

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DEL TIPO DE CAJA EN EL TIEMPO DE ENFRIADO
Y PRESIÓN DE SUCCIÓN EN UN TÚNEL DE AIRE FORZADO EN
FRUTOS DE MANDARINA**

SERGIO ANDRÉS MATEO BUSTAMANTE

Santiago, Chile
2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DEL TIPO DE CAJA EN EL TIEMPO DE ENFRIADO
Y PRESIÓN DE SUCCIÓN EN UN TÚNEL DE AIRE FORZADO EN
FRUTOS DE MANDARINA**

**EVALUATION OF BOX TYPE ON THE COOLING TIME AND
SUCTION AIR PRESSURE IN A FORCED AIR TUNNEL IN
MANDARIN FRUIT**

SERGIO ANDRÉS MATEO BUSTAMANTE

Santiago, Chile
2014

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

EVALUACIÓN DEL TIPO DE CAJA EN EL TIEMPO DE ENFRIADO Y PRESIÓN DE SUCCIÓN EN UN TÚNEL DE AIRE FORZADO EN FRUTOS DE MANDARINA

Memoria para optar al título
Profesional de Ingeniero Agrónomo.

SERGIO ANDRÉS MATEO BUSTAMANTE

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Sr. Luis Luchsinger Lagos. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Javier M. Obando Ulloa. Ingeniero Agroindustrial, Dr.	6,8
Sr. Nelson Díaz Pérez Profesor de Estado en Biología y Ciencias, Dr.	6,0

Santiago, Chile
2014

"Las ciencias tienen las raíces amargas, pero muy dulces los frutos." (*Aristóteles*)

AGRADECIMIENTO

A mis padres, a mi familia, quienes han sido un pilar fundamental en el trascurso de mi carrera.

Muy en especial, a mi profesor guía Luis Luchsinger Lagos, por su sabiduría en la enseñanza y la ayuda en el crecimiento de los futuros profesionales, su paciencia y entendimiento. También a los profesores Ricardo Pertuzé, Javier Obando, Sandro Bustamante, Catalina Pinto, Simón Navarrete por el apoyo en el desarrollo en materias específicas dentro de la memoria de título

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que con sus palabras de ánimo y de ayuda me facilitaron la realización de la presente memoria de título.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Hipótesis.....	6
Objetivos generales	6
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Lugar de estudio.....	7
Materiales	7
Método	9
ENSAYO 1: TIEMPO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.	9
Procedimiento.....	9
Deshidratación de los frutos.	11
Evaluaciones.....	11
ENSAYO 2: PRESIÓN DE SUCCIÓN, CON DIFERENTES TIPOS DE SELLADO EN LA BASE DE LOS PALLET.....	12
Procedimiento.....	12
Evaluación	13
ENSAYO 3: PRESIÓN DE SUCCIÓN, CON DISTINTO NIVEL DE CARGA DENTRO DEL SISTEMA DE AIRE FORZADO.	13
Procedimiento.....	13
Evaluación	14
Análisis estadístico.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
ENSAYO 1: TIEMPO TOTAL DE ENFRIAMIENTO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	15
Tiempo de inversión del flujo de aire	17

Diferencia de temperatura entre la pulpa de la cara interna y la pulpa de la cara externa cuando esta última llega a 5 °C.....	19
Deshidratación de los frutos	20
Ensayo 2: PRESIÓN DE SUCCIÓN DENTRO DEL TÚNEL DE AIRE FORZADO CON DIFERENTES TIPOS DE SELLADO EN LA BASE DE LOS PALLETS	21
Ensayo 3: Presión de succión dentro del túnel de aire forzado con respecto al nivel de carga (pallets).....	24
CONCLUSIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	28
APENDICE	32

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de dos diseños de cajas de cartón corrugado en la eficiencia del enfriamiento y la deshidratación que se produce en los frutos al final del proceso de enfriamiento. Por otro lado, se midió la presión de succión con diferentes tipos de sellado en la base de los pallets y a medida que éstos disminuyen dentro del sistema de enfriamiento. Se utilizaron frutos de mandarina var. W. Murcott dispuestas a granel en dos tipos de cajas de cartón corrugado en pallets de 1,0 × 1,2 m y 2,40 m de altura. El primer diseño consistió en una caja de la empresa Envases Impresos S.A., de 40 cm de ancho × 50 cm de largo y 18 cm de alto, con un peso neto final de 15,6 kg y con un porcentaje de área ventilada de la base, cabezal y lateral de 4,8; 4,7; 7,75 %, respectivamente; mientras que el segundo diseño de caja correspondió a la empresa Cartones San Fernando Ltda., de 40 cm de ancho × 60 cm de largo y 17 cm de alto, con un peso neto de embalaje final de 16,4 kg y con un área ventilada de la base, cabezal y lateral de 6,5; 6,7; y 4,9 %, respectivamente. Para enfriar cada tipo de caja (un tipo a la vez) se utilizó un túnel de aire forzado, con 10 pallets cada uno, evaluando seis pallets por túnel y una caja por pallet. Se utilizó un termómetro digital manual para medir la temperatura de pulpa de los frutos. La temperatura del aire a la salida del evaporador se programó a 4°C. Para obtener el porcentaje de pérdida de agua por deshidratación durante el proceso de enfriamiento, se dispuso de tres mallas de un kilogramo de fruta en tres pallets por tratamiento, las cuales fueron pesadas al inicio y final del proceso. En relación a la presión de succión dentro del túnel de aire forzado se evaluó en dos ensayos diferentes. En el primer ensayo se midió la presión negativa o de succión en tres tipos de sellado en la base de los pallets. El segundo ensayo consistió en disminuir el nivel de carga o cantidad de pallets dentro del sistema de aire forzado. No hubo diferencia significativa entre los diseños de cajas, en cuanto la velocidad de enfriamiento. Los contrastes estadísticos realizados muestran que existe diferencia estadística significativa al final del proceso de enfriamiento donde el diseño de caja 40 × 60 × 17 cm termina su proceso antes que el diseño de caja 40 × 50 × 18 cm. Con respecto a la deshidratación de los frutos, tampoco hubo diferencia significativa entre tratamientos, aunque se presentó una pérdida de peso al término del proceso de enfriamiento en los frutos. En cuanto a la presión de succión, ésta fue mayor en los pallets cercanos a la zona ventilador, disminuyendo a medida que se acercaba a los pallets ubicados en la zona puerta. Sin embargo, la presión de succión aumentó considerablemente al sellar por completo las áreas libres en la base de los pallets y entre pallets, situación contraria ocurrió al disminuir las zonas de sellado. El diseño de caja de 40 × 50 × 18 cm (elaborada por Envases Impresos S.A.) obtuvo mayor presión de succión con respecto al diseño de caja de 40 × 60 × 17 cm (elaborada por la empresa Cartones San Fernando Ltda.). La presión de succión con respecto al nivel de carga, aumentó a medida que la carga de pallets disminuyó dentro del sistema de aire forzado.

Palabras clave: Enfriamiento por aire forzado, Diseño de caja, Tiempo de enfriamiento, Área ventilada, Presión de succión, Presión Negativa, vacío.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the effect of two designs of corrugated boxes in cooling efficiency and the dehydration produced in fruits at the end of cooling process. Furthermore, the suction pressure was measured with different base sealing pallets and the suction pressure as these decrease in the cooling system forced air.

Bulk fruits of var. W. Murcott tangerine were used in two types of corrugated cardboard boxes on pallets of 1.0×1.2 m and 2.40 m high. The first design consisted of a box made by the company Envases Impresos S.A., 40 cm wide, 50 cm long and 18 cm high, with a final net weight of 15.6 kg and a percentage of the base-ventilated area, head and lateral of 4.8; 4.7; 7.8 %, respectively. The second box design was made by the company Cartones San Fernando Ltda., 40 cm wide, 60 cm long and 17 cm high, with a net weight of 16.4 kg final packaging and with a ventilated area of the base, head and side of 6.5, 6.7 and 4.9% respectively.

A forced air tunnel was used for cooling each type of case (one type at a time), with 10 pallets each, six pallets evaluating tunnel and a box per pallet. A manual digital thermometer was used to measure the temperature of fruit pulp. The air temperature at the evaporator outlet was programmed at 4°C. To obtain the percentage of water loss by dehydration during the cooling process, they had three meshes of a kilogram of fruit in three pallets per treatment, which were weighed at the beginning and end of the process, using a digital scale. Regarding the suction pressure inside the tunnel forced air was evaluated in two different assays, in the first test, negative or suction pressure was measured in three types of seal at the base of the pallets. The second test consisted in decreasing the charge level, or number of pallets, inside the forced air system. There was no significant difference between the designs of boxes, as the cooling rate. The statistical tests showed that there is significantly statistical differences at the end of the cooling process where the box design $40 \times 60 \times 17$ cm, ends the process before the box design $40 \times 50 \times 18$ cm. Regarding the dehydration of the fruit, there was no significantly statistical differences between treatments either, but a weight loss was evidenced at the end of the cooling process of the fruit. The suction pressure was higher in the pallets near the fan zone and it decreased as it is approached to the area close to the door pallets, the suction pressure increased considerably by sealing completely free areas at the base of the pallets and between pallets, opposite situation occurred with decreasing the sealing areas. The design box $40 \times 50 \times 18$ cm (produced by Envases Impresos S.A.) scored higher suction pressure than the second box design $40 \times 60 \times 17$ cm (produced by the company Cartones San Fernando Ltda). The suction pressure increased according as the charged pallets into the system decreased.

Key words: Forced air cooling, Box design, Cooling time, Ventilated area, Suction Pressure, Negative Pressure, Vacuum.

