



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

**ESTUDIO TÉRMICO DEL PREENFRIAMIENTO DE ALIMENTOS
CON TÉCNICAS HÚMEDAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

AZUCENA GUTIÉRREZ TAFOYA

ASESOR: I. A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS

COASESOR: M. en C. VÍCTOR MANUEL AVALOS ÁVILA



Universidad Nacional
Autónoma de México

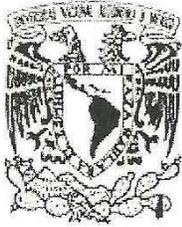


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. A. E. S.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN:L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

"Estudio térmico del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas".

Que presenta la pasante Azucena Gutierrez Tafoya

Con número de cuenta: 405089406 para obtener el título de:

Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Mex. a 05 de agosto de 2011

PRESIDENTE IA.º Alfredo Alvarez Cárdenas

VOCAL IA. Laura Margarita Cortazar Figueroa

SECRETARIO IA. Francisco Javier López Martínez

1er SUPLENTE IA. Francisco Javier Moreno López

2º SUPLENTE IA. Edgar F. Arechavaleta Vázquez

DEDICATORIA

A mis padres...

Este trabajo de tesis se los dedico con todo mi corazón a ustedes papá y mamá (Jorge Gutiérrez y Susana Tafoya), aún cuando parezca bastante pretencioso el tratar de expresar con palabras el infinito agradecimiento por tanto amor fuente de motivación durante toda mi vida, cada uno de mis éxitos no solo se los dedico y agradezco sino que los hago suyos porque su bondad, su cariño, su protección y su apoyo me ha dado la fuerza para cumplir todos mis sueños...infinitamente gracias papás, mi mayor admiración, orgullo y respeto.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores de tesis...

I. A. Alfredo Álvarez y M. en C. Víctor Avalos, quienes me apoyaron incondicionalmente durante la realización de este trabajo, gracias por su tiempo y paciencia, por su incansable inquietud por el conocimiento a quienes admiro y me enorgullece haber aprendido tanto de ustedes, fue mi admiración a su trabajo lo que me despertó la pasión por la ciencia...gracias.

A mis hermanitos...

Gracias Jorgito, Jaz y Jon por su apoyo y cariño porque son ustedes quienes me ha acompañado toda mi vida con quienes puedo contar incondicionalmente quienes sinceramente se alegran por mis triunfos, me apoyan en los momentos difíciles y perdonan mis errores sin esperar nada a cambio.

Al ángel que me acompaña...

Gracias Dani por tu compañía, tu amor, tu apoyo este es uno más de nuestros éxitos porque somos uno mismo.

A mis amigos...

Solo nosotros sabemos todos los momentos inolvidables que vivimos, cuanto apoyo de cada uno de ustedes, todas las risas, los esfuerzos en equipo, los sueños cumplidos, los obstáculos superados, gracias Yaz, Arlette, Anay, Moy, Abraham, karla, Ade, Violeta, David, Juan Ma, Yos.

A la UNAM y a mis profesores...

Gracias a cada uno de mis profesores, especialmente a Laura Cortázar, Edgar Arechavaleta, Javier Moreno, Javier Cruz Maranto, Alfredo Álvarez y Víctor Avalos a quienes admiro y respeto por su gran inteligencia.

Índice

Introducción	
Resumen	
CAPITULO 1. Marco teórico	1
1.1. Preenfriamiento	1
1.1.1. Ventajas del preenfriamiento	2
1.1.2. Métodos de preenfriamiento	3
1.1.2.1. Preenfriamiento con agua	4
1.1.2.2. Preenfriamiento con hielo sólido	7
1.1.2.3. Preenfriamiento con hielo fluido	9
1.1.2.4. Preenfriamiento con aire frío	11
1.1.2.5. Preenfriamiento mediante vacío	13
1.1.3. Mecanismos de transferencia de calor involucrados	14
1.1.4. Predicción de tiempos de preenfriamiento	16
1.1.4.1. Métodos numéricos	16
1.1.4.2. Métodos gráficos	18
1.1.4.3. Métodos analíticos	19
1.1.5. Transferencia de calor por conducción	21
1.1.6. Transferencia de calor por convección	21
1.1.7. Coeficiente de enfriamiento	23
1.1.8. Tiempo medio de enfriamiento	25
1.1.9. Eficiencia térmica	26
1.1.10. Materia prima	26
1.1.10.1. Manzana	26
1.1.10.2. Pepino	28
CAPITULO 2. Metodología Experimental	30
2.1. Cuadro metodológico	31
2.2. Descripción del cuadro metodológico	32

2.2.1. Problema	32
2.2.2. Objetivo general	32
2.2.3. Identificación de variables	32
2.2.4. Selección de variables	32
2.2.5. Actividades preliminares	34
2.2.5.1. Control de materia prima	34
2.2.5.2. Validación de termopares	35
2.2.5.3. Localización del centro térmico	37
2.2.5.4. Adaptación del equipo de proceso	38
2.2.5.5. Estandarización de la técnica de elaboración de hielo fluido	38
2.2.5.6. Determinación de la difusividad térmica de los alimentos	39
2.2.6. Planteamiento de objetivos	39
2.2.6.1. Estudio térmico del coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	39
2.2.6.2. Estudio de la eficiencia térmica del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	40
2.2.6.3. Estudio de la relación entre la eficiencia térmica y el coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	42
CAPITULO 3. Tratamiento y análisis de datos	44
3.1. Actividades preliminares	44
3.1.1. Validación de termopares	44
3.1.2. Localización del centro térmico	44
3.1.3. Adaptación del equipo de proceso	46
3.1.4 Disminución del punto inicial de congelación	48
3.1.5. Estandarización de la técnica de elaboración de hielo fluido	48
3.1.6. Determinación de la difusividad térmica de los alimentos	49
3.2. Resultados y análisis de datos del estudio térmico del coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	51
3.3. Resultados y análisis de datos del estudio de la eficiencia térmica del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	59

3.4. Resultados y análisis de datos del estudio de la relación entre la eficiencia térmica y el coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas	61
Conclusiones	63
Bibliografía	65
Anexo	
Apéndices	

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de hidrogenfriamiento	6
Tabla 2. Solución analítica del método de Rutov para el enfriamiento	19
Tabla 3. Composición química proximal de la manzana	27
Tabla 4. Características principales de la manzana <i>Golden Delicious</i>	27
Tabla 5. Propiedades y datos de almacenamiento para la manzana	28
Tabla 6. Características principales del pepino	29
Tabla 7. Propiedades y datos de almacenamiento para el pepino	30
Tabla 8. Variables de proceso	34
Tabla 9. Ecuaciones de corrección de los termopares	44
Tabla 10. Dimensiones del equipo de proceso	47
Tabla 11. Cantidad del medio de enfriamiento	48
Tabla 12. Cantidades de hielo y dispersión de CMC para la preparación de hielo fluido	49
Tabla 13. Difusividad térmica de la manzana	49
Tabla 14. Difusividad térmica del pepino	51
Tabla 15. Parámetros asociados con el coeficiente de enfriamiento de la manzana	58
Tabla 16. Parámetros asociados con el coeficiente de enfriamiento del pepino	58
Tabla 17. Eficiencia térmica del enfriamiento de manzana y pepino	60

Índice de figuras

Figura 1. Conducción bidimensional, red nodal	16
Figura 2. Diagrama causa-efecto	33
Figura 3. Localización termopares para la ubicación del centro térmico	37
Figura 4. Distribución de termopares en los alimentos	40
Figura 5. Localización del centro térmico en la manzana	45
Figura 6. Localización del centro térmico en el pepino	46
Figura 7. Difusividad térmica de la manzana	50
Figura 8. Difusividad térmica del pepino	50
Figura 9. Gráfica del coeficiente de enfriamiento de manzana ($T_m=0^{\circ}\text{C}$)	52
Figura 10. Gráfica del coeficiente de enfriamiento del pepino ($T_m=0^{\circ}\text{C}$)	53
Figura 11. Gráfica semilogarítmica de la razón de temperatura contra tiempo del enfriamiento de manzana ($T_m=0^{\circ}\text{C}$)	54
Figura 12. Gráfica semilogarítmica de la razón de temperatura contra tiempo del enfriamiento de pepino ($T_m=0^{\circ}\text{C}$)	54
Figura 13. Comparación del coeficiente de enfriamiento de pepino y manzana con diferentes técnicas húmedas	56
Figura 14. Tiempo medio de enfriamiento con los diferentes medios	57
Figura 15. Factor de retraso del preenfriamiento con diferentes medios	57
Figura 16. Eficiencia térmica del enfriamiento de manzana y pepino	60
Figura 17. Comparación de eficiencia térmica y coeficiente de enfriamiento de manzana	61
Figura 18. Comparación de eficiencia térmica y coeficiente de enfriamiento de pepino	62

Nomenclatura

A	Área del sólido en contacto con el medio (m^2)
Bi	Número de Biot
C_p	Calor específico (J/kgK)
CR	Coefficiente de enfriamiento (s^{-1})
Fo	Número de Fourier
h	Coefficiente convectivo (J/m^2sK)
j	Factor de retraso
k	Conductividad térmica (J/hmK)
L	Longitud característica (m)
M	Relación de Schneider entre difusividad y conductividad.
m	Masa (kg)
n	Enésimo
PIC	Punto inicial de congelación (K)
Q_s	Calor sensible (J/kg)
Q_λ	Calor latente (J/kg)
q	Flujo de calor (J)
T	Temperatura en algún punto del alimento (K)
V	Volumen (m^3)
W	Agua
x, y, z, r	Coordenadas geométricas
Z	Tiempo medio de enfriamiento (min)
g	Fracción másica (kg/kg)

Letras griegas

α	Difusividad térmica (m^2/s)
ρ	Densidad (kg/m^3)
ϵ_t	Eficiencia térmica
γ	Peso específico (N/m^3)
θ	Tiempo (s)

η Viscosidad dinámica (Pa s)

Subíndices

a Alimento
 c Centro del alimento
 f Final
 H Hielo
 HF Hielo fluido
 HS Hielo sólido
 i Inicial
 m Medio de enfriamiento
 W Agua
 s Sólido
 \mathcal{S} Superficie
 l Líquido
 φ Fracción volumétrica

Resumen

El presente trabajo proporciona datos de la eficiencia térmica y la velocidad de enfriamiento con diferentes medios. En este estudio se enfrió manzana y pepino como alimentos representativos de las frutas y hortalizas, tratando a estos por su forma geométrica como una esfera y un cilindro respectivamente. La reducción de la temperatura de estos alimentos se realizó mediante tres medios de enfriamiento definidas como técnicas húmedas: Agua a 1°C, hielo troceado e hielo fluido formado a partir de una solución al 0.1% de CMC (como estabilizador del medio), las concentraciones de hielo presentes en este fueron un factor de variación, siendo sus niveles de 20, 30 y 40%. Con respecto al sistema se realizó por inmersión sin agitación. El valor obtenido de la eficiencia térmica del enfriamiento de manzana con hielo fluido a las concentraciones de 20, 30 y 40% corresponde a 90.48, 90.83 y 97.16% respectivamente; un valor alto en comparación con el enfriamiento con agua para el cual se obtuvo 82.51% y con hielo sólido obteniendo una eficiencia térmica de 84.79%. En el caso del pepino, los valores de eficiencia térmica que se obtuvieron durante el enfriamiento con hielo fluido a 20, 30, y 40% fueron de 79.39, 86.76 y 88.46% respectivamente, en relación con la eficiencia térmica obtenida a partir del enfriamiento con agua que fue de 51.67% y la que se obtuvo con hielo sólido fue de 66.94%. Con respecto a la eficiencia térmica obtenida para el preenfriamiento con hielo fluido se puede atribuir a que el calor latente de fusión de las partículas sólidas aumentan en gran medida la capacidad energética del fluido (Sánchez et al., 2003). El coeficiente de enfriamiento (CR) de manzana fue mayor en el preenfriamiento con hielo fluido a concentraciones de 20, 30 y 40% obteniendo valores de 0.0479, 0.0455 y 0.0440 s⁻¹ respectivamente. Los datos obtenidos del coeficiente de enfriamiento durante el preenfriamiento de manzana con agua son de 0.0337 s⁻¹ y con hielo sólido de 0.0207 s⁻¹. Con respecto al pepino los coeficientes de enfriamiento con hielo fluido a las concentraciones de 20, 30 y 40% son de 0.0448, 0.0390 y 0.0326 s⁻¹ respectivamente, el valor obtenido del coeficiente de enfriamiento de pepino con agua es de 0.0521 s⁻¹ y el obtenido con hielo sólido es de 0.0229 s⁻¹, estos resultados son importantes, debido a que el encontrar que determinado método enfría más rápido que otro implica reducción de tiempos de preenfriamiento, lo que a su vez permite menor gasto energético a nivel industrial.

Introducción

El preenfriamiento de frutas y hortalizas es una operación destinada a bajar rápidamente la temperatura de campo y en la actualidad se utilizan distintas técnicas con el fin de que estas sean las adecuadas para la necesidad de cada tipo de producto. Las técnicas de enfriamiento también pueden ser seleccionadas por su capacidad de transmisión de calor, cuestiones energéticas o por su costo de fabricación, por lo que resulta interesante realizar un estudio térmico de diferentes técnicas húmedas de preenfriamiento. Recientes estudios referentes al preenfriamiento de frutas y hortalizas demuestran que el hielo fluido es un sistema con una elevada capacidad de transmisión de calor (Sánchez, 2003), por lo que con esta investigación se pretende encontrar las ventajas que pudiera presentar con respecto a otros sistemas tales como el agua y el hielo sólido.

La evaluación del método de enfriamiento con hielo fluido es de suma importancia para el sector agroalimentario debido a que la aplicación de este método en frutas y hortalizas para la reducción de temperatura de campo presenta muchas ventajas, tales como: gran superficie de contacto con el alimento, menos costo de fabricación e infraestructura sobre la producción de hielo tradicional (Ionescu, 2007), elevada capacidad de transmisión de calor (Ayel, 2003), la posibilidad de ser bombeado y para operar a temperaturas bajas. Debido a la basta cantidad de ventajas que presenta éste método de enfriamiento, tiene diversas aplicaciones, aunque la más conocida es la conservación de pescado (Piñeiro, 2004) sin embargo, el enfriamiento por contacto directo de frutas y hortalizas después de su recolección no es menos importante, siendo 5 o 6 veces mayor su capacidad en comparación con el agua, presentando una nueva alternativa en el sector agroalimentario.

El hielo fluido es también conocido como hielo bombeable o hielo líquido que consiste en un sistema bifásico de partículas de hielo sólido inmersas en agua. Sus características particulares permiten también su empleo en contacto directo con alimentos, además de que puede ser mezclado con otros agentes tales como antisépticos o inhibidores de reacciones (Huidobro, López-Caballero y Mendes, 2002). Estas dos fases permiten un enfriamiento rápido debido a su alta capacidad de intercambio de calor, además de que el daño físico causado a los productos alimenticios preenfriados con este medio es

menor que el causado por el hielo en escamas (Rodríguez et al., 2003). La versatilidad de la técnica con hielo fluido es también importante, debido a que permite su transporte por tuberías, su bombeo y su almacenamiento en tanques permitiendo un sistema higiénico de fácil manejo, por esta situación se creó la necesidad de realizar estudios sobre las propiedades reológicas de este fluido, permitiendo conocer más acerca de su comportamiento (Bel, 1996; Ben, 1998; Christensen, 2000; Doetsch, 2001; Fiikin, 2001). Entre los estudios realizados se proporcionan ecuaciones para conocer sus propiedades tales como: densidad, viscosidad, punto inicial de congelación, conductividad térmica, calor específico, etc. La mayoría de estas ecuaciones están expresadas en términos de la fracción de hielo presente en este sistema bifásico por lo que también se ha clasificado por su comportamiento reológico en fluido del tipo newtoniano a bajas concentraciones del 6 al 12% de hielo (Bel, 1999; Bel, 1998). A partir de estas concentraciones, el fluido se ha caracterizado como de tipo pseudoplastico (Ben 1998), bingham (Paul, 1993; Egolf, 1996) o un comportamiento intermedio (Christensen y Kauffeld, 1997), siendo la diferencia la concentración de hielo así como la concentración de algunos depresores del punto inicial de congelación (Ayel, 2003). Las investigaciones referentes a la transferencia de calor que proporciona el hielo fluido es un tema importante por lo que ha sido estudiado por autores como: Christensen, 1997; Davies, 2005; Ionescu, 2007; Kumano, 2007 entre otros. Cuando se usa hielo líquido como un fluido que genera transferencia de calor por convección en contacto con la superficie de un sólido los coeficientes de transferencia de calor efectivos son del orden de $3 \text{ kW m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ en el rango comúnmente usado (5-30% hielo), el cuál puede proporcionar una capacidad 5-6 veces mayor que el equivalente a enfriar con agua debido al aporte energético proporcionado por el calor sensible y calor latente cedido. (Bellas et al., 2002; Knodel et al., 2000). En un intercambiador un fluido bifásico puede conseguir unos coeficientes de transmisión de calor mucho mayores que un fluido monofásico (Stewart et al., 1995) este incremento puede ser debido a: 1) Incremento micro-convectivo de la conductividad térmica cerca de la superficie del intercambiador como resultado del movimiento de agitación microscópico de las partículas sólidas en el flujo de arrastre, 2) Las interacciones partícula-partícula y partícula-pared que rompen el flujo laminar y 3) El calor de fusión de las partículas sólidas que aumentan en gran medida la capacidad energética del fluido y depende de la concentración usada (Sánchez et al., 2003).

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Preenfriamiento

Se denomina preenfriamiento a la operación unitaria destinada a reducir rápidamente la temperatura de un producto durante un proceso o bien, de un alimento recién cosechado. El calor es originado por las reacciones metabólicas del fruto y por la incidencia de los rayos solares. La eliminación de este calor permitirá aumentar el período de vida del producto en estado fresco (Liu, 1992). Con el preenfriamiento también es posible controlar el crecimiento de microorganismos si este es realizado en poco tiempo después de la cosecha (Shewfelt, 1992). El preenfriamiento se utiliza poco después de que los productos se cosechan y antes de enviarlos a su destino, o antes del almacenamiento o procesamiento.

La fisiología del producto determina el requerimiento o método de preenfriamiento. Algunos vegetales son altamente perecederos y deben de ser preenfriados tan pronto como sea posible después de la cosecha. Estos incluyen espárrago, ejote, brócoli, coliflor, maíz, tomate, calabaza, zanahoria, rábano y chícharo. Las frutas comercialmente importantes que necesitan ser preenfriadas inmediatamente después de la cosecha son: aguacate, durazno, nectarina, tuna, guayaba, mango, papaya, fresa, cereza, mora y piña. Por esta razón son esenciales los sistemas de preenfriamiento para la industria de frutas y vegetales.

Los factores más importantes en preenfriamiento son temperatura y tiempo, ya que una hortaliza o una fruta deben enfriarse en el menor tiempo posible. El producto enfriado sigue una función logarítmica con un rápido enfriamiento inicial seguido por una velocidad más lenta. Ya que es muy difícil retirar todo el calor de campo, se recomienda un preenfriamiento de $7/8$ de la temperatura óptima de almacenamiento. El producto puede entrar a almacenamiento con $1/8$ de la temperatura recomendada (Becker, 1996), el cual puede removerse gradualmente con menos costo de energía.

1.1.1. Ventajas del preenfriamiento

El proceso de preenfriamiento es otro elemento más de costo en la cadena del frío, el cual sin embargo, no afecta negativamente la rentabilidad y si la aumenta ya que el producto preenfriado adquiere un aumento en su valor, dado por los siguientes beneficios (Saucedo, 1981 y Liu, 1992):

- a. Disminuye la velocidad de respiración y los cambios bioquímicos relacionados con este proceso que conllevan a un deterioro en la calidad y la senescencia. La velocidad de evaporación está directamente relacionada con la temperatura.
- b. Disminuye la velocidad de transpiración y pérdida de agua. Se reduce la temperatura y la presión del vapor, esto a su vez disminuye el gradiente entre la presión del vapor del producto y su atmósfera circundante. Así entre menor sea el gradiente de presión de vapor, menor será la velocidad de transpiración.
- c. El etileno provoca la maduración y senescencia de muchos productos. La velocidad de producción de etileno y la sensibilidad del producto a este gas disminuyen a medida que el producto se enfría. El preenfriamiento controla los procesos de maduración lo que permite además de incrementar la vida útil de los productos, alcanzar diferentes mercados y precios más aceptables. El inicio de la maduración de frutas climatéricas puede retardarse, siendo importante en frutas que deben mantenerse en el estadio preclimatérico durante su transporte (como el plátano).
- d. Inhibe o disminuye la velocidad de endurecimiento de ciertos vegetales (como el espárrago), así como la velocidad de crecimiento indeseable (como en los champiñones).
- e. Reducción de pérdidas del producto durante su manejo, transporte y comercialización, al reducir el ataque de microorganismos y otros factores de deterioro.
- f. Ahorro de almacenamiento refrigerado, lo cual en algunos casos (como el transporte aéreo) puede resultar importante. Esto se observa principalmente en aquellos productos que tienen la característica de ser altamente perecederos (como fresa y cereza cuya vida útil es de 5 a 6 días en las condiciones ambientales), los cuales

deben venderse inmediatamente; sin embargo, durante su comercialización a mercados distantes, es de esperarse la presencia de muchos daños (a pesar de lo rápido del transporte) debido a que el producto se maneja siempre a la temperatura ambiente. Por otro lado como en el avión no es posible la instalación de cuartos refrigerados el preenfriamiento del producto, antes del embarque, resulta de gran utilidad para incrementar la vida útil del producto.

- g. El preenfriamiento antes del embarque reduce las necesidades de frío durante el tránsito, sobre todo en aquellos sistemas donde se utiliza hielo para el enfriamiento.

1.1.2. Métodos de Preenfriamiento

Los métodos que actualmente se están utilizando para el preenfriamiento de frutas y hortalizas son los siguientes (Saucedo, 1981):

- Hidroenfriamiento (*Hydrocooling*).
- El aire frío en sus diversas modalidades de aplicación (*Room Cooling, Blast Cooling, Air Jet Cooling y Air Forced Cooling*).
- El enfriamiento mediante vacío (*Vacuum Cooling*).
- Hielo (*Top Icing, Body Icing*).

La velocidad con la cual debe preenfriarse un producto dependerá de qué tan rápidamente se deteriore, de la distancia a donde se envíe, así como de los requerimientos de calidad de mercado, los costos de preenfriamiento y algunos otros requerimientos específicos del producto (Liu, 1992).

Los factores que determinan la selección del método de preenfriamiento son (Pantastico 1979; Lloyd, 1982):

- La proporción de superficie / volumen del producto y porcentaje de masa.
- Lo perecedero que sea el producto.
- Temperatura inicial y final del producto.

- Accesibilidad del producto al medio de enfriamiento.
- Propiedades térmicas del producto como: calor específico, conductividad térmica y resistencia de la superficie a la transferencia de calor.
- Volumen y velocidad del medio de enfriamiento que pasa por el producto.
- El costo de operación, la adaptabilidad al método y a las instalaciones existentes.
- Empaque y embalaje.

A continuación se describen las diferentes técnicas húmedas de preenfriamiento que se emplean antes del almacenamiento de productos altamente perecederos, entre los cuales están el enfriamiento con agua y con hielo, de uso común y el enfriamiento con hielo fluido como nueva alternativa en el sector agroalimentario.

1.1.2.1. Preenfriamiento con agua

Es el método de enfriamiento de un producto (al cuál se le desea reducir la temperatura rápidamente) directamente por agua fría ya sea por aspersion o por inmersión, es rápido y efectivo. La superficie hace contacto directo con el agua la mayoría de veces en movimiento, por lo que el mecanismo de transferencia de calor predominante es convección (Liu 1992). Muchos productos responden bien al sistema. Por ejemplo se enfrían por este método: maíz dulce, manzanas, peras, frutas de carozo (ciruelas, cerezas, duraznos, melocotones), melones, espárragos, apio, arvejas, rábanos y zanahoria (Shewfelt, 1992). En menor proporción se utiliza también en pepinos y papas. Esta operación causa daño o aumenta el deterioro de algunas frutas como bayas, uvas, ciruelas y algunos cítricos; por tanto estas frutas no se recomienda hidrogenfriarlas. A continuación se presentan las ventajas que presenta este método de preenfriamiento (Saucedo, 1981; Liu, 1992):

- a. El agua proporciona un coeficiente de transferencia de calor más elevado que el aire, el hidrogenfriamiento es más rápido que el enfriamiento con aire, a menos que este tenga una velocidad muy elevada.
- b. No provoca pérdida de peso por eliminación de agua del producto.
- c. El método permite la adición de fungicidas.

- d. Favorece el enfriamiento durante el tránsito, especialmente en productos que van a ser embarcados después del empaque.
- e. Fácilmente se ocupa para enfriar grandes cantidades de productos.
- f. Se puede diseñar para escalas pequeñas.

Cabe mencionar que este método de preenfriamiento también presenta algunas desventajas tales como:

- a. El producto enfriado por agua al exponerse a la temperatura ambiente presenta un menor grado de comercialización debido a que es más fácilmente atacado por microorganismos.
- b. Se pueden causar daños al envase cuando se aplica a productos envasados, los recipientes deben de ser resistentes al agua, por lo tanto no pueden utilizarse cajas de cartón corrugado.

Una característica limitante es que no se puede usar en productos que sean sensibles a la humedad como por ejemplo uvas. Obviamente también hay restricciones debido al tipo de embalaje. En algunos casos los envases son encerados. Es importante hacer notar que el agua es continuamente reciclada, lo que puede provocar acumulación de microorganismos creando un problema de higiene. Por tal razón, el agua debe ser tratada constantemente con soluciones de hipoclorito a fin de reducir al mínimo el desarrollo de patógenos (Salunkhe, 1991; Liu, 1992). Para mantener una buena sanidad el agua debe cambiarse una vez o más al día, dependiendo del volumen y la condición de los productos. Pueden agregarse bajas concentraciones de cloro al agua (5% de hipoclorito de sodio o un polvo seco de hipoclorito de calcio); pero como el cloro reacciona con muchos compuestos orgánicos, la concentración debe vigilarse frecuentemente, siendo de 10 ppm efectiva para matar microorganismos. Los fungicidas como el benlate y tiabendazol se utilizan ocasionalmente para disminuir el deterioro de los productos hidrogenfriados (Liu, 1992). Es indispensable también limpiar diariamente los enfriadores. Cabe notar que los productos hidrogenfriados deben ser rápidamente colocados en cámara fría. Existen diferentes diseños, estos varían con el método de enfriamiento que es usado y la forma en que el producto es transportado o

ubicado para que el agua entre en contacto. La capacidad calorífica del agua es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/g°C, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor, sin experimentar apenas cambios de temperatura, lo que tiene gran influencia. Sus calores latentes de vaporización y de fusión (540 y 80 cal/g, respectivamente) son también excepcionalmente elevados.

Existen tres tipos de hidrogenfriamiento por los cuáles el agua se puede poner en contacto con el producto. En la tabla 1 se muestran algunas características de estos sistemas (Saucedo, 1981; Liu, 1992).

Tabla 1. Tipos de hidrogenfriamiento

Sistema	Características
Inmersión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El producto se sumerge completamente en el agua fría, empacado o a granel. ▪ Mediante el uso de una bomba el agua se agita para aumentar la velocidad de enfriamiento. ▪ Se tiene un mayor intercambio térmico entre el agua y el producto. ▪ La eficiencia de este método con respecto al de lluvia, es de hasta un 40% mayor. ▪ Gasto de agua económico, con problemas de residuos de productos y contaminación por hongos y bacterias.
Aspersión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se utiliza un túnel de enfriamiento donde los productos se mueven lentamente sobre una banda transportadora. ▪ El producto se pone en contacto con agua aplicada mediante el uso de aspersores (a presión) o en forma de lluvia (por gravedad) penetrando los recipientes y pasando a través de los productos. ▪ Se puede recolectar el agua, se filtra, se enfría por medio de un serpentín refrigerado o hielo y se bombea para bañar productos calientes.

- Se incrementan los costos por los frecuentes cambios de agua y por el gasto de energía necesaria para enfriar ésta nuevamente.
- Resulta conveniente colocar la fuente de enfriamiento cercana a la parte final del túnel, con el fin de que el producto esté en contacto con el agua más fría a la salida.
- El aumentar el volumen y la velocidad de agua por encima de un cierto nivel no aumenta la velocidad de enfriamiento, debido a que la transferencia de calor por conducción se convierte en el factor limitante (Por ejemplo se utilizan 0.49 m³/min por cada m² de área de enfriamiento para melones de California y un aumento a 0.5 m³/min por cada m² no mejora el grado de enfriamiento).
- El gasto de agua para algunos productos hortícolas es de 70 cm³/min/cm² del área por enfriar y con un máximo de dos capas de producto.
- Se utiliza casi siempre en productos envasados y algunas veces sin envasar.

Mixto

- El producto es por un lado inmerso en agua y por otro asperjado.
- Los productos envasados se mueven en una banda sumergidos en agua helada en una canaleta y la parte superior es rociada al mismo tiempo.
- Al final de la operación los productos son cepillados, secados en un túnel con aire frío y empacados en cajas de cartón.
- Sirve como descarga de productos contenidos en las cajas; evitando magullamiento, siendo más rápida y mecánica la operación.

(Saucedo, 1981; Liu, 1992)

1.1.2.2. Preenfriamiento con hielo sólido

El preenfriamiento con hielo puede ser usado en una diversidad de productos. En este proceso, el hielo es adicionado a los contenedores. El hielo es recomendado para productos como brócoli, zanahorias, maíz dulce, espinacas, col, melón, cebolla, perejil, fríjol (verde),

rábano, espinaca y nabo y es particularmente efectivo en productos empacados que no puedan ser enfriados con aire forzado. Presenta además un efecto residual en productos con tasas de respiración altas. Desde el punto de vista de eficiencia en el consumo de energía del enfriamiento con hielo, un kilogramo de éste puede enfriar cerca de 3 kg de producto de 30 °C a 4 °C.

El hielo ha sido usado para controlar la temperatura de los productos por más de un siglo. El calor latente de fusión del hielo (335 kJ/kg) provee una alta capacidad de enfriamiento. El hielo no sólo mantiene el producto frío, sino también húmedo, brillante, y además previene la deshidratación. El hielo en bloque o hielo en bloque triturado, hielo en tubo, hielo en escamas y hielo en placa son los tipos de hielo usados por décadas en la industria de los alimentos. Conforme ha incrementado la demanda por una calidad superior en los productos, son necesarios métodos más avanzados de preservación, para satisfacer las necesidades del mercado.

Una limitante en el empleo del hielo convencional es la baja velocidad de enfriamiento sin importar que el hielo se aplique directamente al producto o se mezcle con agua. El proceso de enfriamiento se ve afectado básicamente por el tamaño de las partículas y la temperatura de distribución de la mezcla agua-hielo. Las partículas grandes tienen un área de transferencia de calor más pequeña y menos uniforme. En consecuencia proveen menos enfriamiento. Formas diferentes de hielo (en placa, en escamas, triturado, entre otros) presentan algunos otros retos a resolver, por ejemplo en algunos casos presentan formas irregulares con puntas filosas que pueden dañar al producto, o causar congelamiento en la superficie si se aplica directamente, esto es debido a su subenfriamiento.

