

TIEMPO DE ENFRIAMIENTO EN LIMONES MEXICANOS, USANDO AIRE FORZADO Y ENVASES COMERCIALES

COOLING TIME OF SEEDED MEXICAN LIME FRUIT, USING FORCED AIR AND COMMERCIAL PACKING

Carlos Javier Martínez-Hernández^{1*}; Ignacio Covarrubias-Gutiérrez^{1*}; Salvador Valle-Guadarrama²

¹Posgrado CIESTAAM-Universidad Autónoma Chapingo.

²Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

Correo-e: krlitos_jmh@yahoo.com.mx, icovag@gmail.com (*Autores para correspondencia).

RESUMEN

Los procesos de comercialización de frutas y hortalizas actualmente son más exigentes en la garantía de inocuidad y conservación de la calidad, por lo que el uso de la cadena de frío en países en vías de desarrollo, como México, se está incrementando, principalmente en productos perecederos destinados a los supermercados y al mercado internacional. El tiempo de preenfriado tiene implicaciones en los costos y en la organización de los envíos a los compradores. El objetivo de esta investigación fue evaluar el tiempo de enfriamiento $t_{1/2}$ (Z), $t_{7/8}$ (3Z) y la velocidad de pérdida de peso en el proceso de preenfriado de frutos de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle). Se utilizó un cuarto a temperatura de 9 ± 0.3 °C, humedad relativa entre 90-95 %, y un túnel de preenfriado con velocidades de aire de 1.0 a 2.5 m·s⁻¹. El tamaño de los frutos varió de 33 a 45 mm de diámetro, los cuales fueron colocados en envases comerciales de cartón, madera y plástico. La velocidad de aire, el material de empaque y el tamaño de fruto influyeron en la velocidad de pérdidas de peso y en los valores del tiempo de enfriamiento Z.

Palabras clave adicionales: *Citrus aurantifolia*, cítricos, poscosecha, Michoacán.

ABSTRACT

The fruits and vegetables commercialization process is now more demanding in guarantee of food safety and quality conservation, so the use of cold chain in developing countries like Mexico is increasing, mainly for perishable products destined to supermarkets and the international market. Pre-cooling time has cost implications and organizing shipments to buyers. The aim of this study was to evaluate the cooling time $t_{1/2}$ (Z) and $t_{7/8}$ (3Z), and the loss weight rate in the pre-cooling process of fruits of seeded Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). It was used a cold room at 9 ± 0.3 °C, relative humidity between 90-95 %, and a pre-cooled tunnel with speed air from 1 to 2.5 m·s⁻¹. The fruit size ranged between 33 and 45 mm in diameter, and packaging systems were commercial packing cardboard box, wooden box, polypropylene woven bag and plastic box. The results show that speed air, packing material used, and the fruit size influenced the rate of weight loss in fruits and the cooling times Z.

Additional key words: *Citrus aurantifolia*, citrus, postharvest, Michoacán.

INTRODUCCIÓN

El limón con semilla se cultiva principalmente en la costa del océano Pacífico mexicano desde el estados de Oaxaca hasta Nayarit. La fruta cosechada tiene como destino principal los empaques donde se realiza el acondicionamiento. Existe un mercado potencial de preenfriado en 50 empacadoras distribuidas en las zonas productoras, las cuales procesan cerca

de 600 mil toneladas al año de limones cuyo principal destino son las centrales de abasto, supermercados y la exportación principalmente a los Estados Unidos de América (Salcedo-Baca *et al.*, 2010).

La demanda de frutas y hortalizas refrigeradas ha sido impulsada por los mercados internacionales, para garantizar

la inocuidad y además conservar la calidad de productos perecederos, aumentando el tiempo de vida del producto desde la cosecha hasta que lo adquiere el consumidor final. En los mercados domésticos los supermercados demandan frutas y hortalizas acondicionadas y refrigeradas, existiendo una tendencia a incrementar su participación en las ventas a los consumidores finales. Como ejemplo, en México durante 2002 la participación de los supermercados en el comercio de alimentos representaba alrededor del 45 %, y en frutas y hortalizas del 8 al 12 %; estudios más recientes muestran que el crecimiento urbano, el aumento en los ingresos y la apertura de los mercados tienen influencia en el aumento de la participación de los supermercados en el comercio al menudeo, estimando que en las zonas urbanas de México para el 2015 más del 50 % de las ventas de alimentos se realizará en los supermercados (Schwentenius y Gómez, 2002; Traill, 2006).

El enfriamiento y el calentamiento son tratamientos que se aplican a frutos cosechados para prolongar su vida útil y como tratamientos sanitarios (Brosnan y Sun, 2001; Paull y Chen, 2000; Erkan *et al.*, 2005); La disminución de temperatura del producto es rápida al comienzo del enfriamiento y baja a medida que el producto se acerca a su temperatura final (Brosnan y Sun, 2001). El estudio de los tiempos de enfriamiento se realiza de manera experimental con datos de cinética de temperatura y rutinas de regresión, basados en la resistencia al flujo de energía, para determinar la velocidad del proceso y el tiempo de enfriamiento (Valle *et al.*, 2007; Wang y Sun 2002; Becker y Fricke, 2004). En todos los métodos de preenfriado se emplea la expresión “tiempo medio de enfriamiento ($t_{1/2}$)”. Éste se define como el intervalo durante el cual la diferencia de temperatura entre el producto y el medio enfriador se reduce a la mitad. El tiempo medio de enfriamiento es el mismo para un paquete expuesto a un método dado, sin tomar en consideración su temperatura inicial y la del enfriador. Lo que cuenta es la diferencia de temperaturas (Liu, 1992; Brosnan y Sun, 2001).

