 18-20 mm No presenta semillas, sabor neutro muy dulce, de pulpa crujiente y cascará gruesa

Tabla 1.5 Principales especies de uva de mesa en el Perú (continuación)

Imagen	Variedad	Características
	Crimson Seedless	Color: Rojo Baya cónica 17-22 mm No presenta semillas, sabor neutro muy dulce. Pulpa crujiente y cascará gruesa
	Flame Seedless	Color: Rojo Baya esférica 18 mm No presenta semillas, pulpa crujiente, consistente e incolora.

*Nota:* Información recopilada de MINAGRI, FAO Y PROVID. Elaboración propia

Se opta por cultivar este tipo variedades de uva de mesa pues hay una gran demanda y aceptación en el mercado internacional. Además, sus características facilitan el transporte y manejo adecuado de post cosecha. Entre los principales países que Perú exporta son: Estados Unidos, China, Países Bajos (Holanda) y recientemente Rusia (MINAGRI,2019).

### 1.3.2 Producción nacional de Uva

En el Perú se tiene 4 regiones de que abarcan cerca del 90 % de la producción total: Ica, Piura, Lima y La libertad todas ubicadas en la costa del Perú. Ica representa 41% de la producción nacional siendo el mayor productor de uva en el Perú, luego le sigue Piura 26%, Lima 12% y La Libertad con 9% En el 2016, Piura era el principal departamento de producción de uva; sin embargo, el fenómeno del Niño afecto considerablemente su producción, afectando en las tierras y en la infraestructura del riego, esto género que Ica se convierta en el principal departamento de producción con 265 005 toneladas de producción de uvas en el 2018 y con 132 hectáreas de terreno cosechado hasta el 2017 (MINAGRI, 2019) . Actualmente, Lima viene aumentando su producción anual de uvas siendo la tercera ciudad productora. A continuación, se presenta en la Figura 1.2 las principales ciudades productoras de Uva en el Perú, además en

la Tabla 1.5 de se muestran datos de producción en toneladas (tn), hectáreas cosechadas (ha) y rendimiento de producción (kg / ha) hasta el 2018, publicado por el Ministerio de Agricultura y Riego en su publicación de la Uva Peruana del 2019.

**PRINCIPALES DEPARTAMENTOS PRODUCTORES DE UVAS: 2018**

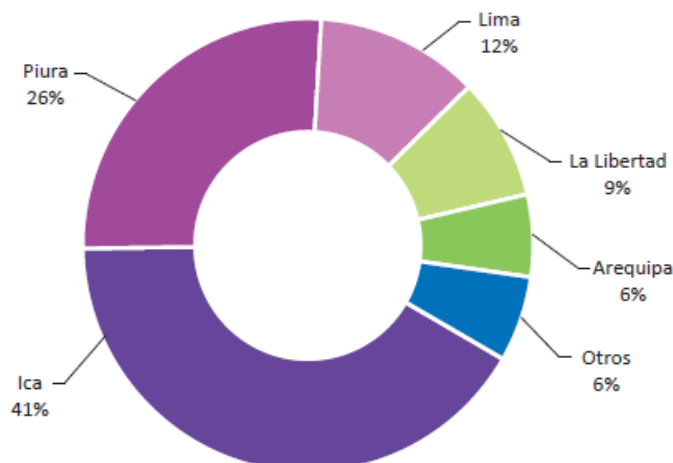


Figura 1.2 Principales departamentos de producción de uva de mesa en Perú en el 2018.

Nota. Tomado de “La Uva Peruana: Una oportunidad en el Mercado Mundial, por MINAGRI, 2019.

Tabla 1.6 Datos producción de cosecha de uva según departamentos en el Perú

Año/Departamentos	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Producción</b>	<b>107 035</b>	<b>169 540</b>	<b>280 468</b>	<b>296 902</b>	<b>361 870</b>	<b>439 244</b>	<b>507 097</b>	<b>597 939</b>	<b>686 957</b>	<b>645 012</b>	<b>639 135</b>
Ica	31 113	69 729	120 999	133 137	149 768	169 043	229 997	229 997	229 997	238 919	265 005
Piura			34 981	33 958	65 597	125 616	182 594	182 594	182 594	223 491	167 160
Lima	26 060	41 534	55 732	54 869	60 265	64 645	74 596	74 596	70 547	75 098	74 990
La Libertad	39 855	45 517	43 384	43 689	44 010	41 093	46 898	46 898	41 321	51 229	55 582
Arequipa	2 026	2 287	8 275	11 085	14 774	18 890	22 428	22 428	22 997	29 577	37 407
<b>Sup. Cosechada</b>	<b>10 299</b>	<b>11 477</b>	<b>15 000</b>	<b>16 573</b>	<b>20 536</b>	<b>21 769</b>	<b>26 650</b>	<b>26 650</b>	<b>23 588</b>	<b>29 777</b>	
Ica	4 969	5 172	6 198	7 300	8 643	8 744	9 017	10 454	9 017	12 132	
Piura			1 368	1 333	3 517	4 220	4 993	5 584	4 993	7 064	
Lima	2 472	3 203	3 531	3 481	3 697	3 715	3 902	3 919	3 902	3 964	
La Libertad	1 715	1 757	1 730	1 820	1 923	1 938	1 989	2 478	1 989	2 507	
Arequipa	264	310	689	765	806	1 073	1 117	1 139	1 117	1 336	
<b>Rendimientos (kg/ha)</b>	<b>10 393</b>	<b>14 772</b>	<b>18 698</b>	<b>17 915</b>	<b>17 621</b>	<b>20 177</b>	<b>21 498</b>	<b>22 436</b>	<b>22 498</b>	<b>21 661</b>	
Piura			25 571	25 475	18 651	29 767	29 494	32 699	32 699	31 638	
Arequipa	7 675	7 376	12 011	14 490	18 330	17 605	20 589	19 691	19 691	22 139	
La Libertad	23 246	25 908	25 079	23 999	22 881	21 201	20 770	18 929	18 929	20 432	
Ica	6 261	13 481	19 523	18 237	17 328	19 332	21 062	22 000	22 000	19 693	
Lima	10 542	12 967	15 784	15 582	16 120	17 192	17 946	18 896	18 896	18 825	

Producción (tn), área de cosecha (ha) y rendimiento (kg/ha)

Nota. Tomado de “La Uva Peruana: Una oportunidad en el Mercado Mundial, por MINAGRI (Perú), 2019.

En la región de Ica las zonas más productivas son Ica, Chincha y Pisco, en la región de Piura las provincias de Piura, Sullana y Morropón. Por otro lado, en la región de Lima la provincia de Cañete tiene más de 90% de la producción; y en La Libertad, las provincias de



mayor producción son las de Gran Chimú, Ascope y Virú. Como se puede apreciar en la Tabla 1.5 el departamento de Piura tiene el mayor rendimiento de 31 638 kg/ha, en el 2017, superando a Ica, que siendo la mayor productora de uva en el 2017 está por debajo de Piura con solo 20 150 kg / ha de uva producida. Por otro lado, la región con menor rendimiento es Lima con 18 825 kg / ha.

### 1.3.3 Comercialización de la uva de mesa

La uva de mesa tiene una importante presencia en el mercado nacional e internacional. Donde participan agricultores, acopiadores y empresas grandes. Los agricultores y acopiadores se dedican generalmente al mercado interior. Por otro lado, las empresas grandes compran a los agricultores o a los acopiadores la uva, para después enfriarlas y exportarlas al mercado exterior de China, Estados Unidos entre otros (MINAGRI,2019).

#### ➤ Comercio interior

En el 2017 el Ministerio de Agricultura y Riego en su Análisis Económico de la Producción Nacional de la Uva Fresca publicado en el 2017 evalúa la comercialización de la uva en Lima Metropolitana, donde se comercializaron 35.5 mil toneladas de uvas en el año 2016 dentro del mercado de mayorista de lima. Las variedades más comercializadas ese año se muestran Tabla 1.6 se muestran el porcentaje de ingresos según variedad de uva al mercado mayorista de Lima en el año 2016. [MINAGRI,2017].

Tabla 1.7 Ingresos de Uva según variedad (%) en el Mercado Mayorista, 2016

TOTAL 2016: 35.5 MIL toneladas	
Variedad de uva	
	Porcentaje
Red Globe	27.0%
Alfonso Lavalett	20.0%
Italia Nacional	4.0%
Borgoña	4.0%
Rosada sin pepa	2.0%
Sultanina Nacional	3.0%
Otras	100.0%
<b>Total</b>	

*Nota:* Adaptado de “Análisis Económico de la producción de la producción Uva Fresca”, por MINAGRI (Perú), 2017.

### ➤ Comercio exterior

Las exportaciones de uva fresca peruana han tenido un considerable incremento en los últimos años, según la publicación del 2019 del Ministerio de Agricultura y Riego acerca de la Uva Peruana, la uva fresca se convirtió en 2018 en el primer producto de agro exportación al lograr un valor de USD 817.9 millones, representando solo 4.6% del valor bruto de la producción agrícola. Perú se posiciona en el octavo lugar de países exportadores en el mundo, siendo Chile y Sud África sus principales competidores. La estacionalidad de la uva peruana para la exportación se da entre noviembre y marzo, en estos meses mercados como de Estados Unidos y China se abren para abastecerse de uva de mesa. A continuación, se mostrará en la Tabla 1.7 las exportaciones en toneladas en el año 2019 durante los meses de enero y febrero.

Tabla 1.8 Exportaciones (tn) de uvas frescas del Perú

<b>Países</b>	<b>Cantidad</b>
Estados Unidos	83,105.00
Unión europea	33,014.00
Hong Kong	31,323.00
China	15,462.00
México	9,031.00
Corea del Sur	3,130.00
Rusia	4,865.00
Tailandia	5,458.00
Colombia	1,756.00
Canadá	3,871.00
Otros Países	9,007.00
<b>Total</b>	<b>200,022.00</b>

*Nota.* Tomado de “La Uva Peruana: Una oportunidad en el Mercado Mundial, por MINAGRI (Perú), 2019.

La principal forma de exportación de la uva es fresca generalmente en racimos de uvas de 600 – 750 gr, en empaques de cartón para su envío. En la Figura 1.3 se muestra la presentación final del empaque de envío para exportación. El empaque son bolsas de polietileno o también conocidas como *polybag*, este tipo de envase para las uvas es muy usado tanto para la

comercialización al interior del país como para la exportación de la uva de mesa hacia el extranjero.



Figura 1.3 Empaquetado de uvas Red Globe, Del Sur Perú  
*Nota.* Tomado de pagina web de la Empresa Del Sur Perú.

#### 1.3.4 Marco legal

Existen normas muy rigurosas para la producción y comercialización de la uva, las finalidades de estas es proteger al consumidor y brindar un producto de calidad. La norma para la uva de mesa es la CODEX STAN 255-2007, la cual abarca disposiciones relativas a calidad, clasificación por calibre, tolerancias, presentación, marcado y etiquetado, contaminantes e higiene. Una norma complementaria a esta es la norma técnica peruana NTP 011.012 2005, la cual abarca los mismos temas que en la CODEX 2007, e incluso en el Anexo A de la NTP 0.11.012 2005 presenta un cuadro con rangos de sólidos solubles para diversas variedades de uvas que se producen en el Perú. Finalmente, el Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú (SENASA) tiene un procedimiento de sanidad fitosanitaria de la uva fresca para la exportación PRO-SSV-08, este busca asegurar la eficacia y calidad del proceso de certificación fitosanitaria para la exportación de uva de mesa

## 1.4 Sistemas de cosecha y empaquetado de la uva de mesa

### 1.4.1 Cosecha de la uva de mesa

Las uvas de mesa son cosechadas cuando estas cumplen con los requisitos mínimos de madurez aceptables para el consumo humano. Estos requisitos de madurez son determinados, por la norma CODEX 255-2007 y/o la norma NTP 011.012.2015, las cuales son normas para la uva de mesa. Estos requisitos exigen un grado de madurez como mínimo 16° Brix de contenido de azúcar (TTS) y una relación de azúcar/acidez (TTS/TA) de 20:1. El contenido de azúcar (TTS) es medido por un refractómetro y el contenido de acidez (TA) se mide a través de un proceso de titulación. En algunos cultivos, como la Red Globe, es común aceptar concentraciones de azúcar de 15° Brix (Zoffoli y Latorre, 2011).

- 18:1 con un valor de grados Brix mayor o igual 14° y menor de 16° Brix.
- 20:1 con un valor de grados Brix mayor o igual a 12.5° y menor de 14° Brix.

*Nota:* Datos tomados de la norma CODEX 255-2007

La cosecha generalmente se hace manualmente por trabajadores entrenados, pues es una actividad que se tiene que llevar a cabo con mucha delicadeza para no dañar el producto y para seleccionar las uvas que tienen un nivel adecuado de maduración. Según la FAO (2015) Las principales ventajas de cosechar las uvas del viñero manualmente son las siguientes:

- Evita la manipulación en exceso de la uva, pues los recogedores pueden manejar con cuidado esta actividad evitando algún daño físico a la uva.
- Selección adecuada de las uvas que tenga un nivel aceptable de madurez y de apariencia.
- Bajo costo de capital de inversión.

Un método muy usado en los viñeros para recolectar las uvas, es usando tendedores de uvas, existen diversos tipos de tendedores en forma de T, en forma de Y o pérgola. Los racimos de uvas están colgados entre los tendedores a una altura de 1.7 m o menor desde el suelo, lo que permite a los recogedores retirar la uva caminando por debajo de los tendedores sin necesidad de una escalera o banco. Como se mencionó, este proceso se debe de realizar con

mucho cuidado, pues el aspecto físico del producto es una característica muy importante que influye en la calidad final del producto. Los recolectores, antes de colocar los racimos de uvas en las canastas de recolección; retiran las uvas de piel marrón, que es el efecto del exceso de luminosidad recibida por el sol y retiran las uvas que tienen algún defecto físico visible (FAO, 2005). A continuación, en la Figura 1.3 se muestra la forma de un tendedero en forma en “y” muy empleado para la cosecha de uvas de mesa.



Figura 1.4 Tendedero en forma de Y  
Nota. Tomado de la página web de la empresa TUPEMESA

#### 1.4.2 Sistemas de cosecha de las uvas de mesa

Existen principalmente dos métodos de recolectar y empaquetar las uvas: empaquetado de campo y empaquetado en sala también conocido como empaquetado *in-house*. En esta sección se hará una breve revisión de ambos métodos.

##### ➤ **Empaquetado en campo**

Este método permite una transportación del producto más adecuada y reduce la pérdida de agua de la uva (Zoffoli y Latorre, 2011). Esto se debe a que la recolección y el empaquetado se realiza de una manera más delicada, en este método generalmente dos personas se encargan de recolectar los racimos. Uno se encarga de elegir el racimo a cortar, siguiendo las siguientes operaciones (FAO, 2005).

- Seleccionar el racimo por tamaño y por color de las uvas.

- Cortar el racimo del arbusto con tijeras, sosteniendo con una mano el racimo y cortando con la otra.
- Remover las uvas marrones y pequeñas del racimo.
- Colocar y acomodar delicadamente el racimo en la caja, sin que se aplaste.

El segundo trabajador tiene una mesa, que usa de soporte para la caja donde se colocan las uvas y los materiales de empaquetado que se describirán más adelante. Este segundo trabajador tiene la función de preparar el empaquetado del racimo cuidadosamente con los materiales adecuados, con el fin de evitar que se aplasten y se dañen los racimos entre sí. Finalmente, cuando la caja está llena se deja en el suelo del viñero y otro trabajador lo recoge. Este método si bien es tedioso haciendo el control de calidad dificultoso, evita las pérdidas de agua por excesiva manipulación del racimo. A continuación, en la Figura 1.5 se muestra la cosecha por el método de empaquetado en campo



Figura 1.5 Empaquetado en campo

*Nota.* Tomado de “Grape Post-harvest Operation” por Food and Agriculture of the United Nations (FAO), 2005.

