

Capítulo 6. Modelización de los patrones de enfriamiento de frutas en túneles de aire forzado.

Ing. Agr. Teófilo Gomila

Grupo de Postcosecha. Estación Experimental Agropecuaria de Alto Valle. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). General Roca, Río Negro, Argentina.

Correo electrónico: tgomila@correo.inta.gov.ar

Uno de los principales factores para mantener la calidad durante la conservación de los frutos es un adecuado y rápido enfriamiento. Los túneles de aire forzado son ampliamente utilizados en la región del Alto Valle de Río Negro para el preenfriado de frutas. El objetivo del presente trabajo es comprender la dinámica del enfriamiento en túneles de aire forzado verticales, a través de la modelización de la distribución espacial de los parámetros de enfriamiento. Mediante sensores de temperatura ubicados en distintos sectores se evaluaron los parámetros de enfriamiento de distintos pallets dentro del túnel de aire forzado vertical. Los parámetros C (coeficiente de enfriamiento), j (factor de retraso) y t_m (temperatura límite) se obtuvieron del ajuste de la función de enfriamiento para cada ubicación. Se registraron importantes diferencias en las temperaturas entre los frutos según posición al final del periodo de preenfriado. Las caras externas de los pallet presentaron coeficientes de enfriamiento mayores y menor factor de retraso, de acuerdo al sentido de circulación del aire dentro del túnel. En este sector las temperaturas límite estuvieron cercanas a las temperaturas del aire. El factor de retraso aumenta con la profundidad del envase, mientras que el coeficiente de enfriamiento disminuye en las cajas que no presentan caras expuestas al aire (“caja ciega”), con temperatura límite superiores a la temperatura del aire externo. Las cajas superiores presentaron coeficientes de enfriamiento más altos debido a que presentan una mayor superficie expuesta. Las diferencias en los parámetros de enfriamiento de distintos sectores del túnel condicionan la homogeneidad y el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de conservación, lo que origina diferencias de temperaturas por debajo o por encima de los valores óptimos de conservación.

Palabras clave: postcosecha, peras, conservación, temperatura, tasa de enfriamiento.

Abstract

One of the main factors to maintain quality during storage of the fruit is an adequate and rapid cooling. The forced-air tunnels are widely used in the Alto Valle of Río Negro for the precooling of fruits. The aim of this study is understand the dynamics of cooling in vertical forced-air tunnels, through the modeling of the spatial distribution of the cooling parameters. Temperature sensors are located in different sectors for the evaluation of cooling parameters in several pallets within a vertical forced-air tunnel. The parameters C (cooling rate), j (lag factor) and t_m (temperature limit) is obtained fitting the cooling function for each location. There were significant differences in temperatures between fruit by position at the end of the period of precooling. The external faces of the pallet cooling showed highest cooling rates and lower retardation factor, according to the flow of air in the tunnel. In this sector, t_m was close to air temperatures. The lag factor (j) increases with the depth of the container, while the cooling rate is lower in the boxes that do not have faces exposed to air with t_m upper to the temperature of outside air. Top boxes had higher cooling rates due to having a higher exposed surface. The differences in the cooling parameters affected in temperature homogeneity and the time required reaching the storage temperature, causing differences in temperatures below or above the optimum values of conservation.

Keywords: post harvest, pears, conservation, temperature, cooling coefficient.

INTRODUCCIÓN

Argentina es el principal productor de peras del Hemisferio Sur. La principal región productora del país se encuentra en los valles irrigados del Alto Valle de Río Negro, donde se concentra el 90% de la producción. El mercado de exportación es el principal objetivo comercial, representa el 60% del volumen producido y genera 320 millones de dólares por año. Argentina es el primer exportador mundial de peras con 417.000 toneladas, siendo su principal ventaja el ingreso a mercados de ultramar en contra-estación.

Para acceder a mercados distantes con productos frescos de calidad, la logística de las empresas frutícolas debe alcanzar altos grados de perfeccionamiento en distintas facetas de la postcosecha. En este sentido, en productos perecederos con alta tasa respiratoria, como las peras, se destaca el enfriamiento: la necesidad de alcanzar de forma rápida las temperaturas de conservación y transporte del producto para garantizar el mantenimiento de la calidad durante la cadena comercial y satisfacer la demanda de consumidores. La demora excesiva en el enfriamiento reduce la calidad del fruto apreciablemente. El producto fresco debe enfriarse de un modo seguro, llevándolo a su temperatura de almacenamiento óptima tan rápido como sea posible, de forma práctica y económica.