Básicamente existen dos modalidades en cuanto a la adición del hielo: El *Body – Icing* y el *Top - Icing*. En el primer caso el hielo es mezclado con el producto en el interior del envase, en tanto que el segundo el hielo es puesto sobre estos. En ambos casos una vez completa la carga en el vehículo de transporte, se proyecta una cantidad adicional de hielo para rellenar los espacios entre estibas (Saucedo, 1981). Después de que el hielo se ha derretido los productos pueden enfriarse más. Por lo tanto, la cantidad de hielo debe predeterminarse de acuerdo con el tipo, cantidad y temperatura del producto. El efecto de

enfriamiento es lento generalmente y no uniforme en la carga. Su uso actualmente está muy limitado. En general es una técnica en donde el enfriamiento se realiza durante el transporte, permitiendo durante el agua de fusión, mantener la turgencia en los tejidos del producto.

Este método es adecuado sólo para productos de baja sensibilidad al frío, produce un excesivo escurrimiento de agua con el consecuente deterioro de la capa térmica y además, el producto es expuesto a un excesivo humedecimiento lo que facilita un mayor ataque de microorganismos (aunque puede controlarse con la adición de fungicidas). Otra limitante para el enhielado en paquetes es que los recipientes deben de ser a prueba de agua. Por otro lado, de acuerdo al tiempo y temperaturas de operación, resulta necesario realizar un determinado número de adiciones de hielo, las cuales sin embargo, pueden reducirse si antes del embarque el producto es preenfriado mediante otro sistema (Saucedo, 1981 y Liu, 1992).

1.1.2.3. Preenfriamiento con hielo fluido

La alternativa al hielo convencional es tener hielo en micropartículas con dimensiones de 0.25 a 0.50 mm, las cuales pueden ser utilizadas ya sea en forma de hielo bombeable o como cristales secos. El tamaño pequeño de este tipo de hielo resulta en una mejor área de transferencia de calor, comparado con otros tipos de hielo para una cantidad determinada. El hielo fluido puede ser bombeado al producto directamente del generador o de un tanque de almacén. El hielo fluido cubre el producto sin provocar ningún daño y de manera efectiva previene las bolsas de aire que son muy comunes en los contenedores llenos con hielo en escamas o hielo triturado.

Los cristales del hielo fluido proveen un enfriamiento más rápido que otros tipos de hielo o mezclas de hielo y agua. Se ha reportado por la industria noruega de la pesca que el hielo fluido, con un contenido de 15% de hielo, puede enfriar 600 kg de salmón en un lote de 12 a 1 °C en 35 minutos. Pruebas desarrolladas por el departamento de industrias pesqueras y de los océanos de Nueva Escocia indican que el hielo fluido con una concentración del 30%

puede proporcionar aproximadamente 1.5 °C menos en la temperatura que el hielo en escamas en bacalao fresco. La desventaja del hielo fluido comparado con el resto de los tipos de hielo es el alto costo de la máquina generadora. Sin embargo las máquinas generadoras de hielo son más compactas, solo 60 % o menos del peso y volumen en comparación con otros tipos de generadores. Las máquinas generadoras de hielo fluido consumen de 30% hasta 40% menos energía que las máquinas generadoras de hielo en escamas (Sánchez, 2003).

Con respecto a las aplicaciones el hielo fluido se ha usado en diferentes operaciones de acuicultura, incluyendo enfriamiento y almacenamiento, distribución y procesamiento (lavado, clasificado, eviscerado y empacado). En la actualidad también se ocupa en la agricultura en el preenfriamiento de frutas y hortalizas, la aplicación más común dentro de estos productos es el brócoli. Las velocidades de enfriamiento aumentan con la disminución del tamaño de partícula. Los sistemas de hielo fluido utilizan pequeñas partículas de hielo en una suspensión de agua para maximizar las velocidades de enfriamiento y evitar el daño al producto. Dentro de las ventajas más importantes que presenta este sistema se encuentran las siguientes:

- a. Transferencia de calor. El hielo líquido cubre toda la superficie del producto, lo cual hace que el enfriamiento sea más rápido.
- b. Disminución de la mano de obra. El hielo líquido fluye a través de tuberías por lo que puede ser rociado fácilmente por una sola persona.
- c. No remueve agua del producto. Por lo que no provoca pérdida de peso.
- d. El método permite la adición de fungicidas.

Es importante conocer las propiedades de este sistema bifásico, puesto que influyen de forma directa en la transferencia de calor. La densidad del hielo fluido se obtiene mediante la siguiente ecuación (Christensen, 1997; Fikiin, 2001):

a. Densidad

$$\rho_{HF} = \left[\frac{g_H}{\rho_H} + \frac{(1-g_H)}{\rho_l} \right]^{-1} \quad 1.1$$

La homogeneidad de las partículas de hielo en el sistema bifásico es controlada mediante algunos coadyuvantes en el sistema, en esta investigación se utilizó una goma soluble en agua (carboximetilcelulosa, CMC). La CMC es producida en grandes cantidades, en grados comerciales crudos sin ningún refinamiento para emplearlo en detergentes, fluidos de perforación y en la industria papelera. En grados de pureza más altos se emplea como aditivo alimenticio. Su carácter hidrofílico provee buenas propiedades para formar películas, alta viscosidad, comportamiento adhesivo, entre algunas otras características. La CMC tiene una amplia variedad de aplicaciones. La CMC es utilizada en alimentos como agente auxiliar en el batido de helados, cremas y natas, como auxiliar para formar geles en gelatinas y pudines, como espesante en aderezos y rellenos, como agente suspensor en jugos de frutas, como coloide protector en emulsiones y mayonesas, como agente protector para cubrir la superficie de las frutas y estabilizador en productos listos para hornear. Debido a que la CMC no es metabolizada por el cuerpo humano ha sido aprobada su utilización en los alimentos bajos en calorías (Belitz, 1997). La función de esta goma en el hielo fluido es la de homogenizar las partículas de hielo y suspenderlas en el medio, para evitar o reducir la estratificación del hielo fluido durante el preenfriamiento de alimentos y garantizar que las condiciones de homogeneidad son las mismas en cualquier punto del sistema.

1.1.2.4. Preenfriamiento con aire frío

El preenfriamiento mediante aire frío, en sus diversas modalidades es el sistema mayormente utilizado principalmente para productos como manzana, pera, cítricos, uvas, melones, ciruelas, cerezas, ejotes, chabacanos, fresas, tomates, etc. A través del tiempo este sistema de preenfriamiento se ha ido perfeccionando y adaptando a diversas exigencias, siendo el punto más importante en dicho perfeccionamiento, la reducción del tiempo de enfriamiento, en base a la velocidad del aire.

- a. Preenfriamiento en cámaras
- b. Preenfriamiento en túnel
- c. Preenfriamiento con aire a presión

a. Preenfriamiento en cámaras

Se refiere al preenfriamiento de productos agrícolas en cámaras de refrigeración y con circulación de aire a velocidades no mayores de 1 m/s. De acuerdo a Kader (1992) se recomienda una velocidad de flujo de aire a velocidad de flujo de aire de 1 a 2 m/s. Cuando se completa el enfriamiento, la velocidad del aire alrededor de los envases deberá reducirse hasta un mínimo de 0.05 a 0.1 m/s, con el fin de conservar su temperatura. Para el aprovechamiento del espacio refrigerado es deseable una densidad de carga superior a 120 kg/m³. Para evitar una excesiva deshidratación del producto, el aire circundante deberá mantener una humedad relativa superior al 85%.

b. Preenfriamiento en túnel

Es un método alternativo de enfriamiento por cámaras en donde se utilizan túneles de forma rectangular en donde se introduce el producto y la fuente del frío se encuentra lateralmente. El movimiento de aire se puede realizar en forma transversal o longitudinal al túnel, con una velocidad que varía de 1 a 7 m/s. Mediante este sistema el coeficiente de transmisión de calor aire-producto alcanza valores mayores del doble, en relación a los obtenidos con las cámaras (Saucedo, 1981). El enfriamiento en túnel es de 2.5 a 11 veces más rápido que en cámaras de refrigeración (Lloyd, 1982). Naturalmente este método requiere de un elevado empleo de energía tanto para el enfriamiento como para la ventilación debiendo considerar las pérdidas por fricción y turbulencia del aire en el exterior de los empaques y es necesario que los envases estén abiertos y expuestos directamente al flujo de aire. Este sistema es aplicado únicamente cuando se debe enfriar en tiempos breves. Para obtener un flujo de aire con estas velocidades, es necesaria una potencia de 10 HP/h/ton de producto (Saucedo, 1981).

c. Preenfriamiento mediante aire a presión

Este método es actualmente el de mayor rendimiento y rapidez, de entre los sistemas que emplean aire como medio de enfriamiento, en este caso se considera la carga de producto

como parte integral del sistema de circulación de aire. En este sistema el aire es forzado a pasar a través de las caras laterales de las estibas (las cuales generalmente son muy estrechas) y a través de los empaques (los cuales tienen suficientes perforaciones), de tal manera que en ambos se establece una diferencia de presión del aire entre la entrada y la salida. La eficiencia del enfriamiento consiste precisamente, en que el aire pasa alrededor de toda la fruta empacada y arrastra el calor desde el centro del empaque, por lo que la velocidad de enfriamiento es regulada por el ajuste de un determinado flujo o presión del aire, además de su temperatura. De acuerdo a Lloyd (1982) velocidades de aire de 1.25 a 1.5 m/s son óptimas, y temperaturas de aire bajas como -7°C son usadas sin dañar por congelación.

1.2.1.5. Preenfriamiento mediante vacío

El mecanismo de enfriamiento es la evaporación rápida de agua de la superficie de los productos a presión reducida. La energía calorífica necesaria para el cambio de fase del agua, de líquido a gas, se extrae de los productos. El agua se evapora lentamente a temperatura ambiente a 1 atm de presión, que equivale a 760 mmHg. El punto de ebullición del agua es de 100°C a 760 mmHg de presión. Si la presión se reduce, el punto de ebullición del agua también se reduce. A 4.6 mmHg de presión el agua hierve a 0°C ; no importa a qué temperatura hierva el agua, siempre se requiere de energía para transformarla en vapor. El calor de vaporización por kilogramo de agua es de alrededor de 550 kcal y sólo hay pequeñas diferencias entre 0 y 10°C . Por tanto, si un producto se coloca a una presión tan reducida como de 4.6 mmHg, el agua en la superficie del producto que se encuentra por encima de 0°C hierve rápidamente y el proceso de vaporización absorbe una gran cantidad de calor del producto; y así el producto se enfría (Liu, 1992). De acuerdo con el grado de disminución de temperatura el producto presenta una pérdida de peso que varía de 1.5 a 4.5% por lo que puede evitarse humedeciendo antes el producto.

1.1.3. Mecanismos de transferencia de calor involucrados

Cuando alimentos sólidos están siendo enfriados, empleando un líquido, hay dos resistencias a la transferencia térmica, a saber, el coeficiente de película térmica h (también llamado coeficiente convectivo) y la resistencia debida a la conducción dentro del sólido, es muy importante conocer cuál es la resistencia limitante.

Si un cilindro de radio r está siendo enfriado con hielo fluido, se supone que la tasa de eliminación de calor cuando la temperatura del centro es T_c , la temperatura de la superficie es T_g y la temperatura global del fluido es T_m . La tasa de transferencia térmica desde la superficie viene dada por la ecuación 1.2.

$$\frac{dQ}{d\theta} = hA(T_g - T_m) \quad 1.2$$

Esta cantidad de energía debe de ser transferida desde el sólido a la superficie por conducción. Por lo tanto:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{kA(T_c - T_g)}{L/2} \quad 1.3$$

Igualando las dos tasas resulta

$$hA(T_g - T_m) = kA \frac{T_c - T_g}{L/2} \quad 1.4$$

Reordenando la ecuación para que aparezcan dos grupos adimensionales, se obtiene:

$$\frac{hL/2}{k} = \frac{T_c - T_g}{T_g - T_m} \quad 1.5$$

Nótese que esta es la relación de la caída de temperatura sobre el alimento respecto a la película térmica. El grupo $(hL/2)/k$ se denomina *número de Biot*, donde h es el coeficiente de película (coeficiente convectivo) y k es la conductividad térmica. Es una medida eficaz

de la convección y la conducción. Para valores pequeños del número de Biot (menores de 0.2) (Mohsenin, 1980) la principal resistencia a la transferencia térmica es debida a la convección y tiene lugar sobre la película, es decir, la mayor parte del gradiente térmico tiene lugar sobre la película, y el sólido puede suponerse que esta a temperatura uniforme (no existen gradientes de temperatura). En este caso el tiempo necesario para enfriar el alimento desde una temperatura inicial T_i hasta una temperatura final T_f , donde T_m es la temperatura del medio de enfriamiento vendrá dada por

$$\theta = \frac{\rho V C_p}{hA} \ln \left(\frac{T_m - T_f}{T_m - T_i} \right) \quad 1.6$$

El número de Biot para la mayoría de los alimentos de cualquier espesor razonable o dimensión es mayor de 0.2, y la tasa de transferencia de calor por conducción resulta el mecanismo predominante, el objeto se enfriará más lentamente de lo predicho por la ecuación. En estas situaciones la solución de las ecuaciones de transferencia térmica en estado no estacionario implicadas ha sido representada gráficamente y el problema puede ser resuelto usando las graficas adecuadas (ver predicción de tiempos de enfriamiento). Los factores que afectan a la temperatura en el centro geométrico pueden ser explicados por los siguientes grupos adimensionales. El factor de temperatura, viene dado por la ecuación 1.7.

$$\frac{T_m - T_f}{T_m - T_i} = \frac{T_f - T_m}{T_i - T_m} \quad 1.7$$

El *número de Fourier* Fo , que concierne a las propiedades físicas y dimensionales del sólido, así como el tiempo, viene dado por

$$Fo = \frac{hL}{k} \quad 1.8$$

Donde L es una semi-dimensión característica; L es el radio en el caso de un cilindro (ver apéndice 2) o esfera y el semi-espesor para una lámina (Lewis, 1993).

1.1.4. Predicción de tiempos de preenfriamiento

El diseño de los sistemas de enfriamiento requiere de una estimación de tiempos de enfriamiento. Existen numerosos métodos para su predicción, entre estos están (Mohsenin, 1980 y Becker, 2002).

1.1.4.1. Métodos numéricos

- Diferencias finitas ó elemento finito.

En contraste con una solución analítica que permite la determinación de la temperatura en cualquier punto de interés en un medio, una solución numérica permite determinar la temperatura sólo en puntos discretos. El primer paso en cualquier análisis numérico debe ser, por tanto, seleccionar estos puntos. Esto se hace al subdividir el medio de interés en un número de pequeñas regiones y asignar a cada una un punto de referencia en su centro. El punto de referencia suele llamarse punto nodal (en este caso se llama centro térmico), y el agregado de nodos se llama red nodal malla o rejilla (ver figura 1). Cada nodo representa cierta región, y su temperatura es una medida de la temperatura promedio de la región (Incropera, 1990).

La determinación numérica de la distribución de temperaturas dicta que se escribirá una ecuación de conservación apropiada para cada uno de los puntos nodales de temperatura desconocida.

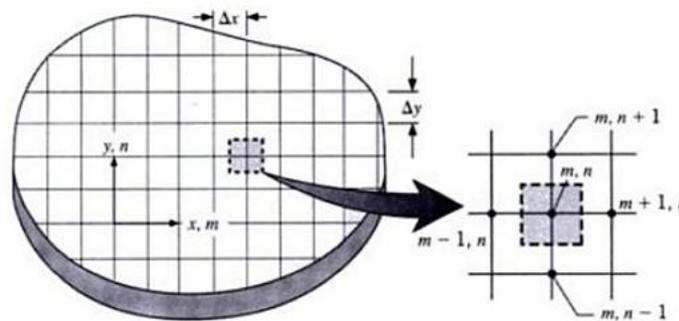


Figura 1. Conducción bidimensional, red nodal.

El conjunto de ecuaciones resultante se resuelve de manera simultánea para la temperatura en cada nodo. Para cualquier nodo interior de un sistema bidimensional sin generación y de conductividad térmica uniforme, la forma exacta del requerimiento de conservación de energía está dada por la ecuación de calor, ecuación de Fourier (Incropera, 1990).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad 1.9$$

Una ecuación de diferencias finitas adecuada para los nodos interiores de un sistema bidimensional se infiere directamente a partir de la ecuación 1.9. Resolviendo las segundas derivadas parciales de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{\partial T / \partial x \Big|_{m+1,n} - \partial T / \partial x \Big|_{m-1,n}}{\Delta x} \quad 1.10$$

Los gradientes nodales se expresan, a su vez, como función de las temperaturas nodales. Es decir,

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1,n} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad 1.11$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1,n} = \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad 1.12$$

Al sustituir las ecuaciones 1.11 y 1.12 en la 1.10, obtenemos la ecuación 1.13.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad 1.13$$

De ahí que para el nodo m,n la ecuación de calor, que es una ecuación diferencial exacta, se reduce a una ecuación algebraica aproximada. Esta forma aproximada en diferencias finitas 1nodos vecinos. Simplemente requiere que la suma de las temperaturas asociadas con los nodos vecinos sea cuatro veces la temperatura de interés (Incropera, 1990).

1.1.4.2. Métodos gráficos

Consisten en la estimación del tiempo de enfriamiento a través de cartas que grafican diferentes números adimensionales en función de la diferencia de temperaturas para diversas geometrías (algunos ejemplos de estas cartas aplicables al enfriamiento de productos agrícolas de forma sólida están dados en el anexo B-1).

- Método de Heisler (1947): Solución gráfica para determinar la temperatura del centro de un producto para conducción de calor en estado no estacionario.
- Método de Gurnie y Lurie (1923): Permite evaluar la conducción de calor en estado no estacionario en diferentes sitios del producto y para diferentes geometrías.
- Método de Williamson y Adams (1919). Gráfico para determinar el cambio de temperatura con respecto al tiempo en diferentes geometrías (cilindros finitos e infinitos).
- Método de Shneider (1963). Solución gráfica para determinar la transferencia de calor en estado no estacionario en diferentes geometrías y diferentes puntos en el alimento.
- Método de Shack (1933). Permite evaluar tiempos de enfriamiento en el centro, en punto medio y en la superficie del producto.
- Método de Groeber (1961). Se utiliza para calcular el tiempo de enfriamiento en el centro del producto.

1.1.4.3. Métodos analíticos

- Método de Rutov

Tabla 2. Solución analítica del método de Rutov para el enfriamiento.

Método	Geometría	Raíz de la ecuación	Ordenada al origen
Rutov	Placa	$Bi^2 = \left(\frac{2.5Nbiot}{2.4 + Nbiot} \right)$	$anti \log \left(\frac{0.11Nbiot}{1.3 + Nbiot} \right)$
	Cilindro	$Bi^2 = \left(\frac{6Nbiot}{2.85 + Nbiot} \right)$	$anti \log \left(\frac{0.22Nbiot}{1.7 + Nbiot} \right)$
	Esfera	$Bi^2 = \left(\frac{10.3Nbiot}{3.2 + Nbiot} \right)$	$anti \log \left(\frac{0.33Nbiot}{2.1 + Nbiot} \right)$

Donde la pendiente esta descrita por la ecuación 1.14

$$pendiente = \frac{-Bi^2\alpha}{2.303r^2} \quad 1.14$$

De tal manera que las soluciones analíticas para las diferentes formas geométricas se presentan en forma de una ecuación de la recta. Donde:

$$y = \log \left(\frac{T_f - T_m}{T_i - T_m} \right) \quad 1.15$$

- Método de Shneider (1955)

Para una placa infinita de espesor uniforme $2x$ donde la temperatura varía en una dirección solamente la ecuación de Fourier se reduce a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 1.16$$

La solución analítica de esta ecuación con el origen en el centro y ambas caras expuestas está dada por Schneider (1955) como:

$$\frac{T_f - T_m}{T_i - T_m} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\text{sen} M_n}{M_n + \text{sen} M_n \cos M_n} \right) \exp \left(- \frac{M_n^2 \alpha t}{x_m^2} \right) \cos \left(M_n \frac{x}{x_m} \right) \quad 1.17$$

Donde:

$$M_n = hx_m/k$$

$$x_m = \text{Espesor medio, ft}$$

$$x = \text{Distancia del centro, ft}$$

$$h = \text{Coeficiente convectivo}$$

$$k = \text{Conductividad térmica}$$

Para obtener soluciones para cilindros o esferas, la ecuación de conducción puede ser convertida a coordenadas polares o esféricas (Carslow, 1959; Rohsenow, 1961; y Schneider, 1955), o puede ser derivada en términos de estas coordenadas. Se asume para cada una de estas formas que las propiedades térmicas h , k y C_p , y la dimensión característica x o r son constantes con la temperatura y el tiempo.

Para determinar el método adecuado para la predicción de tiempos de enfriamiento es necesario conocer el número de Biot, el cual indica si el enfriamiento es newtoniano o no newtoniano. El primer caso indica que el mecanismo de calor predominante es la conducción y se reconoce, porque los valores del número de Biot son menores a 0.1 (Ley de Newton), caso contrario para un sistema en el que predomina la convección, en el cual el Número de Biot tiene valores mayores a 0.2 (Ley de Fourier).

1.1.5. Transferencia de calor por conducción

Cuando un objeto comienza a ser enfriado de una temperatura inicial T_i , a ciertas condiciones, la resistencia al flujo de calor puede ser considerado debido a la resistencia de la superficie del alimento. Estas condiciones son las siguientes:

- La conductividad térmica, k , es alta comparada con el coeficiente convectivo, h .
- El gradiente de temperatura dentro del alimento es insignificante.
- La temperatura superficial no es apreciablemente diferente de la temperatura interna del alimento.

Actualmente si la primera condición existe, las otras dos condiciones podrían no tomarse en cuenta. Estas condiciones del flujo de calor pueden ser dadas para el enfriamiento mediante la ley que involucra la ecuación 1.6. La cual indica que en el enfriamiento, la temperatura del alimento aumenta o disminuye exponencialmente con el tiempo. Además, en la ecuación exponencial se observa que el intervalo de tiempo requerido para experimentar un cambio de temperatura es directamente proporcional a la resistencia térmica de la superficie, $1/hA$, al calor específico, C_p , y a la masa. Esto es solamente en la teoría, porque en la práctica la conductividad alta se asume en el comienzo, la diferencia entre T_f y T_m va a ser extremadamente pequeña, después de un corto intervalo de tiempo.

1.1.6. Transferencia de calor por convección

En el caso general de enfriamiento de alimentos y productos agrícolas, el coeficiente convectivo, h , es alto con respecto a la conductividad térmica, k , entonces la temperatura superficial cambia más rápido que la temperatura del interior y existe un apreciable gradiente de temperaturas.

- El coeficiente convectivo, h , es alto comparado con la conductividad térmica del alimento, k .
- El gradiente de temperatura dT/dx no es pequeño y varía con el tiempo.

- La temperatura del interior del alimento es muy diferente a la temperatura del exterior del alimento.

En estas condiciones la ley de Fourier del alimento es más aplicable. La ecuación diferencial de Fourier de una historia térmica en un cuerpo sólido (alimento) es derivada de la conservación de energía para un elemento espacial infinito (Chapman, 1960; Rohsenow, 1961, and Groeber et al., 1961). La velocidad neta de conducción de calor en el elemento, más la generación de calor interna, es igual a la velocidad de incremento de la energía interna. Para un material isotrópico, donde una fuente interna de calor está presente y no es constante la conductividad térmica, la conducción de calor está dada por la forma general de la ecuación de Fourier en términos de tres direcciones (x, y, z) de la siguiente manera (Rohsenow, 1961)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_i = \gamma C_p \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad 1.18$$

Donde q_i denota la velocidad interna de generación de calor, γ el peso específico y C_p el calor específico. Si la conductividad térmica es uniforme y constante entonces:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{\gamma C_p}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad 1.19$$

Ecuación de Fourier para coordenadas cilíndricas finitas:

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] \quad 1.20$$

Donde: r, ϕ y z denotan la distancia radial, ángulo polar y distancia axial respectivamente.

Ecuación de Fourier para coordenadas cilíndricas infinitas

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad 1.21$$

Ecuación de Fourier para coordenadas esféricas

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\alpha}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{\alpha}{r^2} \left[2r \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad 1.22$$

Este método se puede resolver mediante soluciones graficas dadas por Gurnie-Lurie (1923), Williamson-Adams (1919), Heisler (1947), Schneider (1963), Shack (1933) y Groeber (1961). Estas graficas son de diferencia de temperaturas en función del número de Fourier.

1.1.7. Coeficiente de enfriamiento.

El coeficiente de enfriamiento depende de los siguientes factores (Mohsenin, 1980):

- De las características del producto
 - Características geométricas: Dimensiones, superficie, masa.
 - Características termofísicas: Temperatura del producto, conductividad térmica, calor específico.

- De la unidad de carga
 - Tipo de embalaje: caja, bandeja, caja-palé, etc.
 - Naturaleza del acondicionamiento: madera, cartón, plástico, etc.

- De la presencia de embalaje: éste crea resistencia térmica.

- Las características del medio de enfriamiento

- Naturaleza: Sólido, líquido ó gaseoso.
- Temperatura: Cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura del producto y la temperatura del medio, mayor será la velocidad de enfriamiento.
- Características termofísicas del medio.
- Velocidad del medio en relación al producto.
- Humedad relativa en el caso de aire.

Hay muchos métodos para determinar el coeficiente de enfriamiento. El primer método es usado de la pendiente de la curva de enfriamiento si la razón de temperaturas $(T_i - T_m / T_f - T_m)$ fuera graficada en una escala vertical log y el tiempo en la escala aritmética horizontal. Si el cambio de temperatura es de la forma exponencial una línea recta se debería de obtener con la unidad. La pendiente de la línea recta será hA/Cpm . Este parámetro en el caso del enfriamiento puede ser tomado como coeficiente de enfriamiento denotado por CR . En la interpretación básica de esta ecuación se tiene que (Mohsenin, 1980):

$$CR = \frac{\ln(T_i - T_m / T_f - T_m)}{\theta} \quad 1.23$$

En la práctica se puede graficar de la siguiente manera:

$$-CR = \frac{\ln(T_f - T_m) / (T_i - T_m)}{\theta}$$

o bien 1.24

$$(T_f - T_m) / (T_i - T_m) = je^{-CR(\theta)}$$

Un segundo método es mediante la siguiente expresión logarítmica:

$$CR = \frac{(T_i - T_f) / \theta}{\frac{(T_i - T_m) - (T_f - T_m)}{\ln(T_i - T_m) / (T_f - T_m)}} \quad 1.25$$

Donde:

T_i =Temperatura inicial del alimento (°C)

T_f = Temperatura final del alimento (°C)

T_m = Temperatura del medio de enfriamiento (°C)

j = Factor de retraso

θ = Tiempo (s)

1.1.8. Tiempo medio de enfriamiento

Por definición, el tiempo medio de enfriamiento es el tiempo en el cual la diferencia de temperatura del alimento y el medio llega a ser un medio de la diferencia de temperatura inicial. El tiempo medio de enfriamiento (Z), se encuentra expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\ln \frac{(T_i - T_m)}{1/2(T_i - T_m)} = CR(Z) \quad 1.26$$

$$Z = \ln 2 / CR \quad 1.27$$

Sin embargo esta ecuación no es muy exacta, por lo que se puede ocupar la siguiente ecuación derivada de la ecuación de velocidad de enfriamiento:

$$Z = \frac{(\ln 2)\theta}{\ln(T_i - T_m)/(T_f - T_m)} \quad 1.28$$

La expresión matemática derivada para el tiempo medio de enfriamiento cuando el factor de retraso es diferente de uno se calcula de la siguiente manera:

$$Z = \ln 2j / CR \quad 1.29$$

1.1.9. Eficiencia térmica

El concepto de eficiencia térmica en general expresa la razón de lo obtenido (la energía que se solicita) a lo invertido (la energía que cuesta), pero estas cantidades deben definirse claramente. Con el riesgo de una simplificación excesiva se puede decir que en un sistema térmico la energía solicitada es el trabajo y la energía que cuesta dinero es el calor proveniente de la fuente de calor a alta temperatura. La eficiencia térmica se define por (Sonntag, 1999):

$$\varepsilon_t = \frac{W \text{ (energía solicitada)}}{Q_H \text{ (energía que cuesta)}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad 1.30$$

La optimización de un sistema termodinámico como el que se describe en este trabajo consiste en la maximización del rendimiento o eficiencia térmica. Dicho rendimiento es un coeficiente estándar de operación que comúnmente se define como el cociente de lo que el sistema aporta sobre la energía térmica que proporciona, en términos de esta investigación queda definido como la energía térmica que el alimento requiere para alcanzar el CT requerido sobre la energía que el medio de enfriamiento proporciona al sistema, es decir, la energía que el alimento gana en función de la reducción de la temperatura entre la energía que el medio de enfriamiento (agua, hielo fluido o hielo sólido) pierde (gasta) en enfriar el alimento, de tal manera que este coeficiente nos indica en términos energéticos la magnitud de aprovechamiento térmico, este rendimiento es de suma importancia, debido a que a nivel industrial representa una significativa cantidad de dinero.

1.1.10.1. Manzana

La manzana es un pomo, proviene de un ovario de varios carpelos, en su estructura lleva vestigios de la flor, es una fruta firme y jugosa. En la tabla 3 se presentan las características principales de la manzana *Golden Delicious*.

a) Composición química de la manzana

La mayor parte del peso fresco es agua, ésta propiedad varía de acuerdo al almacenamiento, la variedad y si es alterada por el tratamiento del huerto y otros efectos climáticos. En la tabla 4 se presenta la composición química de la manzana (Ensiminger, 1994).

Tabla 3. Composición química proximal de la manzana.

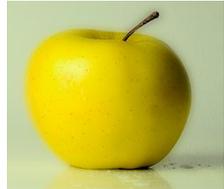
Componente	Cantidad %
Extracto seco	0.15
Agua	85.00
Azúcares totales	11.10
Ácidos totales	0.6 ácido málico
Fracción insoluble	2.10
Pectina	1.60
Cenizas	0.30
pH	3.30

(Belitz, 1997)

b) Madurez de la manzana

La madurez es la característica que necesita la fruta para estar en condiciones de comerse o para ser recolectada a fin de que sazone más. La sazón es la condición óptima cuando el color, sabor y textura han llegado al punto más alto de su desarrollo. Las características de la madurez que determinan el momento óptimo para cosechar la fruta son los siguientes: color, dureza, sólidos solubles, contenido de almidón.

Tabla 4. Características principales de la manzana *Golden Delicious*

Producto	Características de la piel	Características físicas	Método de conservación	Fotografía
Manzana Golden Delicious	Amarilla, delgada y resistente cubierta con lenticelas y pequeñas manchas de color gris.	Longitud: 6.5 cm, ancho: 6.3 cm aprox. Pulpa blanco amarillenta firme, jugosa.	Buena conservación en cámaras de atmósferas controladas.	

(Vera, 2001)

c) Conservación frigorífica de las manzanas

Las propiedades y datos de almacenamiento de manzana para la mayoría de sus variedades son: la temperatura de conservación para las variedades americanas (Red delicious, Golden delicious y australiana) es de 0 a +1 °C; para las variedades europeas (Cox's orange, Bella de bosjoop, Reineta de mans) la temperatura oscila entre los 3 y 5 °C (Durán, 2001). La humedad relativa común a la mayoría debe oscilar entre el 88 y 92 a 94% con unos máximos para las variedades Golden y similares, por ser bastante susceptibles a la deshidratación (Durán, 2001). El punto de congelación está comprendido entre -1.4 y 2.8 °C; el contenido en agua, del fruto, oscila alrededor del 84%, y el calor específico es de 0.87. El calor de respiración a 0 °C es 200 cal/ton/día; mientras que a 4.5 °C es de 400 cal/ton/día (Ensiminger, 1994 y Durán, 2001). En la tabla 5 se presentan las propiedades y datos de almacenamiento para la manzana.