En la Figura 1.5 se observa que la trabajadora de la izquierda se encarga de cortar el racimo y de remover las uvas que no tengan buena apariencia. Por otro lado, la trabajadora de la derecha tiene una mesa de soporte para la jaba, donde se ordena y se empaqueta con los materiales adecuados para evitar que se dañen durante el transporte. En este método la productividad de los recolectores no es muy alta, por extenso el control de calidad, cada recolector tiene una productividad de alrededor 50 – 80 kg/h (FAO,2005)

### ➤ **Empaquetado *in-house***

Este método a diferencia del anterior se caracteriza por ser más rápido pues un trabajador se encarga de recolectar las uvas y colocarlas en jabas de plástico de 60x40x25 cm, el peso de cada jaba esta entre 18-20 kg (FAO,2005). Las jabas que se usan tienen agujeros de ventilación para que pueda circular el aire y los bordes son redondeados para evitar cortar a la fruta y facilitar la limpieza de la jaba. La productividad de la recolección es 100 – 150 kg/h por cada trabajador (FAO,2005), pues las operaciones de limpieza, deshojado y empaquetado se realiza en un área externa al viñero. En un área generalmente techada, con control de temperatura donde las jabas llenas se colocan en una faja transportadora donde los trabajadores se encargan de preparar el empaquetado. Una vez que las uvas llegan a la línea de empaquetado, generalmente son pre-enfriadas. Los trabajadores esperan a que llegue la jaba para deshojarla, limpiarla, remover las uvas que no estén aptas y empaquetarlas y colocarlas en cajas limpias. Las hojas o uvas que han sido removidas, se colocan en un contenedor que se encuentra debajo de la posición del trabajador o los colocan en una faja transportadora que traslada los desperdicios en dirección opuesta. A continuación, en la Figura 1.6 se muestra un esquema de la mesa de trabajo del operador que se encarga de empaclar las uvas. En la línea de empaquetado la productividad promedio de cada trabajador ronda los 50 -120 kg/h esto va depender de las habilidades de cada trabajador (FAO 2005).

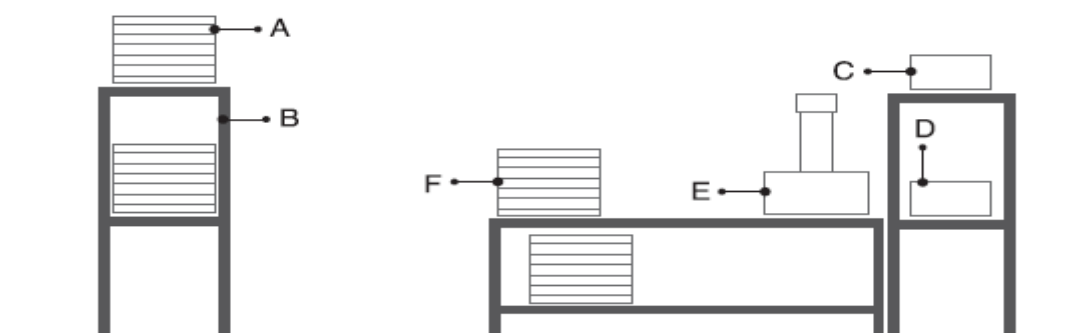


Figura 1.6 Esquema de mesa de trabajo en el empaquetado en “sala”

(A) Jabas vacías; (B) Jabas con las uvas sin empaquetar; (C) Paquetes de envío vacíos; (D) Paquetes de envío llenos; (E) Balanza; (F) Contenedor con materiales de empaquetado  
 Nota. Tomado de “Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Food”, Ch. 9 “Table Grape”, por Zoffoli y Latorre, 2011.



### 1.4.3 Materiales del Empaquetado

La uva, generalmente, antes de ser enfriada es empaquetada con distintas capas de materiales los cuales van a permitir mejorar la efectividad del enfriamiento y van a evitar pérdidas excesivas de agua en la uva. Existen diversas formas de empaquetar la uva, la más comunes es mediante cajas de cartón, de madera o contenedores de plástico. Actualmente existe una tendencia de usar cajas de cartón corrugado para la comercialización al exterior del país. El embalaje de las uvas consiste en una caja de cartón cubiertas de cera la cual cumple la función de contenedor de la uva. Es el sistema más usado por su buena resistencia a los golpes y bajo costo de producción. Luego el interior de la caja se recubre con papel sulfito impregnado con vaselina. Su principal función es evitar la deshidratación de la uva, además cuando se realiza el tratamiento de  $SO_2$ , este material mejora el rendimiento de absorción. Finalmente se protege, los costados y la base con papel corrugado que aumenta la protección de la uva contra los choques en el transporte. Finalmente, cada racimo de alrededor 600 – 750 gr se colocan dentro de bolsas de polietileno, de envases herméticos de plásticos (*clamshell*) o separadas por láminas de esponja para proteger a las uvas. En algunos casos cuando no se va almacenar en frío se les coloca una capa de papel absorbente, la cual mejora la resistencia y la imagen del producto (CCANTO, 2018). En la Figura 1.7 se muestran como estos materiales se ensamblan.

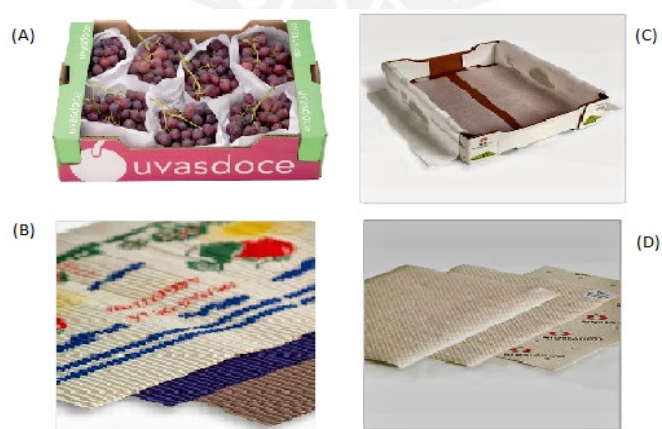


Figura 1.7 Materiales de embalaje de la uva de mesa

(A) Caja de cartón con cera. (B) Cartón corrugado. (C) Papel sulfito. (D) Papel absorbente

Nota. Tomado de pagina web de Peruvian Grapes Export.



Los tamaños de cajas más comunes en el mercado son de 40x30 cm, 50x40 cm o 60x40 cm y de 10 a 13cm de alto. Los pallets donde se apoyan las cajas tienen dimensiones de 120x100cm o de 120x80 cm. Hay diversas configuraciones de las cajas en los pallets, evitando que el pallet tenga una altura mayor a 190 cm por seguridad.

## **1.5 Deterioraciones comunes en las uvas de mesa**

En este apartado se describirán algunos de los factores más comunes de la deterioración que existen en la uva durante la cosecha, transporte, almacenamiento y comercialización. Para esta sección se tomará como referencia lo descrito por Zoffoli y Latorre en el capítulo nueve “*Table grape (Vitis Vinifera L.), Post Harvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Food*”, 2011.

### **1.5.1 Factores bióticos**

#### **➤ Moho gris**

El moho gris (*gray mold*) es causado por el hongo *Botris cinérea*, y es la causa principal de la degradación de la uva en las etapas de cosecha y post-cosecha. Se caracteriza por una pérdida de color de la fruta a un marrón, además de pérdida de firmeza de la fruta y desprendimiento de la cascara. Es característico que bajo condiciones de humedad se forme un moho gris que cubre toda la baya, el cual puede llegar a contaminar a otras bayas a través del aire, lluvias y algunos insectos pueden llegar a esparcir este hongo a otros cultivos. Este hongo puede permanecer latente durante etapas tempranas de la cosecha y recién aparecer en la madures, incluso puede aparecer durante el almacenamiento en frío. Una sola baya infectada puede infectar a un paquete entero de bayas, la infección se anula bajo condiciones secas y usando un tratamiento de  $SO_2$  durante el almacenamiento en frío generalmente a  $-0.5^{\circ}C$ . En la



Figura 1.8 Uva infectada por el hongo *Botrytis Cinérea*.

Nota. Tomado de “Enfermedades de la Vid” por Instituto de Investigaciones Agropecuaria (IIA, Chile), 2016.

➤ **Moho azul**

Es causado por el hongo *Penicillium expansum*, el cual no es solo característico de las uvas sino en diversas frutas como manzanas, peras, entre otras. Esta infección se caracteriza por una decoloración de la cascara de la fruta a un marrón claro, seguida de una putrefacción que puede llegar a afectar rápidamente a la baya. Cuando la putrefacción alcanza la superficie se forma el moho azul, característico de su nombre. Esta infección puede iniciarse durante la cosecha, empaquetado o incluso en el almacenamiento en frío, está asociado a bayas con “heridas abiertas”, estas bayas infectadas pueden infectar a otras por medio del aire o del contacto. Un espacio refrigerado bajo 0°C puede contrarrestar esta infección.

➤ **Otras infecciones por hongos**

Infecciones como *Rhizopus* y *Aspergillus* causan lesiones en bayas con heridas, produciendo decoloración de la cascara, fisuras, pérdida de agua y la aparición de moho en las bayas infectadas. Estas infecciones son controladas rápidamente por un enfriamiento por debajo de 4°C. Por otro lado, la infección de *Cladosporium* ocurre generalmente en uvas almacenadas en frío por más de 60 días, se caracteriza por lesiones de necrosis con un color verde oscuro. Esta infección se controla con temperatura del cuarto por debajo de 0°C.

### 1.5.2 Factores abióticos

#### ➤ Desprendimiento de las uvas

Se caracteriza por la separación de las uvas de su racimo, el desprendimiento aumenta con la madurez de la uva y es muy común en cultivos de uvas sin semilla como la Thompson Seedless y Flame Seedless, también afecta a cultivos con baja presencia de semillas como la Red Globe. El desprendimiento aumenta considerablemente durante el empaquetado por el manejo brusco de las uvas durante este proceso. Otro tipo de desprendimiento causado por la pérdida de agua es muy común en la Thompson Seedless la causa es el manejo brusco en la etapa de empaquetado

#### ➤ Decoloración de la cascara y pulpa

La decoloración marrón de las bayas está asociado al manejo brusco del empaquetado y cosecha, pero esta decoloración se incrementa después del almacenado en frío, especialmente en las uvas expuestas al sol. Se ha demostrado que la incidencia a la decoloración marrón aumenta con la cantidad total sólidos solubles es mayor a 18% (TSS > 18%) o cuando la cantidad de ácido titulable es menor a 0.6% (TA ≤ 0.6%) (Zoffoli y Latorre, 2011, p.191, Ch.9).

#### ➤ Blanquimiento y rajado de la baya

El blanquimiento y el rajado de la uva se debe al tratamiento de  $SO_2$ , el primero se caracteriza por una pérdida de color de la baya que empieza desde el racimo y se va esparciendo hasta llegar a la baya, en especial el cultivo de la Red Globe es muy susceptible a esta deterioración. El rajado se produce por altas concentraciones y sobreexposición de  $SO_2$ , y se caracteriza por finas rajaduras longitudinales; se ha observado que cuando el tiempo de concentración (CT), excede los  $3 \frac{mL}{Lh}$  aumenta la cantidad rajaduras en las bayas (Zoffoli y Latorre, 2011, p.189, Ch.9). A continuación, en la Figura 1.9 se muestra el efecto de la sobreexposición al tratamiento de  $SO_2$  en la uva Thompson Seedless, recogido de “Hairline, a

*postharvest cracking disorder in table grapes induced by sulfur dioxide*”, Zoffoli, Latorre y Naranjo, 2008.



Figura 1.9 Rajado en las uvas (Thompson Seedless) por la sobreexposición de SO<sub>2</sub>  
 Nota. Tomado de “Hairline, a postharvest cracking disorder in table grapes induced by sulfur dioxide” por Zoffoli et al, 2008.

### ➤ **Deshidratación**

La deshidratación de los organismos vivos es causada por la transpiración, en condiciones de altas temperaturas y baja humedad las pérdidas de agua por transpiración aumentan. Sin embargo, materiales en el empaquetado como el polietileno pueden incrementar la humedad en las uvas. Por ejemplo, en el cultivo de Red Globe se tiene que se pierde 1.8% de agua por día durante la cosecha y el transporte, 1.33% durante el empaquetado. 1.09% durante la espera para el enfriamiento con aire forzado, 0.99% durante el enfriamiento y 0.0054% por día durante el almacenamiento a 0°C (Zoffoli y Latorre, 2011, p.189, Ch. 9). Por este motivo es muy importante actuar de manera rápida después de la cosecha para evitar la excesiva pérdida de agua.

## 2 CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

Las frutas, verduras o perecibles en general están expuestos a condiciones desfavorables, como temperatura a condiciones ambientales extremas, para su conservación. En ese sentido, es necesario establecer unas condiciones de adecuadas para su conservación adecuada, el pre-enfriamiento y el congelamiento de la comida reduce de manera eficaz la degradación de los productos. Como regla general demorarse en enfriar el perecible una hora, significaría reducir un día el tiempo que un producto puede conservarse (Elsanari A., Fenton D., Callahan C., 2019). En este capítulo se revisará las principales tecnologías comerciales enfriamiento y congelamiento que se usan para diversos productos. Además, se hará énfasis del en el tipo de enfriamiento más adecuado para la uva de mesa; así como, se abarcará los parámetros que se tiene que considerar para su adecuada preservación.

### 2.1 Tipos de pre-enfriamiento comerciales

El pre-enfriamiento es remover de manera rápida y eficaz el calor de superficial de los perecibles que hayan sido cosechados recientemente. Esto se hace antes de su almacenamiento, envío de exportación o procesamiento. Lo ideal es actuar de manera pronta para evitar el crecimiento de microorganismos que promuevan la deterioración del perecible. En el caso de las frutas y verduras, reducir la respiración, transpiración y remover el superficial es fundamental para evitar marchitez o pérdidas excesivas de agua. En ese sentido, se revisará algunos de los tipos de pre-enfriamiento comerciales más comunes, tomando como referencia el capítulo 28 “*Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers*” del ASHRAE Refrigeration ,2018.

#### 2.1.1 Enfriamiento por *Hydro-Cooler*

El producto puede ser enfriado de dos formas: rociando agua fría al producto o sumergiendo el producto en una batea con agua enfriada. Este método tiene la ventaja de ser económico, rápido efectivo, además tiende a hidratar al producto lo que puede ser beneficioso. Sin embargo, solo unas cuantas frutas y verduras pueden soportar este enfriamiento Esto se

debe a que este método puede causar daños en los productos. Así como el agua que recircula tiene que recibir un tratamiento adecuado para evitar el crecimiento de microorganismos que afecten al producto. Cítricos, manzanas o frutas de racimo como la uva no suelen usar este método de enfriamiento. Entre las frutas y verduras más comunes que se enfrían por este método son: las paltas, zanahorias, mangos, maíz, durazno, apio, pepinillo, entre otros. Como se mencionó anteriormente hay dos maneras de enfriar el producto ya sea rociando agua o por inmersión en agua fría. A continuación, se hará una breve descripción de cada una.

➤ **Hydro-Cooler de tipo aspersor**

Generalmente tiene un flujo continuo, en el cual el producto se mueve a través del *Hydro-Cooler* por una banda transportadora, en la cual se rocía agua enfriada por un sistema de refrigeración simple. Este consiste en tubos finos por el cual pasa un refrigerante el cual tiene la función de enfriar el agua a temperaturas de alrededor  $1^{\circ}\text{C}$  a  $0.5^{\circ}\text{C}$  (AHSRAE,2018, Ch.28). Luego esta agua se distribuye a través de rociadores colocados a lo largo de la banda el agua cae por gravedad hacia el producto, finalmente es agua es recolectada y vuelve a empezar el ciclo. En la Figura 2.1 se muestra un esquema.