INTRODUCCIÓN

Chile es un país que sustenta el crecimiento de su economía, destacando el desarrollo del sector agrícola, con una participación sobresaliente en lo que respecta a la exportación de frutos de mandarinas, ocupando el noveno lugar a nivel mundial (Martenstein, 2012), junto con Perú y Australia, con un 1,8% de participación, logrando con esto, acercarse a países con mayor tradición en el mundo, como Sudáfrica y Argentina (ODEPA, 2013). La mayor parte de la fruta cosechada es exportada al mercado europeo y norteamericano, este último en particular, es de gran interés para los productores agrícolas nacionales. Conforme a esto, Estados Unidos es el principal destino de exportación de productos agrícolas de Chile, siendo el destino de más del 40% de la exportación de fruta fresca del país (Martenstein, 2012). Las exportaciones chilenas de mandarinas han experimentado un crecimiento acelerado a partir de la década pasada con un alza sobre el 20 % anual, por lo que el volumen de las exportaciones se ha casi cuadruplicado en el período referido, incrementándose desde 17.200 toneladas en 2004 a 63.700 toneladas en el año 2013 (ODEPA, 2013). Específicamente, la variedad Clemenules es la más plantada en el país, concentrando el 56,2 % de la superficie nacional. La variedad W. Murcott la sigue en importancia, con una participación de 27,9 %, seguida por las variedades Fortune (4,2%), Oronules (3,3%), Orogrande (3,2%) y Nova (1,2%). Cabe mencionar que las ventas de plantas de mandarinos han evolucionado casi totalmente hacia la variedad W. Murcott, que se exporta entre agosto y septiembre, dejando a la variedad Clemenules sólo para replantes o reposición, con ventas prácticamente estancadas (ODEPA, 2013).

Con respecto a lo anterior, la lejanía de Chile con sus principales mercados de destino obliga a los exportadores nacionales a someter la fruta a extensos períodos de viaje, lo que acorta notoriamente la vida en postcosecha de ésta, al quedar propensa a severos deterioros como la deshidratación (Martínez-Jávega *et al.*, 1998; Del Rio *et al.*, 1999), y pudriciones (Kader, 2002; Cáceres, 2010). El principal factor que afecta la vida postcosecha de la fruta es la temperatura, ya que afecta los procesos que intervienen en la maduración (Nelson 1975, citado por Larral, 1996; Lizana, 1996; Kader 2002), disminuyendo la calidad del fruto a corto plazo. Es por ello que, la fruta debe ser enfriada lo antes posible con el objetivo de remover el calor de campo y el calor de la respiración (Luchsinger y Lizana, 2007).

La temperatura además juega un importante rol en el proceso de deshidratación. Este proceso constituye un factor físico que se encuentra directamente ligado con el potencial evaporativo del aire circulante (Miller, 1946; Lutz y Handenburg, 1968; Kader, 2002). Es un proceso que además de provocar problemas de apariencia, genera problemas de índole cuantitativo, como es la pérdida del peso total del producto, afectando el precio de comercialización final (Cáceres, 2010). Concretamente en los frutos cítricos, se ha citado que la principal causa de deterioro fisiológico es el estrés de agua que es producido por la respiración y la deshidratación al separarse de la planta madre (Martínez - Jávega, 1995). En el caso de mandarinas se agrava más esta situación al ofrecer el fruto una alta relación superficie/volumen y menor espesor del epicarpio que facilitan la deshidratación. Así mismo, esta pérdida de agua se realiza en forma de vapor de agua (Herrero y Guardia,

1992), y puede ocurrir a través de estomas, heridas o directamente a través del epicarpio (Mitchell, 1988; Lizana, 1996). La transpiración no sólo causa desecación, arrugamiento y ablandamiento, sino que también acelera la senescencia (Miller, 1946; Cuquerella *et al.*, 2004), por lo que resulta de vital importancia disminuir la temperatura de los frutos de mandarina a su temperatura óptima de conservación (4 a 5 °C) (Handenburg *et al.*, 1986; Martínez - Jávega, 1995).

La disminución rápida de la temperatura, a la vez, minimiza el desarrollo de pudriciones. Sin embargo, el efecto inhibitorio de las bajas temperaturas varía dependiendo del organismo (Thompson *et al.*, 1998). La germinación de esporas y la velocidad de crecimiento de patógenos generalmente están influenciados por la temperatura; por ejemplo, enfriando los productos por debajo de los 5°C inmediatamente después de la cosecha, reduce notablemente la incidencia de pudrición (Kader *et al.*, 2002).

En virtud de lo anterior, el manejo de la temperatura resulta ser la herramienta más efectiva para extender la vida de productos hortofrutícolas. Se ha demostrado ampliamente que un enfriamiento rápido después de la cosecha, prolonga la vida de los productos cosechados (Gentry y Nelson, 1964; Ginsburg *et al.*, 1978; Nelson, 1979; Artés, 2004). Por lo tanto, previo al enfriamiento es importante establecer sistemas prácticos que ayuden a minimizar la cantidad de calor de campo acumulado en la fruta cosechada y, posteriormente, contar con un sistema de enfriamiento eficiente que permita remover dicho calor antes del almacenamiento (Wade, 1984), para la cual existen diversos procesos dentro de los que se encuentra el enfriamiento rápido o forzado, que logra mantener la calidad en postcosecha de la fruta (Larral, 1996; Luchsinger y Lizana, 2007; Vidal, 2008).

El enfriamiento por aire frío forzado es un método ampliamente usado para disminuir rápidamente la temperatura de los frutos, luego de ser cosechados y su importancia recae en que disminuye el metabolismo de la fruta, así como también el tiempo de llegada de la maduración del fruto (Thompson *et al.*, 1998; Dehghannya *et al.*, 2011). Dentro de este sistema, el tiempo de enfriamiento depende de variados factores, entre los cuales el tipo de envase tiene una gran influencia a la hora de intentar disminuir dicho tiempo. El tamaño, forma, distribución y superficie de sus ventilaciones junto con el diseño o estilo particular de la caja (ubicación de los orificios de ventilación y el área total de ventilación), son características que determinarán su desempeño para el enfriamiento rápido dentro de los túneles (Cáceres, 2010; Pathare *et al.*, 2012; Ballester, 2013). La velocidad de enfriamiento depende igualmente del tamaño, la forma y las propiedades térmicas de la fruta, pero también de la temperatura, flujo de aire y la accesibilidad de la corriente de aire de refrigeración. Esta última está determinada por el patrón de apilamiento de la fruta en los envases (Pathare *et al.*, 2012). Por otro lado el apilamiento de las cajas individuales sobre el pallet (aberturas entre los envases individuales) y la confluencia de los agujeros de ventilación juegan un rol importante los cuales pueden dificultar o mantener constancia del flujo de aire.

Así mismo la capacidad de refrigeración requerida está directamente relacionada con la cantidad de fruta a enfriar, la temperatura inicial y el tiempo que demore en llegar a la temperatura deseada (Nelson, 1984; Rivera, 2011). Este método, utiliza el aire frío del sistema de refrigeración para reducir la temperatura de los productos, basado en la transferencia de temperatura por medio de un fluido, este proceso se denomina “principio de convección” (Namesny, 1991; Brosnan y Sun, 2001). Por otro lado la calidad del fruto está ligada a un enfriamiento rápido y homogéneo de la fruta individual en diferentes partes de la caja, evitando implantar el daño por frío “chilling injury” o enfriar demasiado (Thompson, 2003; Nahor *et al.*, 2005, Dehghannya *et al.*, 2010).

El enfriamiento se logra forzando el paso de aire frío a través de los envases, con el fin de disminuir el tiempo de enfriamiento y la temperatura del fruto. El aire frío debe extraer directamente el calor de la fruta mediante la creación de un gradiente de presión, la que se origina por la diferencia de presión al comenzar a funcionar el ventilador/extractor, originando que el aire frío circule a través de los envases y pallets (Namesny, 1991; Thompson *et al.*, 2003; Dehghannya *et al.*, 2012). Por ello, lo más tradicional es realizar el enfriamiento por un sistema de aire forzado (Kader, 2002; Thompson *et al.*, 2008; Cáceres, 2010; Ballesteros, 2013).

El sistema de aire forzado consiste en ubicar dos hileras de igual número de envases paletizados (pallets), una a cada lado de un ventilador-extractor, dejando un pasillo central entre éstas. El tipo de sellado de los pallets dentro de este sistema es de especial importancia, ya que disminuye las áreas libres no deseadas aumentando directamente la presión de succión. El espacio abierto del centro (entre hileras), sobre los pallets y en el final de éstos es cubierto con mangas plásticas, la base en cambio, es sellada solo con cartón, creando así un flujo constante de aire que retorna al evaporador traspasando los pallets y logrando un contacto directo con la fruta. La presión de succión es la presión promedio por unidad de área, donde el ventilador-extractor de este sistema juega un rol importante en su funcionamiento, descargando el aire de la cámara y, por lo tanto, creando una presión negativa, lo que exige el empleo de un sistema de empaque diseñado de tal forma que el flujo del aire frío se movilice a través de los orificios de los envases hacia la zona de baja presión (Larral, 1996). Durante este período, el aire debe mantener la temperatura baja de forma constante (Thompson *et al.*, 1998). Un aspecto interesante del enfriamiento por aire forzado es la incidencia de aire sobre los pallets que es realizado por la cara exterior de éstos. Por esta razón, se obtiene inevitablemente al término del proceso, una diferencia de temperatura entre las caras exteriores e interiores. Esta diferencia de temperatura no es deseada y puede alcanzar en casos extremos los 10°C (Cáceres, 2010; Ballesteros, 2013). Una forma de eliminar o disminuir esta diferencia de temperatura consiste en invertir el flujo de aire en un determinado momento durante el proceso; es decir, producir un flujo desde el pasillo interior hacia el exterior del pallet. Este efecto puede producirse mediante un diseño adecuado de la carpa que cubre el pasillo del túnel y/o mediante un cambio de polaridad de los ventiladores (Rivera, 2011). Esta práctica de invertir el flujo se ha implementado prácticamente en todas las centrales frutícolas, por lo tanto, es importante estudiar el efecto del cambio de dirección durante el enfriamiento, para garantizar una mayor uniformidad de temperatura (Rivera, 2011).