Tabla 5. Propiedades y datos de almacenamiento para la manzana.

Producto	Calor específico kcal/kg/°C		PIC °C	Contenido de agua %	Almacenamiento corto		
	Arriba del PIC*	Abajo del PIC			T °C	HR %	Calor de respiración cal/kg/ día
Manzana	0.87	0.45	-1.5	84.1	1.67	85-88	0.352

*PIC (Punto inicial de congelación)

(Krack, 1992)

1.1.10.2. Pepino

El pepino es una especie de la familia de las cucurbitáceas (*Cucumis sativus*), se consume en fresco. En general se clasifican como rebanables (slicers) y para encurtido (pickles). La mayoría de los autores coinciden en que es originario de Asia o África, ya que en estos continentes existen cerca de 30 especies diferentes (Denison, 1987). El fruto es carnoso de forma cilíndrica y alargada lo cual depende de la variedad de que se trate pudiendo ser del orden de 13 a 20 cm (SEP, 1981; Wills, 1987; Denison, 1987). Generalmente de cáscara de color verde oscuro aunque existen variedades de color verde claro (Ryall, 1983), en

ocasiones alcanza la coloración amarilla cuando se deja madurar en la planta. Sus semillas se encuentran en tres compartimientos siendo ovaladas, planas y blancas o crema pero también existen variedades sin semilla.

a) Composición química del pepino

Químicamente está constituido por más del 95% de agua (Wills, 1987) por lo que es un envase delicado del preciado líquido, mientras que su contenido de carbohidratos oscila entre el 2 y 4% (Wills,1987), lo que implica sobre todo fibra, su pulpa y cáscara contienen vitaminas A y C (Belitz, 1988) y minerales (SEP, 1981; Wills, 1987 y Calderon, 1993), entre los que destacan K, P, Ca y Mg (Gaurth, 1992).

Tabla 6. Características principales del pepino

Producto	Características de la piel	Características físicas	Método de conservación	Fotografía
Pepino	Coloración verde en todo el cuerpo dado que la coloración amarilla es signo de senescencia.	Longitud: 20 cm, ancho: 5 cm aprox. Pulpa verde muy claro, semillas de color blanco cremoso	Buena conservación en cámaras de atmósferas controladas.	

(Gálvez, 2001)

b) Madurez del pepino

Una vez que ha transcurrido un período de aproximadamente dos meses, el fruto entra en la etapa de madurez fisiológica la cual se evidencia a través de los llamados índices de cosecha, los cuáles establecen el estado fisiológico mediante apreciaciones de índices de color, tamaño, aroma, textura o composición (SEP, 1981); en general los índices que se han establecido son:

- Coloración verde en todo el cuerpo dado que la coloración amarilla es signo de senescencia.

- Semillas de color blanco cremoso.
- Longitud de 15 a 20 cm en promedio lo que constituye 2/3 partes de su completo desarrollo antes de mostrar signos de maduración en la planta.
- Actividad de la poligalacturonasa en el tejido de la cavidad en donde se encuentran las semillas, ya que esta aumenta durante la maduración (Pantastico, 1979).
- El valor de pH en la cavidad que contiene a las semillas disminuye cuando la actividad de la poligalacturonasa aumenta (Pantastico, 1979) variando de 6.2 a 4.6.

c) Conservación frigorífica de los pepinos

La temperatura óptima para almacenar el pepino es de 7.5 a 10 °C. El potencial de almacenamiento es de 4 a 6 semanas dependiendo del cultivar y estado de madurez. La humedad relativa óptima es del 90 al 95% para evitar pérdidas de agua en el producto. La tasa de respiración a 20°C es de 8-12 mL CO₂/kg h (Adel, 2005).

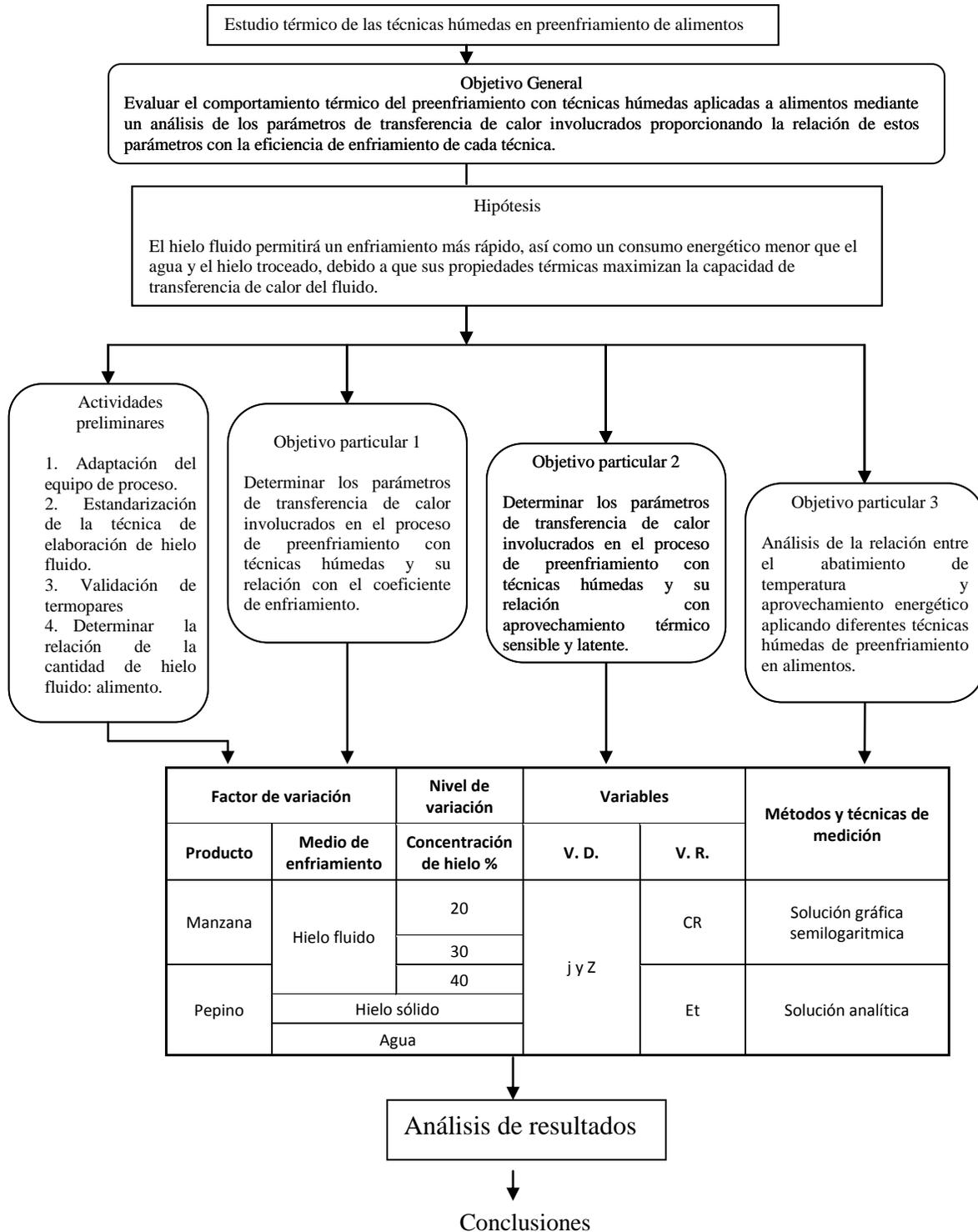
Tabla 7. Propiedades y datos de almacenamiento para el pepino

Producto	Calor específico Kcal/kg/°C		PIC	Contenido de agua %	Almacenamiento corto		
	Arriba del PIC	Abajo del PIC	°C		T °C	HR %	Calor de respiración cal/kg/ día
Pepino	0.97	0.49	-5.5	96.1	10	85-95	2.1

(Krack, 1992)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Cuadro metodológico



2.2. Descripción del cuadro metodológico

2.2.1. Problema

En los sistemas de preenfriamiento es importante la evaluación del comportamiento térmico así como la velocidad con la que se realiza el proceso debido a que es indispensable identificar el medio de enfriamiento que proporcione las propiedades más convenientes según las necesidades de la industria por lo que es necesario un estudio del comportamiento de diferentes técnicas húmedas de enfriamiento.

2.2.2. Objetivo General

Evaluar el comportamiento térmico del preenfriamiento con técnicas húmedas aplicadas a alimentos mediante un análisis de los parámetros de transferencia de calor involucrados, proporcionando la relación de estos parámetros con la eficiencia de enfriamiento de cada técnica.

2.2.3. Identificación de variables

La identificación de variables, es importante, debido a que posterior a este paso, se realiza una selección de las variables a estudiar, por lo cual debe de haber una adecuada identificación de aquellos factores que causan algún efecto en el proceso a estudiar. Un método de identificación de variables muy eficiente es el diagrama causa efecto, también conocido como Ishikawa (figura 2), en este diagrama se simplifican todos aquellos factores que de alguna manera tienen influencia en el proceso que se desea llevar a cabo, en este caso el enfriamiento de alimentos mediante técnicas húmedas.

2.2.4. Selección de variables

En la tabla 8 se observa la selección de variables, que se estudiaron durante esta investigación. El número de repeticiones fue de 3.

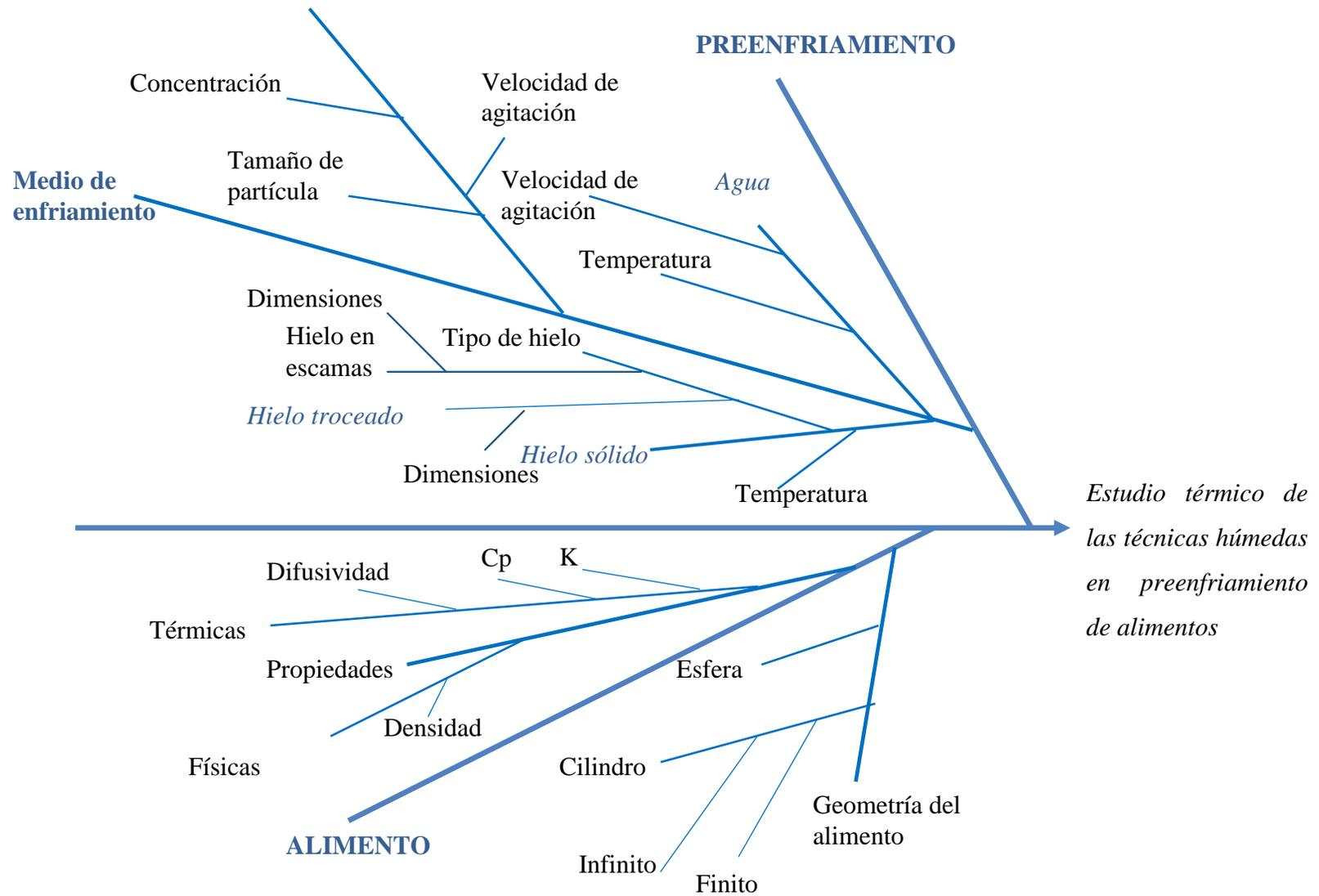


Figura 2. Identificación de variables (diagrama causa-efecto)

Tabla 8. Variables de proceso

Factor de variación		Nivel de variación	Variables		Métodos y técnicas de medición
Producto	Medio de enfriamiento	Concentración de hielo %	V. D.	V. R.	
Manzana	Hielo fluido	20	j y Z	CR	Solución gráfica semilogarítmica
		30			
		40			
Pepino	Hielo sólido			ϵ	Solución analítica
	Agua				

2.2.5. Actividades preliminares

2.2.5.1. Control de materia prima

Con respecto a los parámetros que se tomaron en cuenta para la selección de las manzanas y los pepinos que se sometieron a la operación de preenfriamiento, se utilizó el color como índice para determinar el grado de madurez (mediante la comparación con una tonalidad seleccionado de una carta de colores), seleccionando estos productos hortícolas de acuerdo a las características de color expresadas en el marco teórico para cada uno, de tal forma que el producto tuviera las mismas características de madurez, con la finalidad de mantener un control en la materia prima y asegurar condiciones de homogeneidad en este, ya que influye de forma directa con el sistema en estudio. Otro parámetro importante es la dimensión del producto, debido a que los aspectos geométricos en la transferencia de calor son determinantes, puesto que si se asume que un pepino tiene forma de un cilindro, la forma y dimensiones de este deben de estar consideradas en este concepto; por este motivo, se estableció un rango de dimensiones en función a lo expresado en el marco teórico tanto para el pepino como para la manzana, obteniendo límites de 20 cm de largo y 5 cm de ancho (+/- 1 cm) en el caso del pepino y de 6.5 cm (+/- 1 cm) de diámetro para la manzana.

2.2.5.2. Validación de termopares

La validación se describe como un estudio sistemático basado en evidencias documentadas, el cual ayuda a probar que los sistemas y/o procesos sean efectuados adecuadamente y constantemente trabajen según especificaciones.

Se realizan las siguientes pruebas para validar los termopares: linealidad, exactitud, precisión, repetibilidad y reproducibilidad, el número de repeticiones con que se realizan las pruebas es de tres.

Material:

- 1 termómetro
- 1 parrilla eléctrica
- 1 vaso de precipitados de 500mL
- Agua destilada
- 5 termopares

- Precisión

Es el grado en que una medición es legible o es especificada. Usualmente se expresa en unidades de medición o en forma de porcentaje.

El desarrollo experimental de las pruebas consiste en:

1. Calentar 400 mL de agua hasta el punto de ebullición (92.8°C en C. Izcalli)
2. Introducir los 5 termopares en el agua
3. Registrar datos de temperatura a intervalos de 60 s hasta completar 10 lecturas.

- Linealidad

Es el grado en que el diagrama de una estimulación de entrada, comparado con el diagrama de la respuesta a esta estimulación vista en la salida, se aproxima a una línea recta.

Para desarrollar la prueba se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Introducir los 5 termopares en 400 mL de agua a temperatura ambiente
2. Calentar el agua hasta completar 10 lecturas
3. Registrar las temperaturas en intervalos de 60 s.

- Exactitud

Es el grado en que el valor medido se aproxima al valor correcto. Usualmente se expresa en porcentaje de error. El desarrollo experimental de la prueba de exactitud es el mismo que para la de precisión

- Reproducibilidad

La reproducibilidad es uno de los principios esenciales del método científico, y se refiere a la capacidad que tenga una prueba o experimento de ser reproducido o replicado. El término está estrechamente relacionado con el concepto de testabilidad, y, dependiendo del campo científico en particular, puede requerir que la prueba o experimento sea falsable. El desarrollo experimental de la prueba de reproducibilidad es el mismo que para la de precisión.

- Repetibilidad

La repetibilidad (también conocida como coeficiente de correlación) es una medida estadística de la consistencia entre medidas repetidas de un mismo carácter. Un valor de repetibilidad de uno indica que la medida es perfectamente consistente y repetible, y que el investigador no comete ningún error en la medición de ese carácter. Un valor de cero indica que las medidas repetidas obtenidas de ese carácter son tan distintas como si se hubieran tomado a partir de grupos distintos tomados al azar. El desarrollo experimental de la prueba de repetibilidad es el mismo que para la de precisión

2.2.5.3. Localización del centro térmico

La finalidad de esta actividad preliminar es fundamental, ya que es importante localizar el centro térmico a través de la colocación de termopares ya validados en diferentes puntos del alimento. Debido a que el alimento no mantiene un sistema homogéneo en cualquier punto de su composición la metodología para la localización del centro térmico fue experimental y no por metodologías ya establecidas (relación de áreas). La manera de localizar el centro térmico fue colocando un cierto número de termopares dentro del alimento en diversos puntos (figura 3) y determinar así a través de curvas de penetración de calor, el centro térmico, es decir, el punto que tarda más tiempo en enfriarse. En la figura 3 se muestra el acomodo de termopares para la localización del centro térmico para ambas geometrías, considerando a la manzana como una esfera y al pepino como un cilindro infinito (ver apéndice 2). Con respecto al enfriamiento de manzana, los termopares uno, dos y tres fueron colocados en el centro variando la distancia entre ellos 1 cm sobre el eje axial; los termopares cuatro y cinco fueron colocados 1 cm alejados del centro sobre el eje radial y 2 cm separados entre ellos. El acomodo de los termopares durante el enfriamiento con pepino se realizó ubicando a los termopares uno, dos y tres en el centro con una distancia de 1 cm entre ellos sobre el eje axial; los termopares cuatro y cinco fueron colocados 1 cm alejados del centro sobre el eje radial.

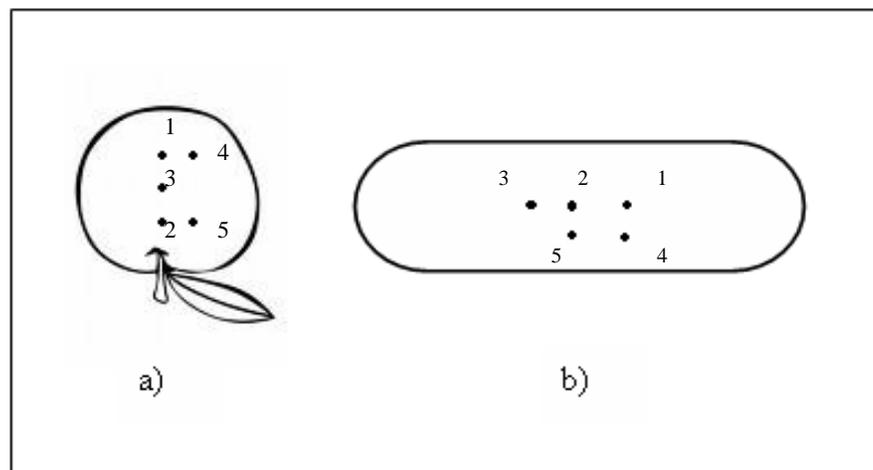


Figura 3. Localización termopares para la ubicación del centro térmico

2.2.5.4. Adaptación del equipo de proceso

La adaptación de equipo de proceso se realizó mediante los cálculos correspondientes a un balance de energía el cual proporciona la cantidad mínima de medio de enfriamiento para enfriar un alimento de masa conocida de una temperatura inicial a una temperatura final. De esta manera mediante el uso de las ecuaciones 2.1 y 2.2 se procede a calcular la masa de hielo (H) y agua (a) respectivamente necesaria para enfriar un alimento con determinado calor específico (ver marco teórico) hasta la temperatura de almacenamiento.

$$m_H \lambda = (mCp\Delta T)_a \quad 2.1$$

$$(mCp\Delta T)_w = (mCp\Delta T)_a \quad 2.2$$

El equipo de proceso debe de ser de material aislante, con el fin de minimizar las pérdidas de calor por paredes y las dimensiones del equipo se calculan mediante el volumen necesario del medio a partir de los datos obtenidos con las ecuaciones anteriores.

2.2.5.5. Estandarización de la técnica de elaboración de hielo fluido

La elaboración del hielo fluido se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Preparación de la goma carboximetilcelulosa (CMC) al 0.1% m/m y mantenerla a una temperatura de 0 °C.
- Pesar la cantidad de goma necesaria para preparar la concentración de hielo fluido y mantenerla a 0°C.
- Moler 500g de hielo troceado en la licuadora con 500g de agua a 0°C por 30 s a alta velocidad.
- Pesar la cantidad necesaria de hielo molido separándolo del exceso de agua con una malla de plástico.
- Mezclar la goma y el hielo molido inmediatamente antes de iniciar con el enfriamiento.

2.2.5.6. Determinación de la difusividad térmica de los alimentos

La determinación de esta propiedad es importante debido a que mide la capacidad de los materiales para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenarla. La difusividad térmica depende de algunas propiedades del producto tales como conductividad térmica, densidad y calor específico tal y como se describe en la ecuación 2.3, estas propiedades a su vez influyen en el coeficiente de enfriamiento.

$$\alpha = k / \rho C_p \quad 2.3$$

La ecuación para determinar la difusividad térmica se deriva de la segunda ley de Fourier la cual establece la transferencia de calor por conducción en estado estacionario. La determinación de esta propiedad se puede realizar mediante el método de diferencias finitas el cuál requiere de un perfil de temperaturas del alimento durante el enfriamiento, por lo que los termopares se colocan en función del centro térmico como se muestra en la figura 4. La solución matemática de la ecuación de Fourier para coordenadas cilíndricas y esféricas se presenta en el apéndice 2. El enfriamiento para la determinación de la difusividad térmica se realizó en agua a temperatura constante de 0°C.

2.2.6. Planteamiento de objetivos

2.2.6.1. Estudio térmico del coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas

Objetivo particular: Determinar los parámetros de transferencia de calor involucrados en el proceso de preenfriamiento con técnicas húmedas y su relación con el coeficiente de enfriamiento.

Las variables involucradas son:

V. I. Medio de enfriamiento

V.D. Tiempo de enfriamiento

V.R. Coeficiente de enfriamiento

A continuación se describen las actividades experimentales necesarias para el desarrollo del objetivo anterior:

- a. Colocar los termopares según la distribución de temperaturas. Como se muestra en la figura 4.
- b. Preparación de los medios de enfriamiento.
- c. Inmersión del alimento en el medio de enfriamiento de acuerdo a las condiciones de proceso. Asegurar que no se filtre calor, ya que el sistema será aislado.
- d. Obtención de las historias térmicas (perfil de temperaturas del alimento). Todos los experimentos se repitieron tres veces.

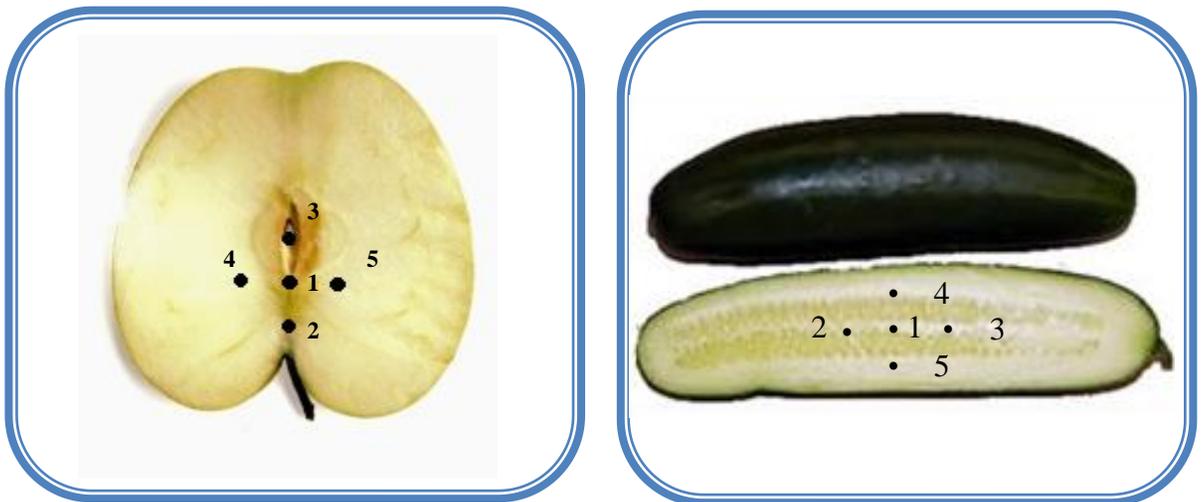


Figura 4. Distribución de termopares en los alimentos

2.2.6.2. Estudio de la eficiencia térmica del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas

Objetivo particular: Determinar los parámetros de transferencia de calor involucrados en el proceso de preenfriamiento con técnicas húmedas y su relación con aprovechamiento térmico sensible y latente.

Las variables involucradas son:

V.I. Medios de enfriamiento

V.D. Temperatura final del agua de enfriamiento y masa de agua que se fundió durante el enfriamiento

V.R. Eficiencia térmica

A continuación se describen las actividades experimentales necesarias para el desarrollo del objetivo anterior:

- a. Colocar los termopares según la distribución de temperaturas para una esfera y un cilindro como se muestra en la figura 4.
- b. Preparación de los medios de enfriamiento
- c. Inmersión del alimento en el medio de acuerdo a las condiciones de proceso. Cerrar el recipiente de tal manera que no se filtre calor, ya que el sistema será aislado.
- d. Obtención de las historias térmicas (perfil de temperaturas del alimento)
- e. Medir concentración final de hielo fluido o hielo sólido, mediante la separación de las dos fases. Alternativa de solución creativa: la concentración final se podría calcular de forma indirecta a partir de una curva patrón de la densidad a diferentes concentraciones.

La masa de hielo cede todo su calor latente, por lo que ésta se evaluó experimentalmente. Se obtuvo después del enfriamiento del alimento (que estuvo en condiciones de aislamiento) mediante la separación de las dos fases tal como se describe en las actividades experimentales. Se consideró evaluar la eficiencia térmica con la misma ecuación que para el hielo sólido (ecuación 2.4), debido a que en el proceso no se registro ningún cambio de temperatura en el medio, es decir que la temperatura del agua que se fundió durante el enfriamiento permaneció a 0°C. En teoría un mínimo porcentaje del calor total que cede el medio se debe al calor sensible del agua. Sin embargo, se considera que el hielo al tener una temperatura constante de 0°C, cedió su calor latente a esta pequeña fracción de agua

que aumento de temperatura, antes de que se separaran las fases, por lo que se considera que el total del calor cedido por el hielo fluido es calor latente.

Los cálculos correspondientes para evaluar la eficiencia térmica siguen la ecuación 1.30, debido a la presencia de tres medios de enfriamiento la ecuación cambia de la siguiente manera:

Hielo fluido

$$\varepsilon_{HF} = 1 - \frac{\text{Calor sensible alimento}}{\text{Calor latente hielo}} * 100 = 1 - \frac{(mCp\Delta T)_a}{(m\lambda)_H} * 100 \quad 2.4$$

Agua

$$\varepsilon_W = 1 - \frac{\text{Calor sensible alimento}}{\text{Calor sensible agua}} * 100 = 1 - \frac{(mCp\Delta T)_a}{(mCp\Delta T)_W} * 100 \quad 2.5$$

Hielo Sólido

$$\varepsilon_{HS} = 1 - \frac{\text{Calor sensible alimento}}{\text{Calor latente hielo}} * 100 = 1 - \frac{(mCp\Delta T)_a}{(m\lambda)_H} * 100 \quad 2.6$$

Como se observa en las ecuaciones 2.4 y 2.6 el calor transferido por el hielo sólido al alimento es el calor latente de fusión, el cual en sistemas de refrigeración se puede comprender por que se mide la capacidad de este sistema en términos de su habilidad de enfriamiento. El término calor latente de fusión significa la cantidad de calor que se debe agregar a una libra de hielo para fundirlo (cambiarlo del estado sólido al líquido sin que se produzca un cambio de temperatura).

Es importante mencionar que el termino de eficiencia térmica no engloba factores como área de transferencia de calor, es decir, que resultaría erróneo asumir que la eficiencia

térmica proporcionada por el hielo sólido es debida a un 100% de la cobertura del alimento con el medio, debido a que por sus características físicas y de dimensiones de las partículas del sistema es un medio limitado en cuanto a su área de contacto, considerando esta propiedad como una restricción propia e impermutable del sistema en este estudio tecnológico se evalúa la eficiencia térmica del hielo sólido de la misma manera que se evalúa para los medios fluidos que si proporcionan un 100% de área de contacto (Warren, 1993).

CAPÍTULO 3. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.1. Actividades preliminares

3.1.1. Validación de termopares

Se realizaron las siguientes pruebas para validar los termopares: linealidad, exactitud, precisión, repetibilidad y reproducibilidad (ver apéndice 1). Las ecuaciones de corrección obtenidas se presentan en la tabla 9 (donde la temperatura corregida es T_c y la temperatura tomada es T):

Tabla 9. Ecuaciones de corrección de los termopares

Termopar	Ecuación de corrección
1	$T_c=1,0019T+1,0811$
2	$T_c=1,0015T+1,1406$
3	$T_c=1,0022T+1,1052$
4	$T_c=1,0017T+1,1382$
5	$T_c=1,0024T+1,0673$
6	$T_c=1,0002T+0,5013$

Con las ecuaciones anteriores se corrigieron las temperaturas tomadas experimentalmente con el fin de proporcionar datos experimentales más confiables, mediante los análisis estadísticos correspondientes a las pruebas de validación, por lo que los resultados correspondientes a la medición experimental de temperatura son introducidos a las ecuaciones anteriores proporcionando valores precisos, exactos, repetibles y reproducibles.

3.1.2. Localización del centro térmico

Esta actividad permitió identificar el sitio que más tarda en enfriarse (centro térmico), es importante debido a que los termopares se colocaron en función de este punto, ya que de no

ser así hubiera sido imposible garantizar el enfriamiento en cualquier otro sitio del alimento, se consideró necesario, debido a que los alimentos no presentan una geometría totalmente regular. En la figura 5 se presenta el promedio de las tres repeticiones de las historias térmicas, para cada alimento. Con dicha actividad se obtuvo que el centro térmico de la manzana se encuentra 1 cm abajo del centro geométrico sobre el eje axial, y con respecto al pepino se observa que las temperaturas no cambian con respecto al eje axial, únicamente varían en función del eje radial, por lo que se consideró como un cilindro infinito con centro térmico en el mismo sitio del centro geométrico. Con la actividad anterior, se obtuvo que el centro térmico del pepino, coincide con el centro geométrico, a diferencia de la manzana, en la cual el centro térmico se obtuvo 1 cm debajo de su centro geométrico (teniendo en cuenta que la posición de la manzana durante el enfriamiento fue con el lado donde se realiza el desprendimiento del árbol frutal hacia abajo) (ver figura 4) esto se puede justificar, debido a la forma geométrica de la manzana, ya que alcanza su máximo radio aproximadamente 1 cm abajo del centro geométrico (ver figura 4). Mediante la obtención de estos resultados, se prosiguió a enfriar los alimentos, colocando los termopares alrededor del centro térmico con el fin de obtener un perfil de temperaturas que servirá durante el tratamiento de datos (difusividad térmica).

