

**Universitat Politècnica de Catalunya**

Programa de Doctorado Tecnología Agroalimentaria y  
Biotecnología

**RECUPERACIÓN DE SOLUTOS DEL HIELO PROVENIENTE DE UN  
CRIOCONCENTRADOR DE PLACAS: CINÉTICA Y  
CONCENTRACIÓN**

**TESIS DOCTORAL**

**RAFAEL ANTONIO GULFO CABRALES**

**Barcelona, 2014**







Departament d'Enginyeria  
Agroalimentària i Biotecnologia

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Universitat Politècnica de Catalunya**  
Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología  
Programa de Doctorado Tecnología Agroalimentaria y Biotecnología

# **RECUPERACIÓN DE SOLUTOS DEL HIELO PROVENIENTE DE UN CRIOCONCENTRADOR DE PLACAS: CINÉTICA Y CONCENTRACIÓN**

**RAFAEL ANTONIO GULFO CABRALES**

Dept. Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia Edifici D4 Campus del Baix Llobregat UPC  
C. Esteve Terradas, 8. 08860. Castelldefels.

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor por la  
Universitat Politècnica de Catalunya

**Director**

Dr. Josep Maria Auleda Amorós  
Departamento de Ingeniería  
Agroalimentaria  
y Biotecnología (DEAB - UPC)

**Codirectores**

Dra: Mercè Raventós  
Dr. Eduard Hernández Yáñez  
Departamento de Ingeniería  
Agroalimentaria  
y Biotecnología (DEAB - UPC)

**Barcelona, Junio 2014**



Curso académico: 2014

## Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos:

RAFAEL ANTONIO GULFO CABRALES  
 Programa de doctorado

TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA Y BIOTECNOLOGÍA  
 Unidad estructural responsable del programa

INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y BIOTECNOLOGÍA

## Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada:

### RECUPERACIÓN DE SOLUTOS DEL HIELO PROVENIENTE DE UN CRIOCONCENTRADOR DE PLACAS: CINÉTICA Y CONCENTRACIÓN

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

NO APTO       APROBADO       NOTABLE       SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SÍ       NO

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	Secretaria de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado

Barcelona a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

# INDICE

<b>I. RESUMEN</b>	13
<b>I. RESUM</b>	14
<b>II. ABSTRACT</b>	15
<b>III. PUBLICACIONES</b>	16
<b>IV. ACRÓNIMOS</b>	17
<b>1. INTRODUCCION</b>	20
<b>1.1. LA EVAPORACIÓN</b>	20
<b>1.2. TÉCNICA DE MEMBRANAS</b>	22
<b>1.3. CRIOCONCENTRACIÓN O CONCENTRACIÓN POR CONGELACIÓN</b>	24
<i>1.3.1. Propiedades básicas en el proceso de crioconcentración</i>	25
<i>1.3.1.1. Punto de congelación</i>	26
<i>1.3.1.2. Viscosidad</i>	28
<i>1.3.1.3. Densidad</i>	29
<i>1.3.1.4. Conductividad térmica</i>	30
<i>1.3.1.5. Calor específico</i>	31
<i>1.3.2. Etapas del proceso de crioconcentración</i>	31
<i>1.3.2.1. Congelación</i>	31
<i>1.3.2.2. Separación</i>	33
<i>1.3.3. Sistemas de crioconcentración</i>	34
<i>1.3.3.1. Sistemas directos</i>	35
<i>1.3.3.2. Sistemas indirectos</i>	35
<i>1.3.4. Procesos de crioconcentración</i>	35
<i>1.3.4.1. Crioconcentración o cristalización en suspensión</i>	36
<i>1.3.4.2. Concentración por congelación y deshielo</i>	38
<i>1.3.4.3. Crioconcentración en película</i>	39
<b>1.4. PRECEDENTES DE ESTUDIO</b>	44
<b>1.5. DESHIELO FRACCIONADO</b>	48

<b>1.6. TIEMPO DE DESHIELO</b>	49
<b>1.7. ALGORITMO DE CÁLCULO</b>	50
<b>2. OBJETIVO</b>	51
<b>2.1. OBJETIVO GENERAL</b>	51
<b>2.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	51
<b>3. PLAN DE TRABAJO</b>	52
<b>4. MÉTODOLOGIA (MATERIALES Y METODOS)</b>	53
<b>4.1. EQUIPO PILOTO DE CRIOCONCENTRACIÓN Y MATERIAL DE ENSAYO</b>	53
<b>4.2. FLUIDOS DE ENSAYO</b>	60
<b>4.3. INSTRUMENTACIÓN BASICA: REFRACTOMETRO, BALANZAS Y SONDAS DE TEMPERATURA</b>	61
<i>4.3.1. Instrumento de medida de la concentración de solutos</i>	61
<i>4.3.2. Instrumentos para la determinación del peso</i>	62
<i>4.3.3. Instrumentos de medición de la temperatura</i>	62
<b>4.4. OPERATIVA DE ENSAYOS</b>	63
<i>4.4.1. Condiciones iniciales de circuito de distribución y evaporadores</i>	63
<i>4.4.2. Temperatura de las placas evaporadoras</i>	64
<i>4.4.3. Obtención de las capas de hielo de las distintas etapas del proceso de crioconcentración</i>	64
<i>4.4.4. Caracterización de las capas de hielo del proceso de crioconcentración</i>	65
<b>4.5. EQUIPO EXPERIMENTAL DE DESHIELO FRACCIONADO Y ENSAYOS</b>	66
<i>4.5.1. Estufa de laboratorio</i>	66
<i>4.5.2. Método de deshielo fraccionado</i>	67
<b>4.6. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE ESTUDIO</b>	67
<i>4.6.1. Relación de similitud. factor de forma (ff)</i>	67
<i>4.6.2. Porcentaje de soluto acumulado (%)</i>	68

4.6.3. Porcentaje de volumen acumulado (%)	68
4.6.4. Índice de concentración	68
4.6.5. Índice de concentración acumulado	68
4.6.6. Densidad del hielo	69
4.6.7. Determinación del tiempo de deshielo	69
4.6.7.1. Corrección del tiempo de deshielo	69
4.6.7.2. Porcentaje de tiempo de deshielo	71
4.6.7.3. Tiempo acumulado	71
4.6.7.4. Velocidad de deshielo	71
4.6.7.5. Relación tiempo y $ff$	71
<b>4.7. HERRAMIENTAS DE ANALISIS ESTADISTICO</b>	<b>73</b>
4.7.1. Análisis simple de varianza (one-way ANOVA)	73
4.7.2. Root Mean Square RMS	73
4.7.3. Coeficiente de correlación ( $r$ ) de Pearson	74
4.7.4. Coeficiente de variación	74
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>75</b>
<b>5.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>75</b>
<b>5.2. FASE I</b>	<b>75</b>
5.2.1. Crioconcentración	75
5.2.1.1. Obtención y caracterización de las capas de hielo de las distintas etapas del proceso de crioconcentración	76
5.2.1.2. Uniformidad del soluto en la masa de hielo	77
5.2.1.3. Caracterización del soluto en la masa de hielo	79
<b>5.3. FASE II</b>	<b>82</b>
5.3.1. Deshielo fraccionado de las muestras de ensayo	82
5.3.2. Análisis de la concentración del deshielo de fructosa, glucosa y sacarosa y zumo de melocotón (s) a temperaturas de 20 °C 25 °C y 30 °C	89
5.3.3. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado	96
5.3.3.1. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado a 20 °C	96
5.3.3.2. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo	97

<i>fraccionado a 25 °C</i>	
<i>5.3.3.3. Mejora de la eficiencia del proceso de criocentración a partir del deshielo fraccionado a 30 °C</i>	98
<i>5.3.4. Análisis tiempo de fructosa, glucosa y sacarosa y zumo de melocotón (S) a 20 °C 25 °C y 30 °C</i>	98
<i>5.3.5. Tasa de deshielo</i>	98
<i>5.3.6. Porcentaje de tiempo de deshielo</i>	100
<i>5.3.7. Validación de los ensayos de deshielo fraccionado</i>	101
<i>5.3.8. Efecto combinado del tiempo de deshielo concentración y factor de forma</i>	103
<i>5.3.9. Efecto combinado tiempo de deshielo e índice de concentración acumulado</i>	105
<i>5.3.10. Comparación del resultado del deshielo fraccionado del melocotón (s) con los azúcares básicos</i>	107
<i>5.3.11. Aplicación del algoritmo de cálculo para zumo de naranja</i>	108
<b>5.4 DISCUSIÓN GENERAL</b>	111
<b>6. CONCLUSIONES</b>	114
<b>7. AGRADECIMIENTOS</b>	116
<b>8. REFERENCIAS</b>	117
<b>9. ANEXOS</b>	126
<b>ANEXO A. GRAFICOS DE PROBABILIDAD</b>	127
<b>ANEXO B. CORRECCIÓN DEL TIEMPO DE DESHIELO</b>	139
<b>ANEXO C. RESULTADOS ESTADISTICOS (ANOVA, BARTLETT, TUKEY)</b>	281
<b>ANEXO D. ROOT MEAN SQUARE (R.M.S)</b>	305
<b>ANEXO E. ARTICULOS PUBLICADOS</b>	308