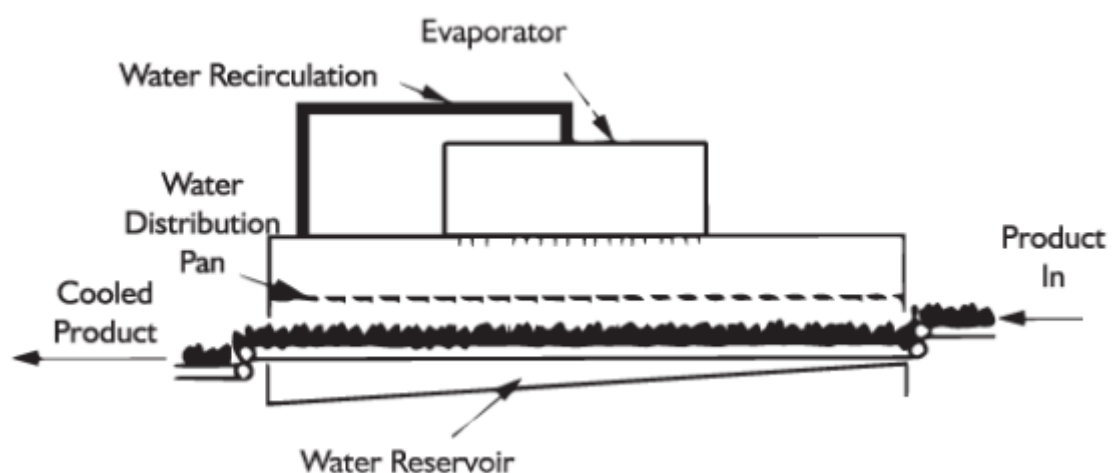


Figura 2.1 Esquema de un hidrocóler de tipo aspersor.  
Nota. Tomado de página web “Hydrocooling Chillers”, 2016.

### ➤ *Hydro-Cooler* de inmersión

Este método consiste en un tanque o batea que contiene agua enfriada y que es agitada al mismo tiempo para mejorar la transferencia de calor, para enfriar el agua se usa generalmente un sistema de refrigeración de amoníaco(R-717) o R-22, que tiene una temperatura de evaporación de alrededor de  $-2^{\circ}\text{C}$ , llegando a enfriar el agua a  $1^{\circ}\text{C}$  a  $0.5^{\circ}\text{C}$ , se recomienda una velocidad del agua entre  $75 - 100 \text{ mm/s}$  (AHSRAE,2018, Ch.28). Este sistema se usa generalmente para grandes y medianos volúmenes de producción con flujo continuo.

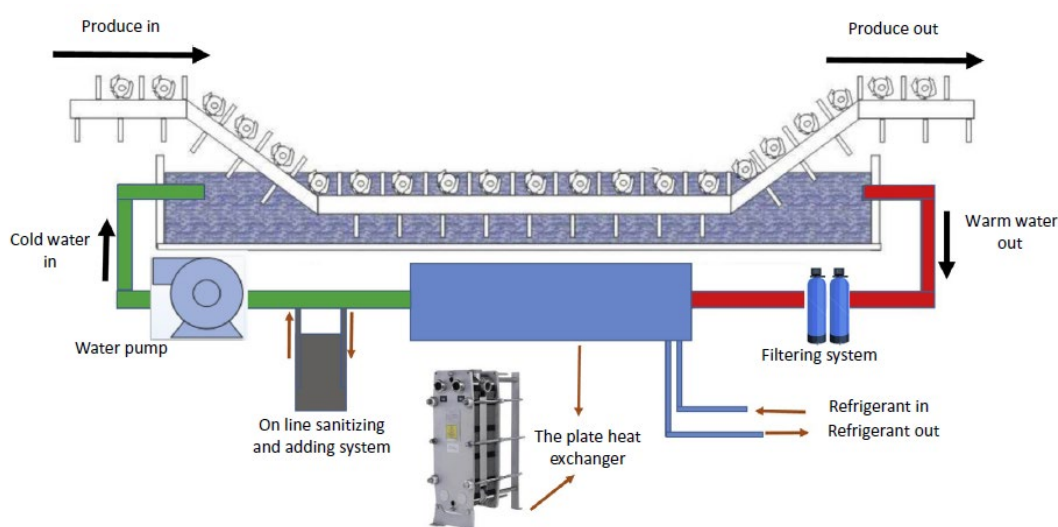


Figura 2.2 Esquema de un hidrocóler de inmersión.

Nota. Tomado de “Post Harvest Technology of Perishable horticultural commodities”, Ch.6 “Precooling”, por Elnasari et al., 2019.

En la Figura 2.2 se presenta un esquema de un *Hidro-Cooler* por inmersión el cual usa un intercambiador de placas para enfriar el agua en el tanque, además es muy usual que presenten un sistema de recirculación de agua para poder ahorrar energía. Ambos sistemas tanto como el enfriamiento por inmersión y por aspersion requieren de un tratamiento del agua que recircula para evitar la contaminación cruzada. Para este tratamiento se usa generalmente cloro a una razón de 50 a 100 mg/kg de agua (Elsanari A. et al., 2019).

### 2.1.2 Enfriamiento al vacío

Este método se realiza de manera discreta; es decir, por lotes o bultos en donde el producto se enfría, dentro de una cámara, mediante vapor de agua a muy baja presión. La

cámara está a una presión por debajo de la presión de saturación a la más baja del agua que requiere. El principio de funcionamiento es que el calor necesario para evaporizar el agua a una presión tan baja sea suministrado por el producto. De esta manera, se consigue bajar la temperatura al producto de manera rápida. Las cámaras de enfriamiento a vacío generalmente operan a una presión de vacío correspondiente a la presión de saturación a la temperatura de 0°C, la cual es 0.610 kPa (AHSRAE,2018, Ch.28). El producto entra a la cámara a temperatura ambiente, una vez sellada la cámara la presión comienza a bajar a temperatura constante, hasta que llega a la presión de saturación de la temperatura inicial donde el agua se comienza a evaporar y la temperatura del producto comienza a descender. Generalmente este proceso demora 20 a 40 minutos para bajar la temperatura de 27°C a 2°C y con una pérdida de agua del producto del 1% por cada 11°C de diferencia de temperatura. (Elsanari A. et al., 2019). A continuación, en la Figura 2.3 se muestra una cámara de enfriamiento a vacío para vegetales.



Figura 2.3 Cámara de enfriamiento a vacío para vegetales  
Nota. Tomado de la página web de “WeberCooling”

El enfriamiento a vacío se aplica para productos donde la tasa de respiración y la razón de área superficial sobre volumen sean altos, productos con alto contenido de agua o humedad



o como las uvas, tomates o pepinillos no son recomendados para este tipo de enfriamiento, pues puede causar daños al producto.

### **2.1.3 Enfriamiento por convección natural de aire**

Este tipo enfriamiento se encuentra en grandes almacenes refrigerados, donde se tiene una atmosfera controlada para la preservación de los productos. Este método tiene la ventaja de poder enfriar una gran cantidad y variedad de alimentos o frutas; sin embargo, el tiempo en el que se logra la temperatura deseada puede tomar días, este inconveniente genere grandes pérdidas de agua en algunos tipos de frutas o verduras y por consiguiente pérdida de materia prima. Este método de enfriamiento es muy común para manzanas, donde son almacenadas en jabs con agujeros para facilitar el paso del aire. Generalmente estos almacenes grandes trabajan a través de un sistema de refrigeración simple de expansión directa. El cuarto de enfriamiento requiere una distribución homogénea de aire entre 60 a 120 m/min, teniendo un tiempo de enfriamiento a la mitad de 36 a 108 horas (Elsanari A. et al., 2019). Esto quiere decir que considerando una temperatura inicial de los productos a 25 °C y se requiere al final del enfriamiento una temperatura de 2°C, se va a demorar de 36 a 108 horas en que el producto pueda alcanzar una temperatura de 12 a 13 °C. Debido al que el aire tiende a absorber humedad en las frutas o verduras ocasionando pérdida de agua y por ende de calidad del producto. En estos casos es necesario analizar la necesidad de usar un sistema de humidificación el cual permita mantener la humedad relativa del cuarto dentro de un rango permitido. En la Figura 2.4 se muestra un espacio refrigerado con diversos productos.



Figura 2.4 Cuarto grande de enfriamiento por convección natural

*Nota.* Tomado de “Post Harvest Technology of Perishable horticultural commodities”, Ch.6 “Precooling”, por Elnasari A. et al., 2019.

#### 2.1.4 Enfriamiento por aire forzado

Estos tipos de enfriamiento varían esencialmente en la forma en la que el aire pasa a través del producto, este proceso se realiza generalmente con el producto ya empaquetado. Y es muy común en almacenes grandes donde se dispone de una pared con un ventilador en la parte superior el cual suministra aire enfriado el cual pasa a través del producto. A continuación, se hará una breve descripción de las configuraciones de este tipo de enfriamiento, tomando como referencia el artículo “*Forced-Air Cooling System for Fresh Ontario Fruits and Vegetables*”, H. Freaser, 2014.

##### ➤ Enfriamiento por túnel

Es el enfriamiento más común es donde el aire pasa en dirección horizontal a través del producto, luego un ventilador extrae el aire caliente y lleva este aire al evaporador donde se enfría y comienza de nuevo el ciclo. Este tipo enfriamiento es muy común usar cartón corrugado como contenedor de la fruta. En la Figura 2.5 (izquierda) se muestra el esquema de esta configuración.

➤ **Enfriamiento con flujo cruzado**

Esta configuración solo funciona cuando las jabas o contenedores de plástico cuentan con espaciamientos en la base para ser levantados por un patín. Estos espacios son útiles para que el aire pase a través de ellos y enfríen el producto. En la Figura 2.5 (derecha) se representa esta configuración.

➤ **Enfriamiento con flujo de aire vertical**

En esta configuración se usa jabas o contenedores de plástico con agujeros que permitan el paso del aire a través del producto, el cual no está todavía empacado aun, el flujo de aire es vertical desde arriba hacia abajo gracias a un ventilador situado en la base, que genera un diferencial de presión. Finalmente, el aire caliente sale a través de los agujeros de la base del pallet. En la Figura 2.5 (derecha) se muestra el esquema de esta configuración.

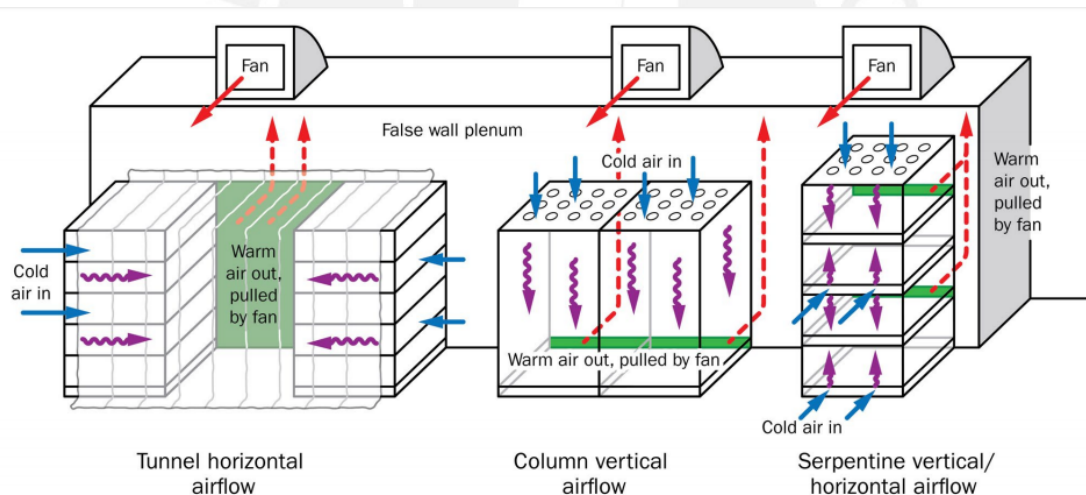


Figura 2.5 Esquemas de los tres tipos de enfriamiento por aire forzado.

*Nota.* Tomado de "Forced-Air Cooling System for fresh Ontario Fruits and Vegetables", por Fraser, 2014.

El recorrido del aire para la configuración por túnel (izquierda), el aire pasa por los costados del producto de manera horizontal, el cual regresa al evaporador a través de un ventilador, en la parte de atrás, que genera una diferencia de presión. Para la configuración de flujo vertical, aire fluye de arriba hacia abajo mediante un ventilador en la parte baja; los 3 laterales son tapados con plástico para direccionar el aire. Finalmente, para la configuración con flujo de aire cruzado (derecha), el aire se mueve a través de los espacios en las bases de las

jabas, los laterales de los costados son tapados con un plástico para direccionar el aire. El diferencial de presiones causado por el ventilador puede variar de 30 a 50  $mm H_2O$  con respecto al ambiente y a velocidades de aire de 1 a 3.5 m/s (FAO 2005).

## 2.2 Tipos de congelamiento comerciales

En la sección 2.1 se describieron algunos de los métodos más comunes para enfriar vegetales o frutas en general. Cabe mencionar que este enfriamiento también es conocido como un pre-congelamiento, pues se busca enfriar el producto a una temperatura por encima de temperatura de inicio de congelamiento. La temperatura de inicio de congelamiento es la temperatura de a la cual el agua al interior de la comida comienza a formar cristales de hielo, generalmente esto ocurre en un rango de temperaturas entre  $-1^{\circ}C$  a  $-3^{\circ}C$ , va depender de las propiedades de la comida que se quiera congelar. Se puede definir el proceso de congelamiento por el cual se trata de preservar la comida sin causar cambios significativos la calidad del producto o en su valor nutricional, esto se logra llevando al producto por debajo de su temperatura inicial de congelamiento mediante sistemas de refrigeración mecánicos o criogénicos (Fellows, 2017, Ch.22). En esta sección se describirán algunos de los métodos más comunes para congelar frutas o verduras, basándose en el capítulo 29 “*Industrial food-freezing systems*” del ASHRAE Refrigeration ,2018.

### 2.2.1 Congeladores por contacto directo

El calor es transferido desde el producto hasta las superficies metálicas por conducción, se puede emplear tanto con comida sin empaquetar o de igual manera con la comida ya empaquetada. El tipo más común es congelador de platos, en donde el producto es sometido a la presión de dos superficies metálicas, las cuales son enfriadas mediante un refrigerante que pasa a través de los canales de las superficies o a través del mismo aire del espacio refrigerado. Los materiales de las superficies pueden ser acero inoxidable o aluminio, las cuales tienen un grosor de 2.5 – 5 cm, a través del cual fluye el refrigerante evaporándose dentro de los platos

absorbiendo el calor del producto. La presión ejercida mejora la transferencia de calor y en el caso de productos empaquetados, evita el ensanchamiento del empaque. La ventaja del uso de este método de congelamiento son los costes bajo de operación comparados con otros sistemas de refrigeración, corto tiempo de congelamiento y tiene un efecto despreciable en la pérdida de agua del producto (Fellows, 2017, Ch.22). Productos planos y delgados como filetes de carne de pescado, res o pollo son congelados por este método u otros productos como espinaca cortada y empaquetada son congelados por este método (AHSRAE,2018, Ch.29). Existen dos tipos de configuraciones congeladores de platos vertical y horizontal. La selección de uno va a depender del estado del producto a congelar, si este empaquetado, mojado, si se quiere congelar en bloques, entre otros. A continuación, las Figuras 2.6 y 2.7 se muestran congeladores de plato horizontal y vertical respectivamente.



Figura 2.6 Congelador de placas horizontal.

*Nota.* Tomado de pagina web de “DSI FREEZING SOLUTIONS”



Figura 2.7 Congelador de placas vertical.