HIPÓTESIS

- 1) El área ventilada expuesta de los envases influye en el tiempo de enfriamiento.
- 2) Un sellado adecuado de los espacios libres en la base del pallet aumenta la presión de succión.
- 3) La cantidad de pallet por enfriar influye en la presión de succión en un túnel de aire forzado.

OBJETIVOS GENERALES

- 1) Evaluar el efecto del área ventilada expuesta sobre el tiempo de enfriamiento en dos tipos de envases.
- 2) Evaluar el efecto de diferentes tipos de sellado en la base de los pallet sobre la presión de succión dentro de un túnel de aire forzado, para dos diseños de envase.
- 3) Evaluar distintos niveles de llenado del túnel de aire forzado sobre la presión de succión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El estudio se realizó en las instalaciones de enfriamiento y almacenaje de fruta de la empresa Gesex, ubicada en el kilómetro 35 de la Ruta 5 sur. Linderos, Comuna de Buin, Provincia de Maipo, Región Metropolitana, Chile.

Materiales

Para el estudio se ocuparon frutos de mandarina de exportación categoría I var. W. Murcott envasadas a granel, proveniente del fundo Agrícola Santa Irene Limitada, ubicada en la Comuna de Palmilla, Provincia de Colchagua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Las mediciones se realizaron en dos diseños de cajas para fruta de mandarina (Figura 1, Cuadro 1). El primer diseño (modelo P84-1L, fabricado por Envases Impresos S.A.), corresponde a una caja de cartón de 40 cm de ancho, 50 cm de largo y 18 cm de alto, con un peso neto final de la fruta de 15,6 kg y con un porcentaje área ventilada del cabezal, lateral y base de 4,7; 7,8; 4,8 %, respectivamente, con una división de cartón en la parte media del envase que no posee ventilación (Figura 1A). El segundo diseño (modelo P84-L, fabricado por Cartones San Fernando Ltda.) corresponde a una caja de cartón de 40 cm de ancho, 60 cm de largo y 17 cm de alto, con un peso neto final de la fruta de 16,4 kg y con un área ventilada del cabezal, lateral y base de 6,7; 4,9; 6,5 %, respectivamente (Figura 1B).

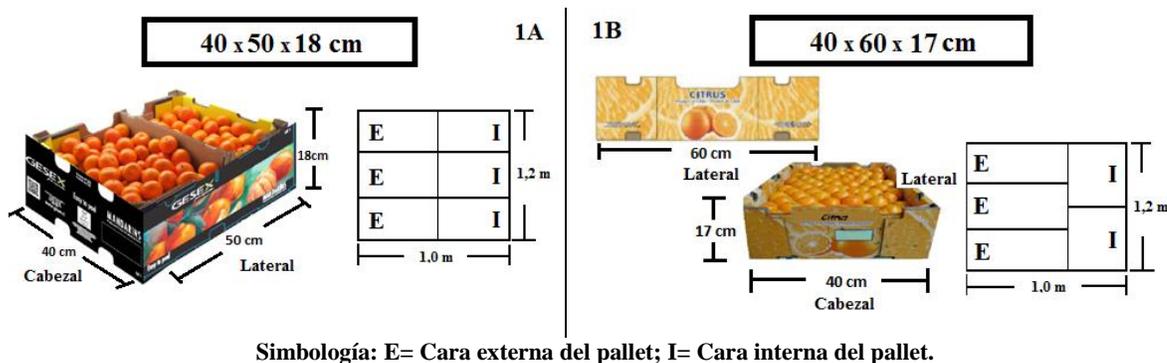


Figura 1. Detalle de los diseños de cajas utilizados para el estudio de enfriamiento en fruta. **1A.** Caja 40 × 50 (Envases Impresos S.A.). **1B.** Caja 40 × 60 (Cartones San Fernando Ltda.). En esta figura se indica el esquema para la disposición de las cajas sobre el pallet. Además, se detalla la cara exterior (E) e interior (I) de los pallets dentro del sistema de aire forzado.

Cuadro 1. Descripción de las cajas y los pallet utilizados en los ensayos dentro del túnel de aire forzado para el enfriamiento de mandarinas var. W. Murcott.

Variables	Unidad	Tipo de caja	
		40 x 50 x 18	40 x 60 x 17
Fabricante	-	Envases Impresos S.A.	Cartones San Fernando LTDA.
Modelo	-	P84-1L	P84-L
Ancho (Cabezal)	cm	40	40
Largo (Lateral)	cm	50	60
Alto	cm	18	17
Área ventilada cabezal	%	4,7	6,7
Área ventilada lateral	%	7,8	4,9
Área ventilada base	%	4,8	6,5
Separador interno		si	no
Peso neto por caja	kg	15,6	16,4
Cajas en base del pallet	-	6	5
Cantidad de cajas de alto en pallet	-	12	13
Cantidad de cajas por pallet	-	65	72
Peso neto por pallet	kg	1123	1066
Largo del pallet	m	1,2	1,2
Ancho de pallet	m	1,0	1,0
Material del pallet	-	Madera	Madera

El estudio se realizó en un túnel de enfriamiento por aire forzado que cuenta con una capacidad máxima de 14 pallet. Este túnel está equipado con 2 ventiladores de 12 aspas con 1 metro cada una, que generan un flujo de aire dentro del túnel de $70.000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, con un motor de 31 cm de diámetro, una potencia de 20 hp, 29 amperes y 1470 rpm. Asimismo, el túnel cuenta con un evaporador de 720 m^2 , que permite extraer el calor de la fruta por medio de Freón, con una carga térmica instalada de $80.000 \text{ Kcal} \times \text{h}^{-1}$ (Figura 2).



Figura 2. Túnel de enfriamiento por aire forzado. Fuente: Gesex S.A.

La temperatura de la fruta se midió inmediatamente después de que los diez pallets por tratamiento fueron introducidos en el túnel de enfriamiento con un termómetro digital manual Greisinger (modelo GMH175, Alemania), el cual se insertó en la pulpa de éstos. El peso inicial y final se determinó con una balanza digital PCE (modelo BSH-10000, China). Estos datos fueron utilizados para calcular el porcentaje de deshidratación de los frutos una vez terminado el proceso de enfriamiento en el túnel de aire forzado. La presión de succión se midió con un vacuómetro Dwyer (modelo 2000-80MM, Inglaterra).

Método

El estudio consta de 3 ensayos, todos realizados dentro del mismo sistema de aire forzado, y aplicados a la misma cosecha y especie de fruto. En dichos ensayos se evaluó: tiempo y velocidad de enfriamiento, presión de succión dentro del túnel de aire forzado con respecto al tipo de sellado en la base de los pallets y presión de succión con respecto al nivel de carga.

ENSAYO 1: TIEMPO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.

El primer ensayo evaluación del tiempo de enfriamiento constó de 2 tratamientos, ambos realizados por separado en el mismo túnel de enfriamiento (Túnel 1, Gesex S.A.). Estos tratamientos consistieron en A: Caja de cartón 40 × 50; B: Caja de cartón 40 × 60, ambos descritos anteriormente. En cuanto a la deshidratación de los frutos el diseño experimental estuvo compuesto por 2 tratamientos, en cada uno de ellos se pesaron 3 mallas con frutos de mandarina de un kilogramo aproximadamente. Cada tratamiento constó de 3 repeticiones, siendo la unidad experimental la malla con fruta.

Procedimiento

Para el montaje de cada tratamiento se dispusieron 10 pallets en 2 hileras de 5 pallets cada una (Figura 3). En el primer tratamiento (T1) se utilizaron cajas de 40 × 50 × 18 cm (Cuadro 1). Cada pallet estuvo compuesto por seis cajas en su base y doce cajas de alto, alcanzando un peso de 1.123 kg y una altura de 2,40 m. En el segundo tratamiento (T2) se utilizaron cajas de 40 × 60 × 17 cm (Cuadro 1) y cada pallet tuvo cinco cajas en su base y 13 cajas de alto, por lo que alcanzó un peso de 1.066 kg y una altura de 2,40 m, siendo la unidad experimental el pallet (Figura 3).

En ambos tratamientos, la primera hilera de pallets se ubicó al lado izquierdo del ventilador-extractor, la hilera se estubo contra el muro de fondo (zona ventilador), de esta forma se presionan los pallet los unos a los otros para eliminar los espacios libres entre pallets. Entre la pared izquierda del túnel y las caras externas de los pallets de la hilera izquierda se dejó un espacio para permitir la circulación del aire. La segunda hilera se colocó de la misma forma, pero al lado derecho del ventilador (Figura 3). Los espacios abiertos al centro y al final del túnel de los pallets fueron cubiertos con mangas plásticas, a su vez las bases de los pallets por ambas caras también se cubrieron para evitar pérdida de aire.



Figura 3. Esquema de un sistema de aire forzado. En esta figura se indican las caras exteriores e interiores de los pallets dentro del túnel de aire forzado. Fuente: Luchsinger, 2013.

La temperatura inicial de los frutos se midió inmediatamente después de que los diez pallets por tratamiento fueron introducidos en el túnel de enfriamiento. Posteriormente, el tiempo de enfriamiento se midió en ambos tipos de envases, desde el inicio hasta el término del sistema de aire forzado, una vez que la fruta alcanzó la temperatura óptima de almacenamiento 4 a 5 °C (Handenburg et al., 1986). La medición se realizó en el primer, tercer y quinto pallet, por las caras externas e internas de los pallets, contemplando ambas hileras y ambos tratamientos (Figura 4).