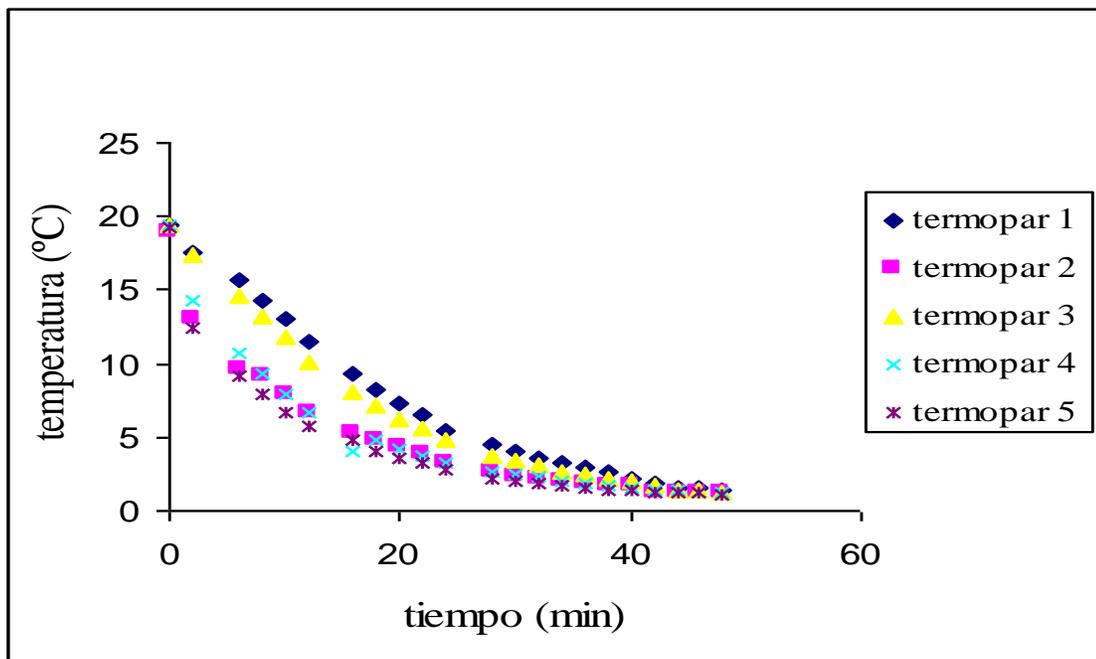


Figura 5. Localización del centro térmico en la manzana

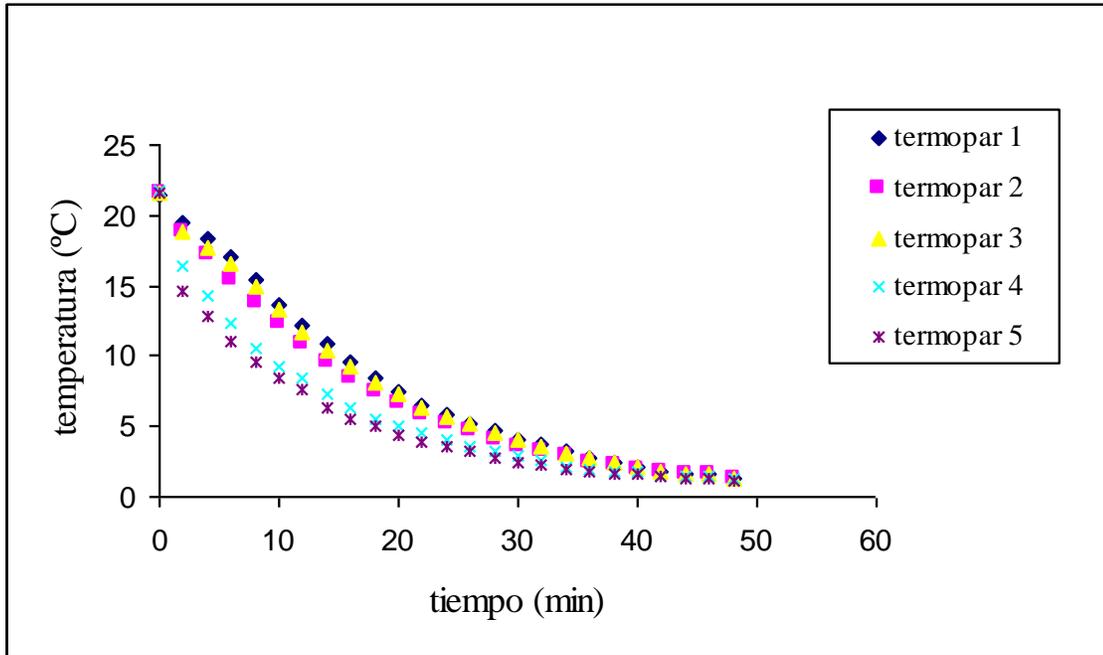


Figura 6. Localización del centro térmico en el pepino

3.1.3. Adaptación del equipo de proceso

Estos cálculos se realizaron con respecto al pepino debido a que tiene las dimensiones más grandes y el calor específico de este es mayor al de la manzana. En el marco teórico se muestra el valor de C_p para los diferentes alimentos, ya que estos valores se ocupan en los cálculos. El calor latente de fusión del hielo es de $334 \text{ kJ/kg.} = 79.492 \text{ kcal/kg.}$ A partir de estos datos se procede a calcular de la siguiente forma:

Masa de hielo necesaria para enfriar un pepino de 500 g de 20°C a 1°C .

$$m_H \lambda = (m C_p \Delta T)_a$$

$$m_H = \frac{(0.5\text{kg})(0.90\text{kcal/kg}^\circ\text{C})(20^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C})}{79.492\text{Kcal/kg}} = 0.1075\text{kg}$$

Masa de agua necesaria para enfriar un pepino de 500 g de 20 a 1 °C.

$$(mCp\Delta T)_w = (mCp\Delta T)_a$$

$$m_w = \frac{(0.5kg)(0.90kcal / kg^{\circ}C)(20^{\circ}C - 1^{\circ}C)}{(1Kcal / kg^{\circ}C)(1 - 0^{\circ}C)} = 8.55kg$$

Mediante los cálculos anteriores se obtuvo que el equipo de proceso para el enfriamiento con agua debe de tener un volumen mayor a 8.55 litros más el volumen del pepino (por sus dimensiones de un cilindro) así que para asegurar que el agua de enfriamiento a temperatura de 1 °C enfríe a 1°C los productos, el volumen de agua en el equipo se consideró de 11 litros, por lo que el equipo de proceso para el enfriamiento de productos con agua debe de tener las medidas que se presentan en la tabla 10.

De acuerdo a los cálculos anteriores para el enfriamiento con hielo sólido y con hielo fluido se necesita un menor volumen de medio de enfriamiento, por lo que para cumplir con la completa inmersión de los alimentos se consideró una masa de 6 kg, por lo que las medidas del equipo de proceso para el enfriamiento con ambos medios fue diseñado con las dimensiones que se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Dimensiones del equipo de proceso

Aplicación	Dimensiones internas (cm)		
	largo	ancho	alto
Enfriamiento con agua	30	20	20
Enfriamiento con hielo sólido y hielo fluido	25	15	20

Se determinó la relación de la cantidad del medio de enfriamiento – alimento mediante los cálculos de la actividad preliminar para el diseño de equipo, estos cálculos están basados en la cantidad mínima del medio de enfriamiento para llevar el alimento de una temperatura

inicial (temperatura de campo) a una temperatura final (temperatura de almacenamiento), con lo que se obtuvo lo correspondiente a la tabla 11.

Tabla 11. Cantidad del medio de enfriamiento

Aplicación	Cantidad (kg)
Hielo fluido	6
Hielo sólido	6
Agua	11

3.1.4. Disminución del punto inicial de congelación

Con respecto a la disminución del punto inicial de congelación (PIC) como parte de las propiedades coligativas de la CMC se obtuvieron los siguientes valores para las concentraciones de 20, 30 y 40% (fracción de hielo en dispersión de CMC al 0.1%) (Ver los cálculos correspondientes en el apéndice 3).

$$PIC_{20\%} = 273.159929 \text{ K} = -7.99\text{E-}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$PIC_{30\%} = 273.159937 \text{ K} = -6.21 \text{ E-}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$PIC_{40\%} = 273.159946 \text{ K} = -5.31 \text{ E-}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.1.5. Estandarización de la técnica de elaboración de hielo fluido.

A continuación se muestra la relación de las cantidades de hielo molido y dispersión de goma para preparar la cantidad de hielo fluido necesario para el enfriamiento (ver tabla 12) a las concentraciones de 20, 30 y 40%.

La dispersión de la goma se preparó al 1% debido a que se validó que es la concentración mínima para estabilizar el sistema, es decir, que proporciona la viscosidad necesaria para mantener las partículas de hielo fluido en suspensión sin que estas se aglomeren o floten.

Tabla 12. Cantidades de hielo y dispersión de CMC para la preparación de hielo fluido

Hielo fluido	Cantidad (kg)	
Concentraciones %	Hielo molido	Dispersión CMC 0.1%
20	1.2	4.8
30	1.8	4.2
40	2.4	3.6

3.1.6. Determinación de la difusividad térmica de los alimentos

Los resultados de la difusividad térmica evaluada experimentalmente de los alimentos en cuestión proporcionan datos confiables para conocer tiempos de preenfriamiento mediante el método gráfico de Heisler, Gurney Lurie, Shneider entre otros (ver anexo). El resultado de la difusividad térmica también es necesario para establecer un análisis del coeficiente de enfriamiento en función de esta propiedad, debido a que éste depende en gran medida de las propiedades termofísicas del alimento (Mohsenin, 1980). En la figura 7 se presenta la difusividad térmica de la manzana evaluada experimentalmente (donde las abreviaciones “ $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ” y “ a ” resultan de la ecuación de Fourier 1.18, ver apéndice 2).

Tabla 13. Difusividad térmica de la manzana

Factor estadístico	Difusividad térmica	
	Experimental	Teórica
Promedio	1.176E-07 m ² /s	1.2645E-07 m ² /s (Gane, 1937)
Desv Est	1.513E-06	1.30E-07 m ² /s (Alvarado, 1994)
CV	1.268E-01	1.1096E-07 m ² /s (Bennett et al., 1969)

En la tabla 13 se observa que la difusividad térmica de la manzana medida experimentalmente no se aleja de la teórica de forma significativa, y que esta entre el intervalo propuesto por los autores. En la figura 8 se observa el promedio de tres repeticiones experimentales de la difusividad térmica del pepino.

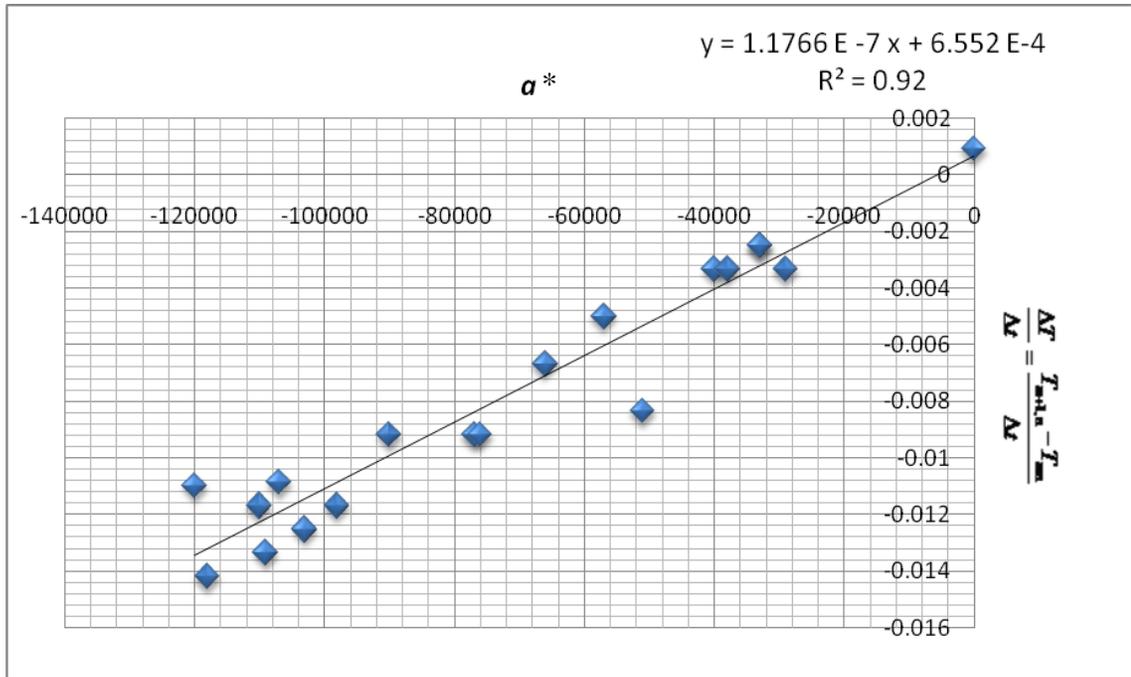


Figura 7. Difusividad térmica de la manzana (* a es la solución de la ecuación de Fourier, ver apéndice 2)

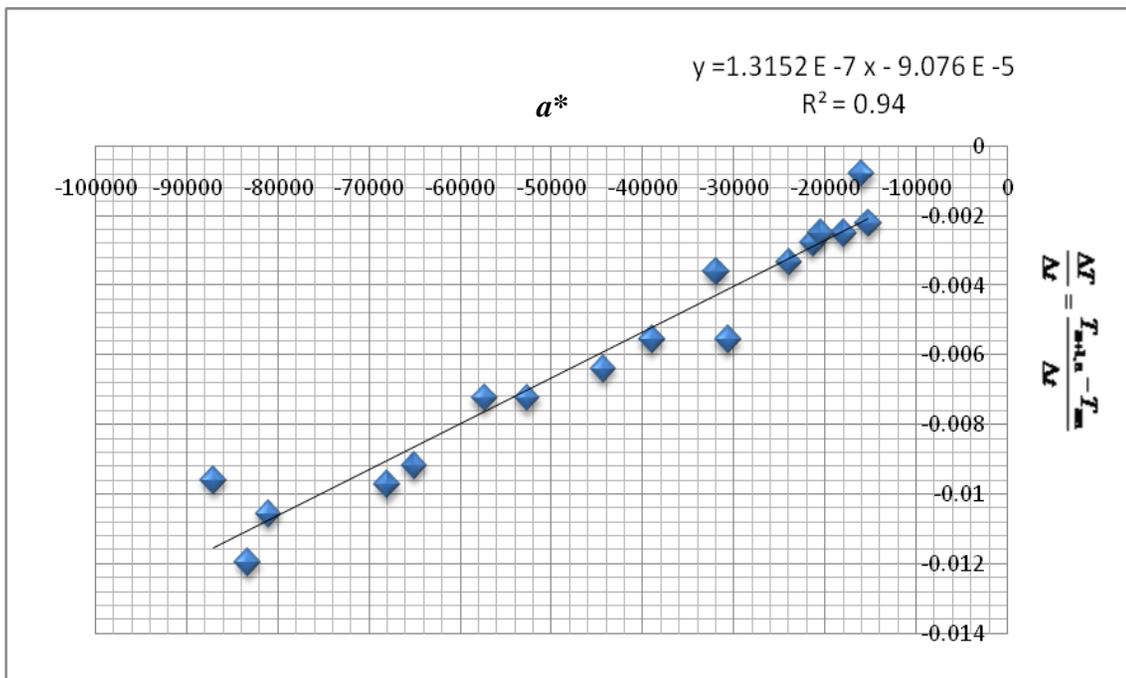


Figura 8. Difusividad térmica del pepino (* a es la solución de la ecuación de Fourier, ver apéndice 2)

Tabla 14. Difusividad térmica del pepino

Difusividad térmica		
Factor estadístico	Experimental	Teórica
<i>Promedio</i>	1.315 E-07 m ² /s	1.32E-07 m ² /s (Alvarado, 1994)
<i>Desv Est</i>	3,45E-09	
<i>CV</i>	2,63E-02	

En las tablas 13 y 14 se observa que la difusividad térmica es mayor en el pepino, lo cuál se le atribuye a su contenido de agua mayor al 95% (Willis, 1987) a diferencia de la manzana la cual esta compuesta por un 85% aproximadamente (Belitz, 1997). Estos valores contribuyen de forma significativa en el coeficiente de enfriamiento. En las figuras 7 y 8 se observa que la recta del gráfico se encuentra en el tercer cuadrante, esto se debe a que la operación es de enfriamiento por lo que al disminuir la temperatura, los resultados que proporcionan las ecuaciones correspondientes son valores negativos (caso contrario de una operación de calentamiento en la cual la recta resulta en el primer cuadrante).

3.2. Resultados y análisis de datos del estudio térmico del coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas

En las figuras 9 y 10 se observa el comportamiento del enfriamiento de los productos, es decir, la disminución de temperatura con respecto del tiempo, de tal manera que el hielo fluido es el medio de enfriamiento con mayor capacidad de reducir la temperatura del producto en el caso de la manzana, a diferencia del pepino en donde el medio de enfriamiento con mayor coeficiente es el agua, esto se debe a que la temperatura final de enfriamiento (temperatura de almacenamiento del pepino) es de 10°C, por lo que se observa que el agua proporciona menores tiempos de enfriamiento cuando la diferencia de temperaturas entre el medio y el producto es baja, sin embargo, cuando se requieren temperaturas más bajas en el producto el agua proporciona los tiempos más altos, siendo el hielo fluido el medio de enfriamiento que proporciona los menores tiempos de enfriamiento.

El gradiente de temperatura entre el alimento y el medio resulta ser una implicación más a considerar en la selección del medio de enfriamiento, este comportamiento se puede explicar debido a la capacidad de transferir calor que generan las partículas presentes que proporcionan calor latente al sistema. Las figuras 11 y 12 proporcionan una gran cantidad de datos valiosos para el estudio, ya que mediante este gráfico se puede conocer el comportamiento del enfriamiento de manzana y pepino, es decir si se rige bajo la ley de Newton o la ley de Fourier, se observa que el enfriamiento es del tipo newtoniano debido a que el factor de retraso (factor lag, j) (el cual corresponde a la ordenada al origen de la ecuación) es de 1, esto es, que la relación es básicamente exponencial del tipo de enfriamiento cuando j es igual a la unidad. Este comportamiento se observa en la ecuación 1.24. Mediante estas figuras, además se conoce el coeficiente de enfriamiento el cuál corresponde a la pendiente de la ecuación exponencial (ver ecuación 1.24).

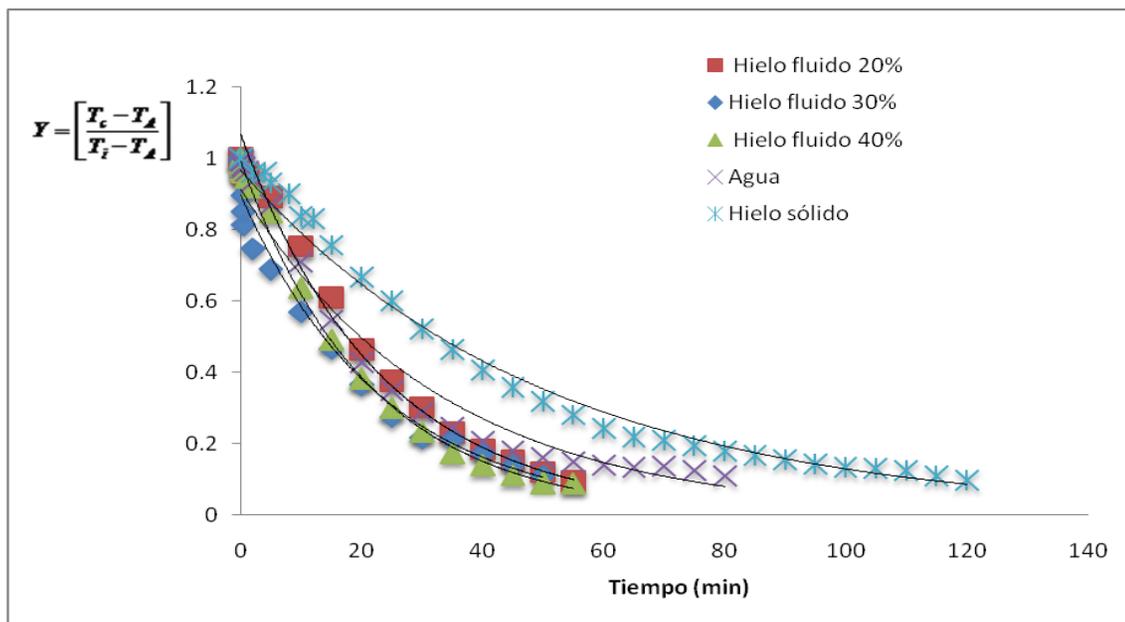


Figura 9. Gráfica del coeficiente de enfriamiento de manzana ($T_m=0^\circ\text{C}$)

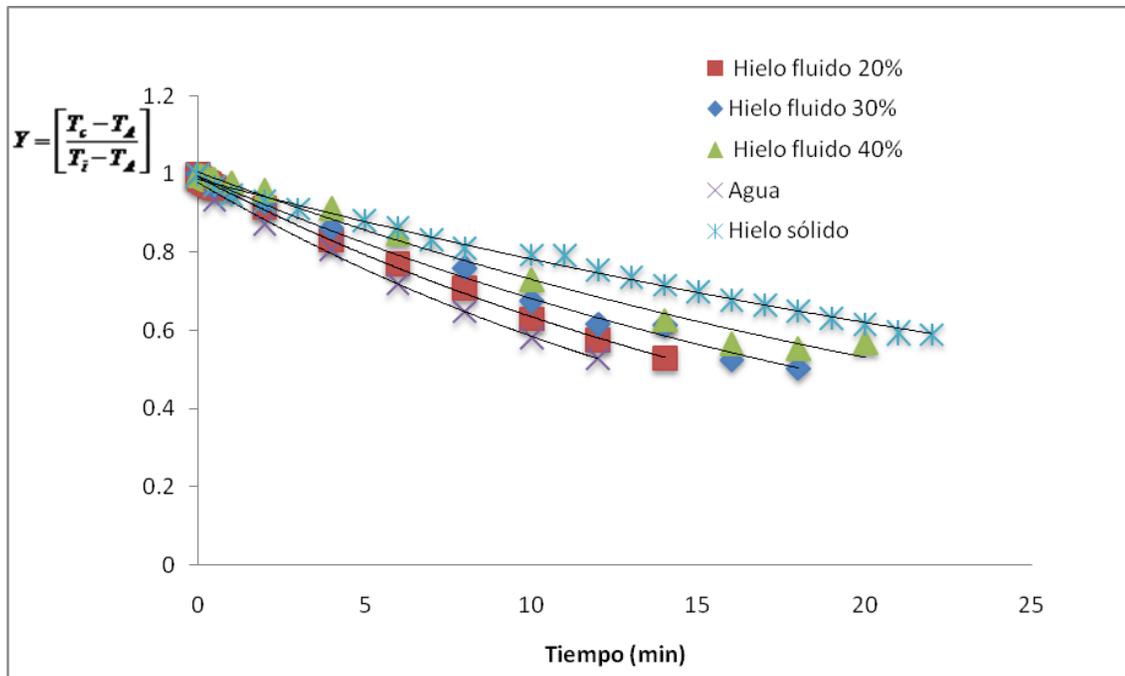


Figura 10. Gráfica del coeficiente de enfriamiento del pepino ($T_m=0^\circ\text{C}$)

Con respecto al coeficiente de enfriamiento en la figura 13 se muestra la comparación de éste para el pepino y la manzana. En el caso de la manzana es mayor en el enfriamiento con hielo fluido con respecto al hielo sólido y el agua, es decir que fue mayor la velocidad de enfriamiento, por lo que el tiempo de proceso fue menor, con respecto a la tendencia que sigue el coeficiente enfriamiento en función de las concentraciones de hielo fluido se observa que al disminuir la concentración aumenta el coeficiente de enfriamiento, por lo que se dice que guardan una relación inversamente proporcional (dentro de los límites de concentración propuestos). Esto se debe a que las partículas de hielo maximizan la transferencia de calor y una menor concentración permite además mayor superficie de contacto, es un comportamiento esperado si se observa en la figura 13 que el agua proporciona datos de coeficiente de enfriamiento mayores a los del hielo sólido. Con respecto al pepino se obtuvo la misma tendencia en cuestión del hielo fluido, sin embargo se obtuvo un mayor coeficiente de enfriamiento con el agua, este comportamiento se debe a que la temperatura final del pepino (temperatura de almacenamiento) (ver marco teórico) es mayor que la de la manzana, por lo que se observa que la técnica de preenfriamiento con hielo fluido proporciona datos de coeficientes de enfriamiento más altos cuando se trata de productos en los cuáles la magnitud de la reducción de temperatura es alta.

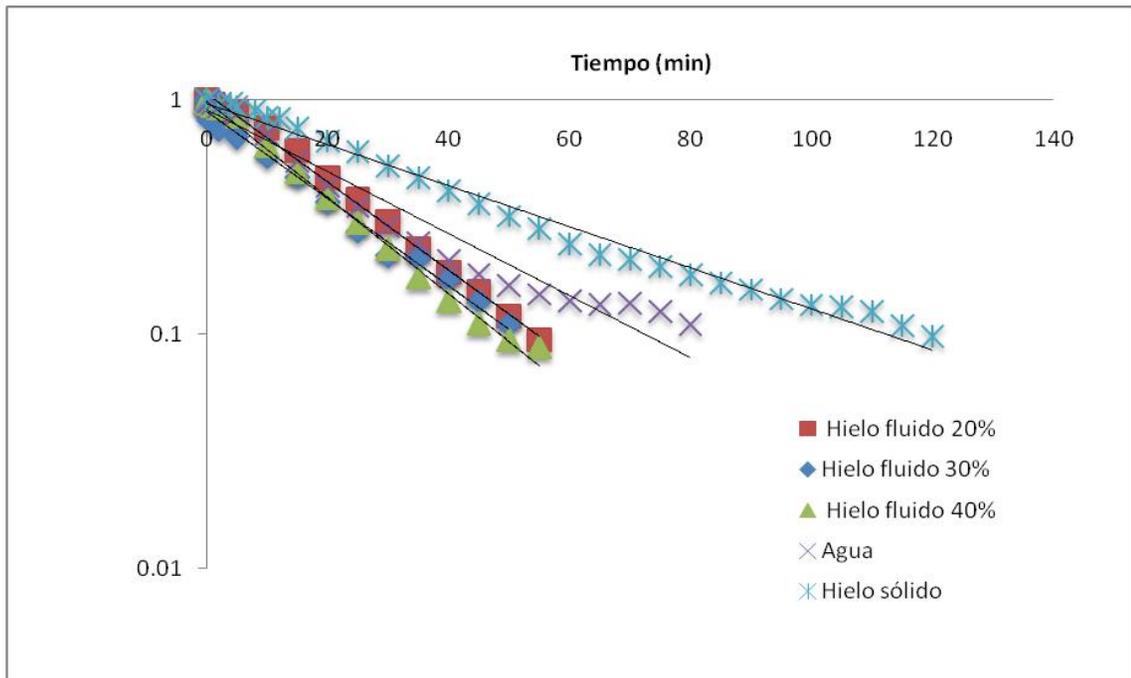


Figura 11. Gráfica semilogarítmica de la razón de temperatura contra tiempo del enfriamiento de manzana ($T_m=0^\circ\text{C}$)

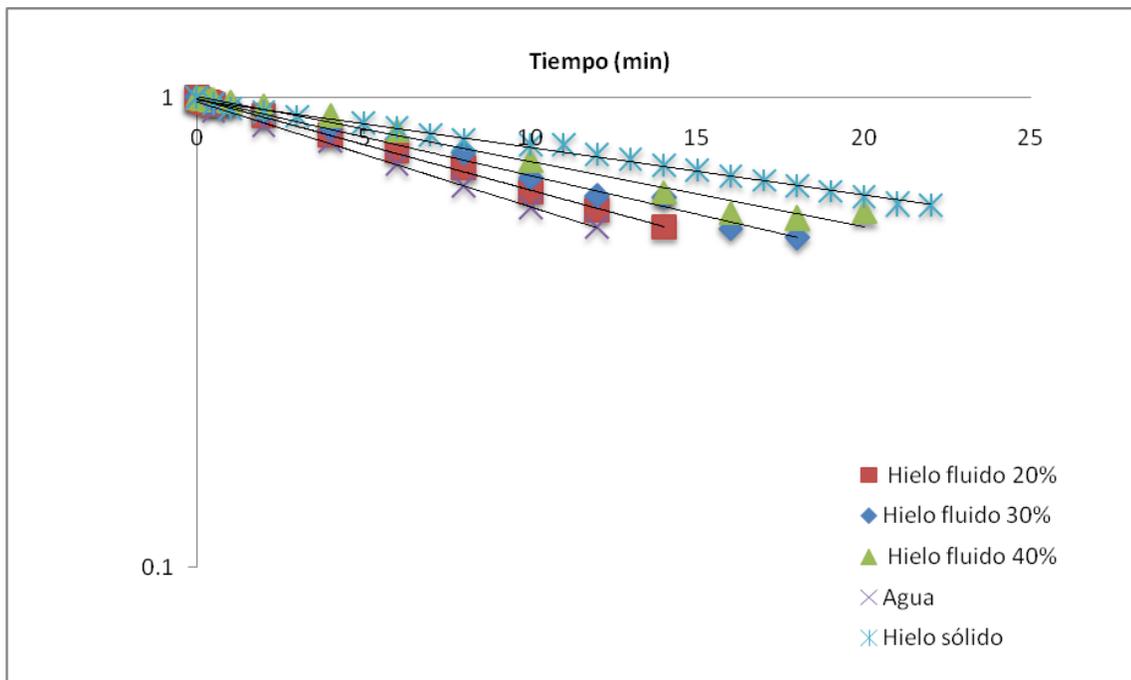


Figura 12. Gráfica semilogarítmica de la razón de temperatura contra tiempo del enfriamiento de pepino ($T_m=0^\circ\text{C}$)

El tiempo medio de enfriamiento es directamente proporcional a la concentración de hielo fluido, lo cual quiere decir que una concentración menor proporciona menores tiempos de preenfriamiento (permitiendo ahorro energético) este comportamiento se puede explicar debido a que el calor latente que ceden las partículas de hielo a la concentración más baja no genera la fusión del 100% del hielo lo cual es el resultado de que esta concentración proporciona un excedente de partículas de hielo sólido que en el diferencial de temperatura estudiado no se requiere, es decir, que todo el calor que el sistema absorbe del alimento es calor latente, de tal manera que la temperatura del medio de enfriamiento permanece constante, sin embargo, existe una reducción en la fracción másica de hielo sólido, este fenómeno fue explicado por Joseph Black quien definió que el calor latente de fusión del hielo es la cantidad de calor necesaria para pasar la unidad de masa de hielo del estado sólido al líquido a la temperatura de fusión del mismo. Si la presión bajo la cual se produce el cambio de fase se mantiene constante e igual a 1 atmósfera, la temperatura de fusión también se mantiene constante y es igual a 0°C.