*Nota.* Tomado de pagina web de “DSI FREEZING SOLUTIONS”

### 2.2.2 Congeladores criogénicos

Estos tipos de congeladores rocían gotas de nitrógeno líquido a  $-195^{\circ}\text{C}$  al producto en pequeñas gotas de tal manera que todo el producto este cubierto, las gotas al entrar en contacto con el producto se evaporan el calor latente de evaporización genera coeficientes de cambio de fase altos, los cuales generan una rápida transferencia de calor congelando rápidamente al producto. El vapor que se genera recircula la cámara enfriando a los productos por convección. Este tipo de congeladores son muy usados para un Congelamiento rápido de productos individuales o por sus cifras en ingles IQF (Individual Quick Frozen). Diversas frutas, verduras cortadas (brócoli, coliflor, hongos, etc), camarones, son congelados de manera individual a través de un túnel donde se rocía el nitrógeno líquido a muy baja temperatura. Este tipo de congeladores aseguran un congelamiento rápido, eficiente y que no afecta en gran medida a la calidad del producto como sabor o pérdidas de agua. La ventaja de estos congeladores es el bajo costo de capital que tiene con respecto a los congeladores de aire, y al menor consumo de energía, pues no tienen componentes mecánicos como compresores o un evaporador. Sin embargo, tiene un alto costo de operación, debido al costo de los fluidos criogénicos y sus altos consumos, pues estos no se pueden recircular y se pierden en la atmosfera. Otro liquido criogénico que se usa es el dióxido de carbono, el cual tiene un comportamiento distinto al nitrógeno líquido. El  $\text{CO}_2$  en estado líquido se expande y cambia de estado a sólido y a gaseoso en partes iguales en peso. La mezcla aire y  $\text{CO}_2$  circula por la cámara enfriando el producto por conducción. Existe una gran variedad de configuraciones de para tanto para congeladores de nitrógeno líquido como de dióxido de carbono. Entre estas están por túnel continuo, en lotes, helicoidales, inmersión, etc. A continuación, se muestra en la Figura 2.8 un congelador criogénico desarrollado por Praxair INC.



Figura 2.8 Congelador criogénico (IQF)

*Nota.* Tomado de pagina web de “PRAXAIR”

### 2.2.3 Congeladores por aire forzado

#### ➤ Congeladores de lecho fluidizado

La combinación de bajas temperaturas a altas velocidades, que generan altos coeficientes colectivos en pequeños productos por separado, resultan en un enfriamiento efectivo y rápido. En estos sistemas el aire fluye hacia verticalmente hacia arriba a través de la banda que tiene una malla con agujeros, por la cual pasa el aire y enfría al producto. El flujo del aire mantiene al producto flotando, obteniendo una buena transferencia de calor. Este tipo de congelador resulta un proceso de congelamiento rápido para productos que tengan una forma y tamaño adecuado para que se congelen de la manera descrita anteriormente. (Heldman & Singh, 2009, Ch.7). En la Figura 2.9 se muestra un esquema de congelador de lecho fluidizado.

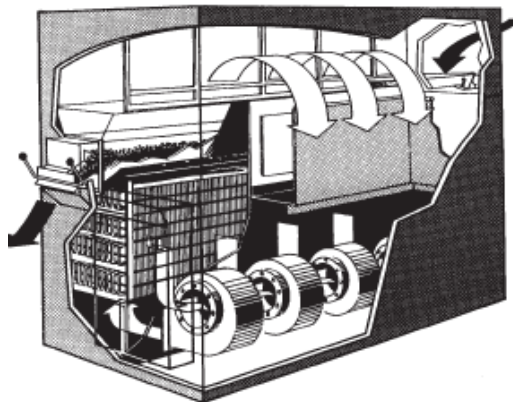


Figura 2.9 Esquema de congelador de lecho fluidizado.

*Nota.* Tomado de “Introduction to food engineering”, Ch.7 “Food Freezing”, por Heldman y Singh, 2009.

➤ **Congeladores por banda transportadora**

Consiste en una banda transportadora, que garantiza un flujo continuo, pasa a través de un espacio refrigerado, el cual el aire congela al producto. Para esta distribución se usa un flujo de aire vertical o horizontal con dos pasos de la faja por el espacio refrigerado para optimizar el proceso. Existen diversos tipos de configuraciones, según el requerimiento del producto a congelar. Por ejemplo, para productos con un largo tiempo de enfriamiento y que son delicados, se recomienda una configuración helicoidal con flujo horizontal del aire. Esto va a permitir reducir el espacio necesario para congelar el producto y si el tiempo de congelamiento es muy largo se pueden poner en serie dos congeladores de espiral. Productos como papas cortadas, pollo recortado o camarones usan este método de congelamiento

➤ **Congeladores de túnel estacionario**

Esta configuración es la más simple, consiste en una cámara refrigerada la cual tiene una gran carga térmica para poder congelar el producto, Además cuenta con ventilador el cual fuerza al aire a pasar a través del producto. La ventaja de este tipo de configuración es que para pequeños volúmenes es muy efectivo y versátil; sin embargo, no es recomendable para grandes volúmenes pues se tiene un flujo del producto lento. Gran cantidad de productos se pueden congelar por este método

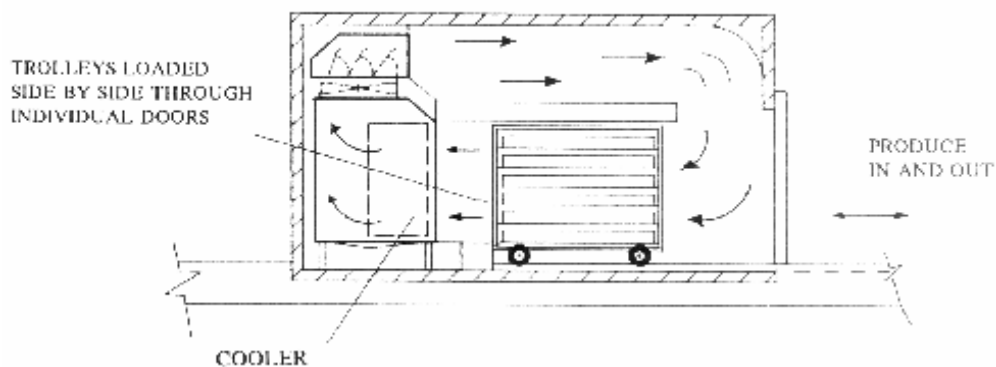


Figura 2.10 Esquema de congelador de aire forzado estacionario.

*Nota.* Tomado de "Freezers. Freezing and Refrigerated storage in fishseries" por Food and Agriculture of the United Nations (FAO), 1994.



## 2.3 Tratamiento de frío para la uva de mesa

### 2.3.1 Propiedades térmicas de la uva

Como se mencionó en el apartado 1.1 la especie *Vitis vinifera L.* es una especie que se cosecha y produce para el consumo en fresco. Esta especie tiene características que hacen que tengan una mejor resistencia al transporte, manejo y almacenado para su posterior consumo. Es este tipo de uva que pasa por un tratamiento de frío para su mejor conservación. Las uvas deben ser rápidamente enfriadas para evitar pérdidas de agua que dañen la calidad del producto. Las uvas una vez cosechadas son empaquetadas para su posterior enfriamiento, para productos empaquetados se prefiere el uso de aire forzado. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra la composición y algunas propiedades térmicas de la uva (AHSRAE,2018, pp.19.4, Ch.19).

Tabla 2.1 Composición y propiedades térmicas de la uva

Ítem	Valor
Fracción másica Humedad (%)	81.3
Fracción másica Proteína (%)	0.63
Fracción másica Grasa (%)	0.35
Fracción másica Carbohidrato (%)	17.15
Fracción másica Fibra (%)	1.0
Punto Congelamiento inicial (°C)	-1.6
Calor específico por encima del punto de congelamiento inicial [kJ/(kg.K)]	3.71
Calor específico por debajo del punto de congelamiento inicial [kJ/(kg.K)]	2.07
Calor latente de fusión (kJ/kg)	272

*Nota.* Tomado de AHSRAE Handbook Refrigeration, Ch.19 “Thermal Properties of food”, 2018

La uva en condiciones de ambiente controladas tiene una baja velocidad respiración. que está ligado a la baja producción de etileno, además tiene una baja sensibilidad al etileno, es

(ASHRAE,2018, pp. 21.5, Ch.21). Esta característica favorece a la preservación de la fruta, teniendo un tiempo de vida considerable. A continuación, se mostrará en la Tabla valores de velocidad respiración.

Tabla 2.2 Valores de calor de respiración de la uva

Temperatura [°C]	Calor de respiración [mW / kg]	Referencia
0°C	5.8	ASHRAE. Ch.19, 2018
	2.93 - 5.86 *	FAO, 2005
5°C	14.1	ASHRAE. Ch.19, 2018
	8.79 - 11.2 *	FAO, 2005
10°C	22.8	ASHRAE. Ch.19, 2018
	14.65 - 23.44 *	FAO, 2005

\*Valores convertidos de  $\frac{mL CO_2}{kg.hr}$  a  $\frac{mW}{kg}$ .

Nota. Elbaoración propia.

### 2.3.2 Velocidad de enfriamiento y almacenamiento en frio

#### ➤ Velocidad de enfriamiento

Dincer I. en su investigación “Air Flow Precooling of Individual Grapes” publicada en 1994 analizo la influencia del tiempo de enfriamiento para velocidades 1.0, 1.25, 1.50, 1.75 y 2.0 m/s para 5 kg de uvas a temperatura del aire de 2 m/s. El experimento fue realizado bajo condiciones controladas y en una cámara de 1x1x2 m de dimensiones exteriores. El evaporador estaba ubicado en la zona superior de la cámara y el aire era forzado a pasar a través de la cámara por el diferencial de presión causado por un ventilador en la zona más baja de la cámara. Los resultados mostraron que aumentar la velocidad del aire de 1 a 2 m/s se redujo el tiempo de enfriamiento de siete-octavos a 23.6% (Dincer, 1994). Por otro lado, incrementar la velocidad de por encima de 3.5 m/s pueden dañar las uvas y dañar los materiales usados en el empaquetado (FAO 2005). Las uvas se suelen enfriar hasta 4°C para luego pasar los almacenes en frio para que se termine de enfriar a temperaturas de -0.5 a -1.0 °C, donde el flujo de aire en el cuarto es de alrededor de 52 L/s por tonelada de producto. (ASHRAE, 2018, Ch.35). Las velocidades dentro estos almacenes son más bajas, dando como resultado un tiempo de

enfriamiento mucho más largo y por consiguiente una mayor pérdida de agua durante el enfriamiento lo cual no es favorable para la calidad de la uva. En la siguiente sección se entrará a más detalle sobre las condiciones de almacenamiento en frío.

➤ **Condiciones de almacenamiento en frío**

El mayor peligro para las uvas es la pérdida de agua, cuyo efecto se ve reflejado la descoloración y deshidratación de la del racimo de la uva a un marrón. Esto sucede cuando la uva ha perdido de 1 a 2% de agua en porcentaje masa. Cuando la uva pierde de 3 a 5% de agua la pulpa pierde textura y puede desprenderse del racimo. es El cuarto de almacenamiento en frío debe estar bajo una humedad relativa de 90 a 95 %. La temperatura recomendada de almacenamiento es de -1°C, incluso a temperaturas de -1.7°C a -2.0°C no se ha presentado problemas. (ASHRAE, 2018, Ch.35; FAO 2005). Las velocidades dentro de los cuartos de almacenamiento son bajas como ya se mencionó anteriormente. estas pueden ir de 0.05 a 0.1 m/s cuando se encuentren a la temperatura del cuarto. Sin embargo, cuando las uvas se encuentran dentro de bolsas, se tiene que aumentar la velocidad entre 0.2 a 0.3 m/s, para facilitar la evacuación del calor debido a la respiración (FAO 2005). En la Tabla 2.3 se presenta una recopilación de los parámetros más relevantes presentados en esta sección

Tabla 2.3 Parámetros para enfriar y almacenar la uva fresca

Parámetro	Valor	Referencia	Observación
Velocidad de aire forzado [m/s]	2.0	(Dincer, 1984) ;( ASHRAE, 2018, Ch. 19)	
	1.0 a 1.5	(Zoffolli,2011)	
	1 a 3.5	(FAO,2005)	3.5 m/s valor máximo
Temperatura de almacenamiento [°C]	-0.5 a -1.0	(ASHRAE, 2018, Ch. 35)	
	-0.5 a -2.0	(FAO,2005)	hasta -1.7 °C
	0.0 a -1.0	(Zoffolli,2011)	
Humedad relativa [%]	90 - 95	(ASHRAE, 2018, Ch. 35)	
	92 - 95	(FAO,2005)	
	0.05 a 0.1	(ASHRAE, 2018, Ch. 35)	
	0.1 a 0.2	(Zoffolli,2011)	

Velocidad de aire en el almacén [m/s]	0.2 a 0.5 (FAO,2005)	uvas en bolsas de polietileno (polybag)
Tiempo de vida después de cosecha	1 a 6 meses (ASHRAE, 2018, Ch. 21) 3 a 6 meses (HELDMAN et al., 2007, Ch. 4)	

*Nota. Elbaoración propia.*

### 2.3.3 Influencia del empaquetado

Una variable fundamental en el proceso de enfriamiento y preservación de la uva es el empaquetado. En el estudio de Mduduzi et al. “Performance of multi-packing for table grapes based on airflow, cooling rates and fruit quiality” publicado en el 2013; se tomó tres arreglos comunes de empaquetado de uvas para analizar su influencia en el flujo de aire, los tiempos de enfriamiento y calidad de la uva, la cual que se midió en base a la cantidad de perdida de agua después de 35 días de almacenamiento. Los tres arreglos que se tomaron fueron en (a) cajas de cartón corrugado de 4.5 kg, donde las uvas estaban dentro de bolsas de polietileno como en la Figura 1.3; (b) cajas de cartón corrugado de 5 kg, en lugar de bolsas de polietileno se usaron empaques plásticos rígidos (*clamshell punnets*); (c) cajas de cartón corrugado de 5 kg, donde los empaques rígidos se dejaron abiertos. El estudio se llevó a cabo dentro un almacén de frio con una temperatura de  $-0.5^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa de 95 %. Se usó un pallet de 1 m x 1.2 m donde para cada configuración se enfrió un total de 225 kg de uvas.

Los resultados mostraron que para la configuración (a) cajas de 4.5 kg y con bolsas de polietileno; un aumento considerable del tiempo de enfriamiento de siete-octavos de 30.30 a 46.14 % y 12.69 a 25.00 % con respecto a la configuración (b) y (c) respectivamente (Mduduzi et al., 2013), esto se puede debe a que las bolsas de polietileno ofrecían una mayor resistencia al flujo de aire que los empaques rígidos, dificultando la trasferencia de calor. Por otro lado; después de 35 días de almacenamiento a  $-0.5^{\circ}\text{C}$  se observó que las configuraciones de 5 kg (b) y (c) tenían una pérdida de agua de 2.01 a 3.12% a diferencia de la configuración (a) de 4.5 kg

solo presentaba una pérdida de agua de 1.08% (Mduduzi et al., 2013). Estos resultados pueden marcar la diferencia entre usar un tipo de empaque u otro.