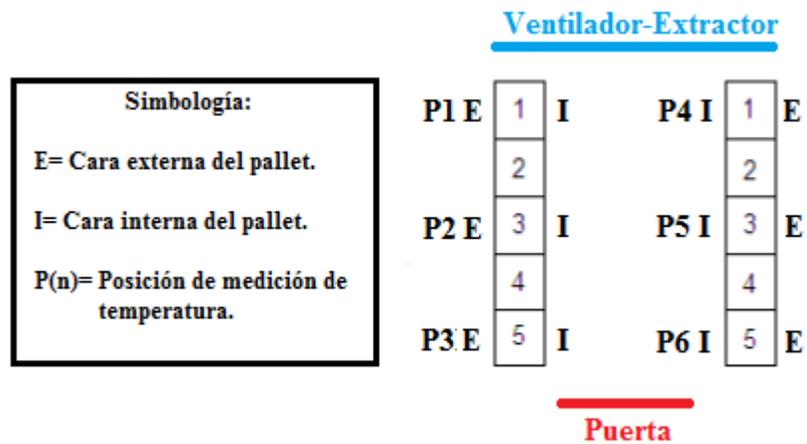


Figura 4. Distribución de los pallets dentro del túnel de aire forzado para ambos tratamientos y detalle de los sectores en los cuales se midió la temperatura de la pulpa de los frutos por ambas caras de los pallet medidos.

La temperatura se midió cada una hora al insertar un termómetro en la pulpa de los frutos, la medición se realizó en la caja central y a altura media de los pallet medidos (Figura 5). Este termómetro también se utilizó para medir y verificar la temperatura del aire que sale del ventilador (salida del flujo de aire).

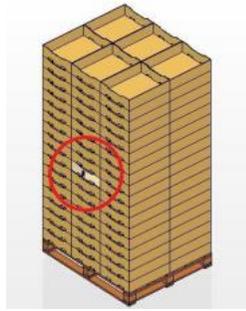


Figura 5. Vista del pallet armado. La caja por medir se identifica con un círculo rojo en la parte media central de cada pallet (Rivera, 2011).

Deshidratación de los frutos.

Se colocaron 3 mallas de un kilogramo de fruta en cajas 40×50 y las otras tres mallas en cajas 40×60 . Las mallas con fruta se ubicaron en la caja superior del primer, tercer y quinto pallet respectivamente, en la hilera de pallets al costado derecho dentro del túnel de aire forzado (Figura 6).



Figura 6. Malla con un kilogramo de frutos de mandarina, ubicados dentro del envase, en la zona superior del pallet.

Para la deshidratación se pesaron sólo los frutos que estaban ubicados dentro de las mallas, la medición se realizó en ambos tratamientos con una balanza digital PCE (descrito anteriormente) antes y después de concluir el proceso de enfriamiento por aire forzado.

Evaluaciones

Tiempo total y velocidad de enfriamiento (Horas).

Temperatura inicial de la pulpa antes del enfriamiento (Grados Celsius).

Tiempo que demora la pulpa de la cara externa del pallet en llegar a 5°C (Horas).

Diferencia de temperatura entre la pulpa de la cara interna y la pulpa de la cara externa cuando ésta última llega a 5°C (Grados Celsius).

Tiempo en el cual se realiza la inversión de pallets (Horas).

Diferencia del peso de los frutos de mandarina al terminar el enfriamiento expresado en porcentaje de deshidratación del fruto.

ENSAYO 2: PRESIÓN DE SUCCIÓN, CON DIFERENTES TIPOS DE SELLADO EN LA BASE DE LOS PALLET.

El diseño experimental estuvo compuesto por tres tratamientos o tipos de sellado aplicados a la base de los pallets, estos fueron:

1. Ambas caras (exterior e interior) selladas con cartón.
2. Sólo las bases externas de los pallets, selladas con cartón (las bases internas sin sellar).
3. Ambas caras de los pallets sin sellar.

Procedimiento

La medición de la presión de succión se realizó dentro del túnel de aire forzado para cada tipo de envase durante su funcionamiento, en la zona de medición de presión de succión (plenum) con el vacuómetro. Al instrumento se le conectó una manguera plástica de 5 mm de diámetro, que fue introducida al plenum por la base del pallet, hasta llegar al medio del pasillo central, que se forma entre ambas hileras de los pallets (Figura 7).



Figura 7. La imagen de la izquierda muestra la manguera utilizada para medir la presión de succión en el plenum del pallet (zona de medición de presión de succión) en la imagen de la derecha se muestra el vacuómetro utilizado dentro del túnel de aire forzado el cual registra la presión de succión en milímetros de columna de agua.

La unidad de medición fue milímetros de columna de agua (mm c.a.). Las mediciones se realizaron 2 veces por tratamiento, en el primer y último pallet de la hilera derecha, obteniendo 3 muestras por cada medición (Figura 8).

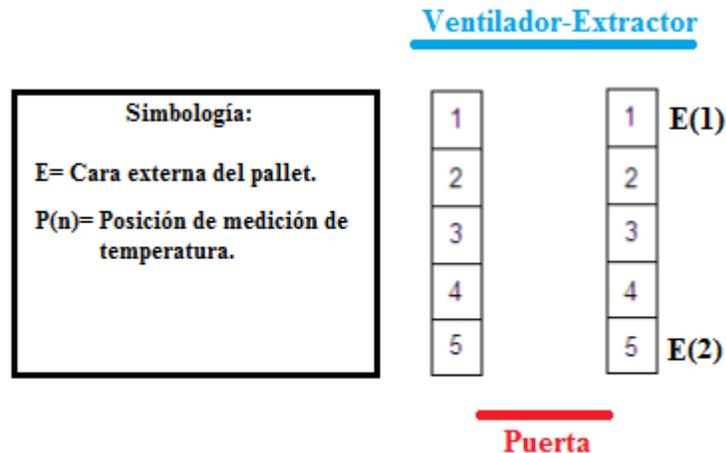


Figura 8. Posición de medición de la presión de succión, en la base (plenum) de los pallets, para ambos tratamientos.

Evaluación

Presión de succión para ambos tipos de cajas dentro del túnel de aire forzado (mm c.a).

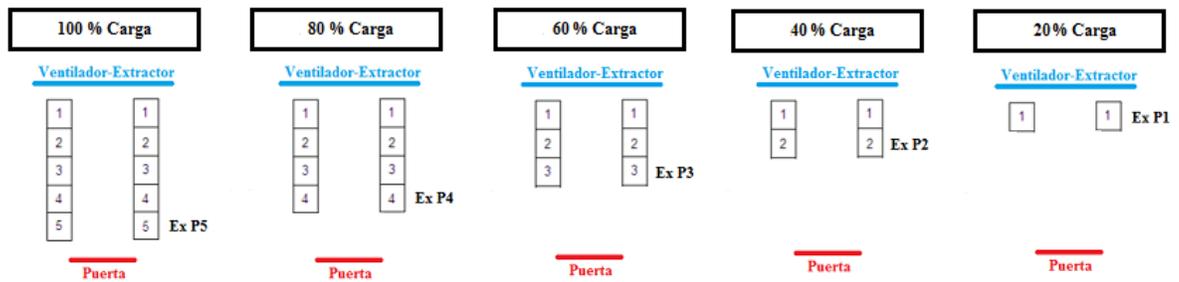
ENSAYO 3: PRESIÓN DE SUCCIÓN, CON DISTINTO NIVEL DE CARGA DENTRO DEL SISTEMA DE AIRE FORZADO.

Se utilizaron ambos modelos de cajas, cada una representa un tratamiento, al igual que las demás evaluaciones anteriores, se sigue respetando la estructura y se dispuso de 10 pallets acomodados en 2 hileras de 5 pallets cada una, que fue la carga de pallets para ésta evaluación (100%), siendo la unidad experimental el pallet.

Procedimiento

Se midió la presión de succión a medida que el nivel de carga o cantidad de pallets dentro del túnel de aire forzado disminuyó. Esta medición se llevó a cabo en ambos tratamientos.

La primera medición se realizó cuando el túnel tuvo un nivel de carga del 100% equivalente a diez pallets (dos hileras con cinco pallets cada una). Se disminuyó la carga del túnel de aire forzado, retirando los pallets de dos en dos, para terminar la evaluación con un 20% de carga final dentro del túnel, la cual equivale a dos pallet (un pallet por hilera). Las mediciones se tomaron 3 veces por cada nivel de carga dentro del sistema de aire forzado, dichas mediciones se realizaron en el último pallet de la hilera derecha “zona puerta” (Figura 9). Para evitar pérdida de presión de succión se sellaron las bases y entre los pallet con cartón y sobre los pallet con una carpa plástica, abarcando ambas hileras.



Simbología: Ex= Cara externa del pallet; P(n)= Posición de la medición (mm c.a.).

Figura 9. Distribución de medición de la presión de succión, con respecto al nivel de carga, para ambos tratamientos.

Evaluación

Presión de succión dentro del túnel de aire forzado a medida que la cantidad de pallet disminuye.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La evaluación del tiempo de enfriamiento se hizo mediante el análisis estadístico de Modelo lineal generalizado mixto con el programa estadístico InfoStat versión 2013 (Di Rienzo *et al.*, 2013). Se realizó una comparación entre las pendientes de las curvas de enfriamiento generadas en ambos tratamientos para las cajas 40×50 , como para las cajas 40×60 . Además se realizaron contrastes estadísticos especiales para el inicio y el final del tiempo de enfriamiento.

La evaluación de deshidratación de los frutos se determinó con un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) con el programa estadístico InfoStat. La medida de los datos de los experimentos, se analizó bajo un análisis de varianza (ANDEVA), luego se procedió a realizar pruebas de comparaciones múltiples (PCM) con el test de Fisher ($P \leq 0,05$).

La evaluación de presión de succión con diferentes tipos de sellado en la base de los pallets dentro del sistema de aire forzado, se determinó con un análisis de varianza (ANDEVA) con estructura factorial (2×3) con 2 tipos de cajas y 3 tipos de sellado, asumiendo un diseño completamente aleatorizado. Luego, se procedió a realizar pruebas de comparaciones múltiples (PCM) con el test de Tukey ($P \leq 0,05$).