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.	
Figura 1. 1	Diagrama esquemático de un evaporador de efecto simple (Singh y Heldman, 2006)	21
Figura 1. 2	Proceso de separación mediante membranas	22
Figura 1. 3	Características y aplicaciones de los procesos de membranas	23
Figura 1. 4	Diagrama de flujo del proceso de criocentración, Sánchez (2011b)	24
Figura 1. 5	Diagrama de fase. Alimento a presión constante donde temperatura de congelación del agua es función de la concentración del soluto	26
Figura 1. 6	Área de punto de congelación para zumos, Auleda (2008)	27
Figura 1. 7	Conductividad térmica efectiva de soluciones de glucosa Miyawaki (2001a)	30
Figura 1. 8	Evolución de la temperatura durante la congelación Felow (1993)	33
Figura 1. 9	Columna Phillips desarrollado por Arnold 1945; Tero (2004)	36
Figura 1. 10	(A) Esquema de un proceso de criocentración en suspensión; (B) la estructura interna de un intercambiador concéntrico de superficie rascada	37
Figura 1. 11	(A) Cristalizador. (B) Columnas de lavado	38
Figura 1. 12	Esquema del proceso de criocentración por congelación parcial y deshielo, Burdo et al (2008)	39
Figura 1. 13	Esquema del proceso de criocentración por congelación total y deshielo	39
Figura 1. 14	Criocentración progresiva por congelación vertical	40
Figura 1. 15	Criocentración progresiva vertical tubular con flujo circulante	41
Figura 1. 16	Criocentración en capa en película descendente	42
Figura 1. 17	(A) Inclusión de solutos en el hielo. (B) Crecimiento de hielo sobre superficie refrigerada y perfil de temperaturas Sánchez (2011)	44
Figura 1. 18	Esquema del proceso de criocentración en película descendente de forma continua descrito por Flesland (1995) Concentración de 1.513 kg/h de zumo de naranja.	47
Figura 1. 19	Cambios de temperatura durante el deshielo Felow (1993)	48
Figura 1. 20	Volumen obtenido a lo largo del tiempo de deshielo de la sacarosa con $ff$ de 167 $m^{-1}$ , Temperatura de deshielo 20 °C y SMFI de 1.0 °Brix. Gulfo et al (2013)	49
Figura 4.1	Esquema básico del proceso de criocentración Hernández et al (2008)	53
Figura 4.2	Esquema del compresor hermético del equipo de criocentración	54
Figura 4.3	Condensador instalado en el equipo de criocentrador	55
Figura 4.4	Esquema de placas evaporadoras de criocentrador	55
Figura 4.5	Descripción esquemática de válvula de expansión	56
Figura 4.6	Recipiente anti-golpe de líquido	57

Figura 4.7	Recipiente de líquido y válvula de seguridad	57
Figura 4.8	Bomba centrífuga instalada	60
Figura 4.9	Esquema de las placas utilizadas en los ensayos de crioconcentración	64
Figura 4.10	Extracción de muestras de las tres zonas de la capa de hielo	65
Figura 4.11	Esquema de la distribución de soluto en la capa de hielo	65
Figura 4.12	Esquema de estufa de laboratorio	66
Figura 5.1	Esquema básico de la metodología utilizada en el proceso de crioconcentración y deshielo fraccionado	75
Figura 5.2	Distribución de soluto en la capa de hielo. A, resultados del hielo obtenido con una etapa de concentración de 14,8 a 18,2 °Brix. B, Ensayos realizados por Chen P et al (1998) con concentración de 20 °Brix. Solute sacarosa	78
Figura 5.3	Perfiles de temperatura y concentración en la capa de hielo Chen P. et al (1998)	80
Figura 5.4	Eficiencia y el coeficiente de distribución del proceso de crioconcentración	81
Figura 5.5	Punto de congelación de fructosa, glucosa y sacarosa	85
Figura 5.6	Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 20 °C	90
Figura 5.7	Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 25 °C	93
Figura 5.8	Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 30 °C	95
Figura 5.9	Eficiencia y coeficiente de distribución $K_a$ , del proceso de crioconcentración y promedio de azúcares básicos ( $f$ , $g$ , $s$ ) a temperatura de 20 °C, 25 °C y 30 °C	97
Figura 5.10	Deshielo de sacarosa con $ff$ de $167 \text{ m}^{-1}$ , temperatura de proceso de 20 °C y la fracción de masa de soluto en el hielo de 1,3 °Brix	99
Figura 5.11	Relación de porcentajes promedio de azúcares básicos ( $f$ , $g$ , $s$ ) entre tiempo / volumen acumulado, tiempo / soluto acumulado en la cuatro etapas del proceso de crioconcentración y temperaturas de deshielo	100
Figura 5.12	Esquema del método de ensayos de deshielo fraccionado de las capas de hielo a temperatura de 20 °C	101
Figura 5.13	$K$ frente SMFI (°Brix) para las cuatro etapas de proceso a temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C	105
Figura 5.14	Valores medios de: tiempos acumulados, índices e índices acumulados para $f$ , $g$ , $s$	106
Figura 5.15	Valores promedios de tiempos acumulados e índice de concentración de la 4 etapa del proceso de crioconcentración para soluciones de $f$ , $g$ , $s$ , ( $ff = 187 \text{ m}^{-1}$ , 7,7 °Brix, 30 °C) y para el zumo de melocotón simulado ( $s$ ) ( $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ , 8,2 °Brix, 30 °C)	108
Figura 5.16	Algoritmo para el cálculo de una etapa de un proceso de concentración por congelación	109
Figura 5.17	Aplicación del proceso de cálculo para el zumo de naranja	110

## INDICE DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1.1	Comparación entre los métodos básicos para la concentración de alimentos líquidos	25
Tabla 1.2	Proporción de azúcares en zumos de fruta y punto de congelación de zumos de pera, manzana y melocotón.	27
Tabla 1.3	Valores de viscosidad de algunos fluidos alimentarios	28
Tabla 1.4	Relaciones de la densidad en función de la temperatura de algunos componentes de los alimentos	29
Tabla 1.5	Tipos de cristalizadores empleados en la concentración por congelación	35
Tabla 1.6	Resultados de crioconcentración progresiva con diferentes fluidos	41
Tabla 1.7	Comparación entre crioconcentración en capa en película descendente y crioconcentración en suspensión	42
Tabla 1.8	Resultados experimentales de ensayos de crioconcentración en capa. Retención de solutos	43
Tabla 4.1	Características de compresor marca Electrolux, modelo TFH3531Z	54
Tabla 4.2	Comparación de las principales características de refrigerantes R – 507 y R - 502	59
Tabla 4.3	Características de Refractómetro Atago DBX - 55	61
Tabla 4.4	Datos técnicos de Data Logger Testo 177-T4	62
Tabla 4.5	Características de Termómetro Beckman	63
Tabla 4.6	Proporción de azúcares en los zumos de frutas	64
Tabla 4.7	Correlaciones para estimar la corrección del tiempo de deshielo	70
Tabla 5.1	Etapas del proceso de crioconcentración	75
Tabla 5.2	Características generales del hielo obtenido del proceso de crioconcentración	77
Tabla 5.3	Comparación entre los valores de ensayos y los resultados obtenidos por Chen P. et al (1998)	78
Tabla 5.4	Resultados de la distribución del soluto en la masa del hielo	79
Tabla 5.5	Concentración del fluido al final de cada etapa de proceso y SMFI	81
Tabla 5.6	Variables del proceso de corrección de tiempo y tiempo corrector	84
Tabla 5.7	Tiempos de deshielo corregidos, volumen y concentración a temperatura de 20 °C	86
Tabla 5.8	Tiempos de deshielo corregidos, volumen y concentración a temperatura de 25 °C	87
Tabla 5.9	Tiempos de deshielo corregidos, volumen y concentración a temperatura de 30 °C	88
Tabla 5.10	Concentración e índice de concentración a temperatura de 20 °C	89
Tabla 5.11	Concentración e índice de concentración a temperatura de 25 °C	92
Tabla 5.12	Concentración e índice de concentración a temperatura de 30 °C	94

Tabla 5.13	Parámetros resultantes del ajuste al modelo sigmoide descrito en la ecuación (5.1)	100
Tabla 5.14	Tiempos de deshielo (sin corrección) de las capas de hielo de la cuarta etapa de proceso de crioconcentración	102
Tabla 5.15	Variables del proceso de corrección de tiempo y tiempo corrector	102
Tabla 5.16	Tiempos de deshielo (corregidos) e índice de concentración de las capas de hielo de la cuarta etapa de proceso de crioconcentración	102
Tabla 5.17	Valores medios de soluciones de $f$ , $g$ , $s$ , para las cuatro etapas del proceso	104
Tabla 5.18	Fracción de deshielo de melocotón ( $s$ ) e índice de concentración con $\bar{f}$ 195 m <sup>-1</sup> , SMFI 8,2 °Brix 7,7 a temperatura de 30 °C	107

## I. RESUMEN

La investigación sobre el proceso de crioconcentración de fluidos alimenticios es un área importante de estudio.

La crioconcentración es un proceso de concentración de fluidos mediante la separación del agua en forma de hielo. La crioconcentración, permite obtener un producto de alta calidad organoléptica, debido a las bajas temperaturas utilizadas durante el proceso. Sin embargo, una característica de la técnica es la limitación de la concentración (de 45 a 55 °Brix) por el aumento de la viscosidad del fluido y a la retención de solutos en el hielo.

El objetivo de la presente memoria de tesis es investigar la recuperación de solutos en el hielo proveniente de un crioconcentrador en capa en película descendente, utilizando la técnica de deshielo fraccionado.

Los trabajos se desarrollan en tres fases:

- a) En la primera fase se realizó la concentración del fluido en un crioconcentrador en capa en película descendente.
- b.) En la segunda fase, se realizaron los deshielos fraccionados a temperaturas controladas (20, 25 y 30 °C).
- c) La tercera fase permitió establecer, a partir de los resultados obtenidos, un procedimiento de cálculo que relaciona la fracción de deshielo con la concentración y el tiempo, permitiendo operar por semejanza con los hielos de zumos obtenidos en un proceso de crioconcentración.

Los resultados presentados en este trabajo no sólo son de interés académico sino que también tiene importancia tecnológica debido a que permite simular el proceso de recuperación de solutos retenidos en el hielo de zumos de fruta y obtener: el tiempo de deshielo, la concentración y la cantidad obtenida para cualquier fracción de la masa del hielo. Esto permite realizar estudios sobre la recuperación de las distintas fracciones, con el fin de establecer la mejor viabilidad económica.

**Palabras clave:** Crioconcentración, temperatura de deshielo, deshielo fraccionado, índice de concentración, tiempo de deshielo, factor de forma, fracción de masa de soluto en el hielo.

## I. RESUM

La recerca sobre el procés de crioconcentració de fluids alimentaris és un tema d'estudi important.

La crioconcentració és un procés de concentració dels fluids a través de la separació de l'aigua en forma de gel. La concentració per congelació, permet obtenir un producte d'alta qualitat organolèptica, degut a les baixes temperatures utilitzades durant el procés. No obstant això, una característica de la tècnica és la limitació de la concentració (de 45 a 55 °Brix) mitjançant l'augment de la viscositat del fluid i la retenció de soluts en el gel.