#### **2.3.4 Tratamiento de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

Como se ha descrito en la sección 1.4 existen diversos hongos, como *B. cinérea*. que pueden llegar a infectar a la uva de manera grave. El tratamiento con SO<sub>2</sub> se usa para evitar el esparcimiento de infecciones. Pues, Este tratamiento protege de manera superficial a la uva, cuando tiene alguna “herida” producida durante el transporte o manejo (AHSRAE, 2018, Ch.35); de esta manera, evita las infecciones de uvas sanas, además reduce el descoloramiento del racimo ayudando a mantener la apariencia por un periodo de tiempo más largo (Zoffolli, 2011). Se necesita un tratamiento inicial de SO<sub>2</sub> antes de pasar al empaquetado, esta operación se realiza en campo o en la sala de procesos cuando la uva aún no está empaquetada y a una temperatura ambiente. Este proceso puede ser realizado con pistolas de inyección de SO<sub>2</sub> donde la cantidad recomendada es de 60 ml de SO<sub>2</sub> por cada 8 kg de producto (Zoffolli, 2011). El tratamiento después del empaquetado, puede llevarse a cabo en grandes almacenes en frío o en la etapa de enfriamiento con aire forzado. Para el primer caso, los ventiladores deben dar una velocidad de por lo menos 0.7 m/s para las primeras 1 a 2 horas, para asegura una buena penetración en las uvas. Si se llevase a cabo bajo condiciones de aire forzado se requiere un flujo de aire de por lo menos 0.5 L/s por kg de producto. Esta es la manera más efectiva de proceder con el tratamiento, pues se aprovecha el tiempo que la fruta está dentro de la cámara enfriándose mientras se puede esperar una buena absorción del gas en la fruta. Para esta fase inicial del tratamiento después del empaquetado se permite una concentración de SO<sub>2</sub> máxima de 10 000 mg/kg a 5 000 mg/kg (AHSRAE, 2018, Ch.35). Es necesario llevar a cabo el tratamiento semanalmente para contralar posibles infecciones en la fruta, concentraciones de 5 000 mg/kg a 2 500 mg/kg con una tasa de 100 mg/kg.h para tiempos de almacenamiento prolongados (AHSRAE, 2018, Ch.35). En la sección 35.9 del ASHRAE, 2018 se muestra una

ecuación con la cual se puede estimar la cantidad de  $\text{SO}_2$  (kg) en base a las cantidades de cajas que hay, el tipo de material de esta y el flujo del aire (aire forzado o por convección natural). Para remover el  $\text{SO}_2$  de la atmosfera del almacén de refrigeración se usa una torre de lavado de agua, por donde se succiona el  $\text{SO}_2$  por la parte baja del almacén llevándolo hacia la torre de lavado, donde se rocía agua por la parte arriba donde el  $\text{SO}_2$  se solubiliza en el agua (FAO, 2005). Actualmente se explora otras alternativas, el uso de parches que al contacto de con la humedad liberan  $\text{SO}_2$  es muy usado en algunas instalaciones.



### 3 CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE TIEMPO DE ENFRIAMIENTO

#### 3.1 Caracterización de la uva

El análisis del tiempo de enfriamiento requiere determinar las propiedades físicas y térmicas de la uva. En caso de que la uva se enfríe por debajo del punto de inicio congelación para la uva  $T_{fo} = -1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se tendrá que considerar la fracción de hielo que se forma; es por esto que se considera dos estados cuando algún perecible se enfría por debajo de su punto inicial de congelamiento. Por otro lado, las dimensiones características que se puedan identificar en la uva van a ser esenciales para el modelamiento de la geometría de la uva, estas distancias se toman con respecto a su centro térmico. Un adecuado modelamiento y cálculo de las propiedades térmicas de la uva, significaría un correcto cálculo del tiempo de congelamiento para la uva. Cabe mencionar que las expresiones de cálculo para el tiempo de congelamiento corresponden a un enfriamiento con convección forzada mediante aire, este el método más adecuado para enfriar la uva como se definió en el capítulo anterior. Para el análisis del tiempo de enfriamiento se tomará como referencia a la uva Red Globe, al ser la uva con mayor demanda internacional.



Figura 3.1 Uva red globe empaquetada en bolsa de polietileno (polybag).

*Nota:* Tomado de página web de “AGRO RETAIL”

En la Figura 3.1 se muestra un empaque comercial de la uva Red Globe, en bolsas de polietileno o también conocido como polybag. Se observa pequeños agujeros en el empaque estos tienen la función de facilitar el paso del aire para enfriar el producto. Este tipo de embalaje es muy común y se usa tanto para la comercialización al exterior como al interior del país, así como se ha mencionado en el capítulo anterior. A continuación, en la Tabla 3.1 se muestra parámetros característicos de la uva Red Globe que van a ser necesarios para el cálculo del tiempo de congelamiento.

Tabla 3.1 Parámetros característicos de la uva Red Globe

Parámetro		
Dimensión más corta (m)	$L_1$	0.011
Dimensión más larga (m)	$L_2$	0.013
Segunda dimensión más corta (m)	$L_3$	0.012
Masa Promedio Racimo (kg)	$M_r$	0.5

Nota: Elaboración propia

Las dimensiones se definen desde el centro térmico de la uva hacia la superficie externa de esta. Como se mencionó anteriormente estas tres dimensiones van a permitir modelar una correcta geometría para el cálculo del tiempo de congelamiento. En la Tabla 3.2 se presenta las propiedades térmicas necesarias para el cálculo del tiempo de enfriamiento de la uva. Estas propiedades se han determinado siguiendo el manual AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (ch.19 2018) considerando que la temperatura de entrada  $T_i = 30^\circ\text{C}$  y temperatura final de enfriamiento del centro térmico de enfriamiento  $T_f = -2^\circ\text{C}$ . Como se puede observar en la Tabla 3.2 se hace una diferencia entre un estado antes y después del punto inicial de congelamiento, esto se debe a que a una temperatura por debajo del punto inicial de congelamiento  $T_{fo} = -1.6^\circ\text{C}$  comienza la formación de cristales de hielo en la uva cambiando de manera significativa sus propiedades como densidad, calor específico y conductividad



Tabla 3.2 Propiedades térmicas de la uva

Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor	
Fracción de hielo	$x_{ice}$	%	24.15	
Fracción de agua residual	$x_{wr}$	%	57.15	
Densidad	Por encima $T_{fo}$	$\rho_{unf}$	$kg/m^3$	1069
	Por debajo $T_{fo}$	$\rho_{fro}$	$kg/m^3$	1045
Calor específico	Por encima $T_{fo}$	$c_{unf}$	$kJ/kg.K$	3.656
	Por debajo $T_{fo}$	$c_{fro}$	$kJ/kg.K$	2.02
Conductividad	@-40°C	$k_s$	W/m.K	0.9145

*Nota:* Detalles del cálculo ver Anexo A1: Cálculo de propiedades térmicas de la uva.

### 3.2 Tiempo de enfriamiento

La ecuación de Plank (3.1) es una de las expresiones más conocidas para el cálculo del tiempo de enfriamiento de bebidas y alimentos perecibles, donde la transferencia de calor se asume que se da por convección entre el medio y el producto a enfriar, es donde se tendrá un coeficiente convectivo de transferencia de calor. Además, los factores geométricos P y R modelan la geometría del producto para superficies infinitas, cilindros infinitos y esferas, donde cada geometría tendrá su longitud característica D. En esta expresión se asume que el punto inicial de congelamiento es constante durante todo el proceso de congelamiento y una conductividad constante de la superficie del alimento congelado (AHSRAE, 2018, Ch.20, p.20.7).

$$\theta = \frac{L_f}{T_{fo} - T_m} \left( \frac{P * D}{h} + \frac{R * D^2}{k_s} \right) \quad \dots(3.1)$$

Donde:

- $\theta$  : Tiempo de congelación para una geometría dada (min)
- $L_f$  : Entalpía volumétrica de fusión del agua ( $J/m^3$ )
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento (-1.6°C)
- $T_m$  : Temperatura del medio (-15°C)
- $k_s$  : Conductividad de alimento completamente congelado@-40°C (W/m.K)
- $h$  : Coeficiente convectivo del medio ( $W/m^2.K$ )
- $P, R$  : Factores geométricos
- $D$  : Longitud característica (m)

La ecuación de Plank no es muy precisa por asumir que los alimentos se congelan a una temperatura constante, esto no es así en la realidad, pues el congelamiento ocurre en un rango de temperaturas. Otro punto es que la conductividad varía de manera significativa durante el congelamiento. En ese sentido, diversos autores han desarrollado una variedad de expresiones para la estimación del tiempo de congelamiento o enfriamiento. Estas expresiones se describen con gran detalle en el manual de AHSRAE-Refrigeration, “*Cooling and Freezing Times of Foods*” (ch.20, 2018), en esta sección se describirá la presentada por Cleand & Earle (1984), donde se usa factores geométricos para modelar la geometría del alimento que se quiera enfriar en este caso la uva, en su expresión se toma como referencia que el centro térmico del producto se encuentra a  $T_{ref} = -10^{\circ}\text{C}$ , sin embargo propusieron una segunda expresión para temperatura de centro térmico diferente a  $-10^{\circ}\text{C}$ , la cual se usará para el análisis del tiempo de enfriamiento (AHSRAE, 2018, Ch.20, p.20.7).

➤ **Tiempo de congelamiento de Cleland & Earle**

La ecuación 3.2 fue presentada por Cleand & Earle en 1984, y permite determinar el tiempo de enfriamiento para temperaturas finales del centro térmico diferentes de  $-10^{\circ}\text{C}$ , se puede observar que la fórmula solo funciona en un rango de temperaturas de medio ( $T_m$ ) menores a  $T_{ref}$ . Es decir, que solo es válido para temperaturas de medio menores a  $-10^{\circ}\text{C}$  esto por el componente de logaritmo neperiano, la temperatura del medio se puede interpretar como la temperatura de la cámara o del aire y para este análisis será de  $-15^{\circ}\text{C}$ . Los factores P y R son factores geométricos que se presentan en la Tabla 5 del ASHRAE Refrigeration (AHSRAE, 2018, Ch.20, p.20.8). Cabe mencionar que los factores P y R presentados en las ecuaciones 3.3 y 3.4 son para una geometría de una superficie infinita con espesor característico D.

$$\theta_{slab} = \frac{\Delta H_{10}}{T_{fo} - T_m} \left( \frac{P * D}{h} + \frac{R * D^2}{k_s} \right) \left( 1 - \frac{1.65 * Ste}{k_s} * \ln \left( \frac{T_C - T_m}{T_{ref} - T_m} \right) \right) \quad \dots(3.2)$$

$$P = 0.5072 + 0.2018 * Pk + Ste(0.3224 * Pk + \frac{0.0105}{Bi} + 0.0681) \quad \dots(3.3)$$

$$R = 0.1684 + Ste(0.2740 * Pk - 0.0135) \quad \dots(3.4)$$

Donde:

- $\theta_{slab}$  : Tiempo de congelación para una superficie infinita (min)
- $\Delta H_{10}$  : Diferencia de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial del producto y la de referencia ( $J/m^3$ )
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $-1.6^\circ C$ )
- $T_m$  : Temperatura del medio ( $-15^\circ C$ )
- $T_{ref}$  : Temperatura de referencia ( $-10^\circ C$ )
- $T_C$  : Temperatura del centro térmico ( $-2^\circ C$ )
- $k_s$  : Conductividad de alimento completamente congelado @  $-40^\circ C$  (W/m.K)
- $h$  : Coeficiente convectivo del medio ( $W/m^2.K$ )
- $Ste$  : Número de Stefan
- $P, R$  : Factores geométricos (Tabla 5,p.20.8, Ch.20, ASHRAE Refrigeration,2018)
- $D$  : Longitud característica para una superficie infinita, espesor (m)
- $Bi$  : Número de Biot
- $Pk$  : Número de Plank

Antes de determinar el tiempo de congelamiento se tienen que determinar los números adimensionales característicos en este caso Biot, Plank y Stefan.

#### ➤ Números adimensionales característicos

Numero de Biot se define como:

$$Bi = \frac{h * D}{k_s} \quad \dots(3.5)$$

Donde:

- $Bi$  : Número de Biot
- $h$  : Coeficiente convectivo del medio ( $W/m^2.K$ )
- $D$  : Longitud característica para una superficie infinita, espesor (m)
- $k_s$  : Conductividad @  $-40^\circ C$  (W/m.K)

El coeficiente convectivo que se se va tomar para el cálculo es  $h = 42 W/m^2.K$  el cual es tomado de la Tabla 13 del ASHRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (ch.19, p.19.26 ,2018,). Este valor de coeficiente convectivo corresponde a una velocidad del aire de

2 m/s una velocidad dentro del rango del recomendado. En el cálculo de tiempo de enfriamiento la longitud característica (D) se define como dos veces la distancia más corta desde el centro térmico hacia la superficie (ASHRAE, 2018, ch.20, p.20.7). Es decir, en el caso de la uva Red Globe, se tiene según la Tabla 3.1 la distancia más corta  $L_1 = 0.011 \text{ m}$  por lo que la longitud característica para la uva es  $D = 0.22 \text{ m}$ .

Remplazando valores en la ecuación 3.5

$$Bi = \frac{42 * (0.022)}{0.9145} = 1.01$$

Número de Plank se define:

$$Pk = C_{unf}^v \frac{(T_i - T_{fo})}{\Delta H_{10}} \quad \dots(3.6)$$

Donde:

- $Pk$  : Número de Plank
- $C_{unf}^v$  : Calor específico volumétrico por encima de  $T_{fo}$  ( $J/m^3 \cdot K$ )
- $\Delta H_{10}$  : Diferencia de entalpia volumétrica entre la temperatura inicial del producto y la de referencia  $-10^\circ C$  ( $J/m^3$ )
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $-1.6^\circ C$ )
- $T_i$  : Temperatura inicial del producto ( $30^\circ C$ )

Determinando  $\Delta H_{10}$

$$\Delta H_{10} = H_{30^\circ C} * \rho_{unf} - H_{-10^\circ C} * \rho_{fro} \quad \dots(3.7)$$

$$H_{30^\circ C} = H_{fo} + (T_i - T_{fo}) * (4.19 - 2.30 * x_s - 0.628 * x_s^3) \quad \dots(3.8)$$

$$H_{fo} = (T_{fo} - T_{ref}) * \left( 1.55 + 1.26 * x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) * L_o * T_{fo}}{T_{ref} * T_{fo}} \right) \quad \dots(3.10)$$

$$H_{-10^\circ C} = (T_2 - T_{ref}) * \left( 1.55 + 1.26 * x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) * L_o * T_{fo}}{T_{ref} * T_2} \right) \quad \dots(3.11)$$

Donde:

- $H_{-10^\circ C}$  : Entalpia específica de la uva a  $-10^\circ C$  ( $kJ/kg$ )
- $H_{30^\circ C}$  : Entalpia específica de la uva a  $30^\circ C$  ( $kJ/kg$ )
- $H_{fo}$  : Entalpia específica de la uva en el punto de congelamiento ( $kJ/kg$ )
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $-1.6^\circ C$ )
- $T_{ref}$  : Temperatura de referencia de entalpia Zero ( $-40^\circ C$ )
- $T_2$  : Temperatura referencia ( $-10^\circ C$ )

- $x_{wo}$  : Fracción de agua en contenido de masa ( $x_{wo} = 0.8130$ )  
 $x_p$  : Fracción de proteína en contenido de masa ( $x_p = 0.0063$ )  
 $x_s$  : Fracción de masa de sólidos contenidos en la uva ( $x_s = 1 - x_{wo} = 0.187$ )  
 $x_b$  : Fracción de masa alrededor de sólidos ( $x_b = 0.4 * x_p = 0.00252$ )  
 $L_o$  : Calor específico latente de fusión del agua ( $272 \text{ kJ/kg}$ )

Remplazando valores en la ecuación 3.10, 3.8 y 3.11

$$H_{fo} = (-1.6 - (-40)) * \left( 1.55 + 1.26(0.187) - \frac{(0.8130 - 0.00252)(272)(-1.6)}{(-40)(-1.6)} \right)$$

$$H_{fo} = 279.5 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{30^\circ\text{C}} = 279.5 + (30 - (-1.6)) * (4.19 - 2.30(0.187) - 0.628 * (0.187)^3)$$

$$H_{30^\circ\text{C}} = 398.9 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{-10^\circ\text{C}} = (-10 - (-40)) * \left( 1.55 + 1.26 * 0.187 - \frac{(0.8130 - 0.00252)(272)(-1.6)}{(-40)(-10)} \right)$$

$$H_{-10^\circ\text{C}} = 80.02 \text{ kJ/kg}$$

Remplazando valores en la ecuación 3.6

$$\Delta H_{10} = H_{30^\circ\text{C}} * \rho_{unf} - H_{-10^\circ\text{C}} * \rho_{fro}$$

$$\Delta H_{10} = 279.5 * (10^3) * 1069 - 80.02 * (10^3) * 1045$$

$$\Delta H_{10} = 1.690 * 10^8 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$$