Con este objetivo se han desarrollado sistemas de enfriamiento por túneles de aire forzado. En este sistema, a través del ordenamiento de los envases se genera un túnel interno donde se genera, mediante ventiladores, un gradiente de presión entre distintos sectores de los envases para forzar un elevado flujo de aire frío a través de ellos. Ofrece ventajas con respecto al enfriamiento tradicional en cámaras: reduce el

tiempo de enfriamiento; brinda una mayor eficiencia en la utilización del espacio, instalaciones y tiempo operativo por una alta recirculación de producto; requiere una inversión relativamente pequeña y la posibilidad de utilizar instalaciones de enfriamiento ya existentes http://www.angelfire.com/ia2/ingenieriaagricola/aire_forzado.htm - ftn2.

En los sistemas de enfriamiento por túneles de aire forzado cobran particular importancia los distintos tipos de envases y materiales utilizados en el embalado del producto. En el caso de peras, el uso de bolsas plásticas para reducir la deshidratación del producto es una importante barrera al flujo de aire dentro del envase, afectando la eficiencia del enfriamiento. Por otro lado, el correcto montaje de los pallets durante el armado del túnel para generar diferencia de presión y coincidencia de troqueles para generar canales de circulación de aire son factores que afectan el desempeño del proceso de enfriamiento.

La capacidad operativa de los sistemas de enfriamiento es normalmente un “cuello de botella” en el flujo del producto para la industria frutícola. La inmovilización de producto y uso de instalaciones durante el periodo de enfriamiento debe optimizarse para asegurar el adecuado flujo de producto, mediante un enfriamiento rápido y eficiente que permita una alta recirculación de producto. La eficiencia de este proceso se puede incrementar mediante la uniformidad del enfriamiento de los envases. Diferencias de enfriamiento en distintos sectores del túnel afectan los tiempos de enfriamiento para alcanzar las temperaturas deseadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Parámetros evaluados

Se utilizó un túnel de aire forzado vertical que posee 4 ventiladores superiores que generan diferencia de presión (succión) en la zona interna del túnel. El túnel se arma con dos filas de 7 pallets, colocadas en columnas de 2 pallets (28 pallets totales por túnel). Se utilizaron pallets de peras Williams tamaño 80-110, en envase 4/5 MarkIV (ancho: 33 cm.; largo: 50 cm.; alto: 24 cm.) con bolsa PEDB de 25 micrones.

Para medir la temperatura de pulpa del fruto se cortaron los frutos por el diámetro ecuatorial, colocando el sensor dentro del fruto y uniéndolo nuevamente las partes con cinta de papel y colocados en la posición correspondiente. Para el registro de temperatura se utilizaron sensores iButtons (Texas Instrumental, USA) con intervalo de medición de 2 minutos. El periodo de evaluación fue de 12 horas, con un total de 360 datos de temperaturas por ubicación.

Los sensores fueron ubicados en distintas cajas (1.interna, 2.lateral-central, 3. caja ciega, 4. externa) por capas dentro del pallet (h0, h1 y h2) y en distintos pallets dentro del túnel (1, 2 y 3) como se puede observar en la Figura 6-1. Se colocaron sensores sobre los troqueles de los lados externos e interno del túnel para la medición de la temperatura del aire. Un software de gestión de sensores térmicos (EcloExpressThermo Pro2007) se utilizó para asignar coordenadas de ubicación de los sensores para generar un modelo 3D de cada pallet.