La evaluación de presión de succión con distinto nivel de carga dentro del túnel de aire forzado, se determinó con un análisis de varianza con estructura factorial (2×5) con 2 tipos de cajas y 5 niveles de carga asumiendo un diseño completamente al azar. Luego se procedió a realizar pruebas de comparaciones múltiples (PCM) con el test de Tukey ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ENSAYO 1: TIEMPO TOTAL DE ENFRIAMIENTO Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

En general, las curvas de enfriamiento de las caras internas de los pallets presentaron una caída lineal, a diferencia de las caras externas que muestran un comportamiento asintótico, similar a la curva típica de enfriamiento. En las caras externas se observa una rápida disminución de temperatura en las primeras dos horas de enfriamiento, luego se estabiliza y finalmente tiende a un comportamiento lineal (Figura 10). Esto se debe a que inicialmente el aire frío es incorporado por las caras externas de los pallets, lo que coincide con lo expuesto por Namesny (1991), Thompson *et al.* (1998), Cáceres (2010) y Dehghannya (2011), quienes señalan que el descenso de temperatura por hora del producto al inicio del enfriamiento es más rápido y a medida que se acerca al término del mismo tiende a ser más lento. Por otro lado, es necesario destacar que la fruta llegó a la temperatura óptima de almacenamiento 4 a 5 °C (Handenburg *et al.*, 1986) en cajas 40 × 60, para su posterior almacenaje o transporte.

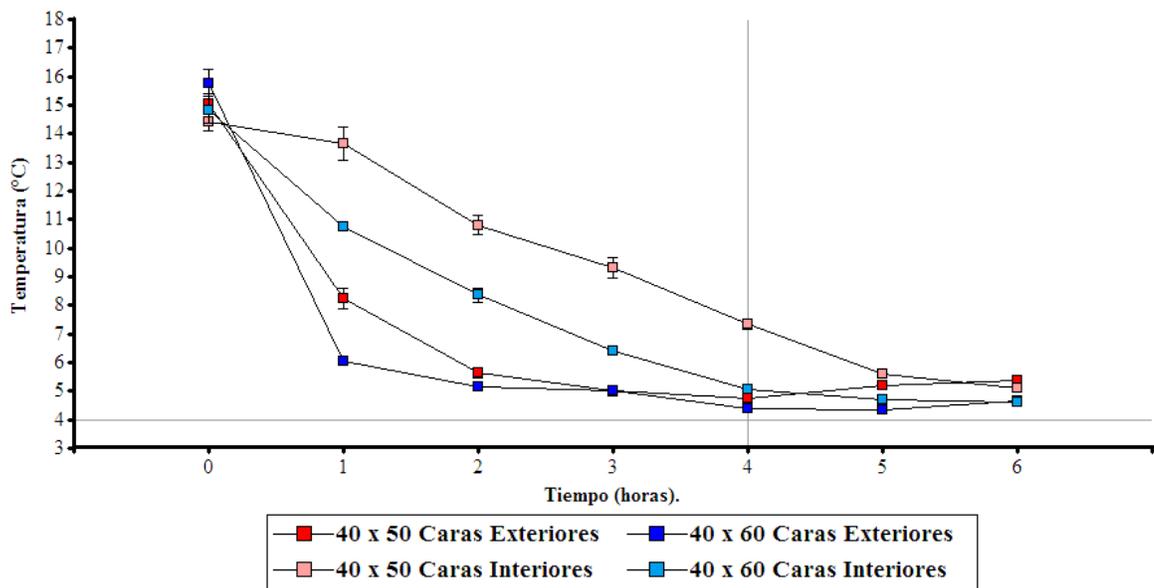


Figura 10. Curvas de enfriamiento de mandarinas var. W. Murcott envasadas en cajas de 40 × 50 y, 40 × 60 en. La línea vertical indica inversión del flujo de aire y la línea horizontal indica temperatura mínima óptima de enfriamiento.

Al comparar las tasas de enfriamiento no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, al comparar ambos tratamientos al inicio del proceso no se encuentran diferencias significativas, ambos tratamientos comienzan el enfriamiento con temperatura similar, en cuanto al final del proceso se evidencia diferencia significativa (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de los predictores lineales y comparación entre tasas de enfriamiento, al inicio y final del proceso, para ambos tratamientos.

Tratamiento	Predictores Lineales	Tasa de Enfriamiento	Inicio Proceso	Final del Proceso
40 × 50	$Y=2,37-0,39X$	-0,39 a	10.35 a	0.99 a
40 × 60	$Y= 2,33-0,69X$	-0,69 a	10.66 a	0.16 b

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de contrastes estadísticos especiales ($p \leq 0,05$).

Al comparar el tiempo total de enfriamiento en ambos tratamientos (Cuadro 3), se observó que el diseño de caja 40 × 50 termina el enfriamiento en 6,2 h mientras que el diseño de caja 40 × 60 hace tras 6,1 h.

Cuadro 3. Se indica en horas el inicio y el termino del proceso de enfriamiento, la cantidad de horas que demora en finalizar el proceso en frutos de mandarina para ambos diseños de cajas, además del promedio de la temperatura inicial de la fruta al momento de ser ingresadas al sistema y la temperatura final de esta al momento de terminar el enfriamiento por aire forzado.

Tratamiento	Inicio del Pre frio (h)	Termino Pre frio (h)	Tiempo Total enfriamiento (h)	Temperatura inicial de pulpa °C	Temperatura final de pulpa °C
40 × 50	23:39	6:00	6,2	15	5,2
40 × 60	12:00	6:10	6,1	15	4,6

Ambos tratamientos iniciaron el enfriamiento con una temperatura promedio de 15 °C. Es importante destacar que la temperatura inicial es crucial para obtener enfriamientos más rápidos y homogéneos (Thompson et al., 1998); es decir, mientras más baja y homogénea sea la temperatura de los frutos dentro del sistema de enfriamiento, mayor eficiencia tendrá al término de éste (Namesny, 1991). Se debe destacar que la fruta alcanzó la temperatura óptima de almacenamiento de 4 a 5 °C (Handenburg *et al.*, 1986), en el diseño de caja 40 × 60, no así en el diseño de caja 40 × 50, puesto que los frutos no logran llegar a la temperatura óptima de almacenamiento. La división central presente en la caja 40 x 50 es un obstáculo para la homogenización de la temperatura de enfriamiento de las mandarinas var. W. Murcott.

Tiempo de inversión del flujo de aire

La inversión del flujo de aire se efectuó cuando las caras externas de los pallets alcanzaron la temperatura óptima de almacenamiento, de acuerdo con Luchsinger y Lizana (2007) y Cáceres (2010); es decir, cuando la temperatura más alta de la pulpa en las caras externas de los pallets fue inferior a 5°C, mientras que las caras internas registraron una temperatura menor o igual que 7,8°C. Si bien se ha reportado que las diferencias de temperaturas entre caras exteriores e interiores pueden ser altas (Cáceres, 2010; Ballesteros, 2013), se debe procurar mantener estas diferencias lo más bajas posibles. Una forma de eliminar o disminuir esta diferencia de temperatura consiste en invertir el flujo de aire en un determinado momento durante el proceso (Rivera, 2010). En ambos tratamientos, el proceso de inversión se realizó por medio de la modificación del encarpado (Kader, 2002; Cáceres, 2010; Ballesteros, 2013), produciendo un flujo de aire desde el pasillo interior (caras interiores) hacia el exterior de los pallets (caras exteriores).

En ambos tratamientos (40 × 50 y 40 × 60), la inversión del flujo de aire se efectuó tras 4 horas, luego de haber iniciado el enfriamiento (Figura 11, Figura 12)

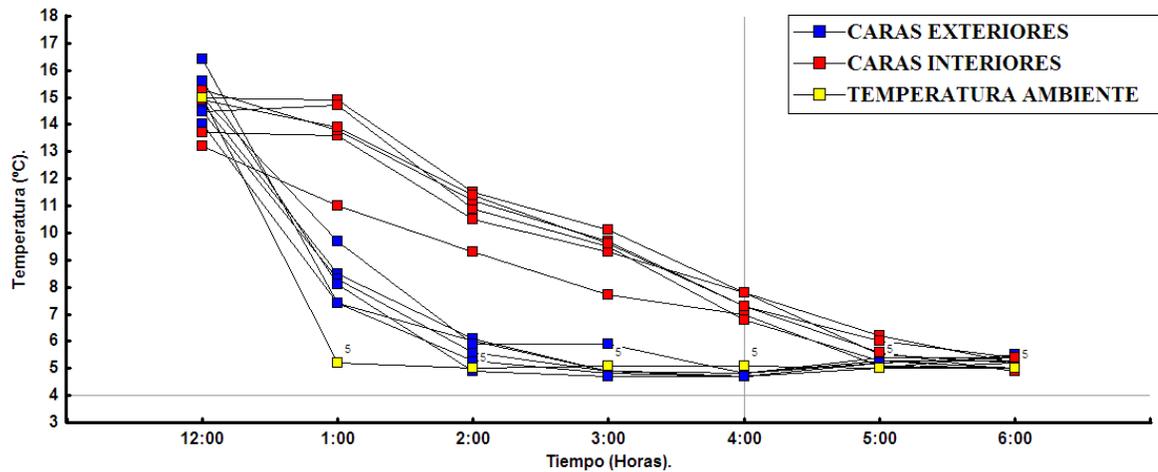


Figura 11. Tiempo de inversión del flujo de aire en diseño de caja 40 × 50 en frutos de mandarinas. La línea vertical indica la hora exacta de cambio del flujo de aire.