Debido a que la investigación se realizó únicamente en tres concentraciones de hielo fluido el realizar una extrapolación hacia otras concentraciones resulta con un margen de error grande, además, se asume que un sistema bifásico presenta diferentes propiedades que uno monofásico, por lo que resulta un error el extrapolar la concentración de hielo hasta un 100% o por el contrario, hasta un 0%. Con respecto a la concentración más alta de hielo fluido evaluada en esta investigación (40%) genera una limitación en la cobertura del alimento (área de contacto), por lo que la superficie de transferencia de calor es menor, lo que reduce significativamente la eficacia del sistema.

En la figura 14 se observa que Z es mayor en el enfriamiento de manzana y pepino con hielo sólido, esto se debe a que la superficie de transferencia de calor cubierta por el medio de enfriamiento es menor y en el caso de la manzana, el hielo fluido ofrece los tiempos más reducidos, sin embargo, durante el enfriamiento del pepino el menor tiempo es para el enfriamiento con agua debido a que la velocidad inicial con este medio es mayor que con hielo fluido, así que como la temperatura final de almacenamiento del pepino es de 10 °C, el agua es una buena opción debido a que el diferencial de temperatura entre el medio de

enfriamiento y la temperatura final del alimento enfriado es mayor, esto se puede explicar gracias a que todo el calor que el alimento cede al sistema es calor sensible dado que térmicamente no es necesario el calor latente que el hielo aporta en el sistema por lo que el tiempo de enfriamiento resulta ser menor para enfriamiento con agua (para elevados diferenciales de temperaturas entre el medio y el centro térmico final del alimento), sin embargo, para el enfriamiento de productos en los que la temperatura final es menor, el hielo fluido presenta los mayores coeficientes de enfriamiento, esto se puede observar en la figura 13. El factor lag puede ser asumido como el factor de retraso; además la presencia de este factor en el enfriamiento comercial de frutas y hortalizas corrige el hecho de que la temperatura del medio de enfriamiento no sea constante y que varíe exponencialmente con el tiempo. En las tablas 15 y 16 se observa que el factor de retraso obtenido de la ordenada al origen de las ecuaciones correspondientes a las graficas de las figuras 11 y 12 (las ecuaciones obtenidas de ambas figuras son de la forma de la ecuación 1.24) es ligeramente mayor para el enfriamiento con hielo fluido; sin embargo, se aproxima a uno, esto es, que la relación es básicamente exponencial, por lo que se asume que el enfriamiento sigue un comportamiento de la ley de Newton.

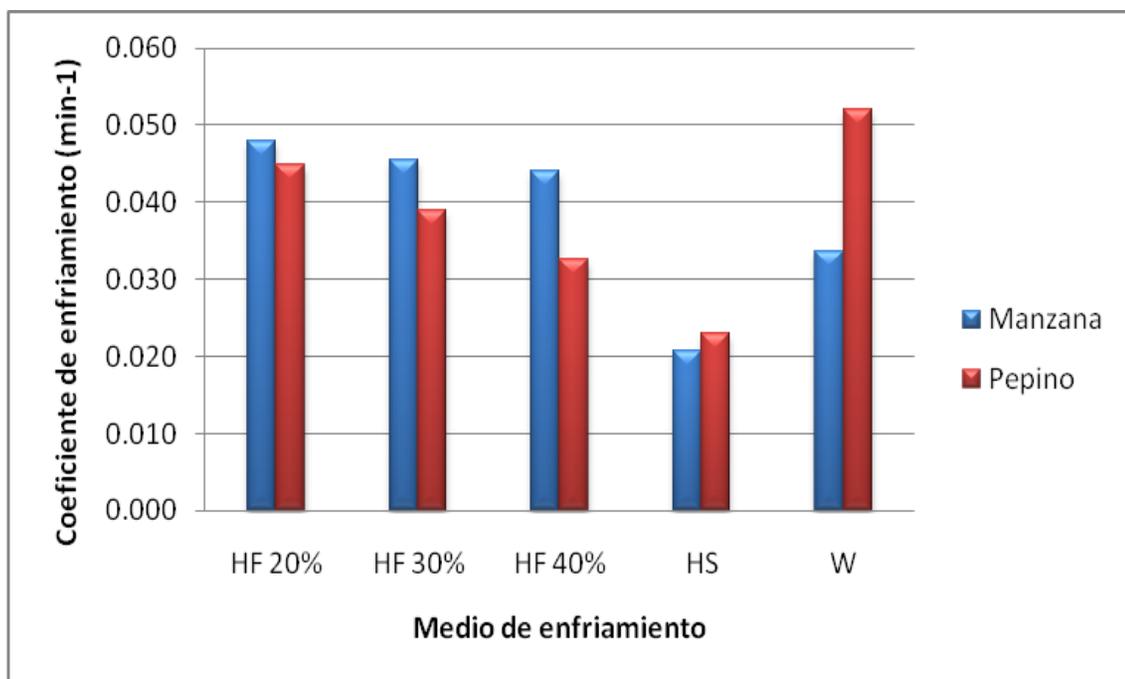


Figura 13. Comparación del coeficiente de enfriamiento de pepino y manzana con diferentes técnicas húmedas.

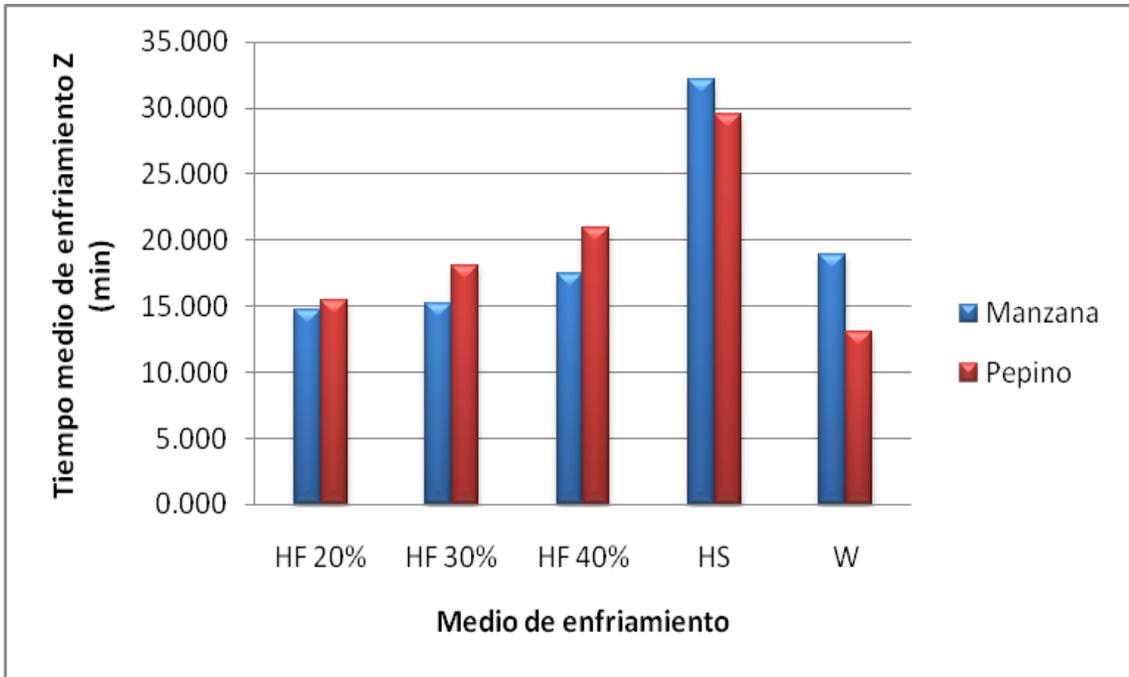


Figura 14. Tiempo medio de enfriamiento con los diferentes medios

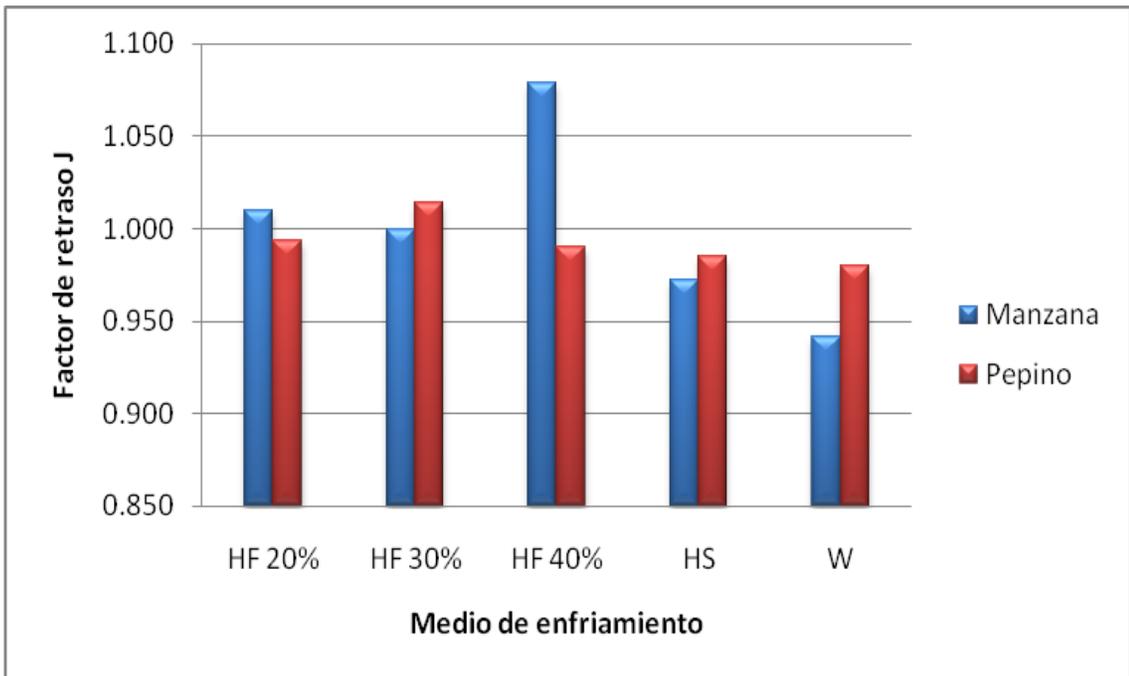


Figura 15. Factor de retraso del preenfriamiento con diferentes medios

En las tablas 15 y 16 se resumen los valores del coeficiente de enfriamiento, así como los parámetros correspondientes al factor de retraso (j) y el tiempo medio de enfriamiento (Z) (ver apéndice 4).

Tabla 15. Parámetros asociados con el coeficiente de enfriamiento de la manzana

Medio de enfriamiento	Manzana			
	CR	j	Z	R^2 *
HF 20%	0,0479	1,00	14,67	0,99
HF 30%	0,0455	0,99	15,19	0,99
HF 40%	0,0440	1,07	17,46	0,99
HS	0,0207	0,97	32,14	0,98
W	0,0337	0,94	18,93	0,96

* R^2 es el coeficiente de correlación

Tabla 16. Parámetros asociados con el coeficiente de enfriamiento del pepino

Medio de enfriamiento	Pepino			
	CR	j	Z	R2
HF 20%	0,0448	0,99	15,41	0,99
HF 30%	0,0390	1,01	18,10	0,98
HF 40%	0,0326	0,99	20,95	0,99
HS	0,0229	0,98	29,55	0,99
W	0,0521	0,98	12,98	0,99

* R^2 es el coeficiente de correlación

Los valores de coeficiente de enfriamiento más altos, son los obtenidos con hielo fluido, lo que representa un dato muy importante para esta investigación y una ventaja a nivel industrial, debido a que el coeficiente expresa la velocidad de enfriamiento, es decir, que únicamente esta en función de un diferencial de temperatura con respecto del tiempo, lo que hace que algunos autores prefieran considerarlo como tal. El enfriamiento con hielo fluido es una técnica que permite aumentar la velocidad y reducir tiempos de operación como se observa en los valores de tiempo medio de enfriamiento (Z) en las tablas 15 y 16. Con respecto al comportamiento de Z en función de la concentración de hielo fluido, la relación es directamente proporcional, aunque se desconoce el comportamiento de este

parámetro extrapolado a otras concentraciones debido a que al hacer esta afirmación implicaría que a una concentración de cero el tiempo medio de enfriamiento fuera menor, sin embargo, en los resultados se observa que no es así puesto que el valor obtenido durante el enfriamiento con agua es mayor al obtenido con una concentración de 20%. Con respecto al factor de retraso se observa que es ligeramente mayor durante el enfriamiento con hielo fluido, sin embargo, ningún valor se aleja significativamente de uno, por lo que se asume que el enfriamiento sigue el comportamiento de la ecuación 1.25.

3.3. Resultados y análisis de datos del estudio de la eficiencia térmica del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas

En la figura 16 se observa la eficiencia térmica obtenida con los diferentes medios de enfriamiento, se aprecia que el hielo fluido aumenta su eficiencia al aumentar su concentración, esto es debido a que a una mayor concentración hay más partículas de hielo que ceden su calor latente durante el enfriamiento al alimento, es decir, el calor de fusión de las partículas sólidas aumentan en gran medida la capacidad energética del fluido (Sánchez, 2003).

De acuerdo a estos resultados se observa que la relación entre la concentración de hielo fluido y la eficiencia térmica es directamente proporcional. Con respecto a la eficiencia más baja se da en el enfriamiento de alimentos con agua, esto se debe a que se necesitan grandes volúmenes de agua para enfriar el alimento de una temperatura inicial a una final, ésta es la masa de agua necesaria para retirar el calor sensible al alimento. El enfriamiento con hielo sólido proporciona una eficiencia térmica baja debido a que este medio presenta deficiencias en la cobertura del área de contacto, es decir, que el área de transferencia de calor no es completa. La tabla 17 muestra el promedio de las tres repeticiones de los resultados de la eficiencia térmica de los diferentes medios de enfriamiento (ver apéndice 5), los cuales se obtuvieron a partir de las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

Tabla 17. Eficiencia térmica del enfriamiento de manzana y pepino

Eficiencia térmica %				
Medio de enfriamiento	Pepino	CV	Manzana	CV
HF 20%	79,39	0,0056	90,48	0,0131
HF 30%	86,76	0,0114	90,83	0,0204
HF 40%	88,46	0,0183	97,16	0,0360
HS	66.94	0,0829	84,79	0,0143
W	51.67	0,0428	82,51	0,0405

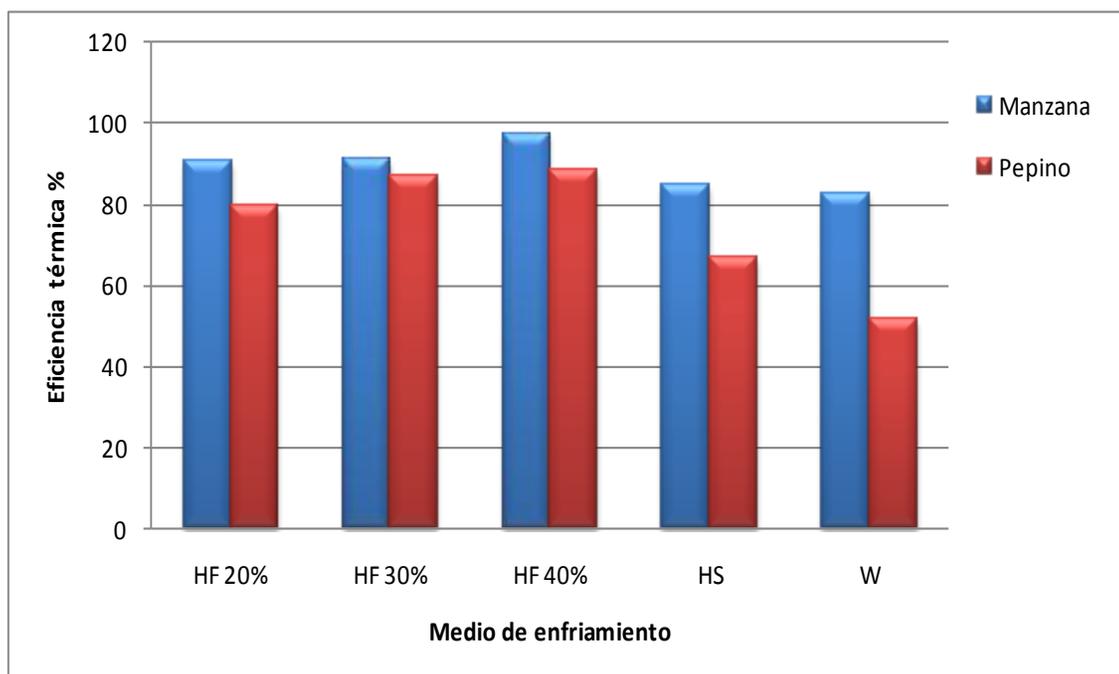


Figura 16. Eficiencia térmica del enfriamiento de manzana y pepino

El obtener una mayor eficiencia térmica con hielo fluido es una aportación importante de la investigación debido a que a nivel industrial la finalidad principal es la reducción de gasto energético debido a que implica ahorros económicos a su vez. Con respecto a la concentración de hielo fluido se observa una relación directamente proporcional con la eficiencia térmica, esto indica que a mayor concentración hay mayor cantidad de partículas de hielo que ceden su calor latente.

3.4. Resultados y análisis de datos del estudio de la relación entre la eficiencia térmica y el coeficiente de enfriamiento de alimentos con técnicas húmedas

En las figuras 17 y 18 se observa que los resultados más altos tanto de eficiencia térmica como de coeficiente de enfriamiento se obtienen a partir de las diferentes concentraciones de hielo fluido, por lo que se confirman las ventajas del hielo fluido con respecto a los otros dos medios. En la figura 18 se aprecia un valor alto de coeficiente durante el enfriamiento de pepino con agua, esto se debe a que la temperatura final de enfriamiento del pepino es de 10°C (temperatura de almacenamiento) y el agua es un medio de enfriamiento capaz de proporcionar menores coeficientes de enfriamiento cuando el diferencial de temperatura final entre el medio y el alimento es alto, debido a que esta es capaz de retirar el calor rápidamente; sin embargo, la eficiencia térmica que proporciona este medio es muy baja, esto se debe a que se necesitan grandes volúmenes de agua para llevar de una temperatura inicial a una final un alimento, esto se debe a que todo el calor que se transfiere es sensible, por lo que la temperatura del medio cambia rápidamente; a diferencia de un sistema bifásico como lo es el hielo fluido, que antes de cambiar de temperatura cede todo su calor latente, lo que permite mantener por tiempos más largos una temperatura constante.

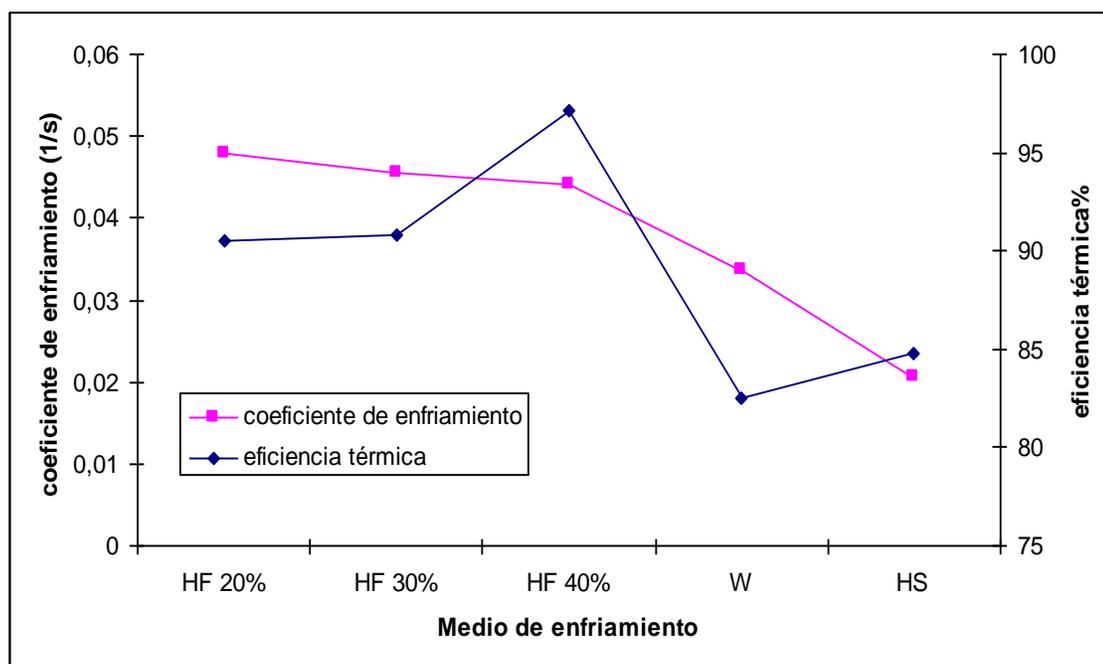


Figura 17. Comparación de eficiencia térmica y coeficiente de enfriamiento de manzana.

Mediante las figuras 17 y 18 se observa sin embargo, que tanto la eficiencia térmica como el coeficiente de enfriamiento son considerablemente mayores que los obtenidos durante el preenfriamiento de los productos con hielo sólido y agua. En ambas figuras se observa que la relación de la eficiencia térmica con la velocidad de enfriamiento (a diferentes concentraciones de hielo fluido) es inversamente proporcional, por lo que se sugiere realizar un análisis económico principalmente en un punto de equilibrio tanto de coeficiente de enfriamiento como de eficiencia térmica, así que mediante este análisis se podría conocer la concentración más adecuada para eficientizar el preenfriamiento de frutas y hortalizas.

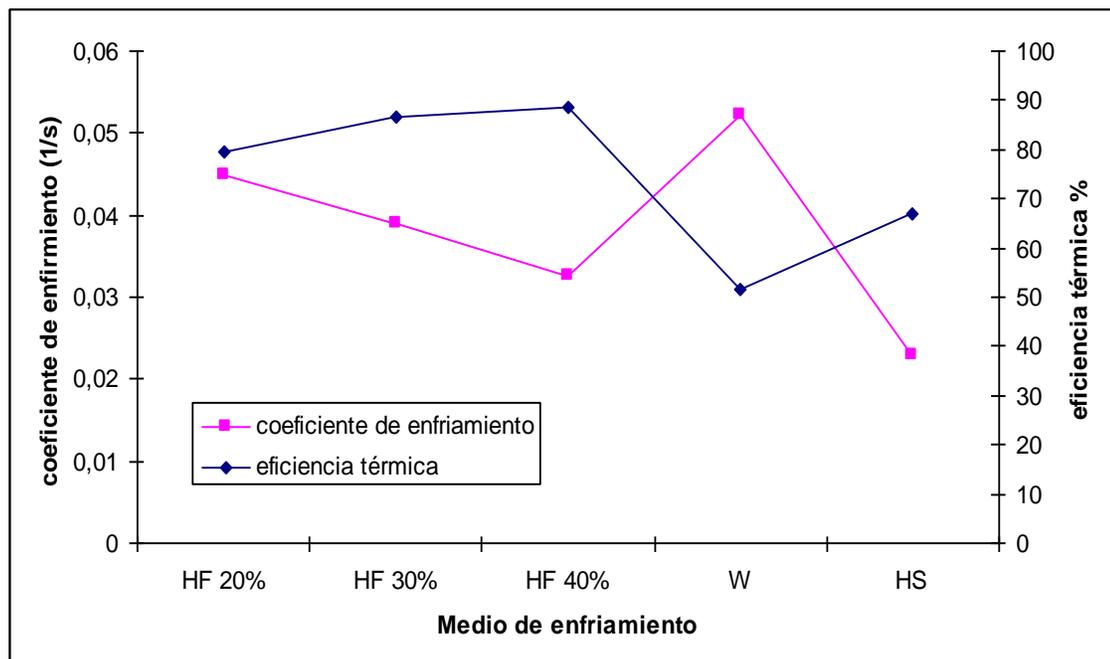


Figura 18. Comparación de eficiencia térmica y coeficiente de enfriamiento de pepino

CONCLUSIONES

En esta investigación se obtienen los valores correspondientes a la eficiencia térmica y el coeficiente de enfriamiento de frutas y hortalizas mediante técnicas húmedas (agua, hielo sólido y hielo fluido) con lo cual se obtuvo que el hielo fluido presenta ventajas sobre los otros dos métodos, resultando una nueva alternativa de preenfriamiento de alimentos. La combinación de sus propiedades térmicas, el uso de cambio de fase para transferir calor (y bajar la temperatura del alimento) y la completa cobertura del área de contacto hace a las suspensiones de hielo fluido un sistema atractivo de transferencia de calor.

Los datos proporcionados por este estudio demuestran que se obtiene un mayor coeficiente de enfriamiento con hielo fluido debido a su capacidad de transferir calor que genera la combinación de calor sensible y latente capaces de retirar el calor del alimento. Con respecto al enfriamiento con agua se obtuvo que para alimentos con una temperatura final alta (8°C) proporciona mayores coeficientes de enfriamiento; sin embargo, cuando el tiempo de enfriamiento es mayor, es decir, cuando la temperatura final del alimento es menor (1°C), el hielo fluido es una mejor opción ya que proporciona mayores coeficientes de enfriamiento. Con respecto a las concentraciones de hielo fluido, los resultados indican que el coeficiente de enfriamiento más alto se obtiene durante el enfriamiento con la menor concentración, es decir, que es inversamente proporcional, esto se debe a que las concentraciones estudiadas son altas y a mayor concentración el sistema tiende a adquirir las propiedades térmicas del hielo sólido. Sin embargo, la eficiencia térmica por el contrario presentó una relación directamente proporcional con las concentraciones de hielo en el fluido bifásico, esto sucede debido a la capacidad del hielo de transferencia de calor latente, por lo que cuando el sistema aumenta la concentración de hielo, el calor latente cedido al alimento es mayor, es decir, que las partículas maximizan su capacidad de transferencia de calor. De acuerdo a los resultados obtenidos, la concentración más alta de hielo fluido genera un mejor aprovechamiento energético, por lo que la eficiencia térmica es más alta con respecto a los medios de enfriamiento con que se comparo.

Por las observaciones anteriores se acepta la hipótesis la cual afirma que: el coeficiente de enfriamiento y la eficiencia térmica serán mayores con el hielo fluido; sin embargo, es necesario encontrar un punto de equilibrio entre la eficiencia térmica y la velocidad de enfriamiento en el cual se explote al máximo la capacidad de enfriamiento del hielo fluido. Se esperan nuevas investigaciones en el uso de hielo fluido como un sistema de transferencia de calor para que surja como una nueva alternativa de preenfriamiento de alimentos en un futuro cercano.

BIBLIOGRAFÍA

Adel, A. K., 2005, Pepino dulce: recomendaciones para mantener la calidad postcosecha, Postharvest Technology Research and Information Center, Chile.

Apaci, V., 1966, Conduction Heat Transfer, Adisson-Wesley Publising Co., USA.

Becker, B. R., Frick, B. A., 1996, Preenfriado de frutas y vegetales, Frío y Calor, 86, 117-122.

Bel O, L. A., 1996, Contribution à l'étude du comportement thermohydraulique d'un mélange diphasique : le coulis de glace. Etude théorique et expérimentale. PhD theses, INSA Lyon, ISAL 0000.

Ben L. M., Lallemand A., 1998, Comportement thermohydraulique d'un fluide frigoporteur diphasique : le coulis de glace. Etude theóorique et expérimentale. PhD theses, INSA Lyon, ISAL 0092.

Becker, B. R., 2002, Hydrocooling time estimation methods, Int. Comm. Heat Mass Trasnsfer, 29 (2), 165-174.

Belitz, H. D., 1988, Química de los alimentos, Acribia, España.

Belitz, H. D., 1997, Química de los alimentos, 2da ed., Acribia, España.

Bellas, I. C., Tassou, S. A., 2002, Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers, Appl. Therm. Eng., 22 (7), 721-732.

Calderon, E. A., 1993, Fruticultura general, España.

Carslow, H. S., Jaeger, J. C., 1959, Conduction of heat in solids. Oxford University Press, USA.

Christensen, K. G., 1997, Heat transfer measurements with ice slurry, Conferencia Internacional, Heat Transfer Issues in natural Refrigerants, IIR/IIF, College Park, USA, 127-141.

Chapman, A. J., 1960, Heat Transfer, The MacMillan Company, USA.

Davies, T. W., 2005, Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains, International Journal of Refrigeration, 28 (1), 1-7.

Denison, E. L., 1987, Cultivo de hortalizas, plantas y flores, Orientación Grupo Noriega Editores, 354-378.

Doetsch C., 2001, Pressure drop and flow pattern of ice slurries, third workshop on ice slurries of the IIR, Switzerland, 4-53.

Durán, T. S., 1998, Frigoconservación de la fruta, Aedos, España.

Egolf, P. W., Brühlmeier, J., Özzvgyi, F., Abächerli, F., 1996, Properties of ice slurry, proc., 2nd Conference on the use of Non artificial Substances. Aarhus. DK. Session 12, 517-526.

Ensiminger, A., 1994, Food and nutrition enciclopedia, 2da. ed., Vol. 1, CRC Press, USA.

Fikiin, O. K., Tsvetkov, Y. L., 2001 Thermophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slurries based on sugar–ethanol aqueous solutions, Third Workshop of the International Institute of Refrigeration on Ice Slurries, Lucerne; 147–156.

Galvez, V. C., 2001, El quitosan como agente de inhibición micotica en patógenos de pepino, México, licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gaurth, R., Wyse, S., 1992, Nutritional quality index of foods, AVI Publishing Company Westt Port, Conn Avi, 73-75.

Geankoplis, C. J., 1998, Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3ra ed., CECSA, Continental S.A. de C. V., México.

Groeber, H., Erk, U. G., 1961, Fundamentals of heat transfer, McGraw-Hill Book Company, Inc., USA.

Gurney, H. P., Lurie, J., 1923, Charts for estimating temperature distributions in heating or cooling of solids shapes, Industrial Engineering Chemical, 15 (11), 1170-1172.

Heisler, M. P., 1947, Temperature charts for induction and constant temperature heating, ASME, 64 (4), 227-236.

Huidobro, A., López – Caballero, M., Mendes, R., 2002, Onboard processing of deepwaterpink shrimp (*Parapenaeus longirostris*) with liquid ice: Effect on quality. European Food Research and Technology, 214(6), 469–475.

Incropera, F. P., De Witt, D. P., 1990, Introducción a la de Transferencia de calor, 2ª ed., Wiley, USA.

Ionescu, C., Philippe, H., Ildiko, K., Lallemand, A., 2007, Local and global heat transfer coefficients of stabilized ice slurry in laminar and transitional flows, International Journal of Refrigeration, 30, 970-977.

Kader, A. A., 1992, Manejo postcosecha de plátano, mango, papaya y piña, Memoria del Simposio sobre Fisiología y Tecnología Postcosecha, Hermosillo Sonora.

Knodel, D. M., Choi, M. W., 2000, Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries, *Appl. Thermal Engineering*, 20 (7), 671–685.

Krack, 1992, Refrigeration load estimating manual, USA.

Kumano H., Tatsunori A., Akio S., Seiji O., 2007, Study on latent heat of fusion of ice in aqueous solutions, *International Journal of Refrigeration*, 30, 267-273.

Lewis, M. J., 1993, Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado, Acribia, S.A., España.

Liu, F. W., 1992, Preenfriado de productos hortícolas, Memoria del Simposio sobre Fisiología y Tecnología Postcosecha, México.

Loyd R. A., Pentzer W. T., 1982, Handling transportation and storage of fruits and vegetables, Vol. 1, AVI Publishing, USA.

Mohsenin, N. N., 1980, Thermal proprieties of foods and agricultural materials, Gordon and Breach Science publishers, USA.