Determinando  $C_{unf}^v$

$$C_{unf}^v = c_{unf} * \rho_{unf} \quad \dots(3.13)$$

Donde:

$C_{unf}^v$  : Calor específico volumétrico por encima de  $T_{fo}$  ( $\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$ )

$c_{unf}$  : Calor específico por encima del punto de congelamiento ( $3656 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ )

$\rho_{unf}$  : Densidad por encima del punto de congelamiento ( $1069 \text{ kg/m}^3$ )

Remplazando valores en la ecuación 3.13

$$C_{unf}^v = 3656 * 1069 = 3.908 * 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$$

Remplazando valores en la ecuación 3.6

$$Pk = 3.908 * 10^6 \frac{(30 - (-1.6))}{1.690 * 10^8} = 0.7306$$

Número de Stefan se define como:

$$Ste = C_{fro}^v \frac{(T_{fo} - T_m)}{\Delta H_{10}} \quad \dots(3.14)$$

Donde:

$Ste$  : Número de Stefan

$C_{fro}^v$  : Calor específico volumétrico por debajo de  $T_{fo}$  ( $J/m^3 \cdot K$ )

$\Delta H_{10}$  : Diferencia de entalpía volumétrica entre la temperatura inicial del producto y la de referencia ( $J/m^3$ )

$T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $-1.6^\circ C$ )

$T_m$  : Temperatura del medio ( $-15^\circ C$ )

Determinando  $C_{fro}^v$

$$C_{fro}^v = C_{fro} * \rho_{fro} \quad \dots(3.15)$$

Donde:

$C_{fro}^v$  : Calor específico volumétrico por debajo de  $T_{fo}$  ( $J/m^3 \cdot K$ )

$C_{fro}$  : Calor específico por debajo del punto de congelamiento ( $2020 J/kg \cdot K$ )

$\rho_{fro}$  : Densidad por debajo del punto de congelamiento ( $1045 kg/m^3$ )

Remplazando valores en la ecuación 3.15

$$C_{fro}^v = 2020 * 1045 = 2.111 * 10^6 J/m^3 \cdot K$$

Remplazando valores en la ecuación 3.14

$$Ste = 2.113 * 10^6 * \frac{(-1.6 - (-15))}{1.690 * 10^8} = 0.1673$$

Una vez que el número adimensional estén definidos se puede ya determinar el tiempo de congelamiento para una superficie infinita de espesor característico. D con la ecuación 3.1, luego se hará uso del factor de dimensión equivalente de transferencia de calor (E), que viene a ser un factor que permite convertir el tiempo de hallado para una superficie finita a otras geometrías.

Remplazando valores en la ecuación 3.3 y 3.4

$$P = 0.5072 + 0.2018 * 0.7317 + 0.1673 \left( 0.3224 * 0.7317 + \frac{0.0105}{1.01} + 0.0681 \right)$$

$$P = 0.4123$$

$$R = 0.1684 + 0.1673(0.2740 * 0.7317 - 0.0135)$$

$$R = 0.1996$$

Remplazando valores en la ecuación 3.2

$$\theta_{slab} = \frac{1.690 * 10^8}{-1.6 - (-15)} \left( \frac{0.4123 * (2 * 0.011)}{42} + \frac{0.1996 * (2 * 0.011)^2}{0.9145} \right) \left( 1 - \frac{1.65 * 0.1673}{0.9145} * \ln \left( \frac{-2 - (-15)}{-10 - (-15)} \right) \right)$$

$$\theta_{slab} = 1206 \text{ min}$$

Se tiene un tiempo de congelamiento para una superficie infinita de espesor característico D de 1206 min o lo que vendría a ser 20 horas 6 minutos para enfriar una superficie infinita de espesor D desde una temperatura 30°C a una temperatura de -2°C.

➤ **Factor de dimensión equivalente de transferencia de calor**

Este factor, como se mencionó anteriormente va permitir calcular tiempos de enfriamiento para formas de alimentos irregulares a partir de tiempos de congelamiento para formas regulares Este factor fue también introducido por Cleand & Earle en 1982. Donde definen el tiempo de enfriamiento para una geometría irregular en función al tiempo de enfriamiento para una geometría de superficie infinita sobre el factor de dimensión equivalente de transferencia de calor. En este caso la geometría que más se adapta a la uva sería la de un cilindro finito donde su diámetro es menor que su longitud. (ASHRAE, 2018, ch.19, p.19.26). En la ecuación 3.16 se define esta relación.

$$\theta_{cil} = \frac{\theta_{slab}}{E_{cil}} \quad \dots(3.16)$$

$$E_{cil} = 1 + W_1 + W_2 \quad \dots(3.17)$$

Para un cilindro finito con longitud mayor a su diámetro se tiene:

$$E_{cil} = 2.0 + W_2 \quad \dots(3.18)$$

Donde:

- $\theta_{cil}$  : Tiempo de congelación para un cilindro finito (min)
- $\theta_{slab}$  : Tiempo de congelación para una superficie infinita (min)
- $E_{cil}$  : Factor de dimensión equivalente de transferencia de calor para un cilindro finito
- $W_1, W_2$  : Parámetros para el factor de equivalente de transferencia de calor

Siendo:

$$W_2 = \left( \frac{Bi}{Bi + 2} \right) * \frac{5}{8 * \beta_2^3} + \left( \frac{2}{Bi + 2} \right) \left( \frac{2}{\beta_2(\beta_2 + 1)} \right) \quad \dots(3.19)$$

Los ratios de corrección  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se definen con la finalidad de ajustar de mejor manera la geometría irregular del producto al que se requiere calcular el tiempo de enfriamiento a partir del tiempo de enfriamiento de para una placa infinita de espesor característico D. Estos ratios dependen de las dimensiones características del producto que en este caso es la uva. Los valores de estas dimensiones se presentan en la Tabla 3.1.

$$\beta_1 = \frac{\text{Segunda dimension mas corta}}{\text{Dimension mas corta}} = \frac{L_3}{L_1} \quad \dots(3.20)$$

$$\beta_2 = \frac{\text{Dimension mas larga}}{\text{Dimension mas corta}} = \frac{L_2}{L_1} \quad \dots(3.21)$$

Donde:

$Bi$  : Número de Biot

$\beta_1, \beta_2$  : Ratios de corrección para formas irregulares

Remplazando valores en la ecuación 3.20 y 3.21

$$\beta_1 = \frac{0.012}{0.011} = 1.09$$

$$\beta_2 = \frac{0.013}{0.011} = 1.18$$

Remplazando valores en la ecuación 3.19

$$W_2 = \left( \frac{1.01}{1.01 + 2} \right) * \frac{5}{8 * 1.18^3} + \left( \frac{2}{1.01 + 2} \right) \left( \frac{2}{1.18(1.18 + 1)} \right) = 0.6424$$

Remplazando valores en la ecuación 3.17

$$E_{cil} = 2.0 + 0.6424 = \mathbf{2.642}$$

Remplazando valores en la ecuación 3.16

$$\theta_{cil} = \frac{1206}{2.642} = \mathbf{456.5 \text{ min}}$$



Finalmente, de la ecuación 3.16 se obtiene el valor de tiempo de enfriamiento para un cilindro finito que modela la geometría de una uva, a partir del cálculo de tiempo para una superficie infinita de espesor  $D$  y del factor de dimensión de transferencia de calor. El tiempo que toma enfriar la uva desde una temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  a una temperatura de  $-2^{\circ}\text{C}$  es de 456.5 minutos o 7 horas con 36 minutos. Se observa que manteniendo constante la temperatura final del producto y la temperatura del medio el tiempo de enfriamiento dependería básicamente de la temperatura de entrada del producto a la cámara de enfriamiento.

### **3.3 Análisis de resultados**

La estimación del tiempo de enfriamiento de algún alimento requiere del cálculo de las propiedades térmicas del alimento. Cabe resaltar que va ser de suma importancia conocer hasta qué punto se requiere enfriar el producto. Para casos de congelación se requiere una temperatura final del centro térmica por debajo del punto inicial de congelamiento, la cual implica una formación de cristales de hielo del agua contenida dentro del alimento, esta formación de cristales cambiara de manera significativa las propiedades térmicas del producto como la conductividad, entalpia y calor específico. La temperatura del medio y el coeficiente de convección influyen de manera notable en la estimación del tiempo de enfriamiento temperaturas más bajas del medio y valores mayores de coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el medio y el producto acelerarían el proceso de enfriamiento; es decir, reducirían el tiempo de enfriamiento de la uva. Sin embargo, temperaturas muy bajas de medio afectarían al producto causando rajaduras en la uva como se ha explicado en el capítulo 1 y altos coeficientes de convección que están relacionados de manera directa con la velocidad del aire podrían también dañar a la uva afectando su calidad. Otro factor que influye de manera significativa en la estimación del tiempo de enfriamiento es la temperatura de entrada del producto, temperaturas menores al ingreso reducirían el tiempo de enfriamiento. Se sabe que las condiciones en la que la vid se cosecha son extremas; es decir, elevadas temperaturas y

climas secos con baja humedad relativa, no es recomendable esperar mucho tiempo para enfriar a la uva, pues podría haber pérdidas significativas de agua en la uva. Una solución podría ser cosechar en horas del día donde la temperatura del ambiente no sea tan alta para así tener una menor temperatura de ingreso del producto. Finalmente, la influencia de modelar la geometría del producto es significativa en la estimación en este estudio se ha modelado la geometría de la baya de la uva, por recomendación del manual de ASHRAE, como un cilindro finito donde su diámetro es menor que su longitud. Sin embargo, otra geometría aceptable sería una irregular en 3D de un elipsoide.



## CONCLUSIONES

Se concluye que para un enfriamiento óptimo de la uva de mesa se necesita un sistema de enfriamiento de aire forzado, pues llevar esta tarea de manera rápida y eficiente es fundamental para evitar pérdidas excesivas de agua en la fruta. Las velocidades de aire forzado recomendadas están entre 2.0 a 3.5 m/s, evitando sobrepasar el límite superior, pues como se ha descrito anteriormente a velocidades mayores de 3.5 m/s se presentan daños en la uva y en el material del empaquetado. Las condiciones de humedad relativa del espacio refrigerado deben estar entre 90% y 95% se tiene que considerar la absorción de humedad de los distintos materiales dentro del espacio refrigerado, para poder mantener la humedad dentro del rango recomendado y evitar pérdidas excesivas de agua que afecten a la calidad final del producto. La temperatura de enfriamiento debe ser cercana a la temperatura de almacén de frío la cual está dentro del rango de -0.5 a -2 °C, las temperaturas no deben ser muy bajas, pues afectaría principalmente al racimo de la uva, en caso de enfriar la uva a una temperatura por debajo de -1.6°C se debe considerar las propiedades térmicas para uva para temperaturas por debajo del punto de inicial de congelamiento y se debe de asegurar que sea realice de manera rápida. Se debe considerar la carga adicional de los materiales de empaquetado, en caso de que la uva entre al enfriamiento empacada.

Las condiciones del almacén de frío deben estar en temperaturas entre -0.5 a -2°C, no se debe estar a una temperatura muy por debajo de la mínima, pues las uvas pueden presentar daños por congelamiento en los racimos y en las bayas. La humedad relativa del almacén debe estar entre 90 a 95%, el almacén deberá de contar con un sistema de humidificación para mantenerse en el rango recomendado, pues el material de empaquetado, jabs, pallets, cajas de cartón, etc., absorben agua reduciendo la humedad en el ambiente controlado. Las velocidades del aire dentro de la cámara deben estar entre 0.2 a 0.5 m/s para evacuar de manera eficiente el calor de respiración de la uva. Se debe de considerar la inyección de SO<sub>2</sub> semanalmente para

el control de aparición de infecciones. La cantidad de  $\text{SO}_2$  va a depender de la cantidad o volumen del lote a tratar, se debe asegurar una concentración mínima de 100 mg/kg.h y una velocidad de 0.7 m/s durante las primeras 2 horas del tratamiento. Se debe tener en cuenta que la sobre exposición de  $\text{SO}_2$  en las uvas puede causar rajaduras en la uva afectando su el sabor y la calidad de la uva.

La selección de arreglos del empaquetado en el proceso de enfriamiento de la uva, va a depender de los requerimientos de las instalaciones. Para lotes que necesiten un almacenamiento en frío prolongado el empaquetado en bolsas en polietileno es el más adecuado, aunque el tiempo de enfriamiento es más largo; se logra una menor pérdida de agua después de un tiempo prolongado de almacenamiento. Esto se traduce a que la calidad de la fruta no se ve muy afectada. Por otro lado, se puede optar por las configuraciones de empaques de plásticos rígidos (clamshell) en caso de que la uva no pase por el almacenamiento, sino que pase directamente al envío. Elegir estos empaques significarían una reducción del tiempo de logística en el enfriamiento, además de darle más resistencia contra los golpes durante el traslado. Para las condiciones de operación en Perú que tiene miras al mercado internacional de China, Europa y Estados Unidos, la configuración más conveniente sería en empaquetado en bolsas de polietileno, para evitar pérdidas excesivas de agua en la fruta que afectaría a la textura y firmeza de la baya, causando el desprendimiento de la baya del racimo.

El tiempo de enfriamiento se ve relacionado directamente con la condición de enfriamiento como la temperatura del medio que se puede interpretar como la temperatura del aire alrededor, la velocidad del aire y la temperatura de ingreso del producto. La velocidad del aire tiene que estar dentro de un rango de 2.0 m/s a 3.5 m/s, como se ha mencionado anteriormente, mientras más cercana sea la velocidad del aire al límite superior menor será el tiempo de enfriamiento, pero hay un mayor riesgo de dañar la uva. En la costa del Perú se puede encontrar temperaturas máximas en verano de alrededor de  $30^\circ\text{C}$ , por lo que si se quiere

enfriar a uva por debajo del punto inicial de congelamiento que es  $-1.6^{\circ}\text{C}$  hasta  $-2^{\circ}\text{C}$  que es limite recomendado, el proceso de enfriamiento duraría alrededor de 7 horas y 36 minutos, considerando a la baya de la uva como un cilindro finito donde su diámetro es menor que su longitud.



## BIBLIOGRAFÍA

Agro Retail. (s.f.). Producto Nacionales. Disponible el 27 de agosto del 2020. Recuperado de <http://agroretail.com.pe/producto-uvas-nacional.html>.

Agro Retail. (s.f.). Empaques. Disponible el 27 de agosto del 2020. Recuperado de <http://agroretail.com.pe/empaques.html>

Almanza, P. Serrano P., Fischer G. (2012) Taxonomía, ampelografía, morfología y organografía. *Manual de Viticultura Tropical*. (pp.17-31) Colombia: Universidad Pedagógica y Técnica de Colombia Tunja.

ASHARE (2018). Thermal Properties of food (Capítulo 19). *AHSRAE Handbook Refrigeration*. (pp.19.1-19.28) Atlanta, USA.

ASHARE (2018). Cooling and Freezing Times of Food (Capítulo 20). *AHSRAE Handbook Refrigeration*. (pp.20.1-20.16) Atlanta, USA.

ASHARE (2018). Commodity Storage Requirements (Capítulo 21). *AHSRAE Handbook Refrigeration*. (pp.21.1-21.13) Atlanta, USA.

ASHARE (2018). Methods of Precooling Fruit (Capítulo 28). Vegetables and Cut Flowers. *AHSRAE Handbook Refrigeration*. (pp.28.1-28.13) Atlanta, USA.

ASHARE (2018). Deciduous Tree and Vine Fruit (Capítulo 35). *AHSRAE Handbook Refrigeration*. (pp.35.1 -35.14) Atlanta, USA.

CCanto P. (2018) Envases y embalajes para exportación de productos agrícolas [Diapositivas de powerpoint]. PrompPerú.