La temperatura promedio del producto durante el enfriamiento por aire forzado sigue un patrón como el que se muestra en la Figura 1; los números entre paréntesis indican la fracción obtenida de la división de la diferencia de la temperatura del producto y la temperatura del aire en la cámara, entre la diferencia de la temperatura inicial del producto y la del aire.

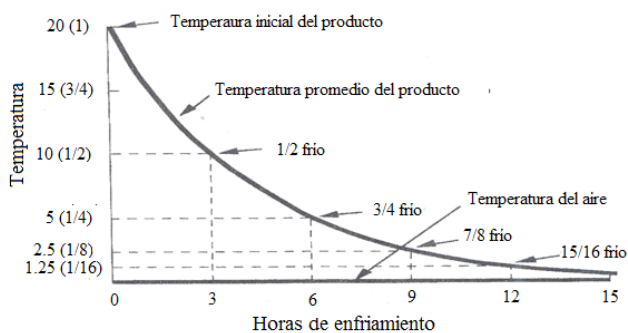


Figura 1. Comportamiento típico de la temperatura en el preenfriado del producto (Fuente: Thompson *et al.*, 2002).

Según Thompson *et al.* (2002), el tiempo total de enfriamiento depende del flujo del aire y del diámetro del producto. Un producto con diámetro grande requiere considerablemente más tiempo para enfriarse que uno de diámetro pequeño. Teóricamente el tiempo Z es independiente de la temperatura inicial del producto y permanece constante a través de todo el proceso de refrigeración. El tiempo medio de enfriamiento (Z) es expresado en la forma de la Ecuación (1), donde C representa un coeficiente de enfriamiento (s^{-1}):

$$Z = \ln(0.5)/C \quad (1)$$

Uso del tiempo a siete octavos de enfriamiento

Muchos de los cálculos de enfriamiento están basados en el tiempo a siete octavos ($t_{7/8}$), que es el tiempo requerido para enfriar un producto siete octavos de la diferencia entre su temperatura inicial y la temperatura del medio de enfriamiento. Los tiempos a siete octavos de enfriamiento equivalen a tres veces el tiempo medio de enfriamiento o $3Z$ (Figura 1), que son los mismos para un producto dado y un medio de enfriado aplicado en forma determinada, independientemente de la temperatura del producto y del medio de enfriamiento. Los tiempos y las temperaturas a siete octavos de enfriamiento son estimaciones bastante prácticas de enfriamiento en operaciones comerciales, y están más estrechamente relacionadas con los tiempos comerciales de enfriamiento que en los tiempos de semienfriado, porque la temperatura del producto a tiempo de siete octavos de enfriamiento es aceptable para requerimientos de temperaturas de almacén o transporte (Brosnan y Sun, 2001).

El tiempo a siete octavos de enfriamiento se puede medir directamente y tiene significado físico sólo cuando la temperatura del medio de enfriamiento se mantiene constante (Brosnan y Sun, 2001). Matemáticamente es expresado en la forma de la Ecuación (2), donde j es un factor lag, que corresponde a la temperatura en el centro del fruto dividido entre la temperatura de la superficie, y puede variar de 1 a 2:

$$3Z \text{ (min)} = \ln(8j)/C \quad (2)$$

La finalidad de este trabajo fue probar cuatro tipos de envases comerciales, así como dos tamaños comerciales del fruto, empleando circulación forzada a dos velocidades diferentes y teniendo como testigo la circulación normal dentro de la cámara. Se analizó el efecto de estas condiciones en el factor pérdida de peso de los frutos, y el tiempo medio y a 7/8 de enfriamiento, ya que se conoce que la temperatura óptima final que debe alcanzar el fruto de limón mexicano para tener un preenfriado adecuado es de 12 ± 1 °C (Mazzuz, 1996).

En tal contexto se plantearon como objetivos analizar el proceso para obtener curvas de enfriamiento para cada tratamiento analizado en el limón mexicano, y analizar el comportamiento que sigue el factor pérdida de peso en los diferentes tratamientos de preenfriado a que fue sometida la fruta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron frutos de cultivares ubicados en Apatzingán, Michoacán, México, que tenían 24 h de haber sido cosechados, resultando un total 72 unidades experimentales, distribuidas en 24 tratamientos con tres repeticiones cada uno, consistiendo éstas de cajas y arpillas con aproximadamente 20 kg de limón mexicano.