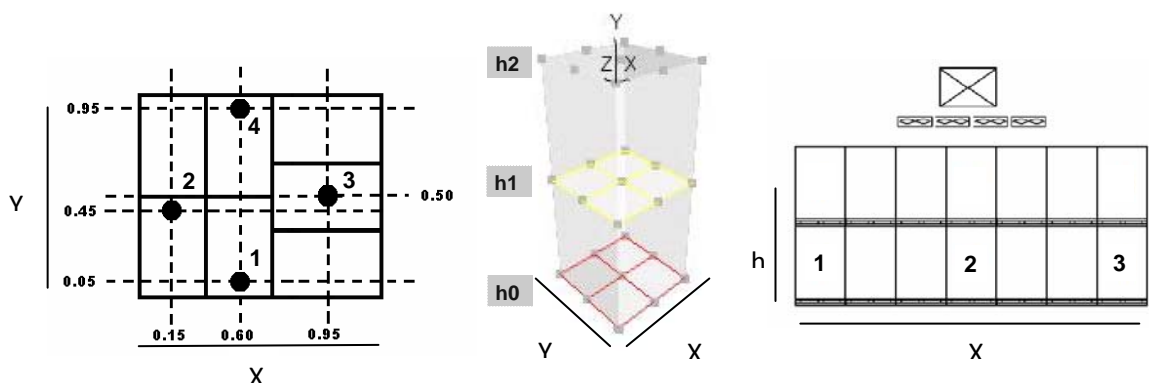


Figura 6-1: Distribución de los sensores por cada capa (izq), de las capas en cada pallet (centro) y de los pallets dentro del túnel vertical de aire forzado (der.)

Modelo de enfriamiento

Cada curva de enfriamiento obtenida fue analizada mediante el ajuste de regresión del modelo de enfriamiento, cuyo comportamiento puede ser resumido en la Figura 2. Representando el eje X en escala logarítmica la diferencia entre la temperatura inicial del fruto (t_i) y la temperatura media del aire (t_m), la evolución de la temperatura del fruto en un momento dado (t_f) se representa como una recta cuya pendiente es la tasa de enfriamiento (C) (Becker y Flicke, 2004) cuyo límite es la temperatura media del aire (t_m). La curva de enfriamiento presenta un retraso inicial, que se denomina factor de retraso (j) y es el valor de la intercepción de la asíntota y normalmente adopta valor superior a 1. (Pflug y Blaisdell, 1963).

Los parámetros C (coeficiente de enfriamiento), j (factor de retraso) y t_m (temperatura límite) se obtuvieron del ajuste de la función de enfriamiento para cada ubicación. Se analizó el comportamiento de los parámetros según ubicación, capa y pallet. El análisis estadístico se realizó mediante el software INFOSTAT/Profesional versión 2006p.1 mediante el procedimiento ANOVA DGC se realizó la separación de medias con un nivel de significación del 0.05.

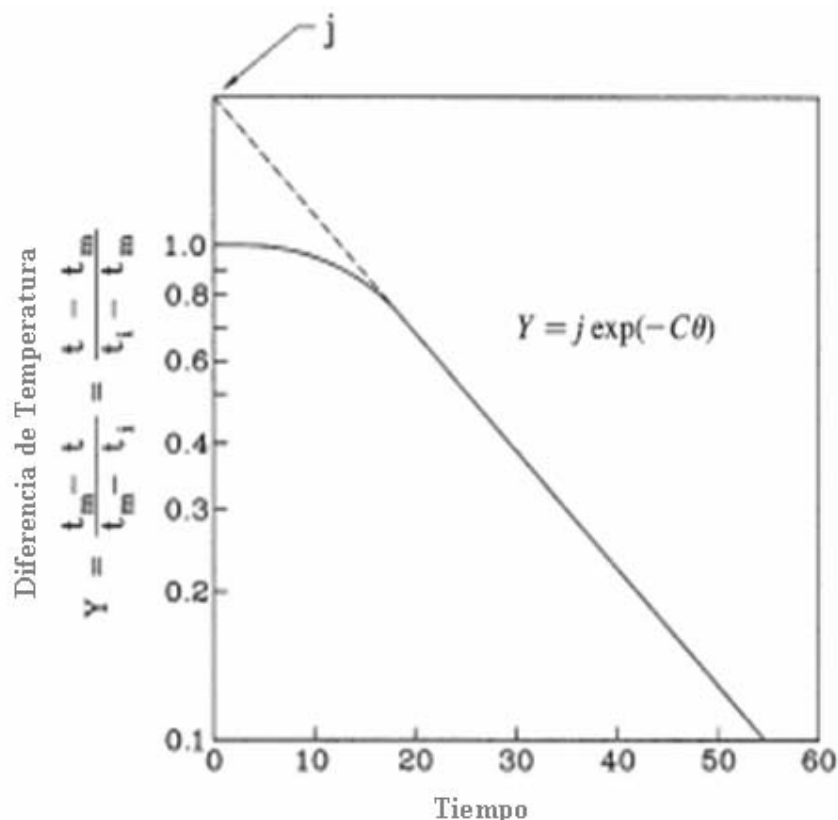


Figura 6-2: Curva de enfriamiento típica (adaptada de Becker y Fricke, 2004).