Ordoñez I., 1996, Determinación y evaluación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en procesos continuos de escaldado e hidrogenfriado de productos vegetales, tesis Ing. Alim., Universidad Austral de Chile.

Pantastico, E. R., 1979, Fisiología de postrecolección, manejo y utilización de frutas y hortalizas tropicales y subtropicales, Continental, México.

Paul, J., 1998, La glace biphase: Une autre technique de réfrigération, Rev. Gén. Froid, 12-17.

Piñeiro, C., Barros V. J., Aubourg P. S., 2004, Effects of newer slurry ice systems on quality of aquatic food products: a comparative review versus flake-ice chilling methods, Food Science and Technology, 15, 575-582.

Richard, E. S., Van Wylen, G. J., 1999, Introducción a la termodinámica clásica y estadística, Limusa Noriega, México.

Rodriguez, O., 2003, Effect of chilled storage in flow ice on the microbiological quality and shelf life of farmed turbot (*Psetta maxima*), In Proceedings of the first joint trans-Atlantic fisheries technology conference, Reykjavik, Iceland, 73-74.

Rohsenow, W. M., H. Choi, 1961, Heat mass and momentum transfer, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, USA.

Salunkhe, D. K., 1991, Storage, processing and nutritional quality of fruits and vegetables, Vol. 1, CRC Press, USA.

Sánchez, R. I., Torres, G. M., Requena, A., Vanaclocha, C., 2003, Mejora de la transmisión de calor por utilización de hielo líquido, 2do Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, España.

Saucedo, V. C., 1981, Preenfriamiento de frutas y hortalizas: métodos y recomendaciones, UACH, Departamento de industrias agrícolas.

Shack, A., 1933, Industrial Heat Transfer, John Wiley and Sons, USA.

Shewfelt, R. L., Stanley, E. P., 1992, Post harvest handling a system approach, Academic Press Inc, USA.

Stewart, W. E. Jr., Stickler, L. A., 1995, Modelling the melting behaviour of ice crystal slurries for district cooling, *Refrigeration Air Conditioned*, Vol. 11, 39-47.

Warren, M. R., Thomas, C. O., 1993, *Principios de la refrigeración*, 2da ed., Diana, México.

Welty, J. R., 1978, *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*, Limusa, México.

Wills, R. H., 1987, *Fisiología y manipulación de frutas y hortalizas postrecolección*, Acibia, España.

Williamson, E. D., Adams, L. H., 1991, Temperature distribution in solids during heating or cooling, *Phys. Rev.*, 14(2), 99-114.

APÉNDICES

Apéndice 1. Validación de termopares

Resultados y Análisis estadísticos

Después de realizar las pruebas experimentales de validación de termopares, correspondientes a exactitud y precisión, linealidad y repetibilidad. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Precisión

Tabla Ap-1. Resultados estadísticos de la prueba de precisión

Termopar	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5
Media	93,0466	93,0033	92,9633	92,8333	92,67
Desv. Est.	0,0996	0,0637	0,0597	0,0471	0,0483
C V (%)	0,10	0,06	0,06	0,05	0,05
Orden	1	2	3	5	4

El coeficiente de variación proporciona una medida de variabilidad que es independiente de la unidad de medida, por ello puede usarse para comparar la variabilidad de varios grupos de datos expresados en distintas unidades de medida. En otras palabras expresa la desviación estándar como porcentaje de medida. Por lo tanto se le dio el mayor orden al termopar con el menor coeficiente de variación (termopar 4).

- Linealidad

Tabla Ap-2. Resultados de la prueba de linealidad

Termopar	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5
Pendiente	4,8697	4,8671	4,8713	4,8691	4,8727
r²	0,9957	0,9955	0,9957	0,9958	0,996
r	0,9978	0,9977	0,9978	0,9979	0,9980
Orden	3	1	2	4	5

El coeficiente de correlación r^2 indica qué tanto se aleja los valores de la tendencia por lo que el mayor orden se le dio al termopar que tuvo mayor coeficiente de correlación.

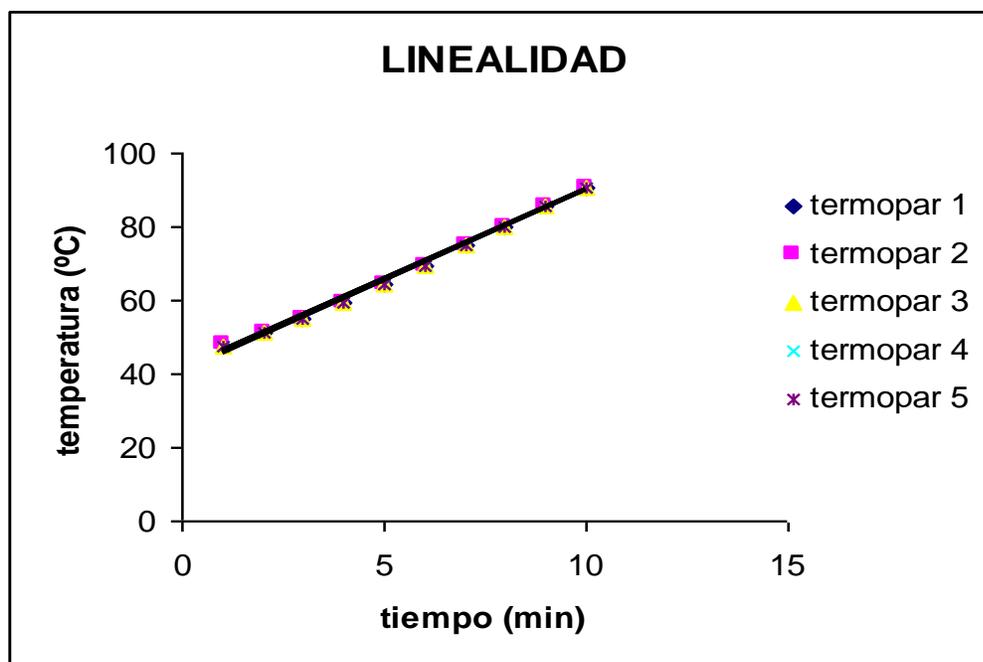


Figura Ap-1. Gráfica de los datos obtenidos en las pruebas de linealidad.

- Exactitud

Mediante una prueba de hipótesis se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla Ap-3. Resultados estadísticos en la prueba de exactitud

Termopar	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5
t_p	4,5494	4,9618	3,1764	4,6957	15,2752
t_p tablas	1,833				
orden	4	2	5	3	1

Para calcular la t_p (valor estadístico de prueba) se utilizó la siguiente fórmula:

$$t_p = \frac{\bar{x} - \bar{\mu}_x}{\bar{S}/\sqrt{n}}$$

Donde: x = media de la muestra o aritmética
 μ = media de la distribución muestra de x (92.9033°C)
 S = desviación estándar
 n = número de observaciones de un tratamiento.

$$t_{(\alpha, n-1)} = t_{(0.05, 10-1)} = 1.833 \quad (\text{tablas})$$

El orden se da de acuerdo a qué tanto se aleja el valor del intervalo de confianza (obtenido de tablas), es decir entre mas se aleje menor orden.

- Repetibilidad

Los resultados obtenidos en esta prueba se les aplico un análisis de varianza.

Tabla Ap-4. Análisis de varianza: medidas de tendencia central

<i>Termopares</i>	<i>Lecturas</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Canal 1	10,00	930,46	93,04	0,0099
Canal 2	10,00	930,03	93,00	0,0041
Canal 3	10,00	929,63	92,96	0,0036
Canal 4	10,00	928,33	92,83	0,0022
Canal 5	10,00	926,70	92,67	0,0023

Tabla Ap-5. Análisis de varianza para la prueba de repetibilidad.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,9349	4,0000	0,2337	52,8518	0,0000	2,5787
Dentro de los grupos	0,1990	45,0000	0,0044			
Total	1,1339	49,0000				

$$\text{Razón de varianza} = 52.8518 \geq F_{(5\%, 5-1, 50-5)}$$

Tabla Ap-6. Resultados estadísticos de la prueba de repetibilidad

Termopar	1	2	3	4	5
Desv. Est.	0,2285	0,1847	0,1650	16,2882	0,1512
Promedio	93,0467	93,0033	92,9633	92,8333	92,6700
C. V (%)	0,0025	0,0020	0,0018	0,0016	0,0016
Fp	8,0599	10,1469	11,5835	13,9390	29,7391
Fp (tablas)	3,3541				
Orden	5	4	3	2	1

- Reproducibilidad

Dicha prueba tiene una gran importancia en todos los análisis estadísticos realizados a termopares, ya que los datos de las replicas obtenidos fueron analizados por el método de Tuckey, mediante el cual se realizo una comparación de medias de cada replica para conocer su diferencia mínima significativa y saber si las medias eran iguales entre si o diferentes y de esta forma conocer si las replicas de una misma prueba se podían representar por una media de los tres datos obtenidos, los resultados fueron los siguientes (de los 10 datos obtenidos de cada replica se calculó la media.):

Tabla Ap-7. Medias de datos de reproducibilidad de cada replica.

Termopar	1	2	3	4	5
X₁(Replica 1)	93,21	93,14	93,1	92,96	92,83
X₂(Replica 2)	93,08	93,02	92,96	92,84	92,65
X₃(Replica 3)	92,85	92,85	92,83	92,7	92,53

Posteriormente se realizó un análisis de varianza de un solo factor para cada termopar y sus replicas. De dichos análisis de varianza se obtuvieron datos de suma de cuadrados, grados de libertad y promedios de cuadrados y el valor de la F calculada; con los datos obtenidos se calculo el valor de diferencia mínima significativa honesta (DMSH) con la cual se comparó el valor de la media como se muestra en la tabla Ap-8.

Tabla Ap-8. Diferencia mínima significativa honesta para cada termopar.

Termopar	1	2	3	4	5
Prom. de cuadrados de los grupos (Sw2)	0,2343	0,2123	0,1823	0,1693	0,228
Sx	0,1530	0,1457	0,1350	0,1301	0,1509
DMSH	0,6161	0,5865	0,5434	0,5237	0,6077
q	4,025				

Donde: $Sx = \sqrt{\frac{Sw2}{r}}$ donde $r=15$

$$\underline{DMSH = q\alpha, t, g.l(Sx)}$$

Posteriormente se realizó las diferencias entre medias para cada termopar y se comparo con la DMSH también para cada termopar:

Tabla Ap-9. Análisis de medias y diferencia minina significativa honesta.

Termopar	1	2	3	4	5
X₁-X₂	0,13	0,12	0,14	0,12	0,18
X₁-X₃	0,36	0,29	0,27	0,26	0,3
X₂-X₃	0,23	0,17	0,13	0,14	0,12
DMSH	0,6161	0,5865	0,5434	0,5237	0,6077

Como se puede observar en la tabla anterior no hay diferencia entre las medias de los termopares, por lo cual se concluye que los datos de las tres replicas se pueden representar por una media. Por último considerando los resultados del análisis del método de Tuckey, se obtuvo las medias correspondientes y se realizó un análisis de varianza de un solo factor, de esta forma se realizó la asignación de orden.

Tabla Ap-10. Resultados de prueba de reproducibilidad.

Termopar	1	2	8	9	10
Fp	8,05987	10,14690	11,58353	13,93902	29,73913
Fp (tablas)	3,35413				
Orden	5	4	3	2	1

- **Elección del termopar patrón**

Tabla Ap-11. Sumatoria de atributos para la elección del termopar patrón

Termopar	1	2	3	4	5
Precisión	1	2	3	5	4
Exactitud	4	2	5	3	1
Linealidad	3	1	2	4	5
Repetibilidad	5	4	3	2	1
Reproducibilidad	5	4	3	2	1
Sumatoria de atributos	18	13	16	16	12

De acuerdo a la tabla anterior se observa que de acuerdo al análisis estadístico y a la suma de atributos el termopar patrón es el número 1. Después de seleccionar el termopar patrón, se continuó con otro análisis de linealidad, que permitió correlacionar de forma directa la respuesta del conjunto de termopares con respecto a la respuesta del termopar patrón con el objetivo de predecir el comportamiento de cada termopar. Por lo tanto los resultados obtenidos fueron los siguientes:

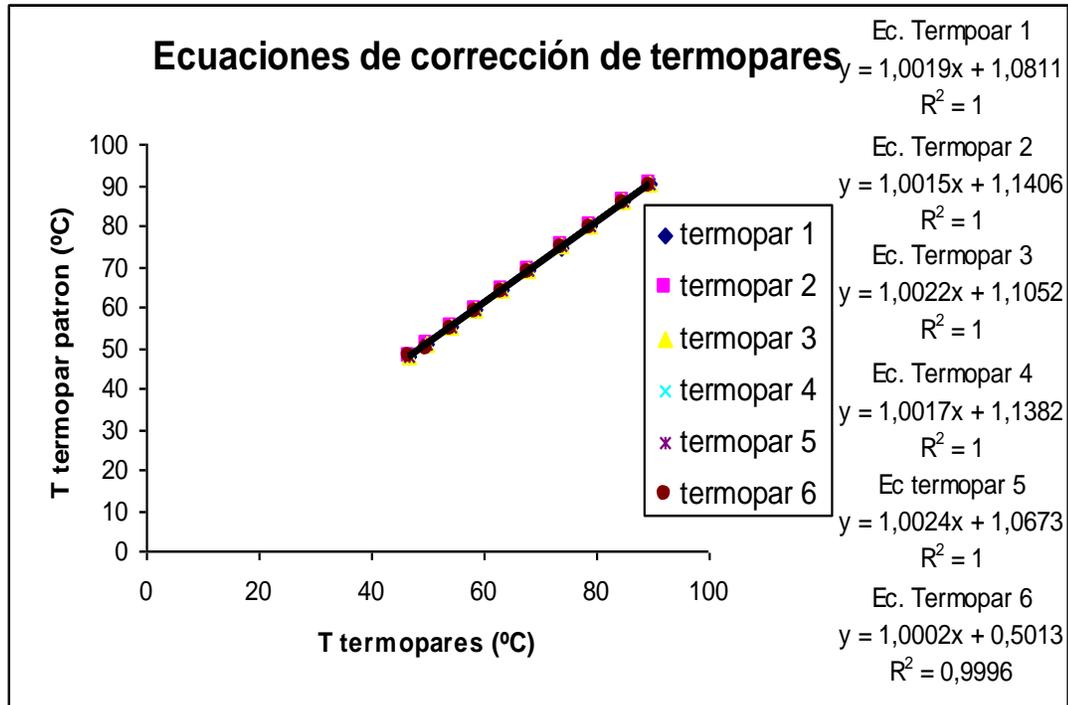


Figura Ap-2. Ecuaciones de corrección de los termopares

En la figura Ap-2 se muestra el siguiente paso para obtener las ecuaciones de corrección particulares para cada termopar.

La ecuación de corrección se obtiene de la siguiente manera:

$$T_c = T_p = mT_n - b$$

Donde: $T_c = T_p$ = corresponde a la temperatura referida al termopar patrón

m = Factor de proporcionalidad

T_n = temperatura n obtenida por otro termopar sin corregir

b = ordenada al origen de cada relación obtenida

Por último, la comprobación de las ecuaciones anteriores se realizó sustituyendo la temperatura tomada por los termopares en la prueba de repetibilidad, el resultado de temperaturas corregidas fue próximo a la temperatura de ebullición del agua en Cuautitlan

Izcalli campo I., 92.8°C. Al graficar la temperatura corregida del termopar en función del tiempo se espera obtener una línea paralela al eje x.

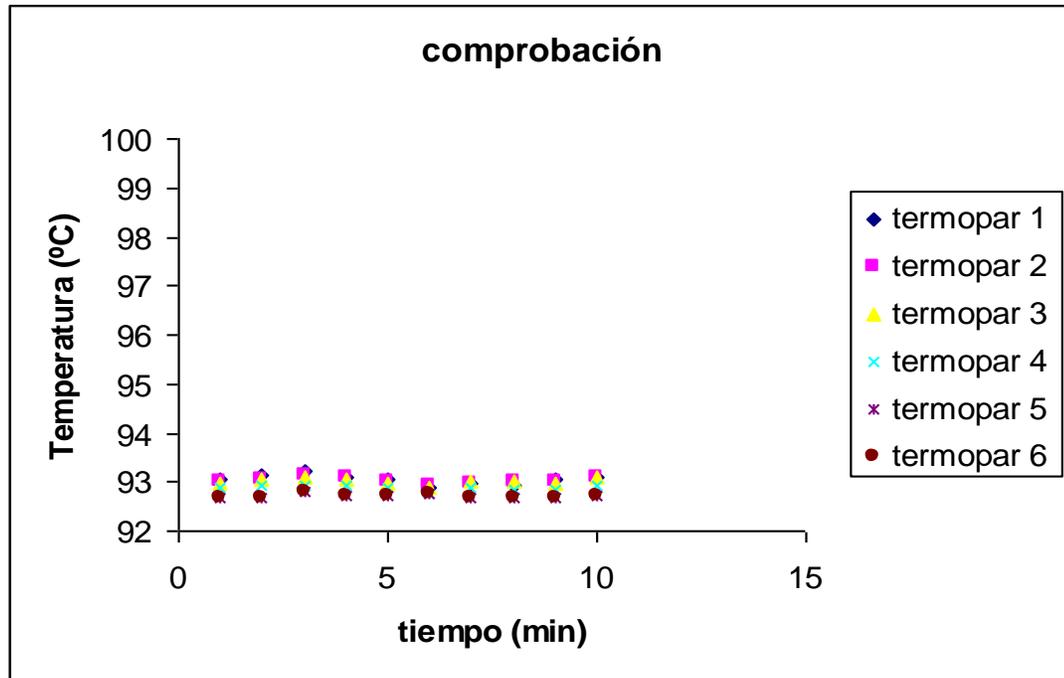


Figura Ap-3. Comprobación de ecuaciones de termopares a temperatura constante.

Apéndice 2. Solución de la ecuación de Fourier: Diferencias finitas

Coordenadas cilíndricas

$$\frac{T_{m+1,n} - T_{mn}}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \left(\frac{T_{m+1,n} - T_{mn}}{\Delta r} \right) + \left(\frac{T_{m-1,n} - 2T_{mn} + T_{m+1,n}}{\Delta r^2} \right) + \left(\frac{T_{m,n-1} - 2T_{mn} + T_{m,n+1}}{\Delta z^2} \right) \right]$$

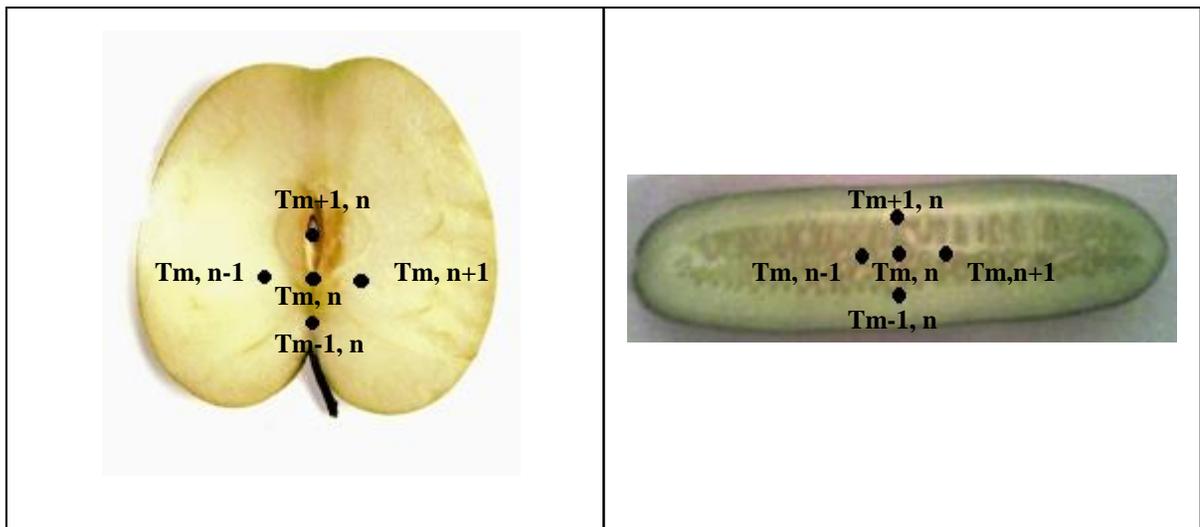
Coordenadas esféricas

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\alpha}{r^2} \left[2r \left(\frac{T_{m+1,n} - T_{mn}}{\Delta r} \right) + r^2 \left(\frac{T_{m+1,n} - 2T_{mn} + T_{m-1,n}}{\Delta r^2} \right) \right]$$

Donde:

$$a = \frac{1}{r} \left(\frac{T_{m+1,n} - T_{mn}}{\Delta r} \right) + \left(\frac{T_{m-1,n} - 2T_{mn} + T_{m+1,n}}{\Delta r^2} \right) + \left(\frac{T_{m,n-1} - 2T_{mn} + T_{m,n+1}}{\Delta z^2} \right)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n} - T_{mn}}{\Delta t}$$



a)

b)

Figura Ap-4. Ubicación de termopares durante el enfriamiento de manzana (a) y pepino (b).

NOTA. El comportamiento de flujo de calor en una manzana es diferente al de una esfera, debido a que en la manzana el flujo de calor varía en las dos direcciones axial y radial y la esfera solo varía en el eje radial (Figura Ap-4), por lo que para el cálculo de difusividad térmica mediante el método de diferencias finitas para este producto alimenticio se utilizó la ecuación Ap-2.1. Concluyendo que su comportamiento de flujo de calor es más similar al de un cilindro finito que al de una esfera. Con respecto al pepino de acuerdo al comportamiento de los flujos de calor estudiados en la investigación se ha tratado como un cilindro infinito.

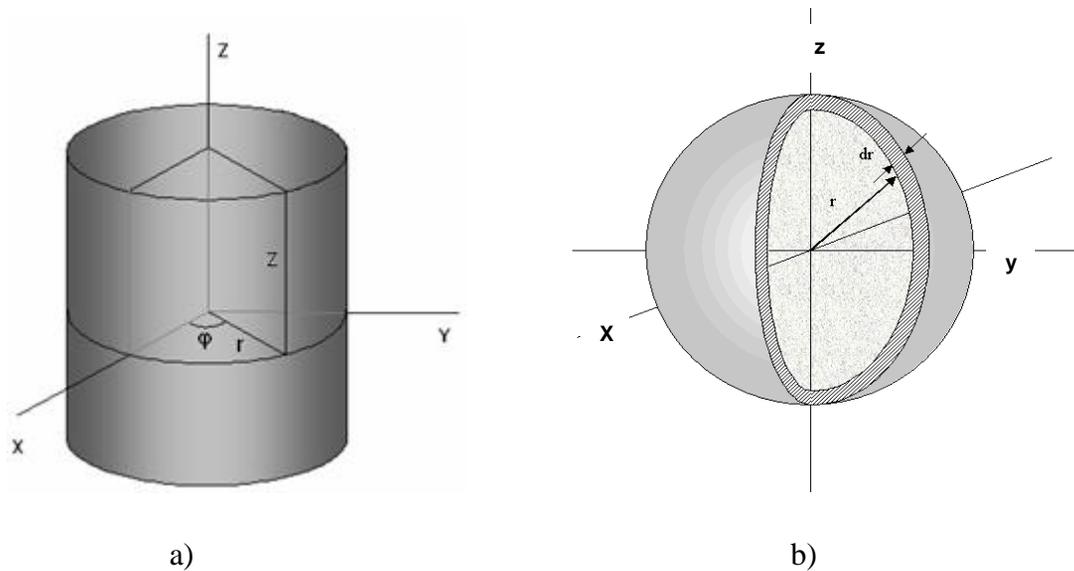


Figura Ap-5. Coordenadas cilíndricas (a) y esféricas (b)

Apéndice 3. Disminución del punto inicial de congelación debido a la presencia de CMC

Se calculó el punto inicial de congelación del hielo fluido a las diferentes concentraciones de CMC que se generaron a partir del uso de la misma solución de CMC al 0.1% para la preparación de las diferentes concentraciones de hielo fluido, es decir, a mayor concentración de hielo, la concentración de CMC resulta ser más baja, sin embargo mediante los siguientes resultados se observa que esta relación no es significativa. Estos resultados se obtienen mediante la ecuación de Heldman (ec. A-3 (1):

$$\Delta T_f = \frac{R_g T_{A0}^2 W_A m}{1000 \lambda} \quad \text{A-3 (1)}$$

$$m = \frac{\frac{g_{soluta}}{1000 g_{solvente}}}{PM_{soluta}} \quad \text{A-3 (2)}$$

$$\Delta T_f = T_{A0} - T_A \quad \text{A-3 (3)}$$

Donde:

R_g = La constante universal de los gases 0.462 J/mol K

T_{A0} = Punto inicial de congelación del agua pura 273.16 K

W_A = Peso Molecular del agua pura 18 g/mol

m = Molalidad mol/kg

λ = Calor latente de fusión del agua pura 333.22 J/g

ΔT_f = Decremento de temperatura de fusión

T_A = Punto inicial de congelación del Hielo fluido preparado con dispersión de CMC.

PM_{soluta} = PM CMC= 21 000 g/mol

Base de cálculo 1 g de Hielo fluido

Dado que la dispersión de CMC se preparo al 0.1 % y para preparar hielo fluido al 20% se ocupo el 80% de dispersión (el 20% restante es hielo molido formado a partir de agua

únicamente), de la misma forma que para preparar las concentraciones de 30 y 40% se utilizo 70 y 60% de dispersión respectivamente.

De esta forma se obtiene que las molalidades a las concentraciones de 20, 30 y 40% son:

$$m_{20\%} = \frac{0.80064}{21000} = 3.8125e - 5 \text{ mol / kg}$$

$$m_{30\%} = \frac{0.70049}{21000} = 3.3356e - 5 \text{ mol / kg}$$

$$m_{40\%} = \frac{0.59964}{21000} = 2.8554e - 5 \text{ mol / kg}$$

Introduciendo estos valores en la ecuación de Heldman, se obtiene que el PIC de las diferentes concentraciones de hielo fluido son:

$$\text{PIC}_{20\%} = 273.159929 \text{ K} = -7.99\text{E-}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{PIC}_{30\%} = 273.159937 \text{ K} = -6.21 \text{ E -}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{PIC}_{40\%} = 273.159946 \text{ K} = -5.31 \text{ E -}5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como se puede observar en los resultados anteriores el punto inicial de congelación se aproxima mucho a 0°C, por lo que se considera insignificante la disminución de este, esto es debido a que la concentración de CMC fue muy baja (0.08%, 0.07% y 0.06% para las concentraciones de hielo fluido de 20, 30 y 40% respectivamente).

Apéndice 4 Coeficiente de enfriamiento

Apéndice 4.1 Coeficiente de enfriamiento de manzana

Tabla Ap-12. Coeficiente de enfriamiento de la manzana con hielo fluido 20%

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0456	0,0502	0,048	0,0023	0,0479	4,80
Factor lag (j)	1,004	1,011	10,132	0,0048	10,094	0,47
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	152,881	140,256	147,137	0,6321	146,75	0.0004

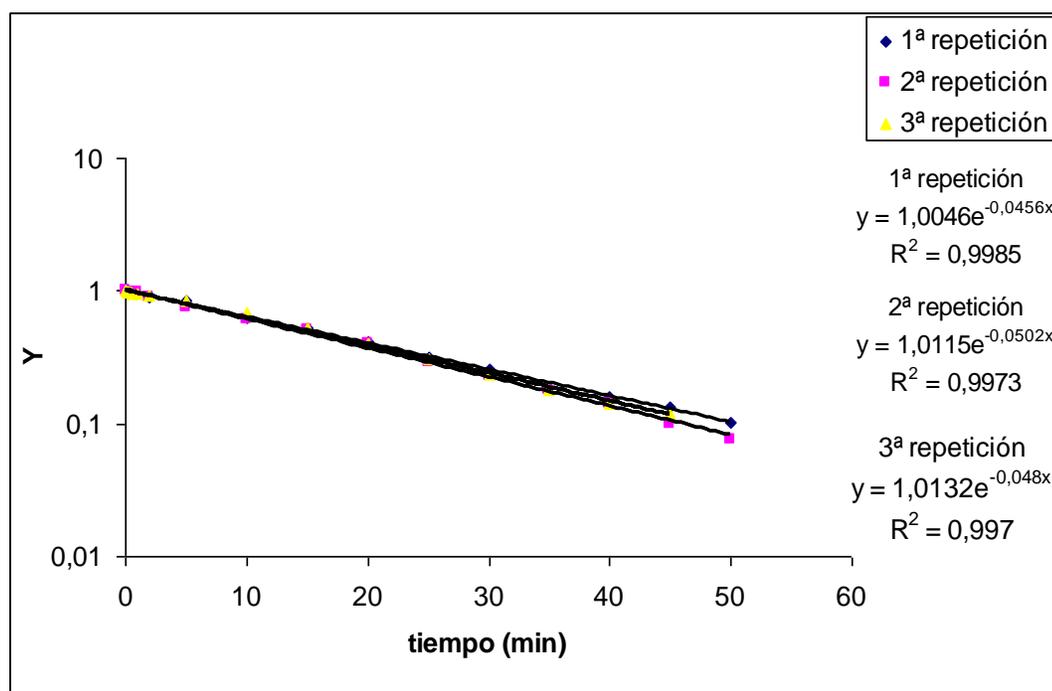


Figura Ap-6. Coeficiente de enfriamiento de la manzana con hielo fluido al 20%

Tabla Ap-13. Coeficiente de enfriamiento de manzana con hielo fluido 30%

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0459	0,0452	0,0552*	0,0004	0,04555	0.878
Factor lag (j)	10,008	0,9972	1,002	0,0025	0,999	0.250
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	151,186	152,730	133,681	0,1091	151,958	0.072

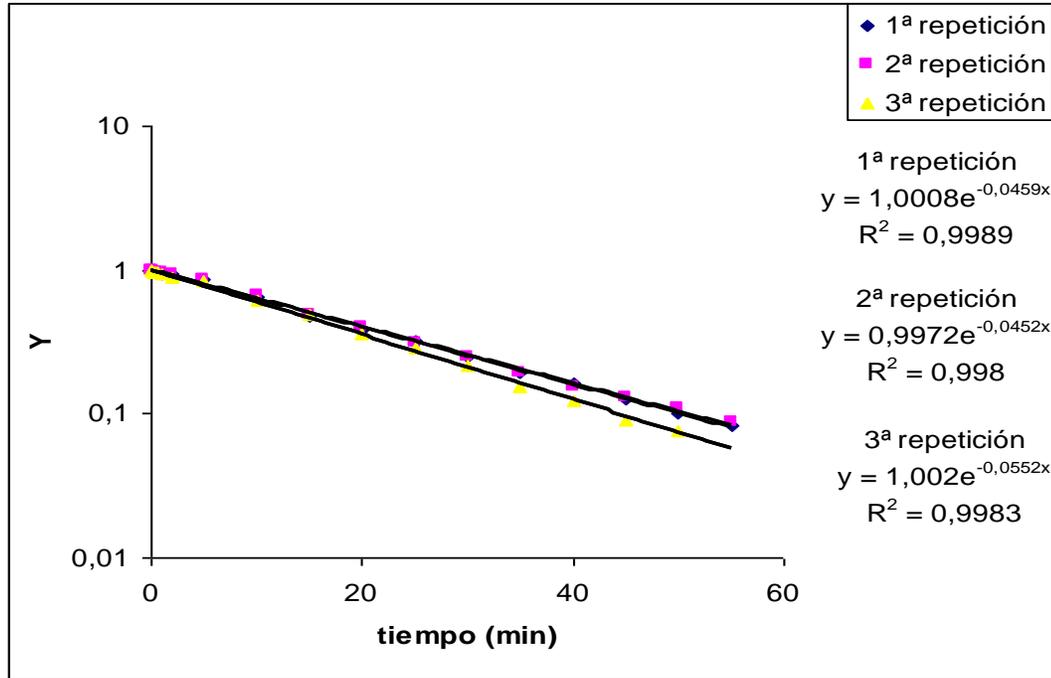


Figura Ap-7. Coeficiente de enfriamiento de la manzana con hielo fluido al 30%

Tabla Ap-14. Coeficiente de enfriamiento de manzana con hielo fluido 40%

parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0448	0,0421	0,0452	0,0017	0,0440	0,0386
factor lag (j)	0,9866	1,1358	1,1143	0,0806	1,0789	0,0747
tiempo medio de enfriamiento (Z)	15,1709	19,4889	17,7295	2,1838	17,4631	0,1251

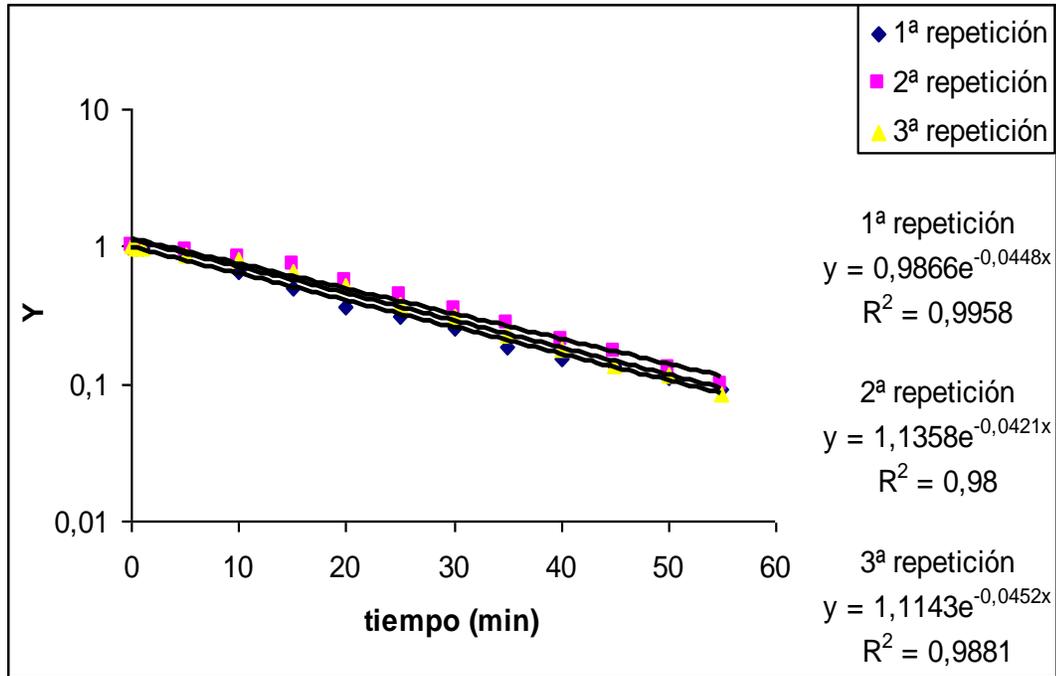


Figura Ap-8. Coeficiente de enfriamiento de la manzana con hielo fluido al 40%

Tabla Ap-15. Coeficiente de enfriamiento de manzana con hielo sólido

Parámetros	repeticiones			Promedio	CV (%)
	1ª	2ª	Desv Est		
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0204	0,021	0,0004	0,0207	0,0204
Factor lag (j)	1,0084	0,9367	0,0506	0,9725	0,0521
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	34,3878	29,8930	3,1782	32,1404	0,0988

Se realizó un análisis estadístico (prueba de tuckey) mediante el cual se identificó que las 3ª repetición es diferentemente significativas, por lo que se procedió a eliminarla para efectos de confiabilidad en el tratamiento de datos.