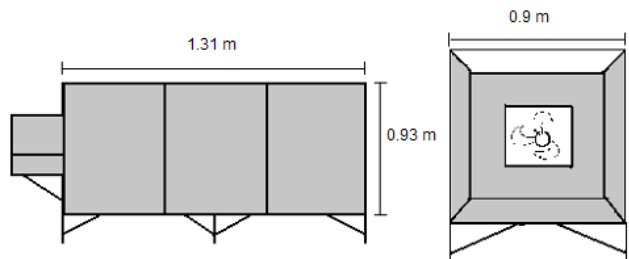


Figura 2. Esquema del túnel de enfriamiento utilizado.

Se utilizó un túnel de enfriamiento hecho de lámina galvanizada (Figura 2), equipado con extractor de aire con dos velocidades, moderada ($1.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y alta ($2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), y una cubierta de plástico en la parte superior del túnel. Se utilizaron cuatro tipos de envases: (a) caja de madera de pino blanco con capacidad de 20 kg; (b) caja de cartón corrugado de doble cara, onda C, papel marrón o kraft, con una resistencia de 17/19 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) caja de plástico (polipropileno) con capacidad de 20 kg, y (d) bolsa de polietileno, a la que comercialmente se le conoce como arpillá, con un número de malla de 12 aberturas $\cdot\text{cm}^{-2}$ (Figura 3).

En el Cuadro 1 se muestra el volumen de espacio vacío entre frutos en los distintos envases, y en el Cuadro 2 el Índice de Área de Ventilación (IAV), parámetro que relaciona el área de abertura de cada una de las presentaciones con la masa de producto contenida en ellas. La arpillá presentó el mayor valor en

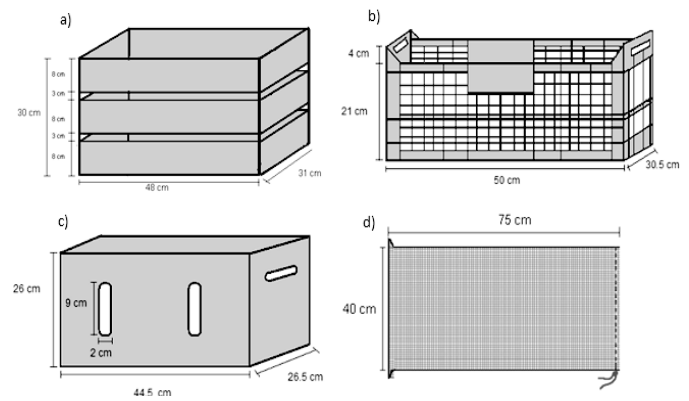


Figura 3. Envases utilizados: a) madera, b) plástico, c) cartón, d) arpillá.

IAV, seguida por el plástico y la madera. Este valor es importante, pues cuanto mayor es su valor, mayor circulación de aire se tendrá dentro del envase.

Antes del preenfriado los frutos se colocaron en una cámara a temperatura de $33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 10 h, con el objetivo de lograr una temperatura similar a los frutos que se preenfriaban en el Valle de Apatzingán, Michoacán, México, donde se realiza el enfriamiento comercial. Los frutos alcanzaron una temperatura entre 25 y $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para medir la evolución de la temperatura durante el preenfriamiento, se colocaron en el centro de frutos representativos en las unidades experimentales termopares de aguja conectados a una interfase de captura de datos o “*Datallogger*” marca Testo®. Para evaluar la pérdida de peso se formaron unidades experimentales en mallas de plástico de un kilogramo, midiendo los pesos al inicio y al finalizar el preenfriado. Los frutos donde se evaluó temperatura en la unidad experimental fueron colocados en el centro geométrico del envase cubiertos con los demás limones.

Las condiciones de temperatura y humedad relativa de la cámara fueron evaluadas con un higrotermógrafo digital marca

Cuadro 1. Volumen de espacio vacío entre frutos en los diferentes envases.

Envase	Volumen (m^3) del envase	Volumen (m^3) de espacio vacío en envase	
		Diámetro = 33-39 mm	Diámetro = 39.1-45 mm
Cartón	0.044640	0.027135	0.027155
Madera	0.030660	0.017532	0.017547
Plástico	0.038125	0.022370	0.022388
Arpillá	0.035460	0.021581	0.021584

Cuadro 2. Índice de Área de Ventilación (IAV) en los envases.

Envase	Área de suministro de aire (cm^2)	Masa contenida en los envases (kg)	IAV ($\text{cm}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
Cartón	65.60	15	4.30
Madera	268.00	20	13.40
Plástico	601.68	20	30.00
Arpillá	1100.00	20	55.00

Cuadro 3. Velocidad de aire en la entrada y periferia de los envases en cada tratamiento.

Tipo de envase	Fruto de 33-39 mm			Fruto de 39-45 mm		
	Velocidad del aire (m·s ⁻¹)			Velocidad del aire (m·s ⁻¹)		
	Normal	Media	Alta	Normal	Media	Alta
Cartón	0.19	0.35	0.44	0.23	0.35	0.51
Madera	0.30	0.52	0.61	0.34	0.53	0.68
Arpilla	0.55	0.63	0.72	0.56	0.71	0.79
Plástico	0.35	0.65	0.66	0.41	0.67	0.69
Promedio entrada	0.35	0.54	0.61	0.38	0.57	0.67
Promedio periferia	1.04	1.44	2.45	1.04	1.33	2.53

Testo®. Las condiciones tanto en la cámara como en el túnel de preenfriado fueron de 9.0 ± 0.3 °C y de 90-95 % de humedad relativa. Se tomaron datos de los diferentes flujos de aire que se tenían en cada tratamiento, tanto en las entradas como en la periferia del envase. Los valores de las velocidades se resumen en el Cuadro 3.