Comportamiento espacial de los parámetros

A través de las coordenadas de ubicación de cada sensor se realizó un estudio del comportamiento espacial de los parámetros. Mediante un programa de geoestadística (GS+ v5.1.1) se realizó el krigado para la estimación y predicción de los parámetros de la curva de enfriamiento en cada posición. Los resultados fueron representados en una gráfica 2d para cada capa analizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de la temperatura de los frutos

La temperatura inicial promedio de la fruta al iniciar el preenfriado fue de 16°C, (salvo en el pallet 3 que son los primeros en colocarse en el túnel y tuvieron temperaturas ligeramente inferiores). En el transcurso del enfriamiento se registraron importantes diferencias en las temperaturas entre los frutos. La principal diferencia se presenta entre la cara externa con respecto al resto. Las temperaturas más altas se presentan generalmente en los frutos de la “caja ciega”, que no presenta lados expuestos. Las temperaturas finales alcanzadas fueron entre -3,0° C y +3,0° C. (Figura 6-3).

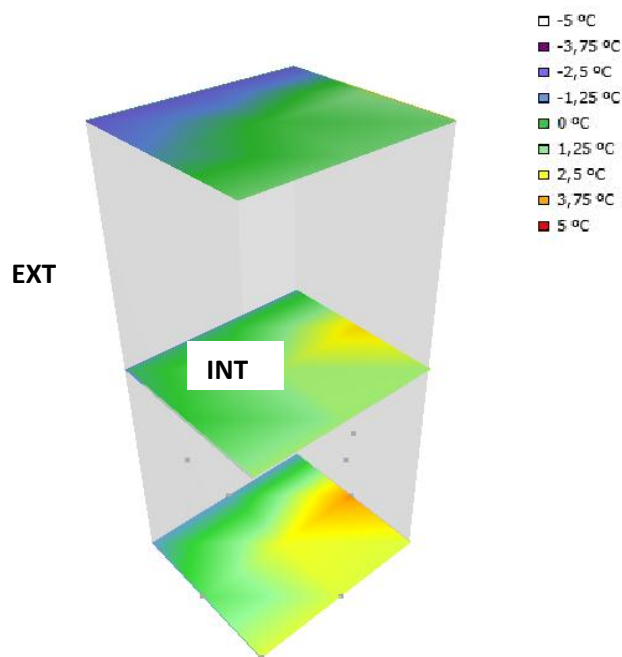


Figura 6-3: Representación 3D de las temperaturas finales del pallet 2 (centro) luego de 12 horas de enfriamiento.

Comportamiento espacial de los parámetros

En la tabla 1 se resumen los resultados. El parámetro C fue mayor en las cajas externas, con respecto al resto del pallet. Esto es debido a que este sector está expuesto directamente al aire frío. El gradiente de presión se genera en el lado interno del túnel, forzando la circulación del aire frío desde el exterior hacia el interior. Las temperaturas de aire son más bajas en el lado externo, mientras que el lado interno presenta un aumento de temperatura debido a la extracción de calor de los frutos. La diferencia de temperatura entre los troqueles del lado externo e interno disminuye en la medida que progresa el enfriamiento de los frutos. La denominada “caja ciega” no tiene ningún lado expuesto directamente al aire frío y presenta el menor valor de C , salvo en la capa superior (h_2). En promedio, las cajas del estrato superior (h_2) presentaron coeficiente de enfriamiento más alto, debido a una mayor superficie expuesta.

El parámetro j (factor de retraso) aumenta desde el sector externo con valores cercanos a 1 (enfriamiento sin demora) hasta el lado interno, en el sentido de la dirección del flujo de aire y representa la resistencia de los materiales al flujo de aire (Figura 6-5). Entre la medición “lateral” y “caja ciega” no hubo diferencias de retraso, aun cuando las cajas presentan distinta configuración. La profundidad de ambas ubicaciones fue similar (0,45 y 0,50 cm., respectivamente) para justificar la similitud del factor de retraso.