La memòria d'aquesta tesi pretén investigar la recuperació de soluts retinguts en el gel d'un crioconcentrador de pel·lícula descendent, utilitzant la tècnica de desgel fraccionat.

Els assaigs es duen a terme en tres fases:

- (a) en la primera fase es concentra el fluid en un crioconcentrador de pel·lícula descendent.
- (b) en la segona fase, s'estudien els desgels fraccionats a temperatures fixades (20, 25 i 30 °C).
- (c) la tercera etapa va permetre establir, basada en els resultats obtinguts, un procediment de càlcul que relaciona la fracció de desgel amb la concentració i el temps, permetent operar per semblança amb els gels de suc obtinguts d'un procés de crioconcentració.

Els resultats presentats en aquest treball no només són d'interès acadèmic, també té importància tecnològica ja que permet simular el procés de recuperació de soluts retinguts en gel procedent de suc de fruita i aconseguir: temps de descongelació, concentració i la quantitat obtinguda per qualsevol fracció de massa de gel. Això permet dur a terme estudis sobre la recuperació de les diferents fraccions, per tal d'establir la millor viabilitat econòmica.

**Paraules clau:** crioconcentració, temperatura de desgel, desgel fraccionat, index de concentració, temps de desgel, factor de forma, fracció de massa de solut en el gel.

## II. ABSTRACT

Research about the cryoconcentration process of food fluids is an important area of study.

Cryoconcentration is a concentration process of fluids by separating water into ice shape. Freeze concentration, allows to obtain an organoleptic product of high quality, because of the low temperatures used during processing. However, a feature of the technique is the limitation of the concentration (from 45 to 55 °Brix) due to increasing the viscosity of the fluid and solutes retention in the ice.

The objective of the current memory thesis is to investigate the recovery of solutes in the ice from a cryoconcentrator in falling-film layer, using the technique of fractional melting.

The works are developed into three phases:

- a) In the first phase, the concentration of the fluid in a cryoconcentrator (Freeze concentrator) in falling- film layer was made.
- b.) In the second phase, fractional thaws at controlled temperatures (20, 25 and 30 °C) were performed.
- c) The third phase allowed to establish, from the results, a method of calculation that involves melting fraction with concentration and time, allowing resemblance to operate with the ice of juices obtained by freeze concentration process.

The results presented here are not only of academic interest, but also has technological importance, because it allows to simulate the recovery process of retained solutes in the ice of fruit juices and get: time thaw, the concentration and amount obtained for any fraction of the mass of ice. This allows studies on the recovery of the different fractions, in order to establish the best economic viability.

Key words: Freeze concentration, thawing temperature, fractionated thawing, concentration index, thawing time, form factor, solute mass fraction in the ice.

### III. PUBLICACIONES

Los siguientes artículos corresponden a publicaciones en revistas científicas y representan los resultados de los objetivos específicos de la presente memoria de tesis.

**ARTÍCULO 1:** Gulfo, R. Auleda, J.M. Moreno, L. Ruiz, Y. Hernandez, E. and Raventós, M. MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATION. RECOVERY OF SOLUTES OCCLUDED IN THE ICE AND DETERMINATION OF THAWING TIME. Food Science and Technology International. DOI: 10.1177/1082013213489127 (online 19 June 2013).

**ARTÍCULO 2:** Gulfo R, Auleda JM, Hernández E, Raventos M. 2014. CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR: TIME AND CONCENTRATION (Admitido). En la revista Innovative Food Science and Emerging Technologies.



## IV. ACRÓNIMOS

Símbolo	Descripción	Unidad
$a$	longitud de la capa de hielo	m
$b$	ancho de la capa de hielo	m
$a_c, b_c, c_c, d_c$	coeficientes experimentales	
$b_{ni}$	variable de corrección del comportamiento no ideal	
$b_2$	constante de tiempo	$s^{-1}$
$e$	espesor de las capas de hielo	m
$f$	fructosa	
$ff$	factor de forma	$m^{-1}$
$g$	glucosa	
$h$	calor de deshielo	kJ
$k$	conductividad térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
$p$	peso de la muestra	kg
Peach ( $s$ )	zumos de melocotón simulado	
$r$	coeficiente de correlación de Pearson	
$s$	sacarosa	
$t$	tiempo	minutos
$t_{exp}$	Tiempo de caída de la primera gota	segundos
$t_1$	Tiempo empleado en caer la primera gota	minutos
$t_2$	Tiempo empleado de $-18\text{ }^\circ C$ hasta alcanzar la temperatura de la placa	minutos
$v_{des}$	tasa de deshielo	mL/s
$v_g$	velocidad media de crecimiento del hielo puro	$\mu m/s$
$w_g$	tanto por ciento de peso del soluto en el hielo	%
$w_s$	tanto por ciento del peso del soluto en la disolución	%
$A_c, B_c, C_c$	Constantes características de cada zumo utilizadas en la correlación de Chen	
$IA$	Índice acumulado	
$AT$	Tiempo acumulado	minutos
$^\circ Bx$	Grados Brix	$^\circ Brix$
$C$	Concentración	$^\circ Brix$
$C_{LI}$	Concentración del fluido al inicio de la etapa del proceso	$^\circ Brix$

$C_{LF}$	Concentración del fluido al final de la etapa del proceso	°Brix
CI	Índice de concentración	
$C_{e1}$	Calor específico de carbohidratos	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{e2}$	Calor específico del hielo	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_v$	Coefficiente de variación	
$E$	Eficiencia	%
FPD	Depresión del punto de congelación	°C
HPLC	Cromatografía líquida de alto rendimiento	
$H_{ice}$	Calor latente de fusión del hielo	$335 \text{ kJ kg}^{-1}$
$K$	Coefficiente de deshielo	$\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
$K_{dist}$	Coefficiente de distribución	%
$K_c$	Depresión del punto de congelación del agua	°C · kg/mol
$K_T$	Coefficiente de temperatura de deshielo	°C
$K_\alpha$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	
IL	Capas de hielo	
M	Masa	kg
$M_s$	Peso molecular	g/mol
PS	Etapas del proceso de crioconcentración	
PFC	Crioconcentración progresiva	
$PME$	Peso molecular efectivo	g
$Q$	Flujo de calor	W
R	Radio	m
RMS	Error medio cuadrático (Root Mean Square)	%
SSHE	Intercambiador de calor de superficie rascada	
S	Área de superficie	$\text{m}^2$
SMFI	Fracción de masa de soluto en el hielo	°Brix
TS	Muestras de ensayo	
TT	Tiempo de deshielo	minutos
$T$	Temperatura	°C
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	°C
$T_{CI}$	Temperatura del hielo con solutos retenidos	°C

$T_{ats}$	Temperatura media de la muestra	-18 °C
$T_{ref}$	Temperatura de cámara frigorífica	-18 °C
$T_{thawing}$	Temperatura de deshielo	°C
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$\overline{V}_E$	Valor experimental	
$\overline{V}_p$	Valor de predicción	
$X_c$	Fracción de masa de soluto	kg/kg
$X_{ice}$	Fracción de masa de hielo	kg/kg
$X_t$	Total fracción de masa	kg/kg
$X_1, X_2, X_3, X_4,$	Constantes características	
Símbolos Griegos		
$\alpha$	Coefficiente individual de transmisión calor por convección o coeficiente de película	W·m <sup>-2</sup> · °C <sup>-1</sup>
$\sigma$	Desviación estándar	
$\mu$	Media	
$\rho_c$	Densidad de carbohidratos en función de la temperatura	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ice}$	Densidad del hielo	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{Cl}$	Densidad del hielo (-4.0 °C)	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{-18}$	Densidad del hielo (-18 °C)	kg/m <sup>3</sup>
$\theta_{1-2}$	Numero adimensional	
$\Delta T$	Incremento de la temperatura	°C

# 1. INTRODUCCION

El procesamiento de alimentos líquidos, implica la combinación de procedimientos que permiten cambios en sus condiciones iniciales. Estos procedimientos están convenientemente clasificados como operaciones unitarias. Cada operación unitaria tiene un efecto específico, identificable y previsible en un determinado alimento. La concentración de soluciones acuosas es una de las principales operaciones unitarias en la industria alimentaria. El proceso consiste en la eliminación de agua del fluido alimenticio con el fin de aumentar el contenido de sólidos solubles. Las ventajas más importantes son:

- Reducir el peso y el volumen del alimento.
- Reducir costos de almacenamiento, envasado, manipulación y transporte.
- Mejorar la estabilidad del producto.
- Acondicionar el producto para su posterior procesamiento.

Básicamente, son tres métodos los que se utilizan para concentrar fluidos alimenticios:

- Evaporación o eliminación de agua como vapor.
- Osmosis inversa o extracción de agua como líquido.
- Crioconcentración o eliminación de agua como sólido (hielo).

De los procesos de concentración, la crioconcentración es la técnica más conveniente para eliminar el agua de los alimentos líquidos con mínimos cambios en la calidad del producto. La crioconcentración es una operación unitaria que tiene como finalidad concentrar fluidos mediante la disminución de la temperatura. La principal ventaja del método en comparación con la evaporación, es la conservación de los componentes volátiles y la reducción de la degradación del alimento por efecto de las bajas temperaturas utilizadas durante el proceso, esto hace que la técnica sea muy atractiva para el procesamiento de zumos de fruta. Sin embargo se ha considerado que la técnica no ha alcanzado su potencial debido a los complicados requerimientos operativos (Flesland 1995; Nakagawa et al 2010b).

La presente memoria de tesis analiza la recuperación de solutos retenidos en el hielo procedente de un crioconcentrador de placas. Mediante la aplicación del deshielo fraccionado, se obtienen recuperaciones de solutos que aumentan el rendimiento general del sistema.