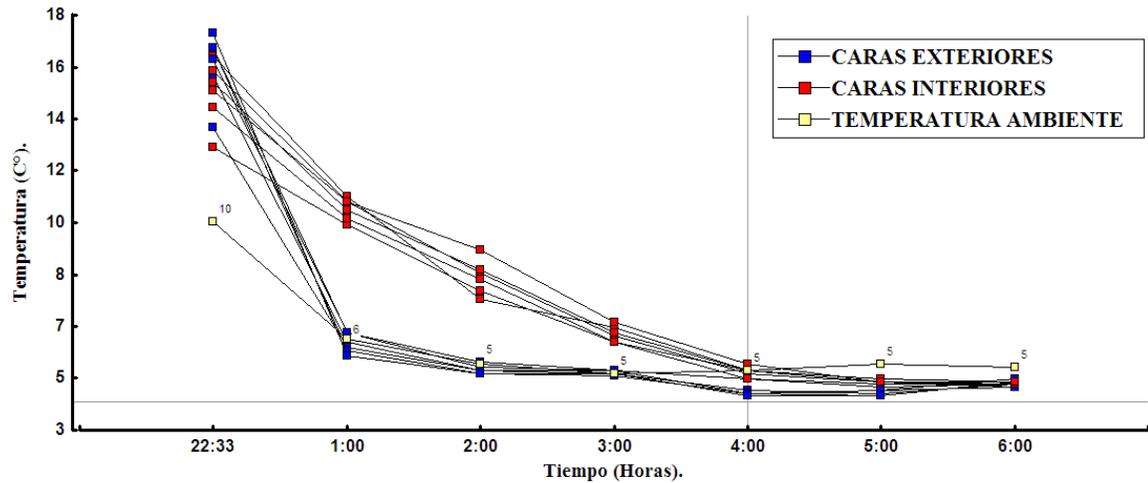


Figura 12. Tiempo de inversión del flujo de aire en diseño de caja 40×60 en frutos de mandarinas. La línea vertical indica la hora exacta de cambio del flujo de aire.

El diseño de caja 40×50 presentó un comportamiento variable al momento de disminuir la temperatura a su punto óptimo de almacenamiento, esto se debe a la división de cartón que tiene el diseño de caja. Las caras externas llegan a 5°C en diferentes tiempos y con una alta variabilidad entre ellas, ya que requirieron un mayor tiempo de estabilización en torno a los 5°C , retrasando el proceso de enfriamiento. En cambio, el diseño de caja 40×60 presentó un comportamiento menos variable en la disminución de la temperatura, puesto que las caras externas de los pallets dentro del sistema alcanzaron la temperatura óptima de almacenamiento con menor variabilidad.

En el Cuadro 4 se aprecia que el diseño de caja 40×60 registra una desviación estándar menor en sus temperaturas en comparación con el diseño de caja 40×50 . Esto conlleva a que el enfriamiento sea más homogéneo en este último diseño y menos homogéneo en el diseño de caja de 40×60 .

Cuadro 4. Promedio de la temperatura de pulpa de los distintas zonas de medición, cuando se procede a la inversión de flujo de aire, para ambos tratamientos.

TIPO DE CAJA	TEMPERATURA DE PULPA $^{\circ}\text{C}$	D. E.
40 x 50	6	1,4
40 x 60	5	0,4

El promedio de temperaturas de pulpa en el diseño de caja 40×50 es mayor en comparación con el diseño de caja 40×60 , debido a la división de cartón dentro del primer diseño de caja, (Apéndice I, Figura 1), lo que otorga una resistencia al paso del aire. Por lo tanto, el enfriamiento de la pulpa de los frutos es menos homogéneo entre las caras externas e internas durante el proceso, ya que no permite un flujo de aire libre entre las cajas (Cuadro 5).

Diferencia de temperatura entre la pulpa de la cara interna y la pulpa de la cara externa cuando esta última llega a 5 °C

En el Cuadro 5 se aprecia con mayor detalle lo explicado en el Cuadro 4, donde se observó que las diferencias de temperaturas que se obtienen entre las caras internas y las caras externas de los pallet montados con el diseño de caja 40 × 50, presentaron una mayor variación de temperaturas en la pulpa de los frutos.

Cuadro 5. Diferencias de temperaturas entre las caras internas y externas de los pallets cuando estas últimas llegan a 5°C, para cajas 40 × 50 y 40 × 60.

Tipo de caja	Temperatura de pulpa	Max.	Min.	D. E.
40 x 50	2,6	3,1	1,1	1,4
40 x 60	0,7	2,1	0,3	0,4

El diseño de caja 40 × 60 mostró 1,9 °C menos con respecto al diseño de caja 40 × 50, además este último presenta una menor variabilidad en las temperaturas entorno al mismo tiempo que el 40 × 60.

Esto toma importancia si se considera que parte vital del enfriamiento por aire forzado es que el aire frío pase por el interior de la caja con un flujo constante de cara exterior a interior o viceversa (Namesny, 1991; Herrero y Guardia, 1992; Thompson et al., 1998; Dehghannya *et al.*, 2012; Thompson *et al.*, 2003). Esto último es lo que se logra en el diseño de caja 40 × 60, donde no existe la división dentro de las cajas y el aire entra al interior del envase a través de la ventilación del cabezal y lateral, atravesando con un flujo constante las caras del envase. Por otro lado, el peso de la fruta en los pallets juega un papel determinante al momento de enfriar los frutos dentro del sistema de enfriamiento por aire forzado, ya que éste influye directamente en la masa a enfriar y en el calor generado (a mayor peso, mayor es la cantidad de fruta, y por lo tanto, más calor producirá ésta). El diseño de caja 40 × 50 que palletizado tiene un peso final de 1.123 kg en comparación con el diseño de caja 40 × 60, el cual tiene un peso final de 1.066 kg, el cual genera menor calor y en total una menor masa, otorga así, un enfriamiento más efectivo y en un menor tiempo hacia el final del proceso.

El Cuadro 4 señaló que el diseño de caja 40 × 50 presentó una mayor temperatura promedio en que la pulpa de las caras externas llega a 5°C. A pesar de esta información, las caras externas del diseño de caja 40 × 60 se demoran 10 minutos más en llegar a la temperatura óptima de almacenamiento con un tiempo promedio de 3,2 h (Cuadro 6).

Cuadro 6. Tiempo necesario para alcanzar la temperatura de 5°C en la pulpa de los frutos ubicadas en las caras externas de los pallet, para los distintos puntos de medición en ambos tratamientos.

Tipo de caja	Tiempo h	D. E.
40 x 50	3,2	0,4
40 x 60	3,3	0,5

Esto se debe particularmente a la demora que se produce en el enfriamiento del pallet 3 del diseño de caja 40 × 60, el cual se encuentra ubicado en la zona puerta, por lo que el tiempo de enfriamiento fue mayor. Thompson et al. (1998) explica que a mayor distancia del ventilador, mayor es la temperatura y el tiempo de enfriamiento, lo que demora el enfriamiento.

Deshidratación de los frutos

Se evidencia que el porcentaje de deshidratación en los frutos de mandarina durante el proceso es por debajo del 1% en todos los tratamientos (Cuadro 7) sin diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 8). Similar situación es reportada por Herrero y Guardia (1992) además de Thompson *et al.* (1998), donde la pérdida de peso por deshidratación en el proceso de enfriamiento de la fruta no supera el 2%.

Cuadro 7. Porcentaje de pérdida de peso de los frutos de mandarina var. W. Murcott tras el enfriamiento en el túnel de aire forzado.

Tratamientos	Porcentaje de deshidratación de los frutos
40 × 50 cm.	0,6
40 × 50 cm.	0,6
40 × 50 cm.	0,7
40 × 60 cm.	0,3
40 × 60 cm.	0,5
40 × 60 cm.	0,6

Cuadro 8. Efecto del tiempo de enfriamiento sobre la pérdida de peso en los frutos de mandarinas.

Tratamiento	Medias
40 × 50	0,63 a
40 × 60	0,46 a

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Fisher ($p \leq 0,05$).

ENSAYO 2: PRESIÓN DE SUCCIÓN DENTRO DEL TÚNEL DE AIRE FORZADO CON DIFERENTES TIPOS DE SELLADO EN LA BASE DE LOS PALLETS

En el primer tratamiento se sellaron ambas caras de los pallets por sus caras interiores y caras exteriores, se obtuvo una media de presión de succión de 27 mm c.a. en el diseño de caja 40 × 50, mientras que el diseño de caja 40 × 60 obtuvo una media de presión de succión de 15 mm c.a. Con el segundo tratamiento, en que sólo se sellaron las caras exteriores y dejando descubierta las caras interiores, se obtuvieron medias de 25 mm c.a. en el diseño de caja 40 × 50 y 14 mm c.a. en el diseño de caja 40 × 60. En el tercer tratamiento en que se removieron completamente los sellados en las bases de los pallets por sus caras interiores y caras exteriores, se obtuvo una media de presión de succión de 21 mm c.a. en el diseño de caja 40 × 50, mientras que el diseño de caja 40 × 60 respectivamente obtuvo una media de presión de succión de 10 mm c.a. Según Thompson (1998) y Ballesteros (2013) la presión de succión aumenta a medida que los materiales impidan el paso del aire. Es por esto que el diseño de caja de 40 × 50 cm presentó una mayor presión de succión, en comparación con el diseño de caja de 40 × 60 cm. Esto se explica porque el primer diseño tiene una división de cartón en la parte media del interior del envase, como se mencionó anteriormente, lo cual impide un flujo constante de aire hacia el evaporador aumentando la presión de succión, El segundo diseño al no tener dicha división (Apéndice I, Figura 2) permite un flujo de aire más expedito, lo que se refleja en una presión de succión menor (Cuadro 9). Ambos tratamientos obtienen una presión de succión similar a lo reportado por Namesny (1991), donde la presión de succión dentro del túnel puede variar entre 60 a 700 Pa. equivalentes a 6 y 71 mm c.a., respectivamente. Herrero y Guardia (1992) señalan que la presión negativa varía entre 30 a 50 mm c.a. como mínimo de columna de agua (mm c.a.), y que las medidas de presión de succión se ven afectadas por el diseño de la caja.