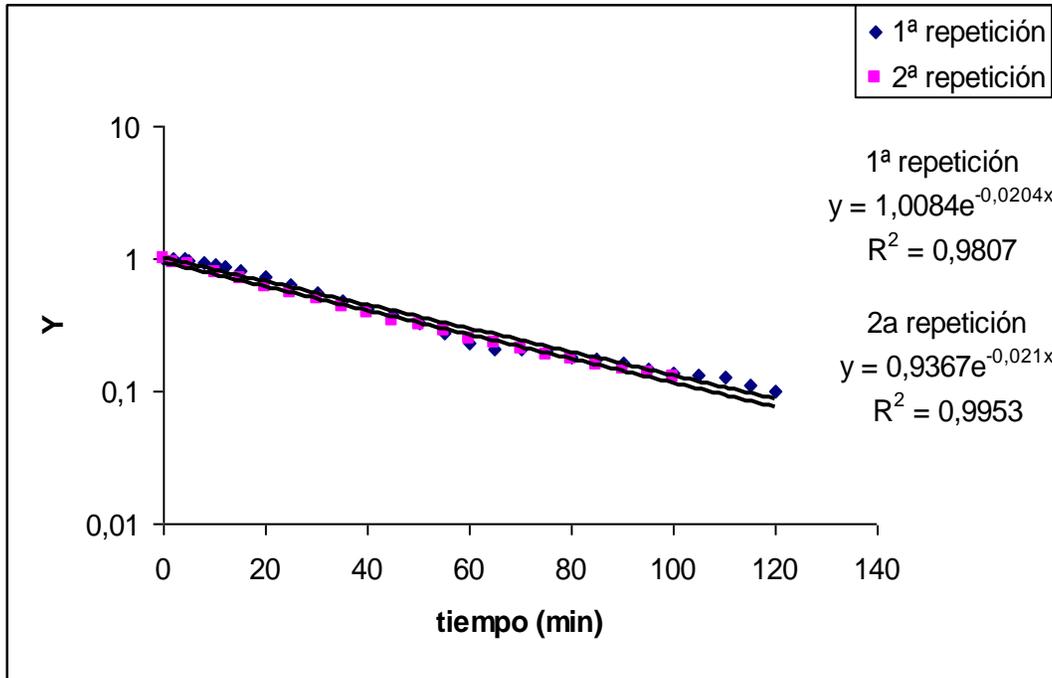


Figura Ap-9. Coeficiente de enfriamiento de manzana con hielo sólido

Tabla Ap-16. Coeficiente de enfriamiento de manzana con agua

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1ª	2ª	3ª			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,035	0,0365	0,0297	0,0035	0,0337	0,1059
Factor lag (j)	0,9512	0,9261	0,9479	0,0136	0,9417	0,0144
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	18,3747	16,8869	21,5367	2,3745	18,9327	0,1254

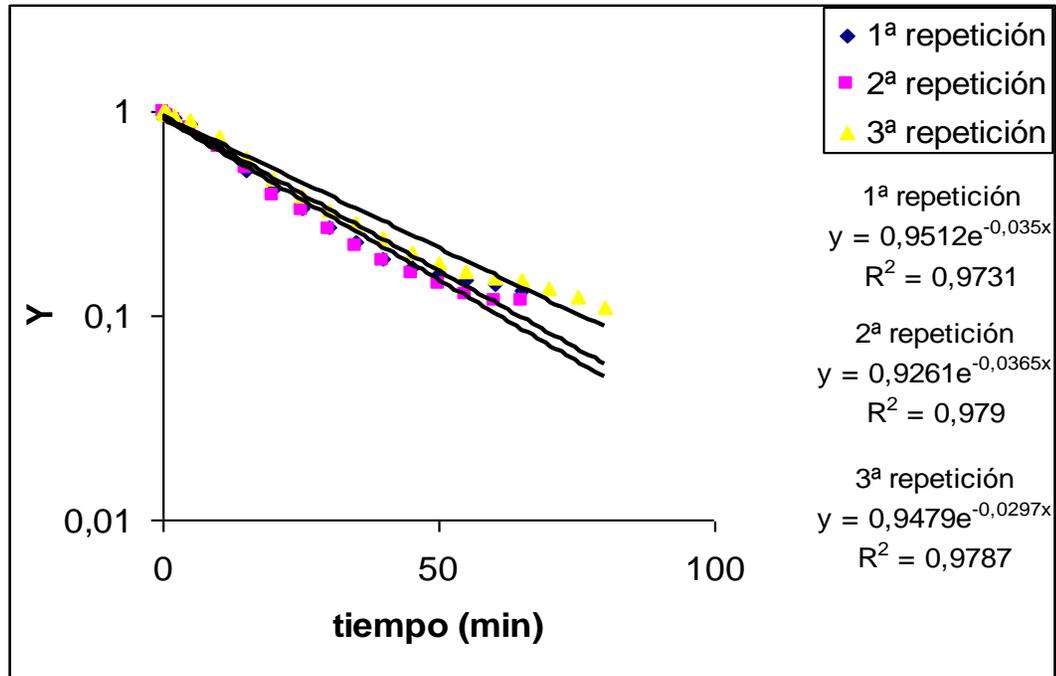


Figura Ap-16. Coeficiente de enfriamiento de manzana con agua

Apéndice 4.2 Coeficiente de enfriamiento de pepino

Tabla Ap-17. Enfriamiento de pepino con hielo fluido 20%

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1ª	2ª	3ª			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0412	0,0501	0,0432	0,0046	0,0448	0,1041
Factor lag (j)	0,9884	0,9911	1,0001	0,0061	0,9932	0,0061
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	16,5407	13,6568	16,0473	1,5424	15,4149	0,1000

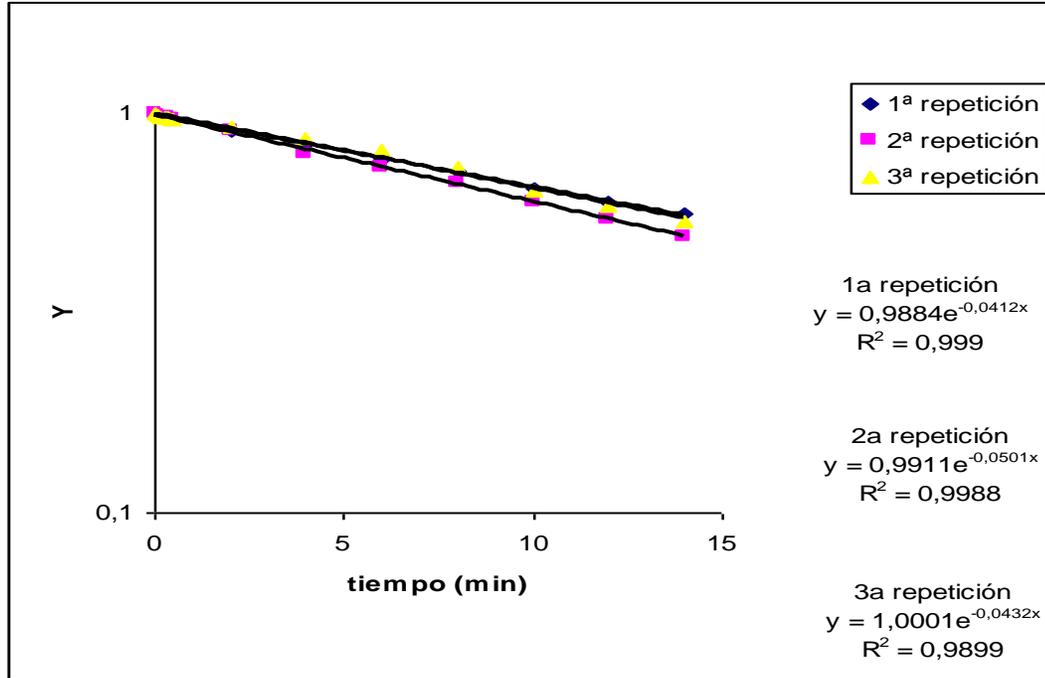


Figura Ap-17. Coeficiente de enfriamiento de pepino con hielo fluido 20%

Tabla Ap-18. Enfriamiento de pepino con hielo fluido 30%

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0284	0,0381	0,04	0,0013	0,0390	0,0344
Factor lag (j)	1,013	1,0093	1,0183	0,0063	1,0138	0,0062
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	24,8613	18,4358	17,7820	0,4622	18,1089	0,0255

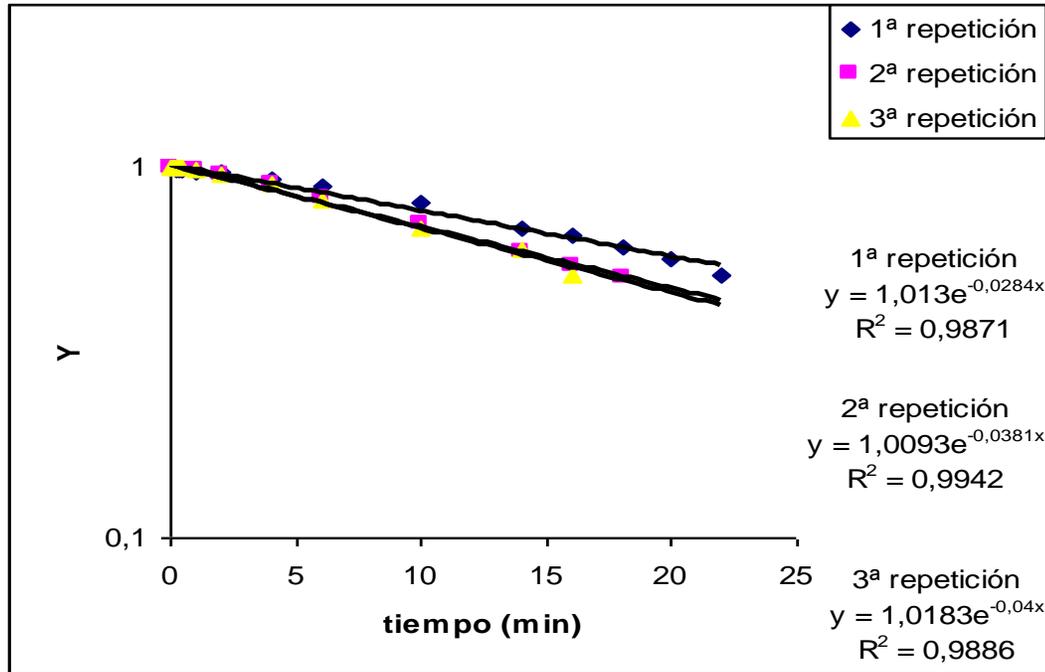


Figura Ap-18. Coeficiente de enfriamiento de pepino con hielo fluido 30%

Tabla Ap-19. Enfriamiento de pepino con hielo fluido 40%

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Coeficiente de enfriamiento(CR)	0,0445	0,0341	0,0312	0,0020	0,0326	0,0628
Factor lag (j)	0,9997	0,9925	0,9875	0,0035	0,99	0,0035
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	15,5695	20,1061	21,8130	1,2070	20,9596	0,0575

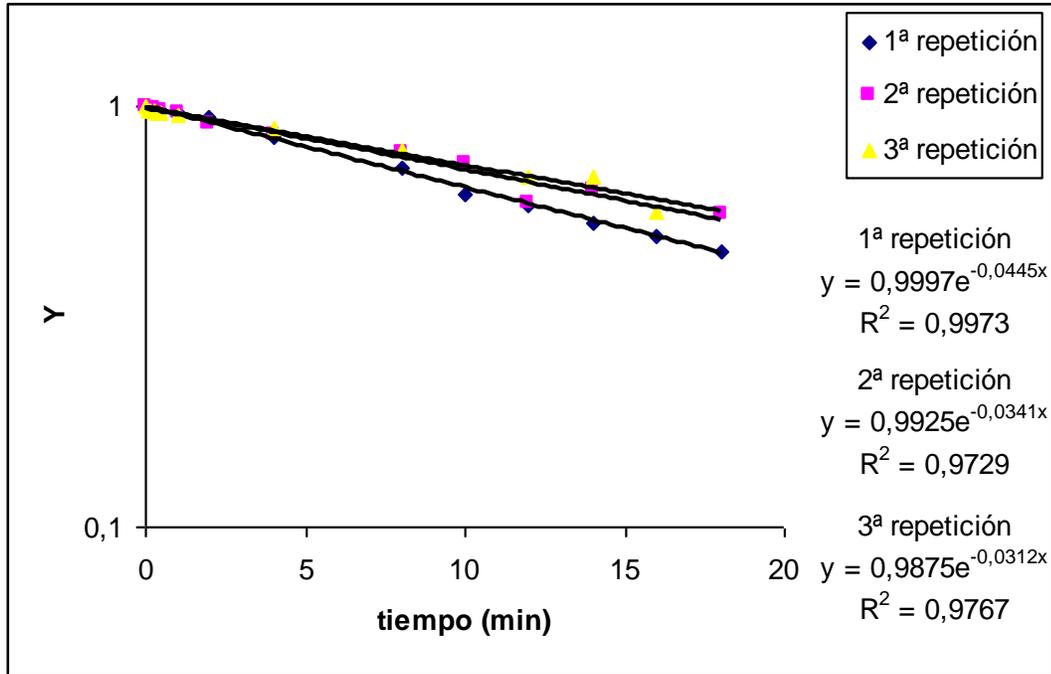


Figura Ap-19. Coeficiente de enfriamiento de pepino con hielo fluido 40%

Tabla Ap-20. Enfriamiento de pepino con hielo sólido

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1ª	2ª	3ª			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,023	0,0219	0,024	0,0010	0,0229	0,0457
Factor lag (j)	0,995	0,9864	0,9725	0,0113	0,9846	0,0115
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	29,9188	31,0252	27,7192	1,6828	29,5544	0,0569

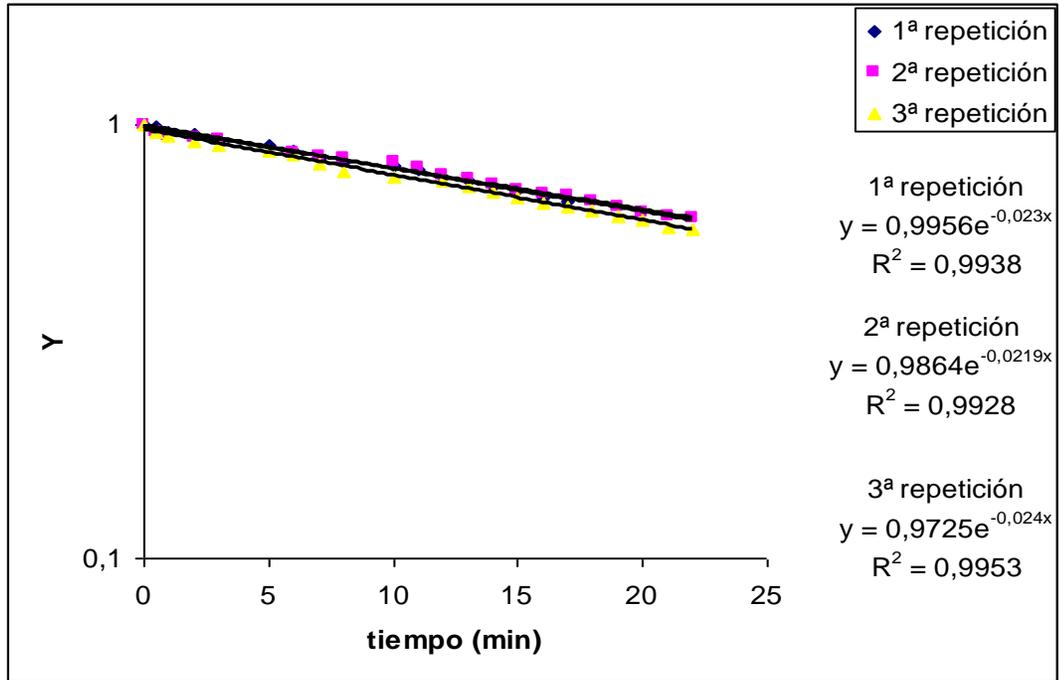


Figura Ap-20. Coeficiente de enfriamiento de pepino con hielo sólido

Tabla Ap-21. Enfriamiento de pepino con agua

Parámetros	repeticiones			Desv Est	Promedio	CV (%)
	1ª	2ª	3ª			
Coeficiente de enfriamiento (CR)	0,0473	0,0509	0,0582	0,0055	0,0521	0,1065
Factor lag (j)	0,995	0,9425	1,0032	0,0329	0,9802	0,0335
Tiempo medio de enfriamiento (Z)	14,5483	12,4543	11,9646	1,3723	12,9891	0,1056

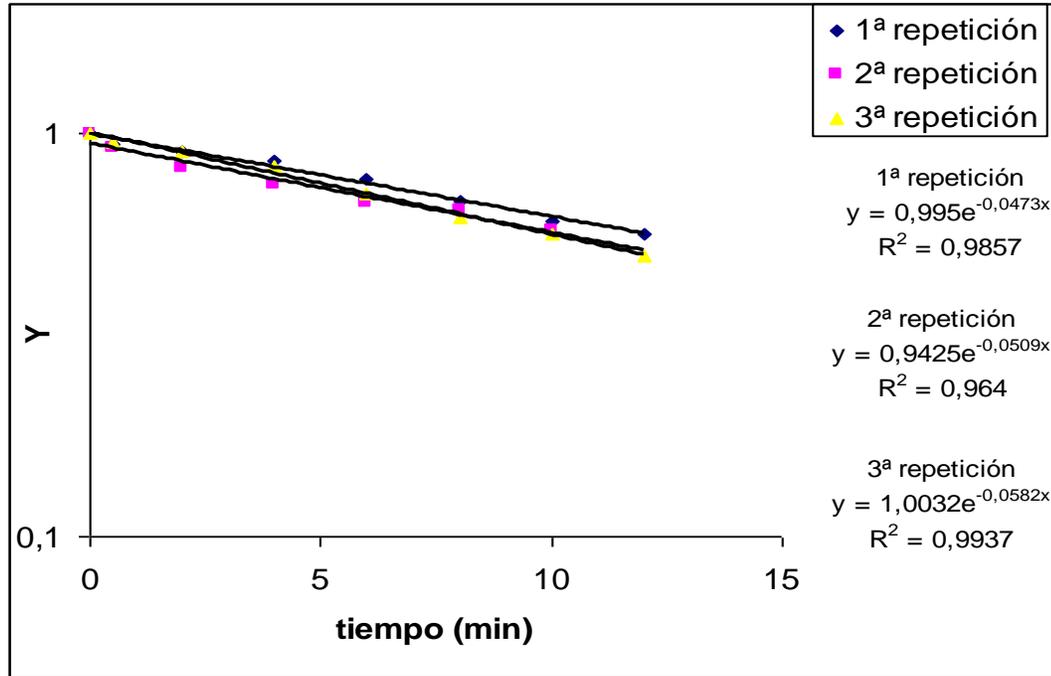


Figura Ap-21. Coeficiente de enfriamiento de pepino con agua

Apéndice 5 Eficiencia térmica

Apéndice 5.1 Eficiencia térmica de enfriamiento de manzana

Tabla Ap-22. Enfriamiento de manzana con: Hielo fluido 20 %			
Eficiencia térmica %	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
	90,93	91,38	89,13
Desv Est	1,1905		
Promedio	90,48		
CV	1.30%		

Tabla Ap-23. Enfriamiento de manzana con: Hielo fluido 30 %			
Eficiencia térmica %	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
	92,89	90,32	89,29
Desv Est	1,8540		
Promedio	90,8333		
CV	2.04%		

Tabla Ap-24. Enfriamiento de manzana con: Hielo fluido 40 %			
Eficiencia térmica %	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
	91,09	97,19	97,13
Desv Est	3,5046		
Promedio	97,16		
CV	3.60%		

Nota: El promedio de las repeticiones de enfriamiento de manzana con hielo fluido al 40% se realizó únicamente con la 2^a y 3^a repetición, ya que el coeficiente de variación al incluir la 1^a repetición aumento a un 0.13, por lo que ésta no se tomo en cuenta.

Tabla Ap-25. Enfriamiento de manzana con Agua			
Eficiencia térmica %	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
	83,69	85,11	78,74
Desv Est	3,3440		
Promedio	82,51		
CV	4.05%		

Tabla Ap-26. Enfriamiento de manzana con hielo sólido			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	83,58	86,02	84,77
Desv Est	1,2201		
Promedio	84,79		
CV	1.4%		

Apéndice 5.2 Eficiencia térmica de enfriamiento de pepino

Tabla Ap-27. Enfriamiento de pepino con: Hielo fluido 20 %			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	78,96	79,86	79,35
Desv Est	0,4513		
Promedio	79,39		
CV	0.05%		

Tabla Ap-28. Enfriamiento de pepino con: Hielo fluido 30 %			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	87,05	85,04	88,18
Desv Est	1,5904		
Promedio	86,7566		
CV	1.83%		

Tabla Ap-29. Enfriamiento de pepino con: Hielo fluido 40 %			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	87,49	88,38	89,51
Desv Est	1,0123		
Promedio	88,46		
CV	1.14%		

Tabla Ap-20. Enfriamiento de manzana con Agua			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	83,69	85,11	78,74
Desv Est	3,3440		
Promedio	82,51		
CV	4.05%		

Tabla Ap-21. Enfriamiento de pepino con hielo sólido			
	repeticiones		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Eficiencia térmica %	72,86	61,84	66,13
Desv Est	5,5548		
Promedio	66,943		
CV	8.29%		

A N E X O

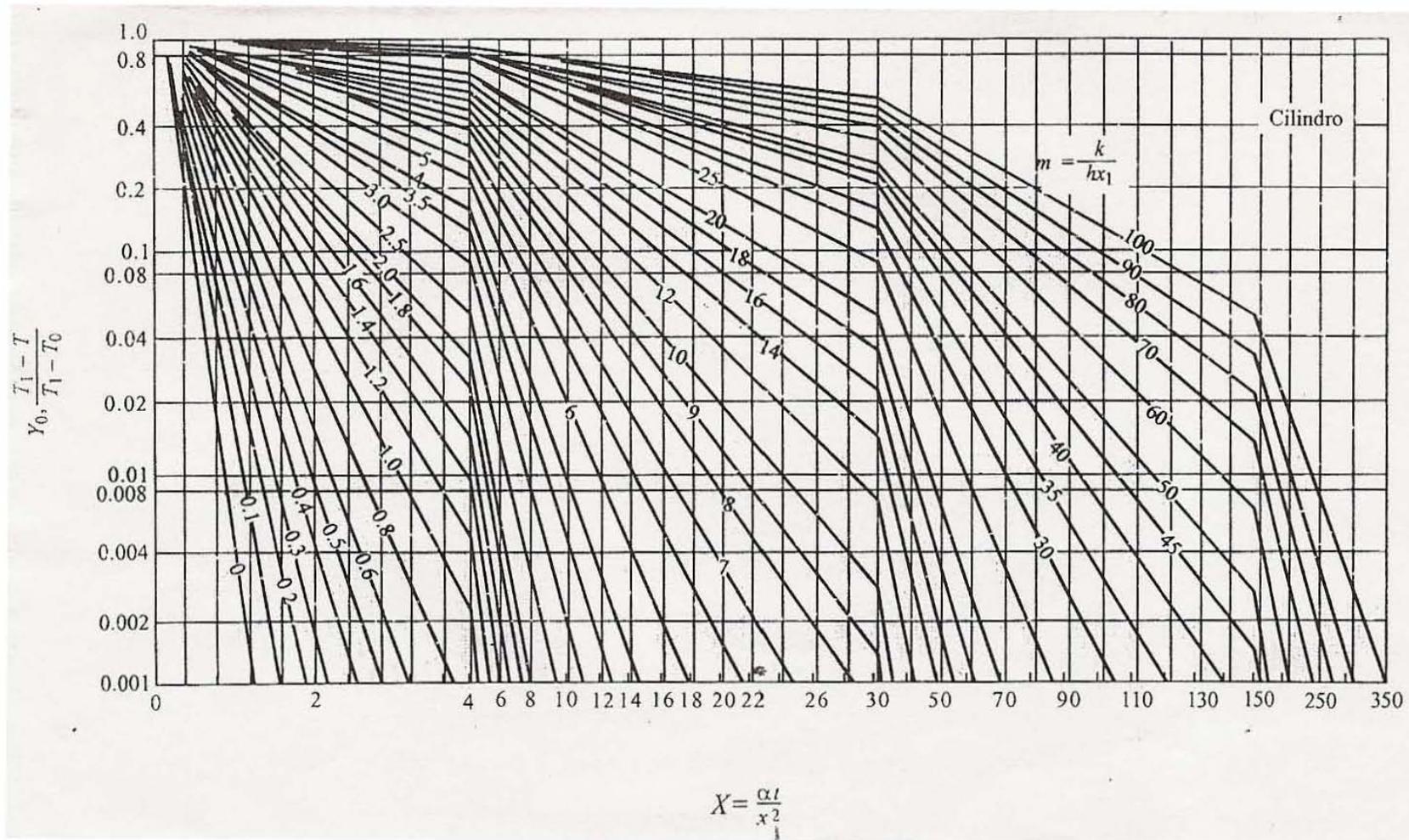


Figura A-1. Grafica para determinar la temperatura del centro de un cilindro para conducción de calor en estado no estacionario (Heisler, 1947).

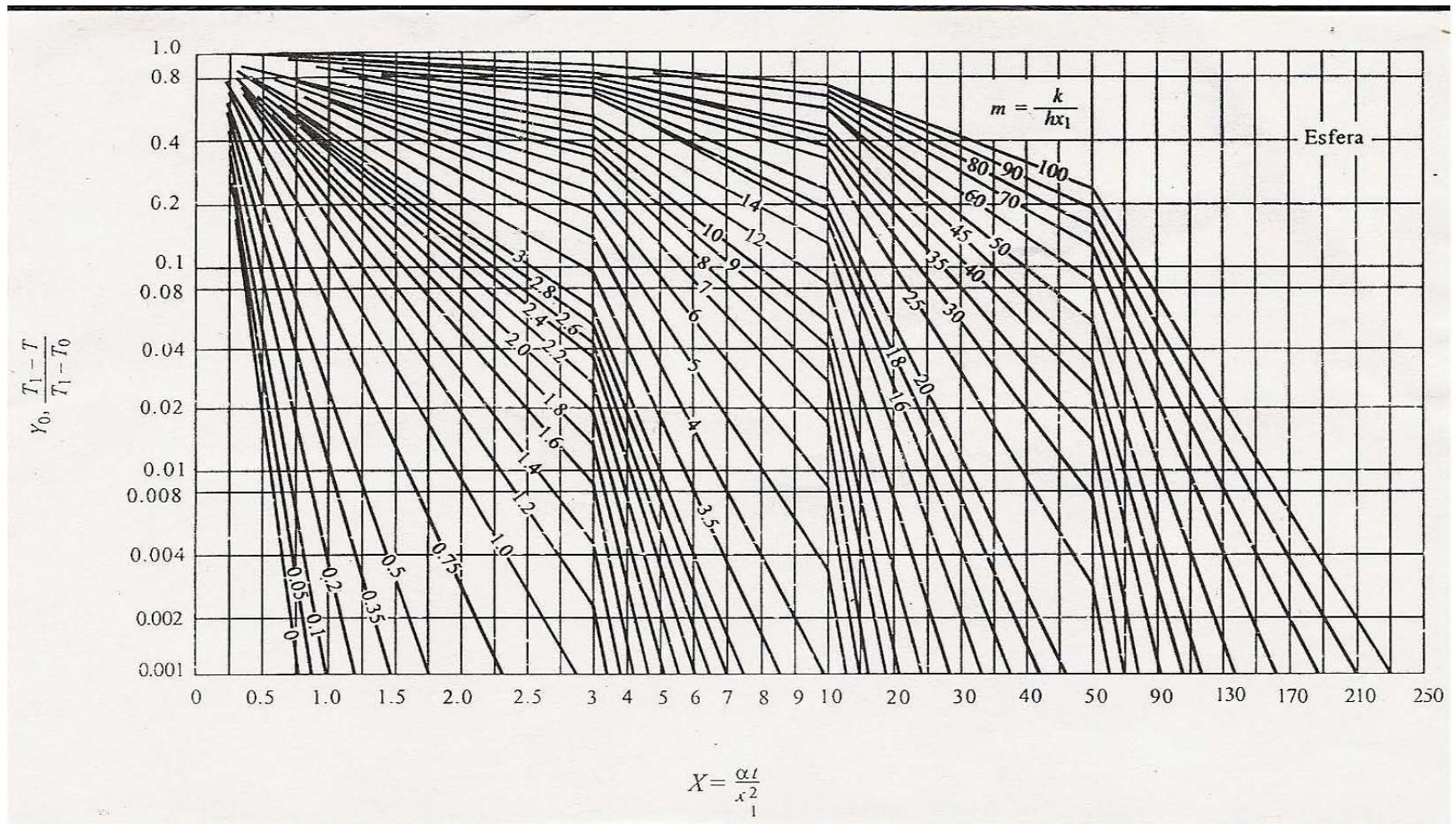


Figura A-2. Grafica para determinar la temperatura del centro de una esfera para conducción de calor en estado no estacionario (Heisler, 1947).