## 1.1. LA EVAPORACIÓN

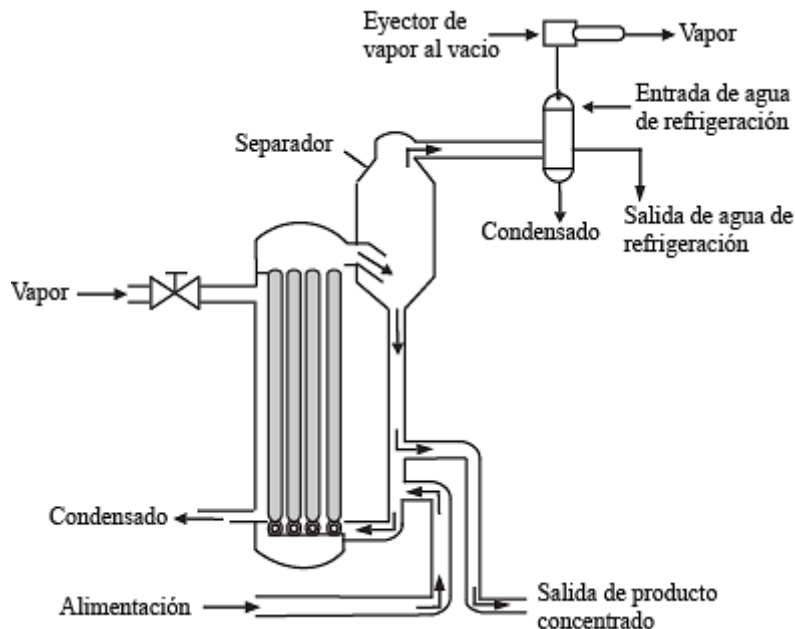
La evaporación es una operación importante en la industria de los alimentos. Generalmente se utiliza para obtener productos líquidos concentrados a partir de la eliminación de agua de los alimentos líquidos diluidos. El proceso, consiste en aumentar la concentración de componentes no volátiles del fluido alimenticio mediante la vaporización del disolvente volátil por ebullición. La separación de componentes se consigue aprovechando la diferencia de volatilidades entre el agua y los solutos (Fellows 1993). Durante la evaporación, el vapor transmite al alimento el calor suficiente para que éste alcance la temperatura de ebullición (calor sensible), una vez alcanzada ésta, el vapor suministra al alimento calor latente de vaporización, formándose burbujas de vapor que finalmente son eliminadas en la superficie del líquido (Fellows 1993).

Los principales objetivos de la evaporación en la industria alimenticia son:

- Reducir los volúmenes de almacenamiento y transporte de alimentos líquidos.

- Pre-concentrar alimentos antes del secado, congelación o esterilización.
- Estabilidad en el almacenamiento mediante la reducción de la actividad del agua.
- Proporcionar zumos concentrados para el uso de los consumidores y para su posterior transformación.

En la figura 1.1 se muestra un esquema simplificado de un evaporador.



**Fig. 1.1** Diagrama esquemático de un evaporador de efecto simple (Singh y Heldman, 2006).

Los sistemas de evaporación (figura 1.1) están constituidos básicamente por:

- Intercambiador de calor para transferir calor de una corriente fluida a otra.
- Separador en el que el vapor se separa de la fase líquida concentrada.
- Condensador para condensar el vapor y eliminar el condensado del sistema.
- Dispositivo de vacío para retirar los gases no condensables y mantener constante la temperatura de evaporación.

La selección de un evaporador debe incluir los siguientes factores, Lau (1999):

- Tasa de producción (cantidad de agua removida por unidad de tiempo).
- Grado de concentración requerida.
- La sensibilidad al calor del producto en relación al tiempo y la temperatura de evaporación.
- Facilidad de limpieza.
- La fiabilidad y la simplicidad de la operación.
- Tamaño del evaporador.
- Capital y costos de operación.

- La calidad del producto.

Los equipos de evaporación se clasifican en: evaporadores de circulación natural, evaporadores de circulación forzada, evaporadores de tubos largos, evaporadores de placas, evaporadores de flujo en expansión, evaporadores de película delgada mecánica, evaporadores a baja temperatura Brennan et al (1998).

El tratamiento térmico inadecuado en los alimentos líquidos puede dar lugar a efectos indeseables: pérdida de aroma, degradación de vitaminas, proteínas, etc.

La evaporación es una técnica con amplia aplicación en la industria de los alimentos, (zumo de frutas, leche, café, etc.), principalmente por los altos valores de concentración que se alcanzan >50% tabla 1.1, sin embargo, debido al tratamiento térmico relativamente severo aplicado durante el proceso, experimenta efectos desfavorables en los componentes nutritivos, propiedades sensoriales y parámetros tecnológicos.

## 1.2. TÉCNICA DE MEMBRANAS

La técnica de membrana se desarrolló aproximadamente en 1960 para producir agua potable a partir de agua de mar o salobre (Cheryan 1999). La industria alimenticia se ha beneficiado de esta tecnología, especialmente en el sector lácteo y en el sector de las bebidas, (clarificación y concentración de zumos).

La técnica hace referencia a diferentes procesos que utilizan membranas semipermeables como mecanismo de separación entre dos fluidos (figura 1.2). Las fuerzas impulsoras de separación pueden ser: las diferencias de concentración o de presión entre ambos lados de la membrana. Algunos elementos importantes en la aceptación de los procesos de membrana en la industria de transformación alimenticia son: la eficiencia energética, la conservación de calidad de los alimentos, la ejecución del proceso en condiciones térmicas ambientales, la mínima generación de residuos, pocas exigencias de espacio y la facilidad de automatizar (Rohit y Bijan, 2002).

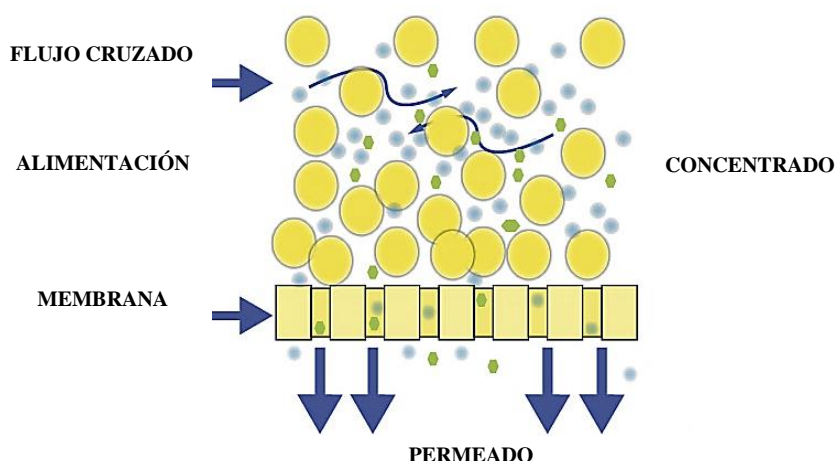


Fig. 1.2 Proceso de separación mediante membranas

Dependiendo del tamaño de poro, la tecnología de membranas se puede subdividir en cuatro procesos: micro-filtración, ultrafiltración, nano-filtración y osmosis inversa.

Los procesos de membrana que se aplican con mayor frecuencia en la industria alimenticia son: la ultrafiltración y osmosis inversa. Son similares en el hecho de que la fuerza impulsora del transporte a través de la membrana es la presión aplicada al líquido alimenticio (Felow 1993).

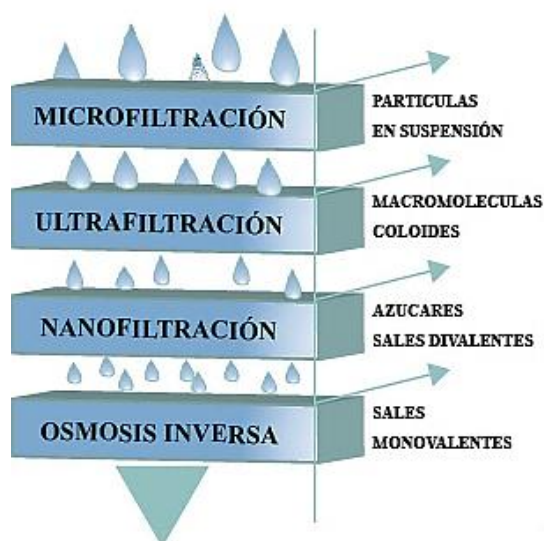
La ultrafiltración se utiliza para el fraccionamiento (separación de diversos solutos basados en el peso molecular), la clarificación de zumos de fruta y la recuperación de proteína del lacto-suero.

La osmosis inversa se utiliza generalmente para la purificación de agua, aunque, también se utiliza en la industria de la bebida (vino, cerveza, zumos de frutas, etc.), la industria láctea (concentración de proteína del lacto-suero) y en menor medida, en la transformación de productos derivados del huevo (Brennan et al 1998; Echavarría et al 2011).

Para obtener una eficiencia satisfactoria del proceso de separación, la elección apropiada de la técnica es sumamente importante, por tanto deben considerarse los siguientes factores:

- Características del alimento.
- Material de la membrana.
- Propiedades de la membrana.
- El diseño.
- Factores de ingeniería
- Las incrustaciones y la limpieza.

El rendimiento del proceso está influenciado por la selectividad de la membrana y la velocidad de flujo de componentes a través de la membrana. Estos aspectos dependen de la estructura física (tipo de matriz, tamaño de los poros), carga de la membrana y afinidad hacia los componentes de la solución, en la figura 1.3 se puede observar algunas características y aplicaciones de los procesos de membranas.