Las velocidades mostradas en el Cuadro 3 se refieren al flujo promedio del aire considerando el flujo que llega a la entrada, por el área de ventilación de los envases, en el que se puede observar que se manejaron flujos de aire de $0.50-0.79$ m·s⁻¹ en el túnel de enfriamiento, mientras que para el cuarto refrigerado se tenían flujos de alrededor de $0.10-0.56$ m·s⁻¹. El fruto de mayor tamaño presentó velocidades mayores que el fruto de menor tamaño porque había mayor espacio entre ellos.

Para las velocidades de aire en la periferia (Cuadro 3) se encontraron velocidades de 0.99 a 1.14 m·s⁻¹ para los tratamientos en circulación normal de aire, mientras que para el túnel en velocidad media fue de 1.06 a 1.75 m·s⁻¹ y para la velocidad alta 2.35 a 2.56 m·s⁻¹.

Las variables respuesta fueron la velocidad media de pérdida fisiológica de peso y del tiempo medio de enfriamiento Z. La velocidad media de pérdida fisiológica de peso (PPF) se determinó considerando la diferencia de peso antes de iniciar el tratamiento y 12 h después. Para evaluar el peso se usó una balanza digital con precisión de 1 g. Para evaluar las pérdidas fisiológicas de peso y la velocidad de pérdida de peso en los tratamientos se emplearon las Ecuaciones (3) y (4), donde P_i es peso inicial, P_f es peso final, $vel.PFP$ es velocidad de pérdida fisiológica de peso (%·h⁻¹); %PPF indica el porcentaje de pérdida fisiológica de peso y t es tiempo en horas, que para cada tratamiento fue de 12 h.

$$\%PPF = \frac{(P_i - P_f) 100}{P_i} \quad (3)$$

$$vel.PFP = \frac{\%PPF}{t} \quad (4)$$

Para la evaluación del tiempo de enfriamiento Z, primero se registró cada minuto la temperatura del centro del fruto en cada tratamiento con ayuda de termopares de aguja. Posteriormente cada historial térmico se ajustó mediante regresión a un modelo del tipo de la Ecuación (5) (Valle *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2001). Para obtener el coeficiente de enfriamiento (representado por la constante k_1), el tiempo medio Z ($t_{1/2}$) y el tiempo 7/8 de enfriamiento 3Z ($t_{7/8}$) se obtuvo con $k_3 = 2$ para $t_{1/2}$ y $k_3 = 8$ para $t_{7/8}$. (Brosnan y Sun, 2001).

$$T = T_0 + k_2 \left(1 - e^{-k_1 t}\right) \quad (5)$$

$$t(\text{min}) = \left(\frac{1}{k_1}\right) \ln k_3 \quad (6)$$

Para el análisis de resultados se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial $4 \times 3 \times 2$, siendo los factores de variación, tipo de envase (arpilla, madera, plástico y cartón), la velocidad del aire (normal, media y alta) y el tamaño del fruto (33-39 mm y 39.1-45 mm de diámetro). Cada tratamiento se realizó por triplicado. El análisis estadístico de resultados se realizó con ayuda del paquete estadístico SAS® Version 6 (SAS Institute, 1989) y la técnica de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tratamientos en los que se utilizó el envase de cartón y madera presentaron menor velocidad de pérdida fisiológica de peso (0.065 y 0.067 %·h⁻¹, respectivamente), sin una diferencia significativa entre éstos, pero sí en los casos de la arpilla y las cajas de plástico, que tuvieron una mayor velocidad de pérdida fisiológica de peso, de hasta 0.123 %·h⁻¹ en el caso de la arpilla y 0.087 %·h⁻¹ para plástico, lo que representa una diferencia significativa entre estos envases (Figura 4). Esto se debió a que la cantidad de flujo de aire que circula en el interior de estos envases es mayor que en el cartón y la madera. Wills *et al.* (1981) mencionaron al respecto que las pérdidas de agua pueden reducirse colocando en torno al producto una barrera física que dificulte el movimiento del aire alrededor del mismo, como las cajas de madera o cartón; la extensión en que el envasado reduce la velocidad de pérdida de peso depende de la permeabilidad

del envase al vapor y de lo apretado que se encuentra la fruta en su interior. En cuanto a la velocidad del aire, la velocidad normal presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$), comparada con la velocidad alta, mientras que la velocidad media no presentó diferencia significativa con ninguna de las anteriores, comportándose así en forma congruente con lo mencionado por Wills *et al.* (1981), quienes plantean que el movimiento de aire sobre el producto es un factor importante en la determinación de las pérdidas de agua. Cuando se mueve el aire a mayor velocidad sobre la superficie de la fruta también es mayor la velocidad a la que el producto pierde agua. Thompson *et al.* (2002) suponen que el paso del flujo de aire barre la humedad del producto y aumenta su pérdida de agua, por lo que el enfriamiento por aire forzado puede ser inapropiado para algunos productos con grandes superficies de exposición al flujo de aire.