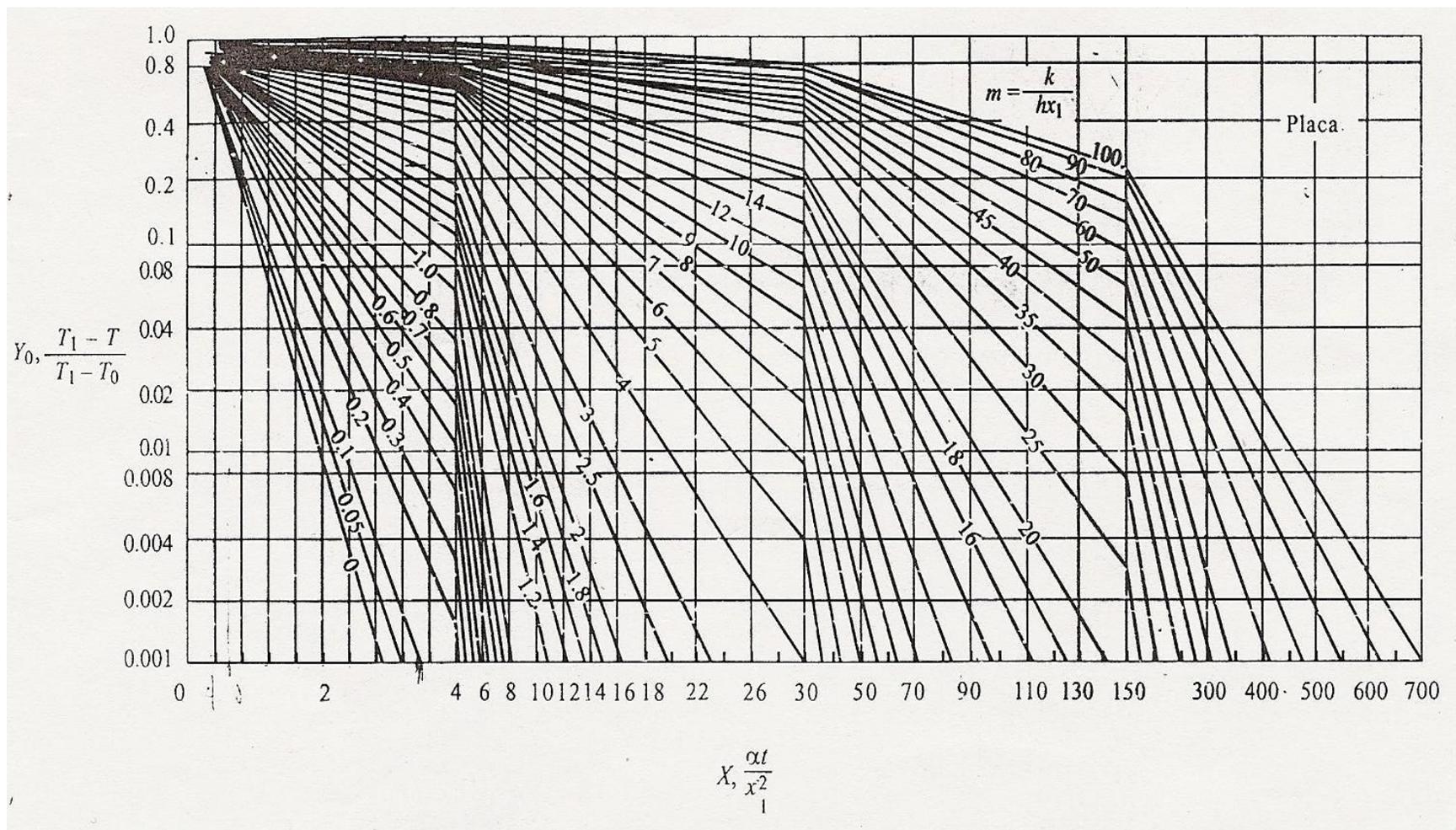


Figura A-3. Grafica para determinar la temperatura del centro de una placa plana grande para conducción de calor en estado no estacionario (Heisler, 1947).

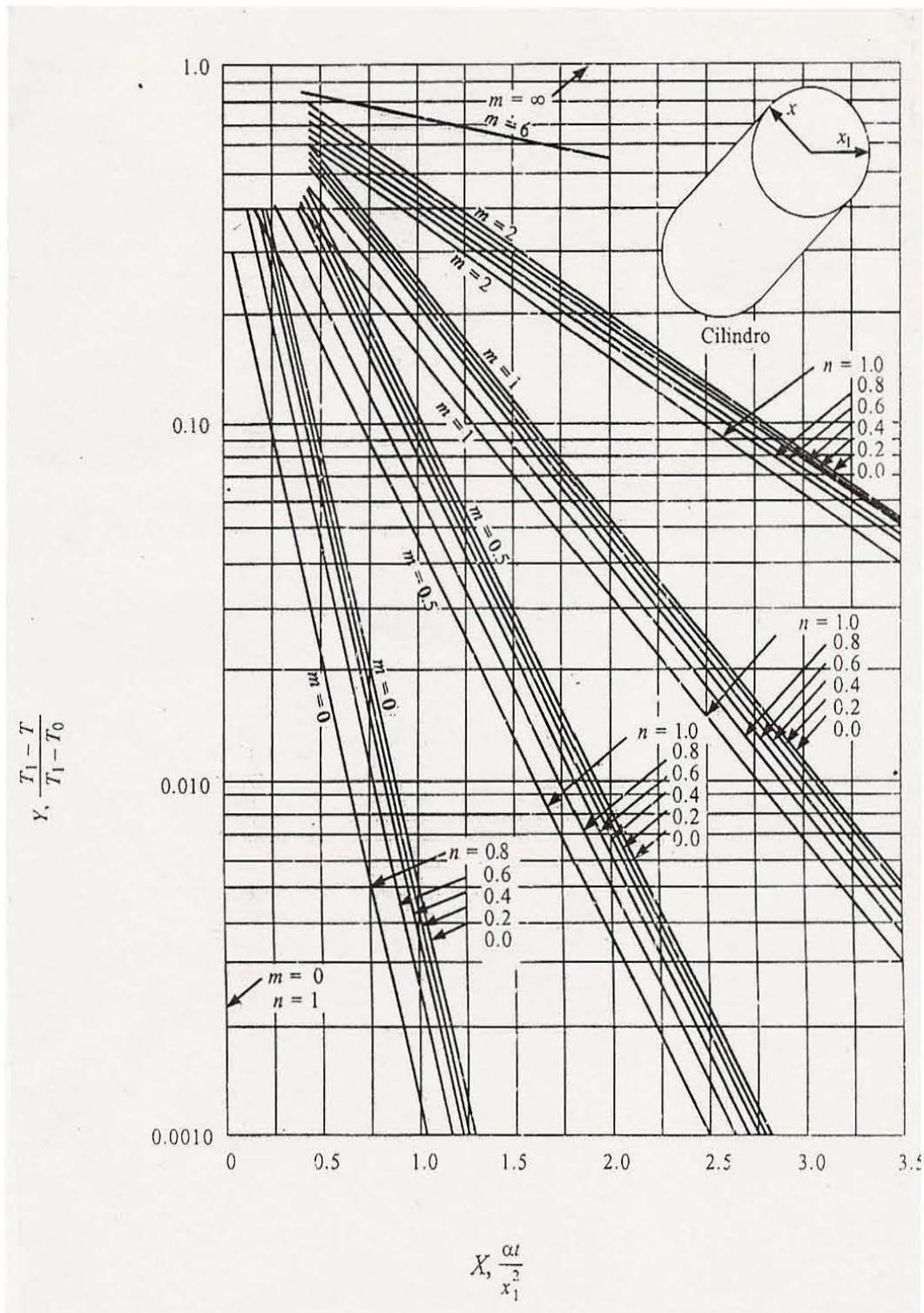


Figura A-4. Conducción de calor en estado no estacionario en un cilindro largo (Gurney-Lurie, 1923).

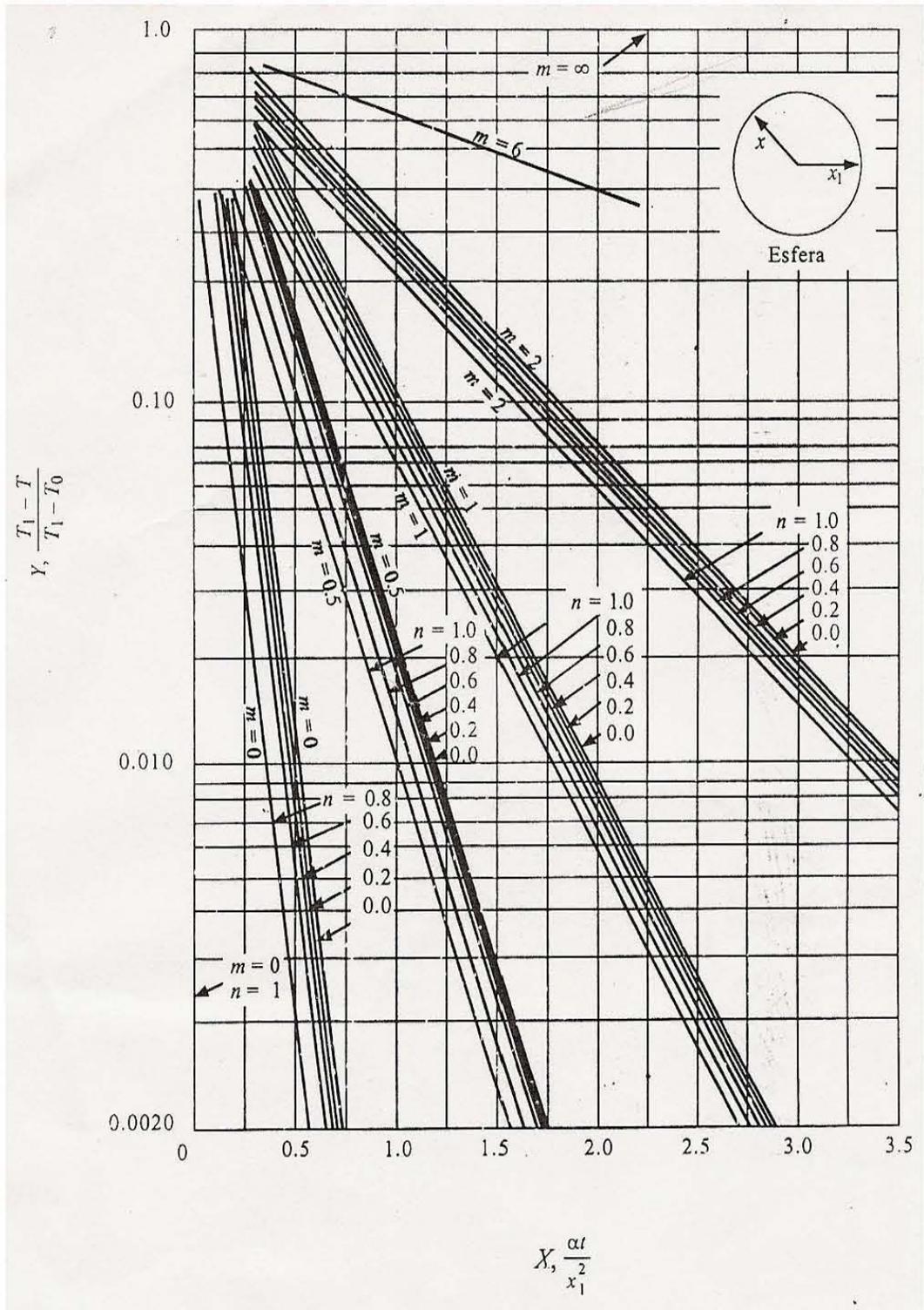


Figura A-5. Conducción de calor en estado no estacionario en una esfera (Gurney-Lurie, 1923).

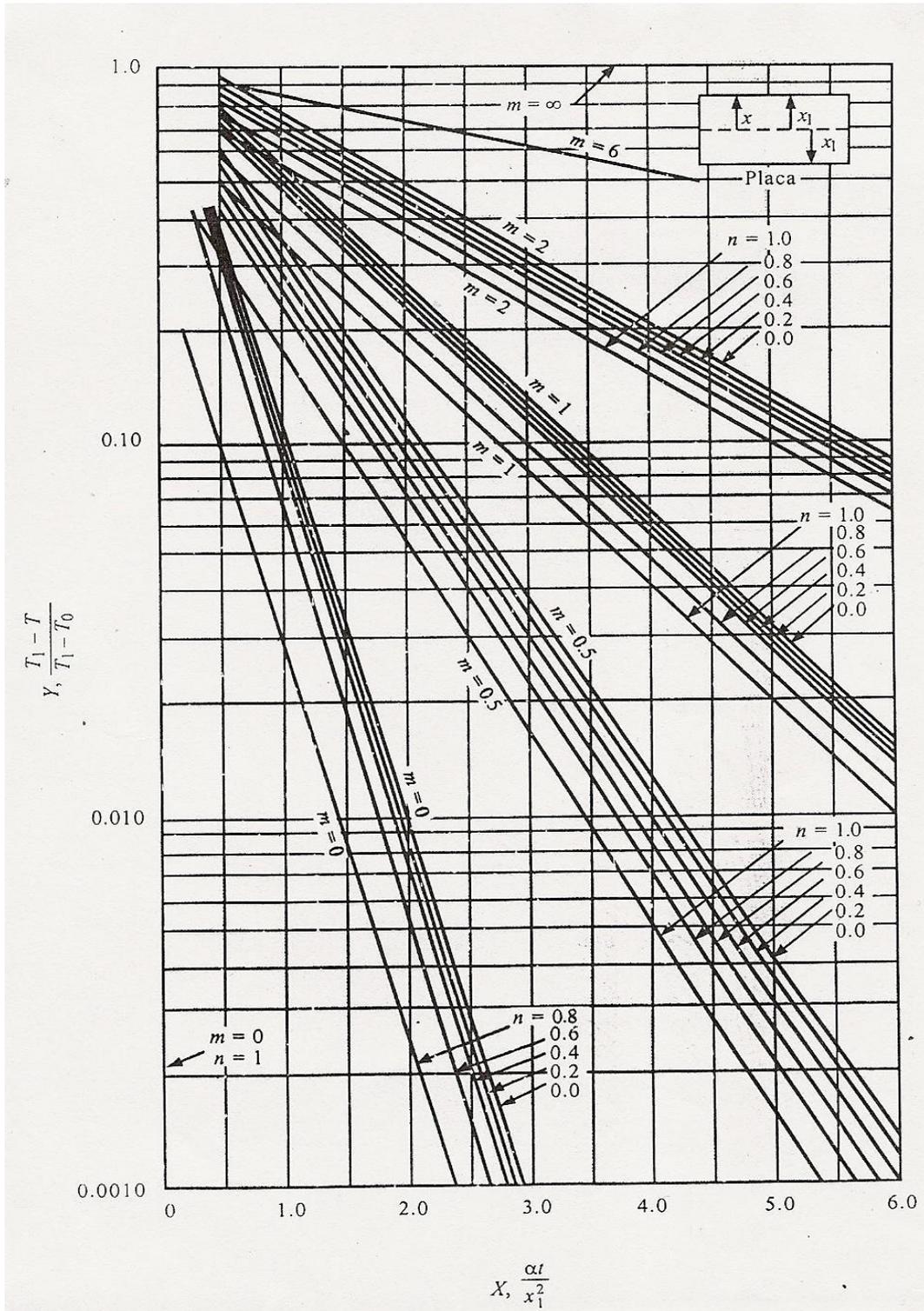


Figura A-6. Conducción de calor en estado no estacionario en una placa (Gurney-Lurie, 1923).

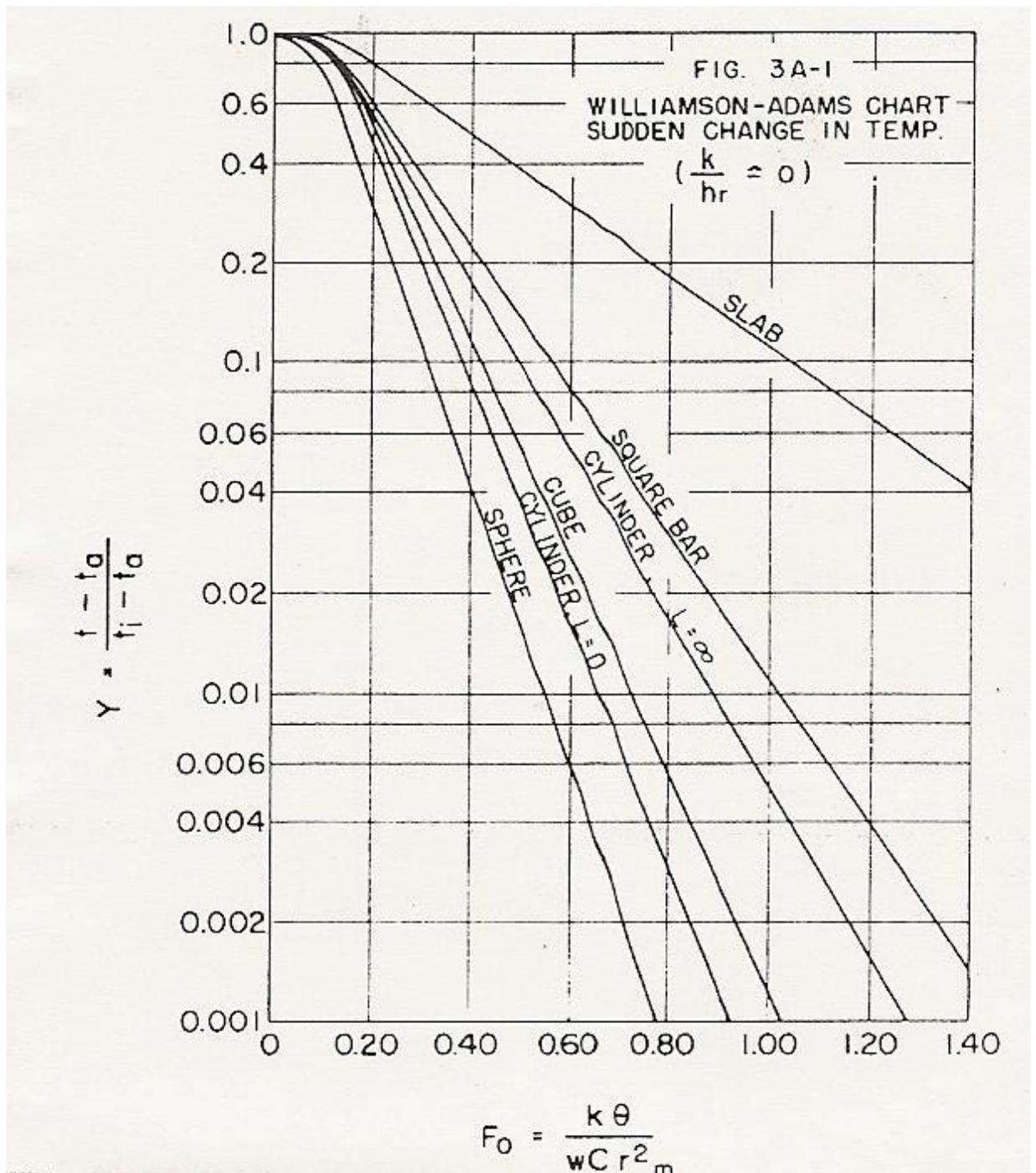


Figura A-7. Grafica para determinar el cambio de temperatura en diferentes geometrías (Williamson - Adams, 1919).

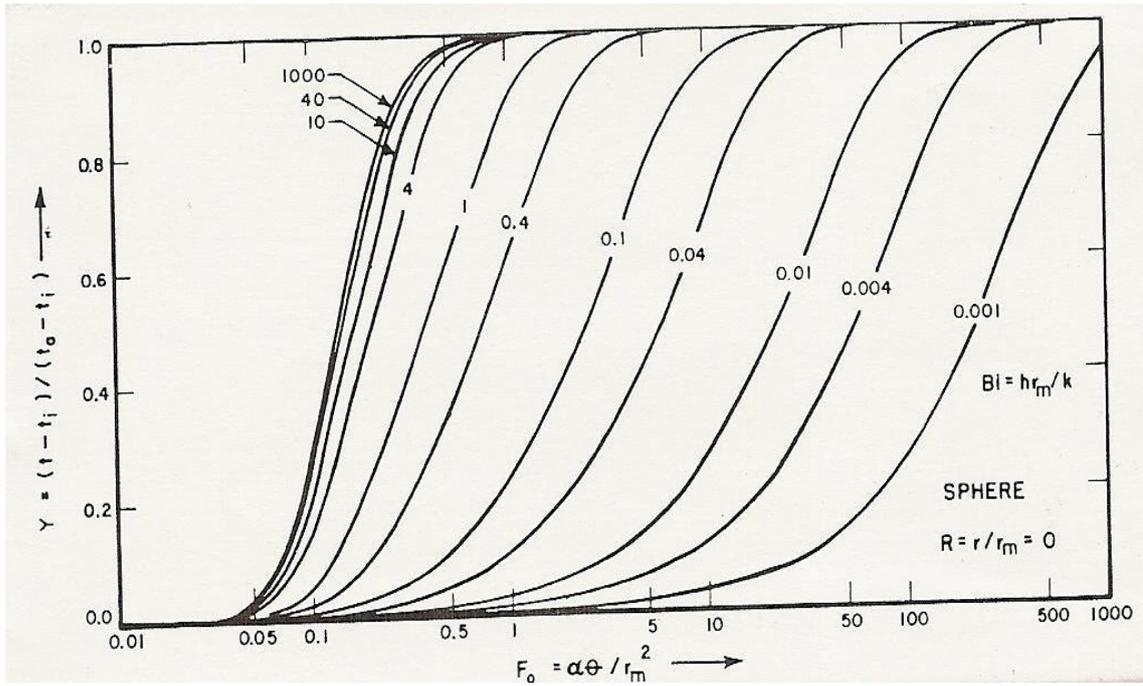


Figura A-8. Solución grafica para determinar la transferencia de calor en estado no estacionario en el centro de una esfera (Schneider, 1963).

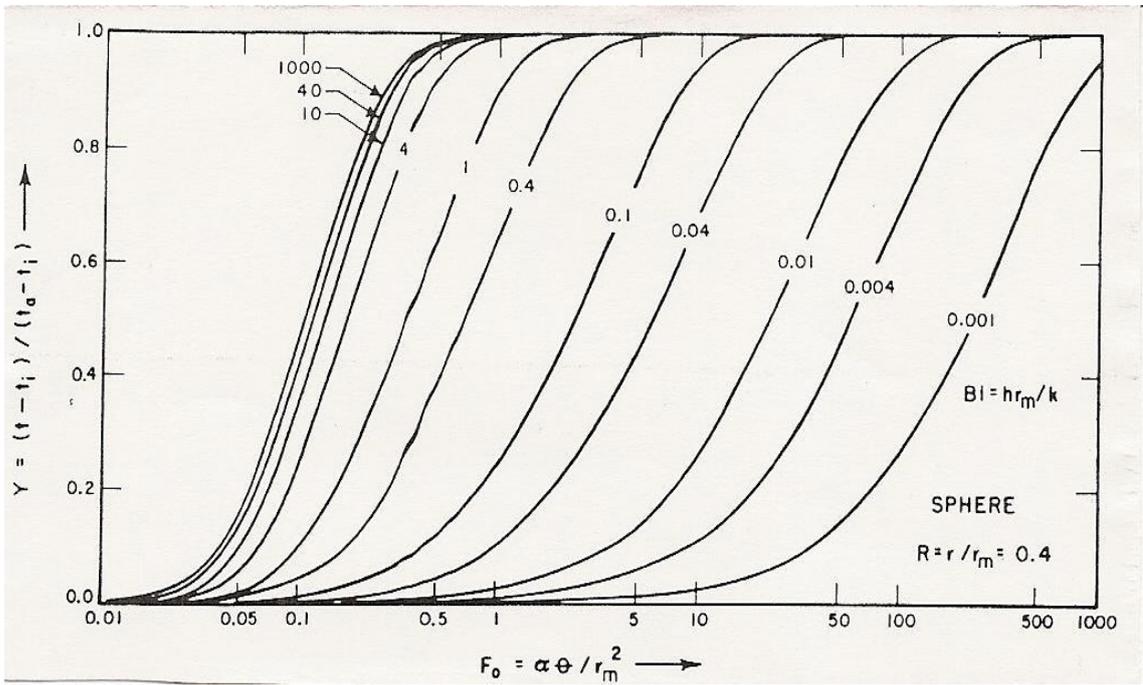


Figura A-9. Solución grafica para determinar la transferencia de calor en estado no estacionario en una esfera cuando $r=0.4r_m$ (Schneider, 1963).

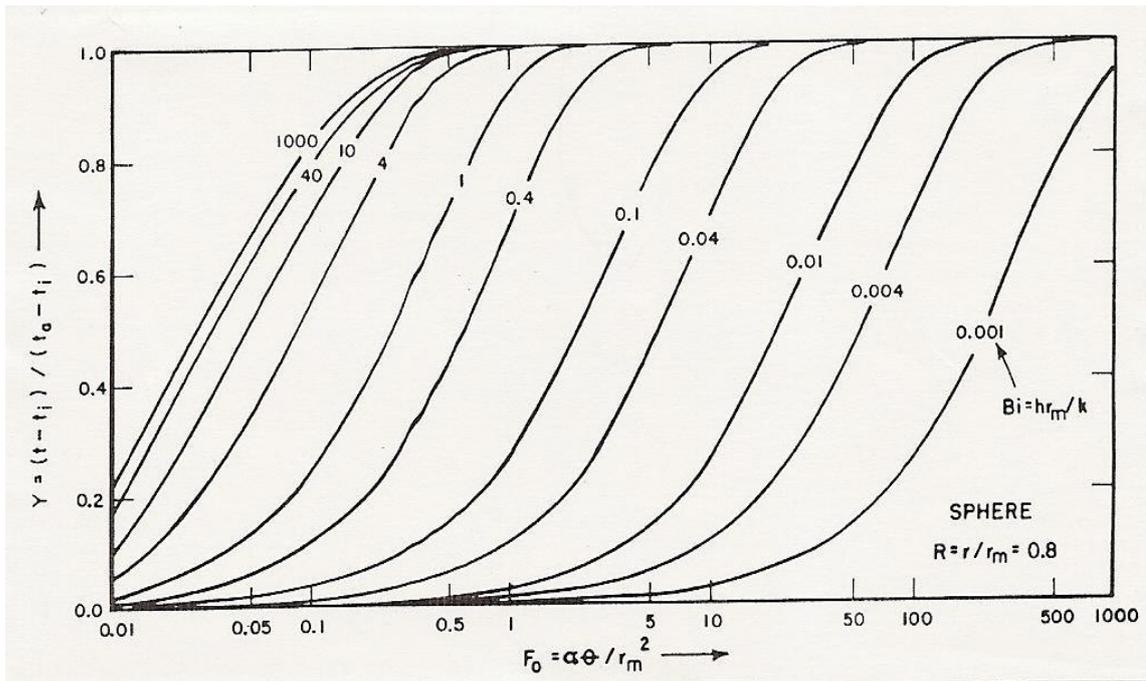


Figura A-10. Solución grafica para determinar la transferencia de calor en estado no estacionario en una esfera cuando $r=0.8r_m$ (Schneider, 1963).

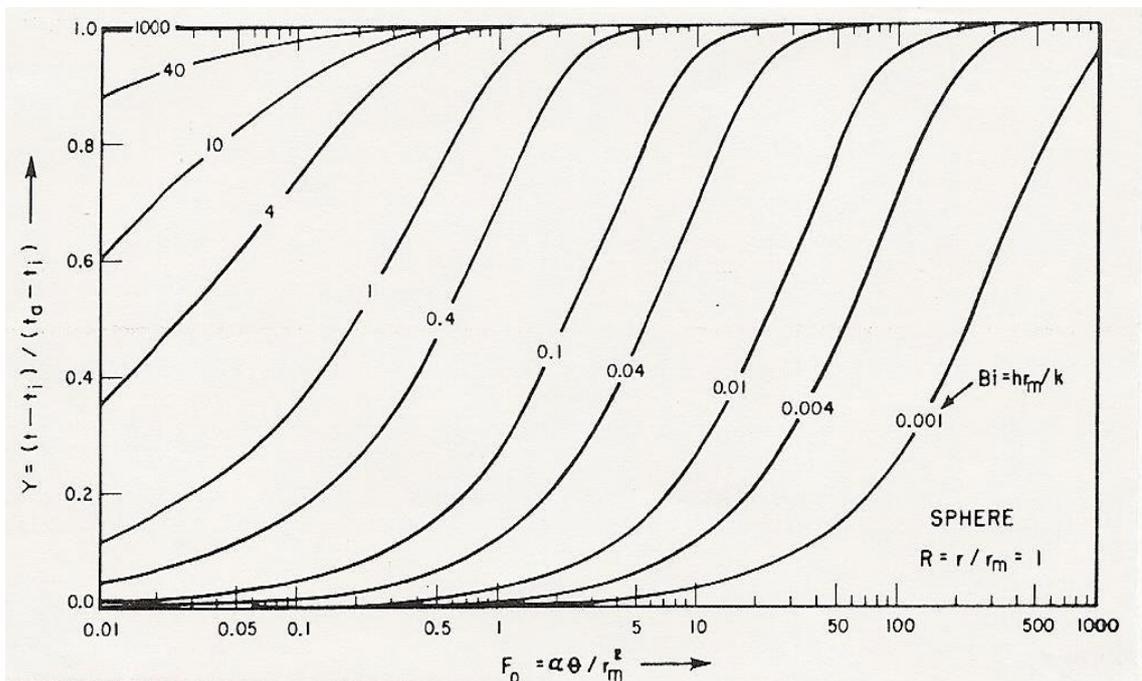


Figura A-11. Solución grafica para determinar la transferencia de calor en estado no estacionario en una esfera cuando $r=1r_m$ (superficie), (Schneider, 1963).