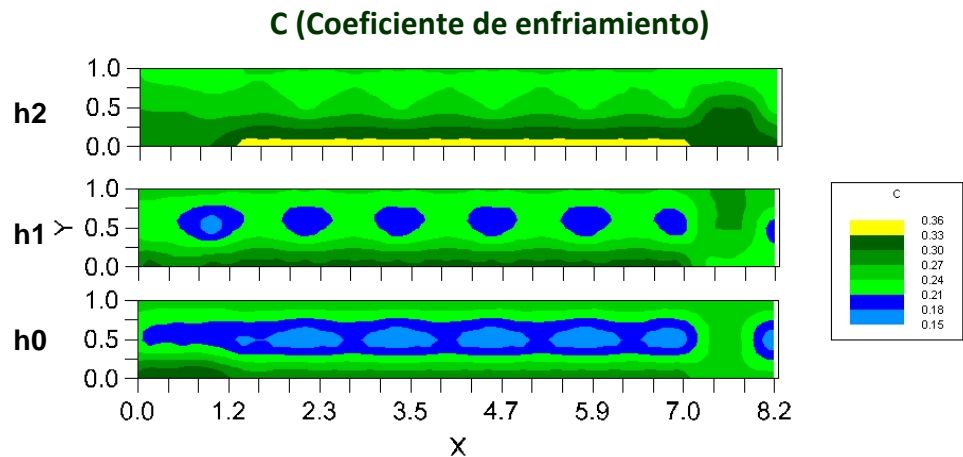


Figura 6-4: Distribución espacial del parámetro C

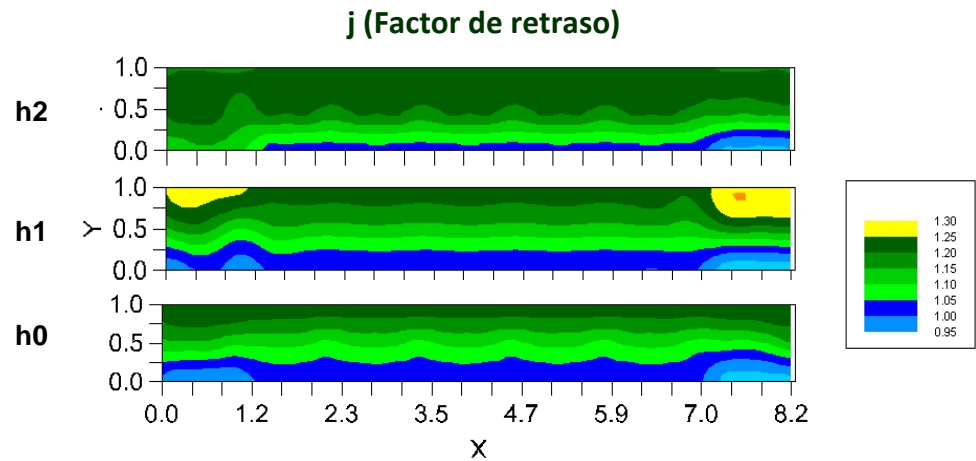


Figura 6-5: Distribución espacial del parámetro j.

El parámetro t_m es la temperatura promedio del aire y representa la temperatura final que alcanzara el fruto con un tiempo de enfriamiento suficientemente prolongado. La temperatura del aire en el túnel estuvo entre -3°C a -4°C (medida en los troqueles de la cara externa del túnel), sin embargo los ajustes de la función de enfriamiento indican que los frutos no alcanzaran esas temperaturas y que las curvas de enfriamiento presentan valores de t_m diferentes según el sector (Figura 6-6) Los sectores externos presentaron ajustes con valores de t_m más bajos, donde las temperaturas finales alcanzaron los $-3,0^{\circ}\text{C}$, con riesgo de congelamiento de los frutos. Sin embargo, otros sectores presentaron valores de t_m superiores. Esto indicaría que existe una importante resistencia al flujo de aire dentro del pallet y que estos sectores no están directamente influenciados por la temperatura del aire externa. La mayor limitante en el enfriamiento se encuentra en la “caja ciega”, con un valor promedio de t_m ligeramente por debajo de 0°C . En este sector las temperaturas finales obtenidas fueron de $+0,5^{\circ}\text{C}$ a $+3,0^{\circ}\text{C}$ y pueden ser no adecuadas para la óptima conservación de pera, posiblemente porque se generan zonas de temperaturas más elevadas dentro de las bolsas que no son fácilmente removidos por deficiencias en el flujo de aire debido a fallas en el montaje de los

pallets (falta de hermeticidad del túnel y reducción del gradiente de presión) o falta de coincidencia de los troqueles que anulan los canales de circulación del aire.