**Fig. 1.3** Características y aplicaciones de los procesos de membranas

Como se ha mencionado, la selectividad de la membrana es el fundamento de la técnica, una buena membrana deja pasar la mayor parte de agua (disolvente) y retiene los sólidos y los compuestos volátiles. Desafortunadamente, no siempre es el caso, ciertas membranas (ósmosis inversa) dejan pasar

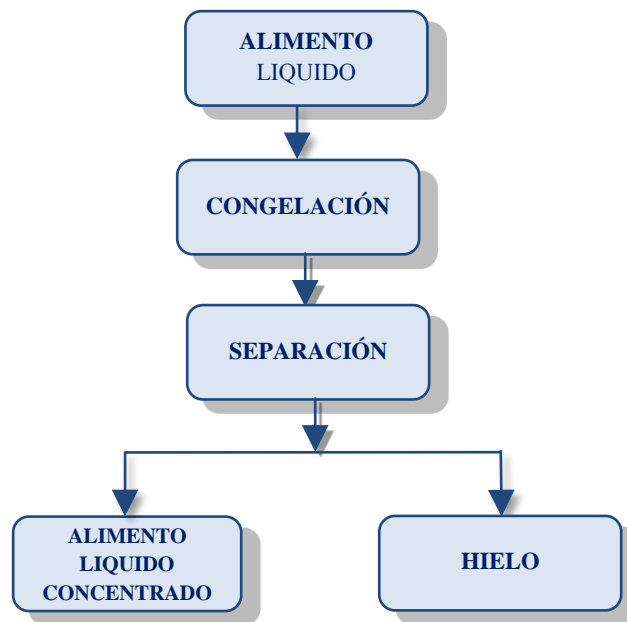
moléculas tales como azúcares, aminoácidos libres y vitaminas solubles en agua (Aider et al 2007). Esta dificultad, junto a los esfuerzos por alcanzar altos valores de concentración, (limitación de la concentración 30%) tabla 1.1 el ensuciamiento de las membranas, la reducción severa en los flujos debido a una impregnación del fluido sobre las membranas y la resistencia limitada de las membranas a la presión hidráulica, han acrecentado las dificultades en la aplicación de la técnica.

### 1.3. CRIOCONCENTRACIÓN O CONCENTRACIÓN POR CONGELACIÓN

La tecnología de crioconcentración o concentración por congelación, es un proceso de interés en la industria de los alimentos líquidos. Desde el punto de vista de calidad, es sin duda la técnica de concentración, que permite conservar al máximo las cualidades organolépticas y nutricionales de los productos alimenticios líquidos (Aider et al 2007). Consiste en la concentración de sólidos solubles a partir de una solución acuosa. Implica la disminución gradual de la temperatura hasta conseguir una congelación parcial o congelación cuasi total del fluido alimenticio.

La concentración por congelación de alimentos líquidos se ha empleado en una amplia gama de productos, aunque no todos son explotados comercialmente. Estos incluyen zumos de frutas, productos lácteos, vinagre, café, té, cerveza, vino y otros productos (Heldman y Hartel, 1998).

El proceso de crioconcentración de un alimento líquido comprende dos etapas fundamentales (figura 1.4): Congelación del alimento líquido sin llegar al punto eutéctico y separación (Sánchez et al 2011a).



**Fig. 1.4** Diagrama de flujo del proceso de crioconcentración, Sánchez 2011b

La máxima eficiencia del proceso se alcanza con la máxima concentración del fluido y la mínima cantidad de soluto retenidos en el hielo (Raventós et al 2007; Hernández 2008; Petzold y Aguilera 2009).

La eficiencia se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$E (\%) = \frac{C_{LF} - SMFI}{C_{LF}} \quad (1.1)$$

Donde:



$E$  = Eficiencia

$SMFI$  = Fracción de masa de soluto en el hielo (°Brix).

$C_{LF}$  = Concentración del fluido al final del proceso (°Brix).

Las principales dificultades del proceso de crioconcentración son:

- Altos costes de los equipos.
- La limitación de concentración de aproximadamente 50% (tabla 1.1), debido a la alta viscosidad, y la inclusión de solutos en los cristales de hielo.

Schwartzberg (1990); Van Mil y Bouman (1990); Hartel y Chung (1993); Flesland (1995); Zhonglai y Hartel (1995); Chen et al (1998); Liu et al (1999); Miyawaki et al (2005); Habib y Mohammed (2006); Raventós et al (2007); Sánchez et al (2011), han orientado la investigación de la técnica de crioconcentración en dos aspectos básicos: controlar la nucleación y el crecimiento de cristales de hielo, para conseguir separar los cristales de hielo de forma selectiva del líquido concentrado, con la mínima cantidad de solutos retenidos.

Sin embargo, Sánchez et al (2009, 2010); Petzold y Aguilera (2009); Auleda et al (2008); Miyawaki et al (2012), sugieren que el avance de la técnica de crioconcentración esta más asociada con la desarrollo de características o mecanismos de recuperación de solutos retenidos en el hielo que sean sencillos y económicos en cuanto a su aplicación, es decir, establecer alternativas que permitan hacer el proceso mas eficiente.

**Tabla 1.1.** Comparación entre los métodos básicos para la concentrar de alimentos líquidos

Método	Principio	Consumo teórico - energía (kJ/g agua)	Máxima concentración (°Brix)	Calidad	Costo
Evaporación	Fase de separación Gas-liquido	2,6	>50	Baja	Baja
Osmosis inversa	Separación por membrana	≈ 0	≈ 30	Media	Media
Crioconcentración	Fase de separación Solido - liquido	0,33	≈ 50	Alta	Alta

Fuente: Miyawaki (2001a)

### **1.3.1. Propiedades básicas en el proceso de crioconcentración**

En la industria alimenticia, es de gran importancia conocer y prever el efecto reciproco de determinados procesos en las propiedades de los alimentos, fundamentalmente para el diseño y control de equipos.

Antes de discutir sobre las etapas del proceso de crioconcentración, debemos conocer algunas propiedades de los alimentos que tienen especial relevancia en el proceso como son: el punto de congelación, viscosidad, densidad, calor específico y conductividad térmica.

### 1.3.1.1. Punto de Congelación

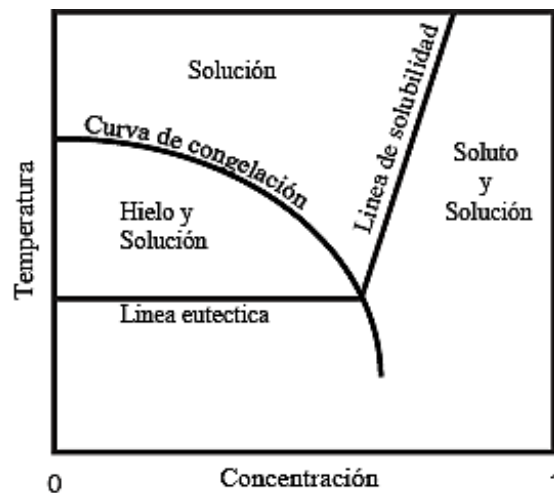
El punto de congelación de soluciones acuosas permite controlar el estado y evolución de una serie de propiedades relacionadas con la preservación, calidad, integridad y valor nutricional de los alimentos. De igual forma, permite, analizar, estimar, o predecir características termo-físicas de los fluidos alimenticios a partir de correlaciones de carácter general o específico.

El diseño de un sistema de concentración por congelación debe tener en cuenta el punto de congelación del fluido alimenticio (Heldman y Hartel 1998).

Se define como la temperatura donde, los estados líquido y sólido de la sustancia alimenticia están en equilibrio a una presión dada (James et al 2005).

El diagrama de fases (figura 1.4), es una representación sencilla de los sistemas en equilibrio. El verdadero equilibrio rara vez se logra aunque puede ser, aproximado (Tiller 1963; Mahmutoglu y Esin 1996).

El análisis térmico, a partir del diagrama de fases, permite visualizar y determinar diferentes estados de los alimentos en función del contenido de agua, la concentración de solutos y la temperatura Rahman (2009). La figura 1.5, representa el diagrama de fases de una solución a presión constante. Se puede observar la curva de congelación y las regiones de temperatura y concentración donde la crioconcentración es factible Hernández (2008). La curva de congelación describe el equilibrio entre la solución y el hielo formado. Cualquier punto de la curva representa el punto de congelación de la solución, a una temperatura y concentración determinada.



**Fig. 1.5** Diagrama de fase. Alimento a presión constante donde temperatura de congelación del agua es función de la concentración del soluto, (Sun 2011).

El punto de congelación, siendo una propiedad coligativa, está influenciado por la fracción molar del soluto presente en la solución y no por la masa. La depresión del punto de congelación (FPD) es inversamente proporcional (aproximadamente) al peso molecular del soluto en una solución. Un gramo de glucosa (con aproximadamente el doble del número de moles de sacarosa) disminuye más el punto de congelación que un gramo de sacarosa (Auleda 2008). Por ejemplo en la tabla 1.2 se observa que a una misma concentración, los zumos de manzana y pera, con especial influencia de la fructosa y la glucosa como solutos, presentan menor punto de congelación con respecto al zumo de melocotón, donde el principal soluto es la sacarosa. Las proteínas, siendo moléculas muy grandes comparativamente, no tienen ningún efecto mensurable sobre el punto de congelación Marshall et al (2003).

El tamaño del cristal de hielo en el fluido alimenticio también puede afectar el punto de congelación. Mientras que el hielo formado a partir de agua tiene un punto de congelación de 0 °C, fluidos alimenticios con cristales de hielo pequeños se sabe que tienen un punto de congelación ligeramente menor en comparación con fluidos con cristales más grandes (Cook y Hartel 2010).

**Tabla 1.2.** Proporción de azúcares en zumos de fruta y punto de congelación de zumos de pera, manzana y melocotón.

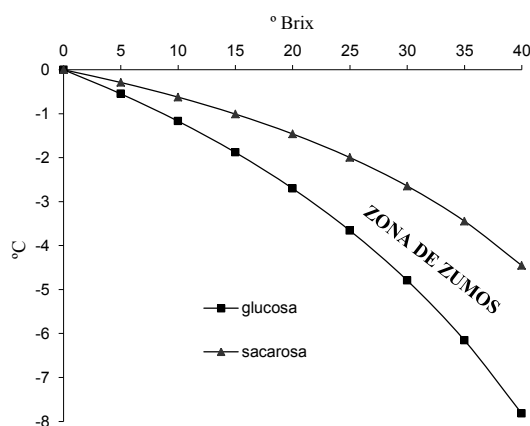
Proporción <sup>a</sup>	Zumo de Melocotón (%)	Zumo de Pera (%)	Zumo de Manzana (%)	° Brix	Zumo de Melocotón FPD <sup>b</sup> (°C)	Zumo de Pera FPD <sup>b</sup> (°C)	Zumo de Manzana FPD <sup>b</sup> (°C)
Glucosa	18,80 ± 0,20	39,00 ± 0,30	22,00 ± 0,16	10	-1,00	-1,05	-1,07
Fructosa	25,50 ± 0,15	52,50 ± 0,03	62,00 ± 0,22	15	-1,60	-1,80	-1,74
Sacarosa	55,70 ± 0,25	8,50 ± 0,40	16,00 ± 0,30	20	-2,05	-2,50	-2,50
				25	-2,70	-3,60	-3,20
				30	-3,25	-4,30	-4,10
				35	-4,20	-5,50	-5,20
				40	-5,60	-6,60	-6,70

Fuente: Auleda (2008) <sup>a</sup>Proporción (%) de azúcares básicos en zumos. <sup>b</sup>Depresión del punto de congelación

Las gráficas de punto de congelación para un determinado producto se trazan representando los resultados de cálculos que establecen el grado de concentración alcanzado (solutos), frente al correspondiente punto de congelación de la solución figura 1.6.