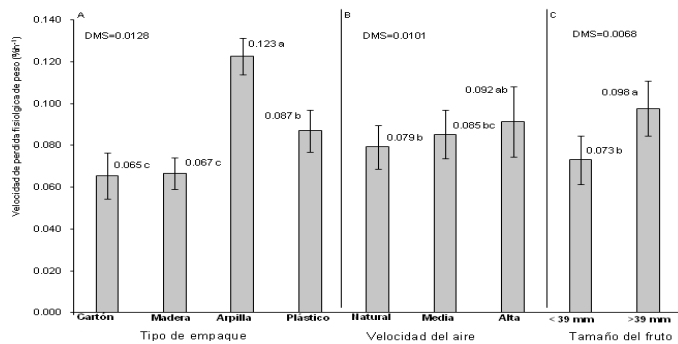


Figura 4. Efecto de los factores en velocidad de pérdida de peso de fruto. A) Efecto global del factor tipo de envase, B) Efecto global del factor velocidad de aire, C) Efecto global del factor tamaño del fruto. Medias seguidas de la misma letra al interior de cada factor son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$)

En cuanto al tamaño, el fruto más grande es el que presenta las mayores velocidades de pérdida de peso (Figura 4). Con respecto al efecto del factor tamaño del fruto, se puede decir que los frutos de diámetro mayor a 39 mm tuvieron una mayor pérdida de peso que los frutos más pequeños, existiendo diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) entre ellos. Lo anterior puede tener explicación también por la mayor circulación de aire en los envases con frutos de mayor tamaño, ya que entre éstos los espacios son mayores y por lo tanto circula mayor cantidad de aire.

Los factores envase y velocidad presentaron interacción significativa ($P \leq 0.05$) para la variable velocidad de pérdida fisiológica de peso. Esto está relacionado con el área de ventilación que tenga el envase, ya que dependiendo de ésta será el flujo de aire que circule por el interior del mismo. También hubo interacción entre velocidad del aire y tamaño del fruto debido a que al tener éste mayor tamaño, hay mayor espacio entre los frutos, y por lo tanto; es mayor la cantidad de aire que puede circular entre ellos; además se observa que la pérdida fisiológica de peso se incrementa con el tamaño del fruto (Figura 4 C), y es muy notable que dichas pérdidas sean mayores cuando aumenta el flujo de aire (Figura 4 B), variando significativamente con el envase que contiene al producto (Figura 4 A).

Con el fin de mostrar las diferentes curvas de enfriamiento que se generaron, se presentan las Figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10, donde se puede apreciar el comportamiento del tiempo medio (Z) y siete octavos (3Z), además de que se puede comparar gráficamente la variación de estos parámetros en cada envase y tamaño del fruto con respecto al tipo de velocidad del aire.

El máximo tiempo de enfriamiento se presentó en el envase de cartón y circulación normal del aire, debido a que éste tiene menos área de ventilación por donde puede circular el aire, ocasionando un flujo menor al que se presenta en los demás envases. Por el contrario, se encontró que el tiempo menor en que se alcanza la temperatura media de enfriamiento se obtuvo con la arpillá a una velocidad alta de aire. El análisis estadístico nos muestra que existe diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre los tres factores de variación. En la variable tiempo de enfriamiento entre los tres tipos de velocidades de aire (Cuadro 4), se presentó un tiempo medio Z ($t_{1/2}$) y a siete octavos de enfriamiento 3Z ($t_{7/8}$) menor con la velocidad alta de aire. Thompson *et al.* (2002), mencionan que cuando el aire no es forzado a pasar a través del interior de los envases que contienen al producto, solamente circula por la periferia. Esto puede observarse más en el tratamiento en cartón y velocidad normal de aire, ya que además de que no se le aplicó el sistema de aire forzado tienen poca área de ventilación, funcionando como una barrera al flujo de aire, presentando los máximos valores en tiempo de enfriamiento (Figuras 5 y 6). Aun cuando se obliga al aire a circular a través del envase de cartón,

Cuadro 4. Valores de tiempo medio y a siete octavos de enfriamiento.