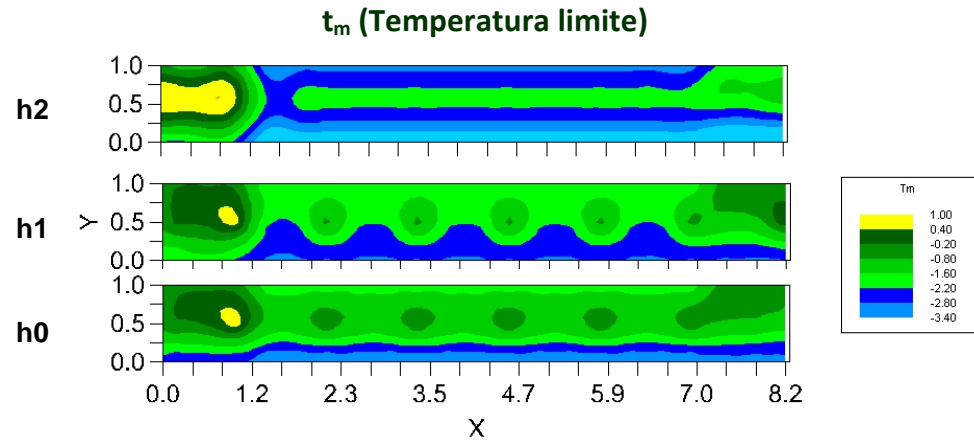


Figura 6-6: Distribución espacial del parámetro t_m .

El sector central del túnel (pallet 2) presenta generalmente temperaturas más bajas. Esto se puede deber a que se encuentra debajo de los ventiladores, posiblemente con un mayor gradiente de presión y circulación de aire. No presento diferencias significativas con respecto al pallet 3 (fondo) en los parámetros evaluados. Hubo diferencias significativas en los valores de t_m con respecto al pallet 1 (cercano a la puerta) que determinaron temperaturas finales más elevadas.

	Parámetro		
	C	j	t_m
1. Interna	0.25 b	1.23 c	-1.20 b
2. Lateral-Central	0.24 b	1.15 b	-1.09 b
3. “Caja ciega”	0.19 a	1.15 b	-0.37 b
4. Externa	0.30 c	0.99 a	-2.98 a
<i>p-value</i>	<0.01	<0.01	<0.01
h0	0.23 a	1.10 a	-1.22
h1	0.24 a	1.12 a	-1.14
h2	0.26 b	1.16 b	-1.87
<i>p-value</i>	0.01	0.01	0.16
PALLET 1	0.24	1.14	-0.47 b
PALLET 2	0.24	1.13	-2.08 a
PALLET 3	0.24	1.12	-1.68 a
<i>p-value</i>	0.96	0.75	<0.01

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

Tabla 6-1: Parámetros de enfriamiento promedio obtenidos para cada sector, capa y pallet evaluado

CONCLUSIONES

El estudio de los parámetros de enfriamiento en distintos sectores del túnel permite entender la complejidad de factores que afectan el preenfriado de los productos. Las diferencias en los parámetros de enfriamiento de distintos sectores del túnel

condicionan el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de conservación. Estas diferencias originan diferencias de temperaturas por debajo o por encima de los valores óptimos de conservación. La resistencia que presentan las disposiciones de las cajas y otros materiales al flujo de aire condiciona la temperatura final alcanzada, que puede ser varios grados por encima de la temperatura del aire dentro del túnel. Deficiencias en el montaje de los pallets en el armado del túnel y configuración de los troqueles pueden reducir el gradiente de presión y dificultar el movimiento del aire dentro de los envases, reduciendo los coeficientes de enfriamiento y las temperaturas finales alcanzadas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Becker, B.R. y Fricke, B.A., 2004. "Heat transfer coefficient for forced-air cooling and freezing of selected foods". *International Journal of Refrigeration*. 27 (2004) 540-551.

Pflug, I.J. y Blaisdell, J.L., 1963. "Methods of analysis de pre-cooling data". Issue of the *ASHRAE Journal*. 1963.