Este mismo patrón se repite y se evidencia en las presiones de succión con respecto a la zona donde está ubicado el pallet. Al sellar completamente las bases de los pallets, en el diseño de caja de 40 × 50, el cual presentó una media de presión de succión en el tratamiento 1 de 27,3 y 26,3 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta, respectivamente. Esto mismo ocurre al sellar las bases externas del pallet, puesto que presenta una media de presión de succión de 26,3 y 24,6 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta, respectivamente. De manera similar, al dejar descubiertas las bases de los pallets en el tratamiento 3, se presenta

una media de presión de succión de 22 y 20,6 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta, respectivamente.

Por otro lado, al sellar completamente las bases de los pallets conformados por las cajas de 40 × 60 cm, se obtuvieron presiones de succión de 16,6 y 14,3 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta, respectivamente. El mismo evento ocurre en el Tratamiento 2, donde se obtienen una media de presión de succión de 14,6 y 14 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta respectivamente. Mismo evento se frecuente en el Tratamiento 3, donde se obtienen una media de presión de succión de 10,6 y 10 mm c.a. en el pallet ubicado en zona ventilador y el pallet ubicado en zona puerta, respectivamente. (Cuadro 9)

Cuadro 9. Resumen de las medias de presión de succión (milímetros columna de agua) y promedio de las medias del primer y quinto pallet, correspondiente a cada tipo de caja y tratamiento.

Modelo de Caja	Tratamientos	Presión de succión (mm c.a.)		Promedio (mm c.a.)
		Zona ventilador	Zona Puerta	
40 × 50	T1 Sellado completo	27,3	26,3	27
	T2 sellado incompleto	26,3	24,6	25
	T3 sin sellar	22,0	20,6	21
40 × 60	T1 Sellado completo	16,6	14,3	15
	T2 sellado incompleto	14,6	14,0	14
	T3 sin sellar	10,6	10,0	10

La presión de succión dentro del túnel de aire forzado describe un evento que evidencia, que la posición del pallet está netamente ligada a los flujos de aire dentro del sistema de aire forzado, esto quiere decir, un aumento de presión de succión a medida que nos acercamos a la zona del ventilador. Esto concuerda con lo señalado por Thompson et al. (1998), donde al comparar cada tratamiento se puede observar que los pallet medidos en zona ventilador obtuvieron una mayor presión de succión con respecto a los pallet ubicados en zona puerta (Cuadro 9), esto se repite en los tres tipos de sellado de la base de los pallets.

Se demuestra la diferencia significativa que existe entre los diseños de caja donde la presión de succión es mayor en el diseño de caja 40 × 50 con respecto al diseño de caja 40 × 60 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Comparación entre las medias de presión de succión en los diseños de cajas 40 × 50 y, 40 × 60 dentro del túnel enfriamiento por aire forzado en frutos de mandarina.

Tipo de caja	Medias mm c.a.
40 × 50	24,6 a
40 × 60	13,4 b

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

La media de presión de succión, disminuye sucesivamente en T2 y T3, con respecto a T1, el cual demuestra, según lo mencionado por Ballesteros (2013) que la disminución de la presión de succión se ve afectada a medida que el flujo de aire se fuga, por lo cual se debe tener un especial cuidado en el sellado de los espacios libres. La presión de succión varía de acuerdo con el sellado que se aplica a los espacios libres de los pallets (Thompson *et al.*, 1998; Namesny, 1991). Esto se debe tener en consideración si se quiere mantener una presión estable dentro del sistema para un enfriamiento eficiente en los envases y a la vez un buen contacto del flujo de aire con la fruta.

Se demuestra la diferencia significativa entre tipos de sellado donde la presión de succión es mayor a medida que los espacios libres de los pallets disminuyen en los diseños de cajas 40 × 50 y, 40 × 60 (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de las medias de presión de succión con respecto al tipo de sellado en la base de los pallet dentro del túnel de enfriamiento por aire forzado en frutos de mandarina.

Tipo de sellado	Medias mm c.a.
Sellado completo	21,2 a
Sellado parcial	19,9 b
Sellado incompleto	15,8 c

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

ENSAYO 3: PRESIÓN DE SUCCIÓN DENTRO DEL TÚNEL DE AIRE FORZADO CON RESPECTO AL NIVEL DE CARGA (PALLETS)

La presión negativa o de succión dentro del túnel de aire forzado, aumenta a medida que nos aproximamos a la zona del ventilador, situación contraria ocurre a medida que nos alejamos del ventilador, donde la presión de succión disminuye. Otro punto a considerar es la influencia de la cantidad de pallets dentro del sistema de refrigeración, ya que tienen un efecto radical sobre la presión de succión, aumentando y disminuyendo la presión de succión a medida que retiramos o agregamos los pallets dentro del sistema (Figura 13).

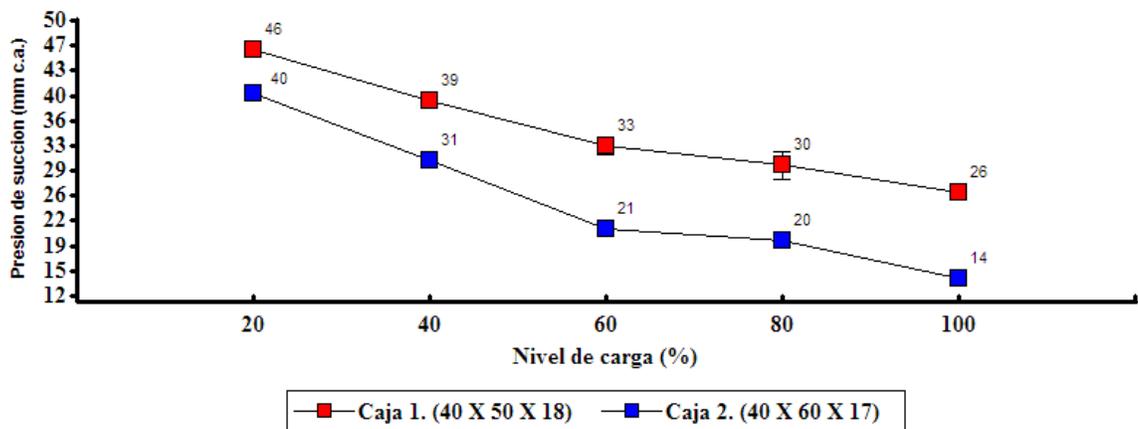


Figura 13. Medias de presión de succión (mm c.a.) correspondiente a cada tratamiento, a medida que disminuimos el nivel de carga dentro del sistema de aire forzado.

Cuando el túnel se encuentra con 10 pallets, es decir al 100%, la presión de succión disminuye en ambos tipos de cajas. Por otro lado, cuando el túnel se encuentra a una capacidad del 20%, equivalente a 2 pallets dentro del sistema de aire forzado, la presión de succión es mayor para ambos diseños de cajas, esto quiere decir, que a medida que el túnel se cargó con pallets la presión de succión disminuyó dentro del sistema de aire forzado.

Se demuestra la diferencia significativa que existe entre los diseños de cajas, donde la presión de succión es mayor en 40×50 con respecto al diseño de caja 40×60 dentro del túnel de aire forzado, en los diferentes tratamientos dentro del sistema de enfriamiento. (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación de los diseños de cajas 40×50 cm y 40×60 cm con respecto a las medias de presión de succión a medida que disminuyen el nivel de carga (pallets), dentro del túnel de enfriamiento por aire forzado en frutos de mandarina.

Tipo de caja	Medias mm c.a.
40×50	34,8 a
40×60	25,2 b

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Los pallets apilados con el diseño 40×50 , alcanzan una media de presión de succión de 26 mm c.a., en comparación con los pallets apilados con el diseño 40×60 , los cuales obtienen una media de presión de succión de 14 mm c.a. A medida que el nivel de carga dentro del túnel disminuye la presión de succión aumenta dentro del sistema, cuando el túnel tiene una carga del 80%, equivalentes a 8 pallets, la media de presión de succión del primer diseño es de 30 mm c.a., en comparación con el segundo diseño el cual obtiene una media de presión de succión de 20 mm c.a. La presión de succión se incrementa cuando el túnel tiene una carga del 60%, equivalentes a 6 pallets dentro de la cámara, donde la media de presión de succión del primer diseño fue de 33 mm c.a., en comparación con el segundo diseño donde la media de presión de succión fue de 21 mm c.a. Se observa un aumento considerable cuando la cámara tiene una carga del 40 y 20% equivalente a 4 pallets y 2 pallets respectivamente, donde las medias de presión de succión del primer diseño fueron de 39 y 46 mm c.a. en comparación con las medias de presión de succión del segundo diseño, las cuales alcanzan 31 y 40 mm c.a., respectivamente (Cuadro 13).

Se demuestra la diferencia significativa que existe entre los tratamientos, donde la presión de succión es mayor a medida que disminuimos el nivel de carga dentro del sistema de enfriamiento, en los diferentes tratamientos (Cuadro 12).

Cuadro 13. Comparación de los diseños de cajas 40×50 y 40×60 con respecto al nivel de carga (pallets) dentro del túnel de enfriamiento por aire forzado en frutos de mandarina.

Nivel de carga	Medias mm c.a.
2 pallet (20%)	43,0 a
4 pallet (40%)	34,8 b
6 pallet (60%)	27,0 c
8 pallet (80%)	24,8 d
10 pallet (100%)	20,3 e

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Al comparar la media de presión de succión en ambos diseños de cajas, se comprueba que el primer diseño tiene una mayor presión negativa o de succión, en comparación al segundo diseño, en todos los tratamientos dentro de la evaluación. Este resultado concuerda con la evaluación anterior. Presión de succión con diferentes tipos de sellado en la base de los pallets, donde la media de presión de succión es mayor en el primer diseño en comparación al segundo diseño estudiado.