Factor y Nivel	Z ($t_{1/2}$) ^y (min)	3Z ($t_{7/8}$) ^y (min)
Factor A: tipo de envase.		
A.1. Cartón.	139.008 a ^x	417.025 a
A.2. Madera	51.290 bc	153.87 bc
A.3. Arpillá	33.427 c	100.28 c
A.4. Plástico	53.043 b	159.13 b
DMS ^w	20.616	16.848
Factor B: velocidad de aire		
B.1. Normal	108.258 a	324.773 a
B.2. Media	64.146 b	192.439 b
B.3. Alta	35.173 c	105.518 c
DMS	20.52	61.56
Factor C: tamaño del fruto		
C.1. 33-39 mm	51.791 b	155.373 b
C.2. 39.1-45 mm	86.593 a	259.780 a
DMS	13.931	41.793
Coefficiente de variación (%)	40.8704	40.8704
Interacción factores (A*B)	**	**
Interacción factores (A*C)	NS ^v	NS
Interacción factores (B*C)	*	*
Interacción factores (A*B*C)	**	**

^y $t_{1/2}$: tiempo medio de enfriamiento (Z); ^y $t_{7/8}$: tiempo a siete octavos de enfriamiento (3Z); ^x letras iguales entre niveles, al interior de cada factor, indica que no existe diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$); ^w DMS: diferencia mínima significativa relativa a la comparación de medias de niveles al interior de cada factor. ^vNS: no significativa, *: significativa, con una $P \leq 0.05$, **: altamente significativa, con una $P \leq 0.01$.

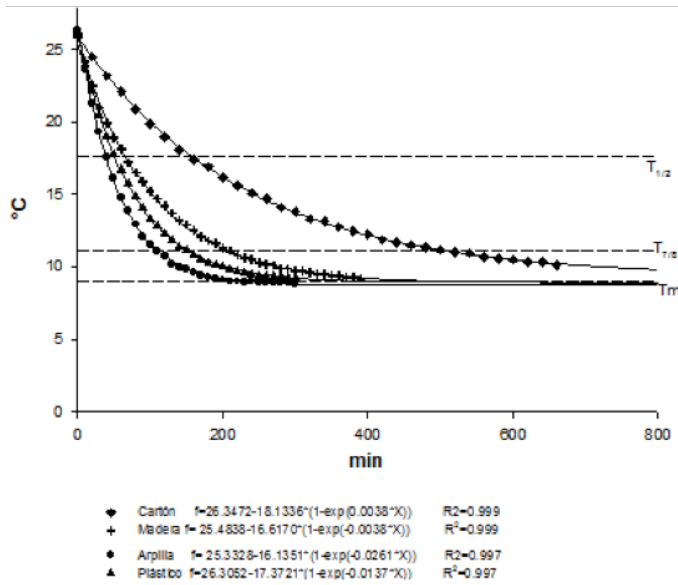


Figura 5. Curva de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad normal de aire, con frutos <39 mm de diámetro.

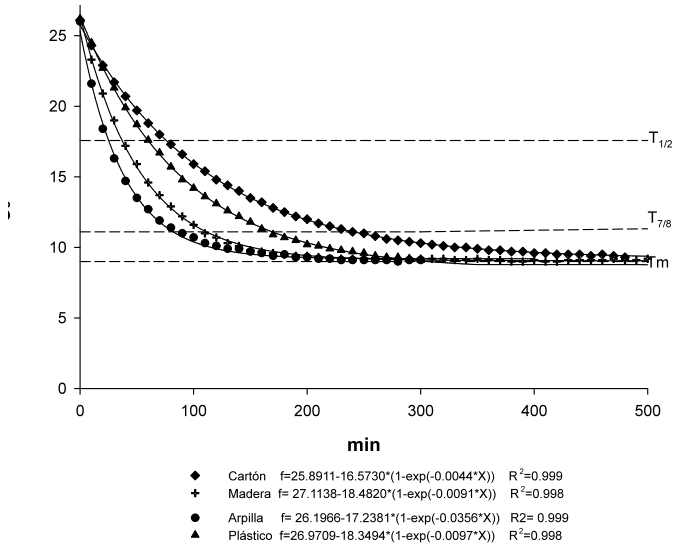


Figura 7. Curvas de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad media de aire de frutos <39 mm de diámetro.

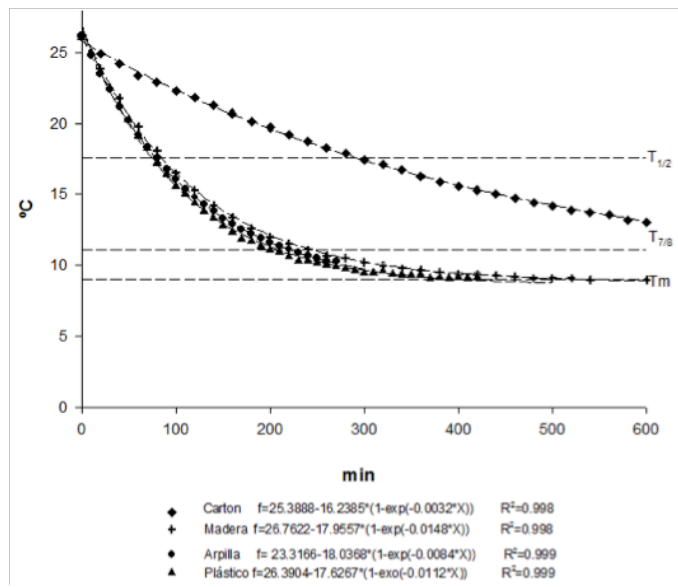


Figura 6. Curvas de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad normal de aire de frutos >39 mm de diámetro.