El punto de congelación, se puede estimar, en el caso de los alimentos, asumiendo la mezcla de sus componentes como un sistema binario (sólidos y agua), utilizando la composición media de los sólidos disueltos con mayor proporción que contribuyen a la depresión del punto de congelación.

La figura 1.6 Representa el modelo de curvas de congelación de la glucosa y sacarosa para zumos de fruta propuesto por Auleda (2008). Establece que cualquier punto de congelación de cualquier jugo debe estar en el área entre las dos curvas.



**Fig. 1.6** Área de punto de congelación para zumos, Auleda (2008)

### 1.3.1.2. Viscosidad

En diversas operaciones de procesamiento de alimentos, para seleccionar el equipo o equipos mas adecuados, es esencial conocer la viscosidad del fluido que se procesa. La viscosidad de zumos manifiesta cambios sustanciales durante el procesamiento. Esto es así, particularmente en procesos que implican calentamiento, enfriamiento, congelación, homogeneización y concentración.

La viscosidad aumenta en función del descenso de la temperatura y del aumento de la concentración (Vitali y Rao 1984, (zumo de naranja), Hernández et al 1995, (zumo de naranja), Shamsudin et al 2005, (zumo de guayaba), Magerramov et al 2006, (azucares y pectinas).

Según Constenla et al (1989) la viscosidad de un fluido es función de las fuerzas intermoleculares y de la interacción agua-soluto que restringe el movimiento molecular. Estas fuerzas dependen de espaciamentos intermoleculares y la fuerza de los enlaces de hidrógeno y son afectadas por los cambios en la concentración y la temperatura Azoubel et al (2004).

Es importante controlar, la viscosidad en función de la temperatura, la presión y la concentración, principalmente por la ineficiencia de la crioconcentración y otras operaciones (evaporación, osmosis inversa) cuando el producto se convierte en altamente viscoso. Por ejemplo durante la crioconcentración, la tasa de transferencia de calor se ve influenciada por la variación de la viscosidad. A medida que aumenta la viscosidad, menor será la tasa de transferencia de calor y como consecuencia mayor consumo de energía.

El incremento de viscosidad determina un límite máximo de concentración durante el proceso. Por tanto, a medida que la viscosidad aumenta, la capacidad para separar los cristales de hielo disminuye. En la crioconcentración de fluidos alimenticios la capacidad de separación del hielo del fluido concentrado es inversamente proporcional a la viscosidad del producto (Hernández 2008).

Valores experimentales de viscosidad para algunos fluidos alimentarios se presentan en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Valores de viscosidad de algunos fluidos alimentarios

Fluido	Composición (%)	Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa·s)		Observación
			40 °Brix	50 °Brix	
Zumo de Melocotón	Fructosa	-6 a 4	11,6 a	34,6 a	Fluidos newtonianos. Ecuación tipo Arrhenius
	Glucosa		21,0	64,0	
	Sacarosa				
Zumo de Manzana	Fructosa	-6 a 4	12,9 a	31,6 a	
	Glucosa		21,0	61,8	
	Sacarosa				
Zumo de Pera	Fructosa	-6 a 4	11,3 a	28,5 a	
	Glucosa		22,1	55,0	
	Sacarosa				

Fuente: Sánchez (2011)

Se encuentran disponibles diversos datos experimentales de viscosidad para fluidos alimenticios en, Saravacos (1970); Ibarz. et al (1987); Vitali y Rao (1984); Constenla et al (1989); Ibarz et al (1989); Lau et al (1999); Bayindirli (1992, 1993); Hernández et al (1995); Cepeda y Villarán (1999) Sogi (2003); Juszczak y Fortuna. (2004); Ruiz et al (2010).

### 1.3.1.3. Densidad

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen.

Las propiedades físicas de los alimentos como la densidad y sus respuestas a las condiciones del proceso son cruciales en el análisis de las operaciones que intervienen en el procesamiento de alimentos. La densidad es una indicación de cómo la materia se compone en determinado cuerpo. Los materiales con arreglos moleculares más compactos tienen densidades más altas. La densidad de los alimentos líquidos aumenta gradualmente con la concentración de la materia seca y la disminución de la temperatura del líquido, (Singh y Heldman 2006; Ramos e Ibarz 1998; (zumo de melocotón y naranja); Shamsudin et al 2005 (zumo de guayaba); Cepeda y Villarán 1999 (zumo de Malus floribunda); Telis-Romero et al 1998 (zumo de naranja de Brazil)).

La densidad del agua sólida (hielo) es menor que la densidad del agua líquida. Del mismo modo, la densidad de los alimentos congelados será menor que la densidad de los alimentos no congelados.

La densidad de una solución, generalmente se puede describir mediante la siguiente relación Miyawaki (2001a):

$$\rho = \frac{1}{\sum_i X_i / \rho_i} \quad (1.2)$$

Donde  $x_i$  y  $\rho_i$  son la fracción en peso y la densidad intrínseca de los componentes como: agua, hielo, carbohidratos, etc. En la literatura podemos encontrar diversos autores que establecen la variación de la densidad con respecto a la temperatura y la concentración para diferentes zumos de fruta Alvarado y Romero (1989); Bayindirli (1992, 1993); Ibarz y Miguelsanz (1989); Ramos e Ibarz (1998).

Ibarz y Barbosa, (2005) definen ecuaciones que relacionan la densidad en función de la temperatura y el contenido de sólidos solubles (tabla 1.4).

**Tabla 1.4.** Relaciones de la densidad en función de la temperatura de algunos componentes

Componente	Ecuación	Unidad	Fuente
Carbohidrato	$\rho_c = 1,5991 \cdot 10^3 - 0,31046 T$	(kg/m <sup>3</sup> )	Choi and Okos(1986b)
Hielo	$\rho_{ice} = 916,89 - 0,13071 T$	(kg/m <sup>3</sup> )	Choi and Okos(1986b)
Agua	$\rho_{agua} = 997,18 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,7574 \cdot 10^{-3} T^2$	(kg/m <sup>3</sup> )	Choi and Okos(1986b)
Zumos	$\rho_{Zumos} = 1.002 + 4,61Bx - 0,46T + 7,001 \cdot 10^{-3} T^2 + 9,175 \cdot 10^{-5} T^3$	(kg/m <sup>3</sup> )	Choi and Okos(1986b)

Fuente: Ibarz Barbosa (2005)

### 1.3.1.4. Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material alimenticio es una medida de su capacidad para conducir el calor. Modelos y datos de conductividad térmica son analizados por Ahmed y Rahman (2009); Miyawaki (2001b). La conductividad térmica de los fluidos alimenticios durante la crioconcentración se ve afectada por tres factores: composición del alimento, estructura y condiciones ambientales de elaboración. La mayoría de los alimentos con alto contenido de humedad tienen valores de conductividad térmica más cercana al agua (Singh y Heldman 2006).

El contenido de hielo juega un papel significativo en la conductividad térmica, debido a la magnitud relativa de las conductividades del hielo y el agua en los alimentos congelados. La conductividad térmica del hielo ( $2.220 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) es cuatro veces superior a la conductividad térmica del agua ( $0.583 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) Miyawaki (2001). La figura 1.7 muestra la conductividad térmica efectiva de soluciones de glucosa en estado sólido (hielo) y en estado líquido (fluido concentrado). En estado líquido, la conductividad térmica depende ligeramente de la concentración de soluto y levemente dependiente de la temperatura. En estado sólido, sin embargo, es fuertemente dependiente tanto de la concentración de soluto y de la temperatura Miyawaki (2001).

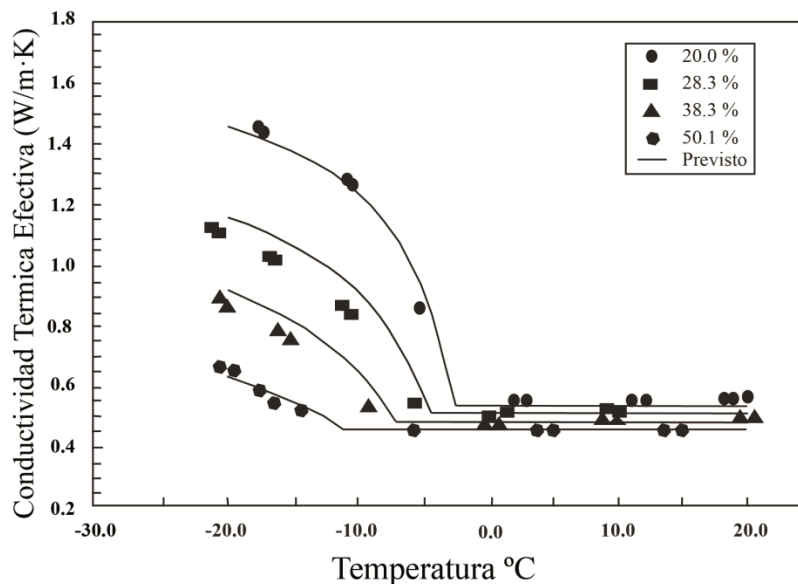


Fig. 1.7 Conductividad térmica efectiva de soluciones de glucosa, Miyawaki (2001a)

Algunas ecuaciones de predicción empíricas son útiles en los cálculos de procesos donde la temperatura cambia. Choi y Okos (1986), estableció la siguiente expresión que determina la conductividad térmica en función de la temperatura y la composición del producto:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i Y_i \quad (1.3)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica de un material alimenticio tiene  $n$  componentes,  $k_i$  es la conductividad térmica del  $i$ -ésimo componente,  $Y_i$  es la fracción de volumen del componente  $i$ -ésimo, obtenido de la siguiente manera:

$$Y_i = \frac{X_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^n (X_i / \rho_i)} \quad (1.4)$$

Donde  $X_i$  es la fracción en peso y  $\rho_i$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) del  $i$ -ésimo componente.