CONCLUSIONES

Ambos tipos de caja presentaron un tiempo de enfriamiento similar. Sin embargo, el diseño de caja $40 \times 60 \times 18$ cm permite que los frutos de mandarina var. W. Murcott alcancen la temperatura óptima de almacenamiento de una manera más eficiente en comparación con el diseño de caja de $40 \times 50 \times 17$ cm.

La exposición de los frutos al sistema de enfriamiento genera deshidratación por debajo del 1 % en mandarinas var. W, Murcott, independientemente del diseño de cajas utilizado.

Un sellado completo permite una mayor presión de succión que un sellado parcial, puesto que la presión de succión aumenta a medida que los espacios libres de los pallets disminuyen.

La presión de succión aumenta a medida que los pallet se encuentran más cercanos a la zona ventilador, mientras que a medida que se acercan a la zona puerta, la presión de succión disminuye. A mayor cantidad de pallet situados dentro del sistema de aire forzado, la presión de succión disminuye, por el contrario, a menor cantidad de pallets, la presión de succión aumenta.

BIBLIOGRAFÍA

- Artés, F. 2004. Refrigeration for preserving the quality and enhancing the safety of plant foods. Bulletin of the International Institute of Refrigeration LXXXIV. 2004 (1):1-2004.
- Ballester L. 2013. Enfriamiento por aire forzado [En línea]. México. Recuperado en: <<http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2013/06/enfriamiento-por-aire-forzado/>>. Consultado el: 20 de julio 2013.
- Brosnan, T. and D. Sun. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products a review. International Journal of Refrigeration 24 (2): 154 -170.
- Caceres, N. 2010. Evaluación de dos diseños de cajas de cartón en la eficiencia del tiempo y costo de enfriado en uva de mesa cv. Thompson Seedless. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronomicas, Universidad de Chile. 35p.
- Cuquerella, J., Martínez-Jávega, J., Monterde, A., Navarro, P. y A. Salvador. 2004. Nuevo sistema de medida de color para cítricos. Levante agrícola 372: 298-304.
- Dehghannya, J., Ngadi, M., Vigneault, C., 2010. Mathematical modeling procedures for airflow, heat and mass transfer during forced convection cooling of produce: a review. Food Engineering Reviews 2 (4): 227–243.
- Dehghannya, J., Ngadi, M., Vigneault, C., 2011. Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas. Food Control 22 (8): 1393–1399.
- Dehghannya, J., Ngadi, M., Vigneault, C., 2012. Transport phenomena modelling during produce cooling for optimal package design: thermal sensitivity analysis. Biosystems Engineering 111 (3): 315–324.
- Di Rienzo, J.A.; F. Casanoves; M.G. Balzarini; L. González; M. Tablada y C.W. Robledo. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Ferrua, M.J., Singh, R.P., 2009a. Design guidelines for the forced-air cooling process of strawberries. International Journal of Refrigeration 32 (8): 1932–1943.
- Ferrua, M. and R. Singh. 2009b. Modelling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages. Part I: numerical model. International Journal of Refrigeration 32 (2): 334–347.
- Gentry, J. and K. Nelson. 1964. Conduction cooling of table grapes. American Journal of Enology and Viticulture 15(1): 41-46.

- Gesex S.A. 2013. Documento interno: diseño de envases de la empresa Gesex S.A. Chile. 2p.
- Ginsburg,L., J. Combrink and A. Truter. 1978. Long and short term storage of table grapes. International Journal of Refrigeration 1(3): 137-142.
- Hardenburg, R., A. Watada and C. Wang. 1986. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks, United States of America. USDA-ARS Agric. Handbook 66, 130 p.
- Herrero, A. y J. Guardia. 1992. Conservación de frutos. Manual tecnico. Madrid, Mundi. 409p.
- Kader, A. 2002. Tecnología Postcosecha de Productos Hortofrutícolas. División de Agricultura y Recursos Naturales. Publicación 3311. Universidad de California. 571 p.
- Larral, I. 1996. Diagnóstico del enfriamiento rápido en kiwi y uva de mesa y efectos en postcosecha del aire forzado como método de enfriamiento. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 61p.
- Lizana, L. 1996. Manejo calidad y fisiología postcosecha de fruta (Apuntes de Fisiología de postcosecha). Universidad de Chile. Santiago, Chile. 108p.
- Luchsinger, L. y A. Lizana. 2007. Efecto del diseño de la caja en la eficiencia del tiempo de enfriamiento en uva de mesa Thompson Seedless. En: Congreso Iberoamericano de Tecnología Postcosecha y Agroexportaciones. (Quinta versión,29 de mayo al 1 de junio del 2007, Cartagena). Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena. 56 p.
- Luchsinger, L. 2013, Junio. Postcosecha de frutas. [Sala de clases]. Departamento de producción agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.
- Luchsinger, L. 2013. Ventilación en empaques corrugados y su incidencia en el enfriamiento (cadena de frio). [En línea]. Panamá. 20p. Recuperado en: <http://www.drivecr.com/acccsa2013/conferencias/martes/lluchsinger.pdf>. Consultado el: 10 de noviembre del 2013.
- Lutz, J. y R. Hardenburg. 1968. The commercial storage of fruit, vegetables, and florist and nursery stock. USDA. Agriculture Handbook 66. 579p.
- Martenstein T. 2012. Evaluación técnica económica de la plantación y cultivo de mandarina W. Murcott, en reemplazo de palta Hass [En línea]. Chile. Disponible en <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/110862> Consultado el: 28 de diciembre 2013.

- Martínez- Jávega, J.M. 1995. Tendencias actuales en la conservación refrigeradas de frutas como marcadores de la calidad higiénicas de los frutos. *Lérida. Microbiología SEN* (11): 111-114.
- Martinez-Javega, J.M., Del Rio, M.A. 1998. Desordenes fisiológicos en postcosecha. Libro “Manejo Postcosecha de frutas y versuras en iberoamerica”. Ed. Reginaldo Baez. P: 57-62.
- Miller, E. V. 1946. The Physiology of Citrus Fruits in Storage. *The Botannical Review* (24): 43-56
- Mitchell, G. 1988. Enfriado de productos hortofrutícolas. Capítulo 7, 27 p. In: Fundación Chile. Curso Tecnología de postcosecha de frutas y hortalizas. 122 p.
- Nahor, H., Hoang, M., Verboven, P., Baelmans, M., Nicolai, B., 2005. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores. *International Journal of Refrigeration* 28 (3): 368–380.
- Namesny, A. 1991, Enero. El pre-enfriamiento II parte. (bol. N°64), *Horticultura*. España. 73p.
- Nelson, K. 1984. Sistema de Manejo de Postcosecha para uva de mesa en California y Chile. En: Fundación Chile. Curso producción y manejo de uva de mesa. Santiago. Chile. 287-317p.
- Nelson, K. 1979. Harvesting and handling California table grapes for market. No. 1913. University of California, ANR Publications. 67p.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2013. Mandarinas: un negocio jugoso. Santiago, Chile. 9p.
- Pathare, P.B., Opara, U.L., Vigneault, C., Delele, M.A., Al-Said, F.A., 2012. Design of packaging vents for cooling fresh horticultural produce. *Food and Bioprocess Technology* 5 (6): 2031–2045.
- Rivera, O. 2011. Evaluación de capacidades de envases de cartón para el enfriamiento rápido de uvasde mesa de exportación. Memoria de título para optar al título de Ingeniero civil mecánico. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. 68p.
- Thompson, J., F. Mitchell, T. Rumsey, R. Kasmireand, C. Crisosto. 1998. Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. Publication 21567. 34p.

Thompson, A.K., 2003. Fruit and Vegetables-Harvesting, Handling and Storage, second ed. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.

Vidal, M. 2008. Enfriamiento de un sólido por flujo forzado con cambio cíclico de dirección. Aplicación a pallets de uvas, memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. 110p.

Wade, N. 1984. Estimation of the refrigeration capacity required to cool horticultural produce. International Journal of Refrigeration 7(6): 358-366.

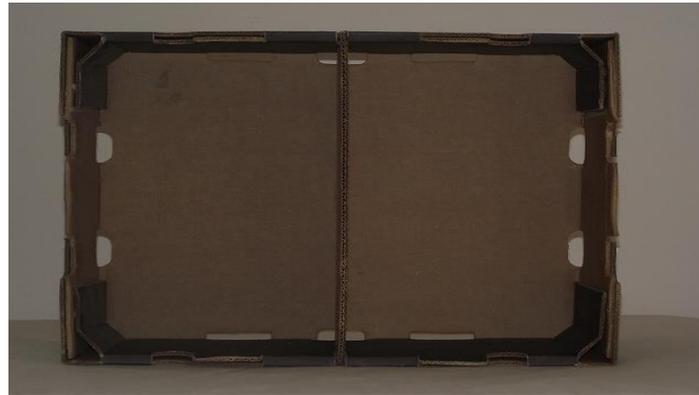
Xu, Y., and D. Burfoot. 1999. Simulating the bulk storage of foodstuffs. Journal of Food Engineering 39:23-29.

APENDICE

P84-1L



Vista del cabezal



Vista del Interior



Vista del Lateral

Dimensiones Exteriores [mm]	50x40x18
Ventilación del Cabezal [%]	4,8
Ventilación del Lateral [%]	4,7
Ventilación de la base [%]	7,75

Figura 1. Características Caja P84-1L.

P84-L**Vista del cabezal****Vista del Interior****Vista del Lateral**

Dimensiones Exteriores [mm]	60x40x17
Ventilación del Cabezal [%]	6,5
Ventilación del Lateral [%]	6,7
Ventilación de la base [%]	4,9

Figura 2. Características Caja P84-L.



Figura 3. Coincidencia de los orificios de ventilación con cajas colindantes, caja P84-L.