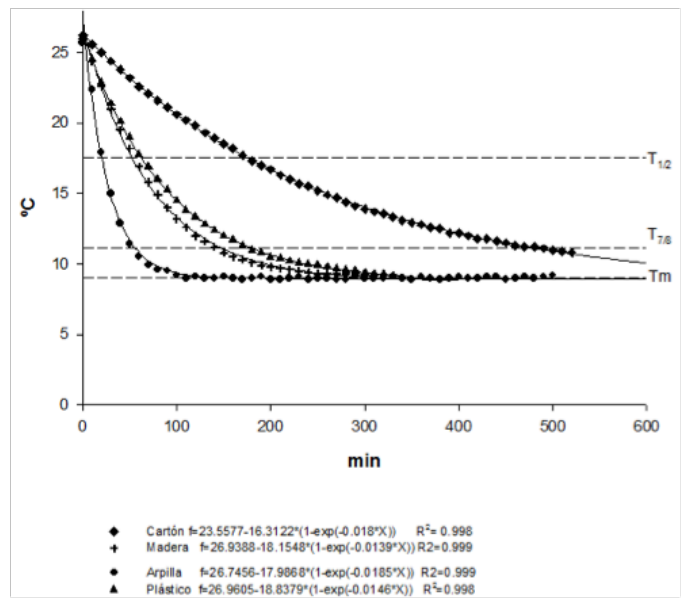


Figura 8. Curvas de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad media de aire de frutos >39 mm de diámetro.

éste opone resistencia al paso del aire, presentando tiempos de enfriamiento muy diferentes a los demás envases (Figuras 7 a 10), en los cuales no existe tanta variabilidad entre ellos aunque sí diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

En el Cuadro 4, podemos notar una reducción de hasta el 75 % en el tiempo de enfriamiento en la arpilla con respecto al cartón, mientras que la madera y el plástico, comparados con el cartón, tienen un 63 y 61 %, respectivamente. De igual forma, el análisis estadístico muestra diferencia significativa en el tiempo de enfriamiento entre los tres tipos de velocidades de aire (Cuadro 4), presentándose un tiempo medio y a siete octavos de enfriamiento menor a una velocidad alta de aire.

Según Brosnan y Sun (2001), cuando el preenfriado es por medio de aire, éste se realiza porque pasa a través del área de ventilación de los envases, siendo proporcional la velocidad de enfriamiento con el área de ventilación. En este caso la arpilla es el envase que presentó mayor área de ventilación, seguida por el de plástico y la madera, confirmando este comportamiento con las Figuras 5 y 6. Sin embargo, como se observa en la Figuras 7 a 10, cuando el aire es forzado, los tiempos de enfriamiento entre los diferentes envases varían de manera considerable, encontrando tiempos de enfriamiento muy largos para el cartón y más cortos para la arpilla. En cuanto al tamaño del fruto, el comportamiento del tiempo de enfriamiento es similar en todos los casos de circulación de aire, siendo mayor cuando se tiene el fruto con

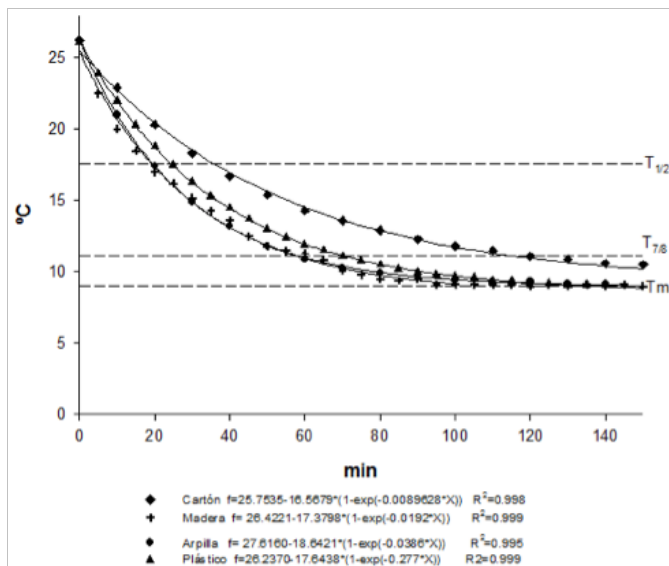


Figura 9. Curvas de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad alta de aire de frutos <39 mm de diámetro.

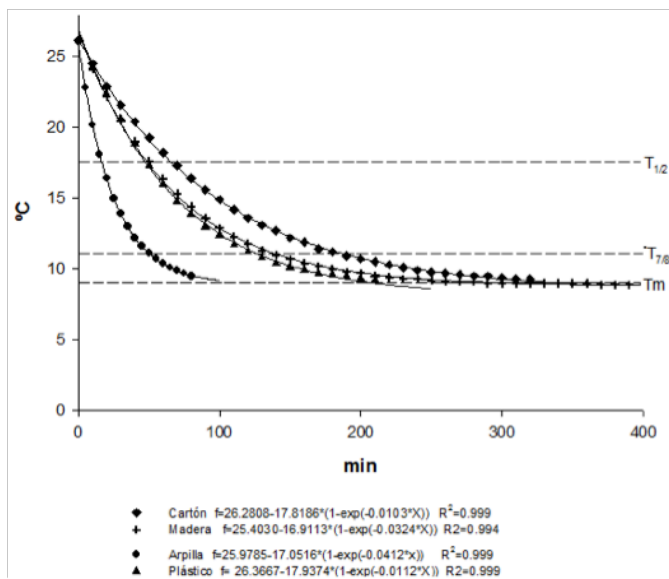


Figura 10. Curvas de enfriamiento de los cuatro envases a velocidad alta de aire de frutos >39 mm de diámetro.