### **1.3.1.5. Calor específico**

El calor específico es una parte esencial del análisis térmico en el procesamiento de alimentos. El calor específico de un alimento aumenta a medida que aumenta el contenido de humedad del producto. Se define como la cantidad de calor que gana o pierde un producto por una unidad de masa para alcanzar un cambio en la temperatura de una unidad. Para procesos donde se lleva a cabo un cambio de estado, como la congelación o deshielo, se utiliza el calor específico aparente. El calor específico aparente incorpora además del calor involucrado en el cambio de estado el calor sensible Singh y Heldman (2006).

Se dispone de datos publicados que proporcionan valores de calor específico para algunos alimentos en Singh y Heldman (2006).

Otra forma de obtener datos o valores de calor específico es utilizar ecuaciones predictivas. Las ecuaciones de predicción son expresiones empíricas, obtenidas mediante la recopilación de datos experimentales fundamentados en modelos matemáticos. Estos modelos matemáticos se basan en uno o más constituyentes del alimento. Singh y Heldman (2006) propusieron la siguiente expresión basada en los componentes de un producto alimenticio:

$$C_{ep} = 1,424X_h + 1,549X_p + 1,675X_f + 0,837X_a + 4,187X_w \quad (1.5)$$

Donde  $X$  es la fracción de masa; los subíndices son:  $h$ , hidratos de carbono,  $p$ , proteínas,  $f$ , grasa,  $a$  es ceniza y  $w$  la humedad.

Para procesos, donde hay cambios de temperatura, hay que utilizar modelos predictivos de calor específicos que incluyan la temperatura. Choi y Okos (1986) presenta un modelo integral para predecir el calor específico basado en la composición y la temperatura:

$$C_e = \sum_{i=1}^n C_{ei}X_i \quad (1.6)$$

Donde  $X_i$  es la fracción del componente  $i$ -ésimo,  $n$  es el número total de componentes del alimento y  $C_{ei}$  es la calor especificación del componente  $i$ -ésimo.

## **1.3.2. Etapas del Proceso de Crioconcentración**

Como se mencionó anteriormente el proceso de crioconcentración comprende básicamente dos etapas: congelación y separación.

### **1.3.2.1. Congelación**

Los alimentos líquidos en cuanto a su composición, se pueden considerar como soluciones acuosas complejas de comportamiento real. La temperatura de congelación de los alimentos líquidos no es constante, es inferior a  $0^\circ\text{C}$ .

La congelación es una operación unitaria, donde una proporción del agua del alimento se somete a un cambio de estado para formar cristales de hielo mediante la reducción de la temperatura (Fellows 1993).

El proceso de congelación de agua incluye dos procesos continuos: reducción de la temperatura por debajo del punto de equilibrio de congelación y cambio de fase de líquido a sólido (formación de hielo). Ambos procesos están fuertemente influenciados por las propiedades de transferencia de calor (termodinámica), propiedades de transferencia de masa (cinética) y las variables del producto (composición y tamaño).

En la práctica, la cristalización del agua implica dos fenómenos:

- Nucleación o formación de una minúscula estructura reticular cristalina de la solución.
- Crecimiento de cristales que corresponde al aumento de tamaño de los cristales de hielo.

Se puede encontrar una descripción detallada del proceso en Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, Da-Wen (2011).

#### ***a) Nucleación o formación de cristales de hielo***

Nucleación, se refiere al inicio del proceso de separación de fases.

Antes de que se produzca el proceso de cristalización en el punto de congelación, se debe superar una significativa barrera de energía mediante la generación de una gran fuerza impulsora. La existencia de una barrera de energía es demostrada por la extracción continua de calor sensible por debajo de 0 °C sin la presencia de cambio de fase, (AS figura 1.8 curva de enfriamiento). Este fenómeno es conocido como sub-enfriamiento y puede ser 10 °C por debajo del punto de congelación Fellows (1993). El grado de sub-enfriamiento es dictaminado por la aparición de la nucleación del hielo. Sin un núcleo, el cambio de fase estable no es posible; las moléculas del líquido no lograrían alinearse fácilmente en la configuración de un cristal Petzold y Aguilera (2009).

La nucleación es probablemente el paso más importante para el control de la distribución del tamaño de los cristales durante la cristalización. Es fundamental para el desarrollo de tecnologías de crioconcentración Hartel y Chung (1993).

Se entiende por nucleación la generación de partículas cristalinas capaces de crecer espontáneamente a partir de cierto tamaño mínimo (Sánchez 2011). Durante la nucleación se libera el calor latente de fusión, línea (SB figura 1.8 curva de enfriamiento).

Hay dos tipos de nucleación: homogénea y heterogénea. La nucleación homogénea consiste en la producción espontánea de cristales de hielo, libre de impurezas y libre de perturbaciones mecánicas (Ulrich y Jones 2009) y la nucleación heterogénea: se produce en presencia de impurezas, o partículas extrañas. En sistemas complejos como las soluciones alimenticias ocurre la nucleación heterogénea (Sánchez 2011).

#### ***b) Aumento de tamaño de los cristales de hielo (crecimiento)***

Una vez ocurre la nucleación, la formación y el aumento de tamaño de los cristales de hielo, está controlado por la velocidad de eliminación de calor latente liberado durante el cambio de fase, línea (BC figura 1.8 curva de enfriamiento). Si la velocidad de remoción del calor es lenta, la solidificación del agua tiene lugar en torno a pocos núcleos que dan origen a cristales de hielo grandes, el fenómeno de formación de cristales grandes está regido por el proceso conocido como maduración de Ostwald, en el que los cristales grandes crecen a expensas de los más pequeños, como resultado de diferencias en la temperatura de equilibrio causados por contribuciones de



energía en la superficie (Pronk et al 2005). Los resultados experimentales muestran que la maduración de Ostwald es más lenta en concentraciones de soluto altas, lo que puede atribuirse al aumento de la resistencia a la transferencia de masa. Si la velocidad de eliminación de calor es rápida, la velocidad de nucleación aumenta debido a que la solución tiende a sobre-enfriarse y congelarse simultáneamente en muchas partes. En este caso la solidificación se produce entorno a muchos micro-cristales. En ésta etapa se forma la mayor parte del hielo (Fellows 1993). Una forma eficaz de controlar la cristalización durante el proceso de concentración por congelación es el uso de bajos niveles de sub-enfriamiento (Petzold y Aguilera 2009).

Sin embargo, la transferencia de calor no es el único factor que regula el crecimiento o la velocidad de propagación de cristales de hielo. El crecimiento del hielo también se rige por la transferencia de masa en forma de moléculas de agua (y soluto en algunos casos) que se agregan y propagan en el crecimiento de cristales de hielo. Teóricamente, los solutos deben ser rechazados de la región ocupada por los cristales de hielo puros.

Durante el crecimiento de cristales de hielo la temperatura disminuye, la concentración del soluto de la fase no congelada aumenta, alcanzando cierta concentración máxima de solutos (sobresaturación) en la que cristaliza. Se libera calor latente de fusión y la temperatura se eleva a la temperatura eutéctica del soluto, (línea CD figura 1.8 curva de enfriamiento). La máxima concentración que se podría alcanzar mediante el proceso de crioconcentración depende del punto eutéctico de la solución, Sánchez et al (2011).

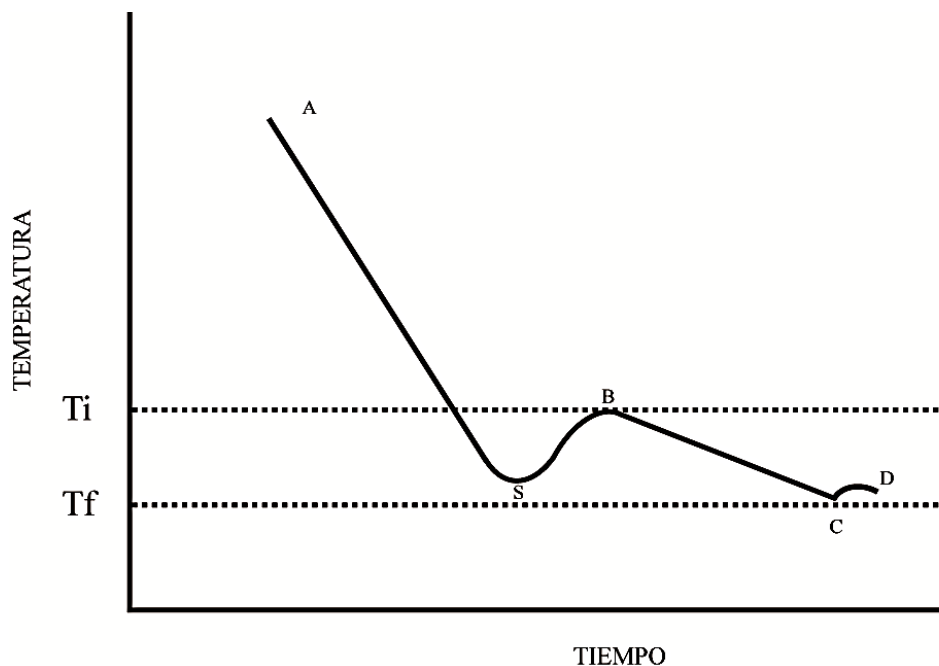


Fig. 1.8 Evolución de la temperatura durante la congelación Felow (1993)

### 1.3.2.2. Separación

a) En general, los alimentos líquidos son mezclas complejas de diferentes componentes donde la separación constituye una etapa fundamental en el proceso de crioconcentración.

El objetivo básico de la operación de separación durante el proceso de crioconcentración, es la separación de componentes específicos, para aumentar su valor añadido, que puede ser el componente extraído, el residuo o ambos (Brennan et al 1998).