<http://export.promperu.gob.pe/Miercoles/Portal/MME/descargar.aspx?archivo=14BD53D3-7A85-4016-B83E-B94C3BF02173.PDF>

CODEX ALIMENTARIUS INTERNATIONAL FOOD STANDARDS (2007). Norma para uvas de mesa (CODEX STAN 255-007).

Cuya E. (2013). Propagación e Instalación del cultivo de Vid [Guía Técnica]. Ica, Perú: Agrobanco.

Del Perú Sur. (s.f.). Uva Red Globe. Disponible el 22 de abril del 2020. Recuperado de <<http://delsurperu.com/productos/uva>>

Dincer I. (1994). Air Flow Precooling of Individual Grapes. *Journal of food Engineering*. Vol .27 (pp. 243-249). < [doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00049-F](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00049-F) >

DSI Freezing Solutions. (s.f.). Vertical Freezers, Horizontal Freezers and Handling. Disponible el 23 de abril del 2020. Recuperado de <<https://dsifreezing.com/products/>>

Elsanari A., Fenton D., Callahan C. (2019). Precooling (Capítulo 6). *Post Harvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. (pp. 169-207). <[doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00006-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00006-7)>

Fellows P. (2017) Freezing (Capítulo 22). *Food Processing Technology Principles and Practice*. (4ta Edición). (pp.885-928)

Food and Agriculture of The United Nations (FAO). (1994) Freezing and Refrigerated Storage in Fishseries. < <http://www.fao.org/3/V3630E/v3630e05.htm>>

Food and Agriculture of The United Nations (FAO). (2005) Grape Post-Harvest Operations. <[http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/inpho/docs/Post\\_Harvest\\_Compndium\\_-\\_Grape.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Compndium_-_Grape.pdf)>

Food and Agriculture of The United Nations (FAO). (2005) Grape Post-Harvest Operations. <[http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/inpho/docs/Post\\_Harvest\\_Compndium\\_-\\_Grape.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Compndium_-_Grape.pdf)>

Food and Agriculture of The United Nations (FAO). (2016) Table grape and dried grapes.

<<http://www.fao.org/3/a-i7042e.pdf>>

Fortes M., Pais S. (2016). Grapes (*Vitis* species) (Capítulo 12). *Nutritional Composition of*

*Fruit Cultivars*. (pp.257-286). <[doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00012-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00012-X)>

Fraser H (2014). Forced air Cooling Systems for Fresh Ontario Fruits and Vegetables.

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. <[doi.org/10.1016/0260-](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00049-F)

[8774\(94\)00049-F](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00049-F)>

Heldman D., Lund D. (2007) Transport and Storage of Food Products (Capítulo 4). *Handbook of Food Engineering*. (2da Edición). (pp. 354-395) CRC Press

Heldman D., Singh P. (2009) Food Freezing (Capítulo 7). *Introduction to Food Engineering*.

(4ta Edición). (pp. 501-541) Academic Press.

Hydrocooling Chillers. (2016) Hydrocooling Process and General Information. Disponible el

23 de abril del 2020. Recuperado de <<http://hydrocoolerchiller.com/hydro-cooling-process/>>

Instituto de Investigaciones Agropecuaria (2016). Enfermedades de la Vid. Ministerio de la agricultura Chile. Disponible el 23 de abril del 2020. Recuperado de

<<https://www.inia.cl/sanidadvegetal/2016/11/08/moho-gris-botrytis-cinerea/>>

Mduduzi N., Mulugeta A., Umezuruike L, Meyer C. (2013) Performance of multi-packing for table grapes based on airflow, cooling rates and fruit quiality. *Journal of food*

*Engineering*. Vol. 116 (pp. 613-621). <[doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.044](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.044)>

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), (2008). Informe de registro de productores

de Ica. Arequipa, Moquegua, Tacna y Lima provincias. Lima, Perú



Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), (2017). Análisis Económico de la producción nacional de Uva fresca. Lima, Perú.

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), (2019). La Uva Peruana: Una oportunidad en el Mercado Mundial. Lima, Perú.

Peruvian Grapes Export. (2013). Embalaje. Disponible el 22 de abril del 2020. Recuperado de <<http://peruviangrapesexport.blogspot.com/2013/10/embalaje.html>>

Zofolli J., Latorre A., Naranjo P. (2007). Hairline, a postharvest cracking disorder in table grapes induced by sulfur dioxide. *Post harvest biology and technology*. Vol .47 (pp. 90-97). <[doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.013](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.013)>

Zofolli J., Latorre A. (2011). Table Grape (Capítulo 9). *Post harvest biology and technology of tropical and subtropical Food*. (pp. 179-212). <[doi.org/10.1533/9780857092885.179](https://doi.org/10.1533/9780857092885.179)>

## ANEXO A1: Cálculo de las propiedades Térmicas de la uva

El siguiente procedimiento de cálculo está basado en lo presentado en el AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018). En la siguiente Tabla A1-1 se muestra la composición en masa de la uva tomado del AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018) y los datos necesarios para el desarrollo del cálculo de las propiedades Térmicas de la uva.

Tabla A1- 1 Datos para el cálculo de las propiedades térmicas

Temperatura inicial (°C)	$T_o$	30
Temperatura final (°C)	$T_f$	-2
Temperatura de masa por encima/debajo de $T_{fo}$ (°C)	$T_{ba}/T_{bd}$	14.2/-1.8
Contenido de agua (%)	$x_{wo}$	81.30
Contenido de proteína (%)	$x_p$	0.63
Contenido de carbohidrato (%)	$x_c$	17.15
Contenido de grasa (%)	$x_f$	0.35
Contenido de fibra (%)	$x_{fb}$	1.00
Contenido de ceniza (%)	$x_{ce}$	0.57
Punto inicial de congelamiento (°C)	$T_{fo}$	-1.6
Calor específico por encima del punto de congelamiento (kJ/kg.K)	$C_{afo}$	3.96
Calor específico por debajo del punto de congelamiento (kJ/kg.K)	$C_{bfo}$	1.89
Calor la tente de fusión (kJ/kg.K)	$H_f$	272

Nota: Tomado de AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, Ch. 19)

Los valores por encima del punto de congelamiento son calculados con  $T_{ba} = 14.2^{\circ}C$  y los valores por debajo del punto de congelamiento son calculados con  $T_{bd} = -1.8^{\circ}C$

### ➤ Fracción de hielo

$$x_{ice} = \frac{1.105 * x_{wo}}{1 + \frac{0.1738}{\ln(T_{fo} - T_f + 1)}} \quad \dots(A.1.1)$$

Donde:

- $x_{ice}$  : Fracción de hielo en contenido de masa
- $x_{wo}$  : Fracción de agua en contenido de masa
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento (°C)

$T_f$  : Temperatura final de congelamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )

Remplazando valores en la ecuación A.1.1

$$x_{ice} = \frac{1.105 * (0.8130)}{1 + \frac{0.1738}{\ln((-1.6) - (-2) + 1)}} = \mathbf{0.2415}$$

Fracción de agua residual en estado líquido a  $-2^{\circ}\text{C}$

$$x_{wr} = x_{wo} - x_{ice} \quad \dots(\text{A.1.2})$$

$$x_{wr} = 0.8130 - 0.2415 = \mathbf{0.5715}$$

Congelar la uva a una temperatura de  $-2^{\circ}\text{C}$  se formarán  $x_{ice} = 24.15\%$  de cristales en porcentaje en masa, por otro lado, la cantidad de agua residual restante en la uva será de  $x_{wr} = 57.15\%$

### ➤ Densidad

$$\rho_{unf} = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{x_{wo}}{\rho_{wo}} + \frac{x_p}{\rho_p} + \frac{x_c}{\rho_c} + \frac{x_f}{\rho_f} + \frac{x_{fb}}{\rho_{fb}} + \frac{x_{ce}}{\rho_{ce}}} \quad \dots(\text{A.1.3})$$

$$\rho_{fro} = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{x_{ice}}{\rho_{ice}} + \frac{x_{wr}}{\rho_{wr}} + \frac{x_p}{\rho_p} + \frac{x_c}{\rho_c} + \frac{x_f}{\rho_f} + \frac{x_{fb}}{\rho_{fb}} + \frac{x_{ce}}{\rho_{ce}}} \quad \dots(\text{A.1.4})$$

Donde:

- $\rho_{unf, fro}$  : Densidad de la uva antes y después del punto de congelamiento respectivamente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\varepsilon$  : Factor de porosidad, para la uva ( $\varepsilon = 0$ )
- $x_{ice}$  : Fracción de hielo en contenido de masa por debajo del punto inicial de congelamiento
- $x_{wo}$  : Fracción de agua en contenido de masa por encima del punto inicial de congelamiento
- $x_{wr}$  : Fracción de agua residual por debajo del punto inicial de congelamiento en contenido de masa ( $x_{wr} = x_{wo} - x_{ice}$ )
- $x_{p,c,f,fb,ce}$  : Fracción de proteína, carbohidratos, grasas, fibra y cenizas en contenido de masa respectivamente
- $\rho_{ice}$  : Densidad de hielo generado por debajo del punto inicial de congelamiento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\rho_{wo}$  : Densidad de agua por encima del punto inicial de congelamiento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\rho_{wr}$  : Densidad de agua residual por debajo del punto inicial de congelamiento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\rho_{p,c,f,fb,ce}$  : densidad de proteína, carbohidratos, grasas, fibra y cenizas respectivamente. ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Para las densidades de los compuestos de la uva se tomará las expresiones presentadas en la Tabla 1 “*Thermal Property Models of Food Components*” presentado en el AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, p.19.1)

Tabla A1- 2 Expresiones para determinar la densidad de compuestos de la uva.

Densidad, (kg/m <sup>3</sup> )	Expresión
Proteína	$\rho = 1.3299(10^3) - 5.1840(10^{-1})(t)$
Grasa	$\rho = 9.2559(10^2) - 4.1757(10^{-1})(t)$
Carbohidrato	$\rho = 1.5991(10^3) - 3.1046(10^{-1})(t)$
Fibra	$\rho = 1.3115(10^3) - 3.6589(10^{-1})(t)$
Ceniza	$\rho = 2.4238(10^3) - 2.8063(10^{-1})(t)$
Agua	$\rho = 9.9718(10^2) + 3.1439(10^{-3})(t) - 3.7574(10^{-3})(t^2)$
Hielo	$\rho = 9.1689(10^2) - 1.3071(10^{-1})(t)$

Nota: Tomado de AHSRAE-Refrigeration, "Thermal Properties of Foods" (2018, Ch. 19)

Se tendrá dos densidades para un estado por encima del punto inicial de congelamiento ( $\rho_{unf@T_{ba}}$ ), que se determina con las expresiones prestadas en la Tabla anterior y con la ecuación A.1.3. Además, se tendrá otra densidad para un estado después ( $\rho_{fro@T_{bd}}$ ) que se determina con las expresiones prestadas en la Tabla anterior y con la ecuación A.1.4. Estas densidades son calculadas con la temperatura de masa correspondientes a cada estado. En la siguiente Tabla A1-3 se rempazan los valores correspondientes.

Tabla A1- 3 Resultado de cálculo de densidades

Densidad, (kg/m <sup>3</sup> ) @14.2°C	
Proteína	$\rho_p = 1.3299(10^3) - 5.1840(10^{-1})(14.2) = 1323$
Grasa	$\rho_f = 9.2559(10^2) - 4.1757(10^{-1})(14.2) = 915$
Carbohidrato	$\rho_c = 1.5991(10^3) - 3.1046(10^{-1})(14.2) = 1595$
Fibra	$\rho_{fb} = 1.3115(10^3) - 3.6589(10^{-1})(14.2) = 1306$
Ceniza	$\rho_{ce} = 2.4238(10^3) - 2.8063(10^{-1})(14.2) = 2420$
Agua	$\rho_{wo} = 9.9718(10^2) + 3.1439(10^{-3})(14.2) - 3.7574(10^{-3})(14.2^2) = 996.5$
Densidad, (kg/m <sup>3</sup> ) @-1.8°C	
Proteína	$\rho_p = 1.3299(10^3) - 5.1840(10^{-1})(-1.8) = 1331$
Grasa	$\rho_f = 9.2559(10^2) - 4.1757(10^{-1})(-1.8) = 926.4$
Carbohidrato	$\rho_c = 1.5991(10^3) - 3.1046(10^{-1})(-1.8) = 1600$
Fibra	$\rho_{fb} = 1.3115(10^3) - 3.6589(10^{-1})(-1.8) = 1312$
Ceniza	$\rho_{ce} = 2.4238(10^3) - 2.8063(10^{-1})(-1.8) = 2424$
Agua	$\rho_{wr} = 9.9718(10^2) + 3.1439(10^{-3})(-1.8) - 3.7574(10^{-3})(-1.8^2) = 997.2$
Hielo	$\rho_{ice} = 9.1689(10^2) - 1.3071(10^{-1})(-1.8) = 917.1$

Remplazando valores en la ecuación A.1.3 y A.1.4

$$\rho_{unf} = \frac{1}{\frac{0.8130}{996.5} + \frac{0.0063}{1323} + \frac{0.1715}{1595} + \frac{0.0035}{915} + \frac{0.01}{1306} + \frac{0.0057}{2420}} = 1069 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{fro} = \frac{1}{\frac{0.2415}{917.1} + \frac{0.5715}{997.2} + \frac{0.0063}{1331} + \frac{0.1715}{1600} + \frac{0.0035}{926.4} + \frac{0.01}{1312} + \frac{0.0057}{2424}} = 1045 \text{ kg/m}^3$$

Se obtienen dos valores de densidad  $\rho_{unf} = 1069 \text{ kg/m}^3$  para cuando la uva se encuentra por encima del punto de congelamiento; es decir, por encima de  $T_{fo} = -1.6^\circ\text{C}$  y  $\rho_{fro} = 1045 \text{ kg/m}^3$  cuando la uva se encuentra por debajo de este punto.

➤ **Calor específico**

$$c_{unf} = \sum c_i * x_i = c_{wo} * x_{wo} + c_p * x_p + c_c * x_c + c_f * x_f + c_{fb} * x_{fb} + c_{ce} * x_{ce} \quad \dots(\text{A.1.5})$$

$$c_{fro} = 1.55 + 1.26 * x_s + \frac{(x_{wo} - x_b) * L_o * T_{fo}}{T_{rc}^2} \quad \dots(\text{A.1.6})$$

Donde:

- $c_{unf, fro}$  : Calor específico de la uva antes y después del punto de congelamiento respectivamente ( $\text{kJ/kg.K}$ )
- $c_{wo, p, c, f, fb, ce}$  : Calor específico del agua, proteína, carbohidratos, grasas, fibra y cenizas contenidos en la uva respectivamente. ( $\text{kJ/kg.K}$ )
- $x_{wo, p, c, f, fb, ce}$  : Fracción de agua, proteína, carbohidratos, grasas, fibra y cenizas en contenido de masa respectivamente.
- $x_s$  : Fracción de masa de sólidos contenidos en la uva ( $x_s = 1 - x_{wo}$ )
- $x_b$  : Fracción de masa alrededor de sólidos ( $x_b = 0.4 * x_p$ )
- $L_o$  : Calor específico latente de fusión del agua ( $272 \text{ kJ/kg}$ )
- $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_{rc}$  : Temperatura referencia ( $-40^\circ\text{C}$ )

Para los calores específicos de los compuestos de la uva se tomará las expresiones presentadas en la Tabla 1 “*Thermal Property Models of Food Components*” presentado en el AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, p.19.1)

Tabla A1- 4 Expresiones para determinar el calor específico de los compuestos de la uva

Calor específico, ( $\text{kJ/kg.K}$ )	Expresión
Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.289(10^{-3})(t) - 1.3129(10^{-6})(t^2)$
Grasa	$c_p = 1.9842 + 1.4733(10^{-3})(t) - 4.8008(10^{-6})(t^2)$
Carbohidrato	$c_p = 1.5488 + 1.9625(10^{-3})(t) - 5.9399(10^{-6})(t^2)$
Fibra	$c_p = 1.8459 + 1.8306(10^{-3})(t) - 4.6509(10^{-6})(t^2)$
Ceniza	$c_p = 1.0926 + 1.8306(10^{-3})(t) - 4.6509(10^{-6})(t^2)$
Agua (entre $-40^\circ\text{C}$ a $0^\circ\text{C}$ )	$c_p = 4.1289 - 5.3062(10^{-3})(t) + 9.9516(10^{-4})(t^2)$
Agua (entre $0^\circ\text{C}$ a $150^\circ\text{C}$ )	$c_p = 4.1289 - 9.0864(10^{-5})(t) + 5.4731(10^{-6})(t^2)$
Hielo	$c_p = 2.0623 - 6.0769(10^{-3})(t)$

Nota: Tomado de AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, Ch. 19)

Se tendrá dos calores específicos para un estado por encima del punto inicial de congelamiento ( $c_{unf@T_{ba}}$ ), que se determina con las expresiones prestadas en la Tabla anterior y con la ecuación A.1.5. Además, se tendrá otro calor específico para un estado después ( $c_{fro}$ ) que se determina con la ecuación A.1.6. En la siguiente tabla se remplazan los valores correspondientes para el cálculo de ( $c_{unf}$ ).