mayor diámetro. El caso más extremo de este comportamiento se presentó en el cartón a circulación normal, ya que el tiempo de enfriamiento en el fruto de diámetro mayor a 39 mm fue mayor al del doble que en el limón de menor diámetro. En el análisis estadístico sí presentan diferencia estadística significativa, comportándose en forma congruente con lo mencionado por Wills *et al.* (1981), quienes plantean que la velocidad de enfriamiento de un producto depende fundamentalmente de la velocidad de transferencia de calor del producto al medio de enfriamiento, que a su vez depende de la forma y del tamaño. En el Cuadro 4 puede notarse que en el fruto de diámetro menor el tiempo de enfriamiento se reduce en aproximadamente 40 % con respecto al diámetro mayor.

CONCLUSIONES

El proceso de preenfriado con sistema de aire forzado reduce de 4 a 8 veces el tiempo de enfriamiento de los limones

dependiendo de la velocidad y del flujo de aire que circule por el producto, comparado con el preenfriado por medio del cuarto refrigerado con una circulación de aire normal. El tipo de envase afecta la velocidad de pérdida fisiológica de peso y el tiempo de enfriamiento. Tales efectos se vieron más acentuados en el cartón, ya que éste presentó menores velocidades de pérdida fisiológica de peso, pero se tiene un tiempo de enfriamiento mayor. La madera demostró tener tiempos de enfriamiento similares a los de arpilla y plástico, pero con menores velocidades de pérdidas de peso. La velocidad del aire afectó ambas variables evaluadas: a mayor velocidad de aire, mayor es la velocidad de pérdida fisiológica de peso y menor es el tiempo de enfriamiento. En cuanto al tamaño del fruto, existió diferencia en la variable velocidad de pérdida fisiológica de peso, ya que es mayor cuando se tiene un mayor diámetro del fruto. Asimismo se notó que el tamaño del fruto influye en el tiempo de enfriamiento, y cuanto más grande es el tamaño del fruto, mayor será el tiempo de enfriamiento.

LITERATURA CITADA

- Becker B. R.; Fricke B. A. 2004. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. *International Journal of Refrigeration* 27:540-551.
- Brosnan T.; Sun. D. W. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products. *International Journal of Refrigeration* 24:154-170.
- Erkan M. M.; Pekmezci C.; Wang. 2005. Hot water and curing treatment reduce chilling injury and maintain post-harvest quality of "Valencia" oranges. *International Journal of Food Science and Technology* 40:91-96.
- Liu F. W. 1992. Preenfriado de productos hortícolas. *In: Yahia E.M.; Ciapara H.I. (eds.), Fisiología y Tecnología de Productos Hortícolas*. Ed. Limusa. México.
- Mazzuc C. F. 1996. Calidad de Cítricos, Manual para Gestión desde Recolección hasta la Expedición. Ed. Tecnidex. España.
- Paull R. E.; Chen N. J. 2000. Heat treatment and fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology* 21:21-37.
- Salcedo-Baca D.; Hinojosa R. A.; Mora A. G.; Covarrubias G. I.; DePaolis F. J. R.; Mora F. J. S.; Cántora G. C. L. 2010. Evaluación del Impacto Económico de Huanglongbing (HLB) en la Cadena Citrícola Mexicana. IICA. México.
- SAS INSTITUTE, INC. 1989. SAS/STAT® User's Guide. Version 6, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schwentesius R.; Gómez M. 2002. Supermarkets in Mexico. Impact on Horticulture System. *Development Policy Review* 24(4): 487-502.
- Thompson J. F.; Mitchell F. G.; Kasmire R. F. 2002. Cooling horticultural commodities. *In: Kader A.A. Postharvest technology of horticultural crops*. California: University of California, Agriculture and Natural Resources, Davis. USA.
- Trail W. B. 2006. The rapid rise of supermarket? *Development Police Review* 24(2).163.174.
- Valle G.S.; Hernández A.R.L.; Covarrubias G.I. 2007. Modelado de las velocidades internas de calentamiento y enfriamiento. Caso: limón mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 61-68.
- Wang L.; Sun D. W. 2002. Modeling three conventional cooling processes of cooked met by finite element method. *International Journal of Refrigeration* 25:100-110.
- Wang S.; Tang J.; Cavalieri R. P. W. 2001 Modeling fruit internal heating rates for air and hot water treatment. *Postharvest Biology and Technology* 22: 257-270.
- Wills R. H.; Lee T. H.; McGlasson W. B.; Hall E. G.; Graham. 1981. Fisiología y Manipulación de Frutas y Hortalizas en Post-recolección. Edit. ACRIBIA SA. Zaragoza, España.