Tabla A1- 5 Resultados del cálculo de calores específicos

Calor específico, (kJ/kg.K) @14.2°C	
Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.289(10^{-3})(14.2) - 1.3129(10^{-6})(14.2^2) = 2.025$
Grasa	$c_f = 1.9842 + 1.4733(10^{-3})(14.2) - 4.8008(10^{-6})(14.2^2) = 2.004$
Carbohidrato	$c_c = 1.5488 + 1.9625(10^{-3})(14.2) - 5.9399(10^{-6})(14.2^2) = 1.575$
Fibra	$c_{fb} = 1.8459 + 1.8306(10^{-3})(14.2) - 4.6509(10^{-6})(14.2^2) = 1.871$
Ceniza	$c_{ce} = 1.0926 + 1.8306(10^{-3})(14.2) - 4.6509(10^{-6})(14.2^2) = 1.119$
Agua (entre 0°C a 150°C)	$c_{wo} = 4.1289 - 9.0864(10^{-5})(14.2) + 5.4731(10^{-6})(14.2^2) = 4.129$

Remplazando valores en la ecuación A.1.5

$$c_{unf} = 4.129 * 0.8130 + 2.025 * 0.0063 + 1.575 * 0.1715 + 2.004 * 0.0035 + 1.871 * 1.119 * 0.57$$

$$c_{unf} = 3.656 \text{ kJ/kg.K}$$

$$x_s = 1 - 0.8130 = 0.187$$

$$x_b = 0.4 * 0.0063 = 0.00252$$

$$c_{fro} = 1.55 + 1.26 * (0.187) + \frac{(0.8130 - 0.00252)(272)(-1.6)}{(-40)^2} = 2.02 \text{ kJ/kg.K}$$

Se obtienen dos valores de calores específicos,  $c_{unf} = 3.656 \text{ kJ/kg.K}$  para cuando la uva se encuentra por encima del punto de congelamiento; es decir, por encima de  $T_{fo} = -1.6^\circ\text{C}$  y  $c_{fro} = 2.02 \text{ kJ/kg.K}$  cuando la uva se encuentra por debajo de este punto.

### ➤ Entalpia

$$H_{30^\circ\text{C}} = H_{fo} + (T_i - T_{fo}) * (4.19 - 2.30 * x_s - 0.628 * x_s^3) \quad \dots(\text{A.1.7})$$

$$H_{fo} = (T_{fo} - T_{ref}) * \left( 1.55 + 1.26 * x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) * L_o * T_{fo}}{T_{ref} * T_{fo}} \right) \quad \dots(\text{A.1.8})$$

$$H_{-2^\circ\text{C}} = (T_f - T_{ref}) * \left( 1.55 + 1.26 * x_s - \frac{(x_{wo} - x_b) * L_o * T_{fo}}{T_{ref} * T_f} \right) \quad \dots(\text{A.1.9})$$

Donde:

- $H_{30^{\circ}\text{C}}$  : Entalpia especifica de la uva a  $30^{\circ}\text{C}$  (kJ/kg)  
 $H_{fo}$  : Entalpia especifica de la uva en el punto de congelamiento (kJ/kg)  
 $H_{-2^{\circ}\text{C}}$  : Entalpia especifica de la uva a  $-2^{\circ}\text{C}$  (kJ/kg)  
 $T_i$  : Temperatura inicial de la uva ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{fo}$  : Punto inicial de congelamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{ref}$  : Temperatura de referencia de entalpia Zero ( $-40^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_f$  : Temperatura final del producto ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $x_s$  : Fracción de masa de solidos contenidos en la uva ( $x_s = 1 - x_{wo}$ )  
 $x_b$  : Fracción de masa alrededor de solidos ( $x_b = 0.4 * x_p$ )  
 $x_{wo}$  : Fracción de agua en contenido de masa  
 $L_o$  : Calor especifico latente de fusión del agua (272 kJ/kg)

Remplazando valores en la ecuación A.1.8 ,A.1.7 y A.1.9

$$H_{fo} = (-1.6 - (-40)) * \left( 1.55 + 1.26(0.187) - \frac{(0.8130 - 0.00252)(272)(-1.6)}{(-40)(-1.6)} \right)$$

$$\mathbf{H_{fo}=279.5 \text{ kJ/kg}}$$

$$H_{30^{\circ}\text{C}} = 279.5 + (30 - (-1.6)) * (4.19 - 2.30(0.187) - 0.628 * (0.187)^3)$$

$$\mathbf{H_{30^{\circ}\text{C}} = 398.9 \text{ kJ/kg}}$$

$$H_{-2^{\circ}\text{C}} = (-2 - (-40)) * \left( 1.55 + 1.26(0.187) - \frac{(0.8130 - 0.00252)(272)(-1.6)}{(-40)(-2)} \right)$$

$$\mathbf{H_{-2^{\circ}\text{C}} = 235.4 \text{ kJ/kg}}$$

### ➤ Conductividad térmica

$$k_{parll} = \sum x_i^v * k_i \quad i = wo, ice, p, c, f, fb, ce, wr \quad \dots(\text{A.1.10})$$

$$x_i^v = \frac{\frac{x_i}{\rho_i}}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} = \frac{x_i}{\rho_i} * \rho_{unf, fro} \quad i = wo, ice, p, c, f, fb, ce, wr \quad \dots(\text{A.1.11})$$

Donde:

- $k_{parll}$  : Conductividad paralela (W/m.K)  
 $x_i^v$  : fracción volumétrica del compuesto i  
 $\rho_i$  :Densidad del compuesto i (kg/m<sup>3</sup>)  
 $k_i$  : Conductividad del compuesto i (W/m.K)  
 $\rho_{unf, fro}$  :Densidad de la uva antes y después del punto de congelamiento respectivamente (kg/m<sup>3</sup>)

Para las conductividades térmicas de los compuestos de la uva se tomará las expresiones presentadas en la Tabla 1 “*Thermal Property Models of Food Components*” presentado en el AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, p.19.1)

Tabla A1- 6 Expresiones para determinar la conductividad de los compuestos de la uva

Conductividad térmica, (W/m.K)	Expresión
Proteína	$k = 1.7881(10^{-1}) + 1.1958(10^{-3})(t) - 2.7178(10^{-6})(t^2)$
Grasa	$k = 1.8071(10^{-1}) + 2.7604(10^{-3})(t) - 1.7749(10^{-7})(t^2)$
Carbohidrato	$k = 2.0141(10^{-1}) + 1.3874(10^{-3})(t) - 4.3312(10^{-6})(t^2)$
Fibra	$k = 1.8331(10^{-1}) + 1.2497(10^{-3})(t) - 3.1686(10^{-6})(t^2)$
Ceniza	$k = 3.2962(10^{-1}) + 1.4011(10^{-3})(t) - 2.9069(10^{-6})(t^2)$
Agua	$k = 5.7109(10^{-1}) + 1.7625(10^{-3})(t) - 6.7036(10^{-6})(t^2)$
Hielo	$k = 2.2196 + 6.2489(10^{-3})(t) + 1.0154(10^{-4})(t^2)$

Nota: Tomado de AHSRAE-Refrigeration, “*Thermal Properties of Foods*” (2018, Ch. 19)

Se tendrá dos conductividades para un estado por encima del punto inicial de congelamiento ( $k_{unf}@T_{ba}$ ), que se determina con las expresiones prestadas en la Tabla anterior y con la ecuación A.1.10. Además, se tendrá otra conductiva para un estado después ( $k_{fro}@T_{ba}$ ) que se determina con las expresiones prestadas en la Tabla anterior y con la ecuación A.1.10. Estas densidades son calculadas con la temperatura de masa correspondientes a cada estado. En la siguiente tabla se rempazan los valores correspondientes.

Tabla A1- 7 Resultados del cálculo de conductividad

Conductividad térmica, (W/m.K)@14.2°C	
Proteína	$k_p = 1.7881(10^{-1}) + 1.1958(10^{-3})(14.2) - 2.7178(10^{-6})(14.2^2) = 0.1952$
Grasa	$k_f = 1.8071(10^{-1}) + 2.7604(10^{-3})(14.2) - 1.7749(10^{-7})(14.2^2) = 0.1846$
Carbohidrato	$k_c = 2.0141(10^{-1}) + 1.3874(10^{-3})(14.2) - 4.3312(10^{-6})(14.2^2) = 0.2202$
Fibra	$k_{fb} = 1.8331(10^{-1}) + 1.2497(10^{-3})(14.2) - 3.1686(10^{-6})(14.2^2) = 0.2004$
Ceniza	$k_{ce} = 3.2962(10^{-1}) + 1.4011(10^{-3})(14.2) - 2.9069(10^{-6})(14.2^2) = 0.3489$
Agua	$k_{wo} = 2.2196 + 6.2489(10^{-3})(14.2) + 1.0154(10^{-4})(14.2^2) = 0.1807$
Conductividad térmica, (W/m.K)@-1.8°C	
Proteína	$k_p = 1.7881(10^{-1}) + 1.1958(10^{-3})(-1.8) - 2.7178(10^{-6})(-1.8^2) = 0.1766$
Grasa	$k_f = 1.8071(10^{-1}) + 2.7604(10^{-3})(-1.8) - 1.7749(10^{-7})(-1.8^2) = 0.1802$
Carbohidrato	$k_c = 2.0141(10^{-1}) + 1.3874(10^{-3})(-1.8) - 4.3312(10^{-6})(-1.8^2) = 0.1988$
Fibra	$k_{fb} = 1.8331(10^{-1}) + 1.2497(10^{-3})(-1.8) - 3.1686(10^{-6})(-1.8^2) = 0.181$
Ceniza	$k_{ce} = 3.2962(10^{-1}) + 1.4011(10^{-3})(-1.8) - 2.9069(10^{-6})(-1.8^2) = 0.327$
Agua	$k_{wr} = 2.2196 + 6.2489(10^{-3})(-1.8) + 1.0154(10^{-4})(-1.8^2) = 0.1538$
Hielo	$k_{ice} = 2.2196 + 6.2489(10^{-3})(-1.8) + 1.0154(10^{-4})(-1.8^2) = 2.232$



Desarrollando la ecuación A.1.11

Tabla A1- 8 Cálculo de fracción volumétrica de los compuestos antes del  $T_{fo}$

Fracción volumétrica	$\frac{x_p}{\rho_p} * \rho_{unf}$	$\frac{x_f}{\rho_f} * \rho_{unf}$	$\frac{x_c}{\rho_c} * \rho_{unf}$	$\frac{x_{fb}}{\rho_{fb}} * \rho_{unf}$	$\frac{x_{ce}}{\rho_{ce}} * \rho_{unf}$	$\frac{x_{wo}}{\rho_{wo}} * \rho_{unf}$
$x_i^v_{unf}@14.2^\circ\text{C}$	$x_{p,unf}^v$	$x_{f,unf}^v$	$x_{c,unf}^v$	$x_{fb,unf}^v$	$x_{ce,unf}^v$	$x_{wo,unf}^v$
(%)	0.5091	0.4067	10.82	0.8181	0.2517	87.19

Desarrollando y reemplazando valores en la ecuación A.1.10

$$k_{unf} = k_{wo} * x_{p,unf}^v + k_f * x_{f,unf}^v + k_p * x_{p,unf}^v + k_c * x_{c,unf}^v + k_{fb} * x_{fb,unf}^v + k_{ce} * x_{ce,unf}^v$$

$$k_{unf} = 0.1807 * 0.8719 + 0.1846 * 0.00467 + 0.1952 * 0.005091 + 0.2202 * 0.1082 + 0.2004 * 0.008181 + \dots 0.3489 * 0.002517$$

$$k_{unf} = \mathbf{0.1857 \text{ W/m.K}}$$

Tabla A1- 9 Cálculo de fracción volumétrica de los compuestos después del  $T_{fo}$

Fracción volumétrica	$\frac{x_p}{\rho_p} * \rho_{fro}$	$\frac{x_f}{\rho_f} * \rho_{fro}$	$\frac{x_c}{\rho_c} * \rho_{fro}$	$\frac{x_{fb}}{\rho_{fb}} * \rho_{fro}$	$\frac{x_{ce}}{\rho_{ce}} * \rho_{fro}$	$\frac{x_{wr}}{\rho_{wr}} * \rho_{fro}$	$\frac{x_{ice}}{\rho_{ice}} * \rho_{fro}$
$x_i^v_{fro}@-1.8^\circ\text{C}$	$x_{p,fro}^v$	$x_{f,fro}^v$	$x_{c,fro}^v$	$x_{fb,fro}^v$	$x_{ce,fro}^v$	$x_{wr,fro}^v$	$x_{ice,fro}^v$
(%)	0.4931	0.3936	10.52	0.7939	0.2449	54.87	32.69

Desarrollando y reemplazando valores en la ecuación A.1.10

$$k_{fro} = k_{ice} * x_{ice,fro}^v + k_{wr} * x_{wr,fro}^v + k_f * x_{f,fro}^v + k_p * x_{p,fro}^v + k_c * x_{c,fro}^v + k_{fb} * x_{fb,fro}^v + k_{ce} * x_{ce,fro}^v$$

$$k_{fro} = 2.2320 * 32.69 + 0.1538 * 54.87 + 0.1802 * 0.003936 + 0.1766 * 0.004931 + 0.1988 * 0.1052 + \dots 0.181 * 0.007939 + 0.181 * 0.002449$$

$$k_{fro} = \mathbf{0.8386 \text{ W/m.K}}$$

Se obtienen dos valores de conductividad,  $k_{unf} = 0.1857 \text{ W/m.K}$  para cuando la uva se encuentra por encima del punto de congelamiento; es decir, por encima de  $T_{fo} = -1.6^\circ\text{C}$  y  $k_{fro} = 0.8386 \text{ W/m.K}$  cuando la uva se encuentra por debajo de este punto.

Conductividad térmica para alimento completamente congelado  $T_{ref} = -40^\circ\text{C}$

$$k_s = \mathbf{0.9145 \text{ W/m.K}}$$

➤ **Difusividad térmica**

$$\alpha_{unf, fro} = \frac{k}{\rho * c} * 1000 \quad \dots(A.1.12)$$

Donde:

- $\alpha_{unf, fro}$  : Difusividad térmica por encima y por debajo del punto inicial de congelamiento ( $mm^2/s$ )  
 $k$  : Conductividad (W/m.K)  
 $c$  : Calor específico (kJ/kg.K)  
 $\rho$  : Densidad ( $kg/m^3$ )

Remplazando valores en la ecuación A.1.12

$$\alpha_{unf} = \frac{0.1857}{1069 * 3.656} * 1000 = \mathbf{0.04752 \text{ mm}^2/s}$$

$$\alpha_{unf} = \frac{0.8382}{1045 * 2.02} * 1000 = \mathbf{0.3970 \text{ mm}^2/s}$$