Un enfoque alternativo para la separación de componentes en un fluido alimentario es inducir un cambio de fase, sobre la base de sus puntos de congelación.

**b)** En el proceso de crioconcentración la cristalización (parte diluida) comporta la operación de separación de la fracción deseada, (parte concentrada). La separación del hielo del fluido concentrado puede llevarse a cabo mediante diferentes mecanismos, por ejemplo: filtración, lavado del hielo, centrifugación, extracción por presión y deshielo que incluye el deshielo fraccionado como mecanismo alternativo de concentración de fluidos en el proceso de crioconcentración.

(Desphande et al 1982), establece una relación que permite determinar la cantidad de agua que hay que retirar (separar) en forma de hielo de la solución, a partir de la concentración:

$$W_i = \frac{C_{LF} - C_{LI}}{C_{LF} - C_h} \quad (1.7)$$

Donde:

$W_i$  = kg de hielo formado / kg líquido de alimentación

$C_{LI}$  = concentración de solutos en líquido de alimentación (°Brix)

$C_{LF}$  = concentración del fluido al final del proceso (°Brix)

$C_h$  = concentración de solutos en hielo (°Brix)

### ***Dispositivos de separación***

Al igual que la unidad de congelación, una gama de dispositivos de separación han sido empleados en el proceso de concentración por congelación de alimentos. Estos incluyen prensas simples que ejercen una presión sobre el líquido y separan el hielo del líquido, centrifugas que excluyen el líquido por fuerza centrífuga y columnas de lavado donde el concentrado líquido es separado sobre la base de la fuerza de flotación de los cristales de hielo. En general, la eficiencia de separación está relacionada con el tamaño y la forma de los cristales de hielo, la magnitud de la fuerza utilizada para separar el concentrado y la viscosidad del concentrado.

En los equipos de crioconcentración en capa en película descendente donde el hielo se forma sobre una superficie fría, la separación no se hace por medio de los sistemas antes descritos. En estos casos, si el proceso se ha llevado a cabo en condiciones óptimas, es necesario separar el hielo de la superficie de enfriamiento. Para separarlo se utilizan medios mecánicos, medios térmicos o una mezcla de ambos.

### ***1.3.3. Sistemas de crioconcentración***

Para crioconcentrar un fluido alimenticio, debe exponerse a un medio de baja temperatura durante el tiempo suficiente para eliminar el calor sensible y latente de fusión (congelación). Esta operación se establece por medio de sistemas que pueden ser por contacto directo o indirecto, tabla 1.5. (Englezos 1994; Hartel y Chung 1993; Rane y Padiya 2011). El tipo de sistema utilizado depende de: la temperatura aplicada, el producto elaborado, el medio de congelación (aire, superficie fría, líquido) y la forma de procesamiento (continua, o por lote), (Saravacos y Kostaropoulos 2002).

**Tabla 1.5.** Tipos de cristalizadores empleados en la concentración por congelación

Sistema	Características
Contacto Directo	Expansión directa de refrigerante Refrigerantes (Freón, butano, CO <sub>2</sub> ). Expansión directa en el líquido
	Sistema de expansión al vacío Bajo vacío, el agua se vaporiza y enfría por debajo del punto de congelación
Contacto Indirecto	Refrigeración interna Cristalización en placa
	Enfriamiento externo Cristalización en suspensión

Fuente: Heldman y Hartel (1998)

### **1.3.3.1. Sistemas directos**

En sistemas directos, el refrigerante actúa como medio de transferencia de calor, no es necesaria una superficie de intercambio de calor.

La tecnología de refrigeración por contacto directo se ha empleado para la producción de agua pura a partir de agua salina. En este caso, el producto es el hielo, que tiene un bajo contenido de sal. Para la concentración por congelación de alimentos, sin embargo, la expansión directa de refrigerante en el producto causa una sustancial pérdida de sabor, similar a la experimentada durante la evaporación. Por tanto, no hay ninguna ventaja inherente en la calidad obtenida de concentración por congelación y no se utilizan estas tecnologías (Heldman y Hartel 1998).

### **1.3.3.2. Sistemas indirectos**

El tipo de criocentrador diseñado en la Planta Piloto de Industrias Alimentarias pertenece los congeladores por contacto indirecto con enfriamiento interno y con cristalización por capa (Hernández 2008).

Este sistema tiene ventajas con respecto al sistema de contacto directo: por ejemplo no hay contacto del refrigerante con el producto, se evita la contaminación del alimento con el refrigerante, la temperatura dentro del congelador puede ser fácilmente controlada por medio de válvulas.

En el sistema de congelación indirecto la transferencia de calor se produce a través de una pared o barrera sólida, por cuyo interior fluye el líquido refrigerante. Según Hernández (2008), Heldman y Lund (1992) se clasifican en dos tipos:

Congeladores con enfriamiento interno que pueden ser, cristalización por capa y cristalización en suspensión.

Congeladores con enfriamiento externo que pueden ser: con alimentación sub-enfriada y recipientes de maduración.

### **1.3.4. Procesos de Criocentración**

Existen tres procesos de criocentración: criocentración en suspensión, concentración por congelación y deshielo y criocentración en película.

### 1.3.4.1. Crioconcentración o cristalización en suspensión

El Proceso a escala industrial que existe comercialmente de concentración por congelación está basado en el proceso de cristalización en suspensión (Huige y Thijssen 1972).

El primer proceso de cristalización en suspensión que combina la formación de cristales con un intercambiador de calor de superficie raspada y una columna de lavado fue llamado columna Phillips desarrollado por Arnold 1945; Tero (2004). Este proceso se describe de la siguiente forma:

Los cristales de hielo se forman en un intercambiador de calor de superficie raspada, desde donde los pequeños cristales se llevan a una columna de separación. Durante el recorrido los cristales crecen en la solución sub-enfriada. En la columna de separación los cristales se sumergen por gravedad. En la parte inferior de la columna, los cristales se funden. Parte de los cristales fundidos se toma como producto y la otra parte es bombeada por la columna en contracorriente. La parte bombeada sirve como fluido de lavado, eliminando las impurezas de la superficie de los cristales de hielo que caen por gravedad.

Un modelo modificado del anterior, incluye la columna a presión, donde, los cristales en suspensión se transportan por medio de un pistón. El pistón consiste en un filtro, a través del cual el fluido concentrado se separa de los cristales. Las dos formas de columna se muestran en la figura 1.9.

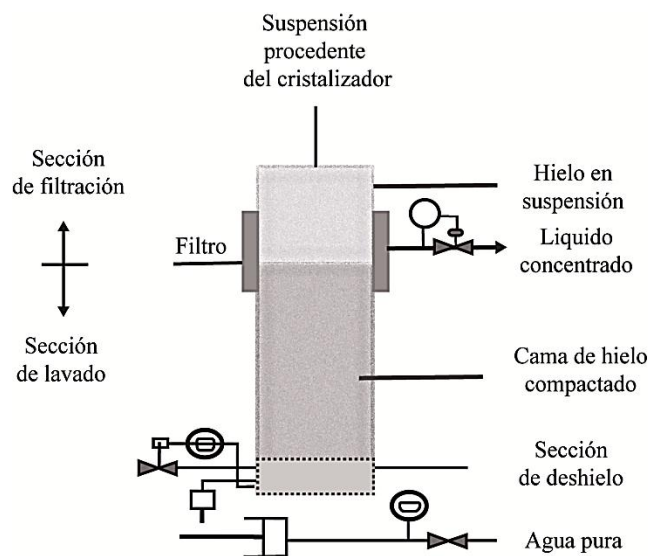


Fig. 1.9 Columna Phillips desarrollado por Arnold, 1945; Tero, (2004)

La investigación del proceso de cristalización en suspensión, se ha centrado en establecer mecanismos que permitan controlar las etapas de nucleación y formación del hielo con el objetivo de conseguir cristales de hielo de tamaño óptimo. Ciertamente la aplicación de ésta tecnología en la industria alimenticia establece la división de las etapas de producción y crecimiento de hielo (Otero et al 2011).

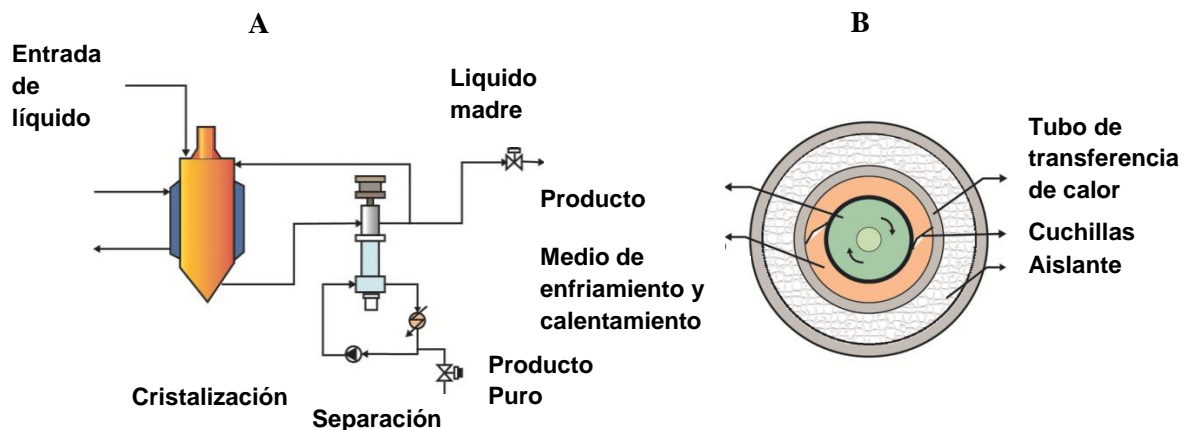
En el proceso de concentración por congelación, los cristales de hielo de gran tamaño favorecen y facilitan el proceso de separación del hielo del fluido concentrado.

Es la tecnología patentada más utilizada en la industria de bebidas, con más de 60 plantas de concentración por congelación en todo el mundo (Otero et al 2012), Esta tecnología consiste en un sistema de procesamiento bastante complejo compuesto básicamente por tres unidades de procesamiento:

**Intercambiador de calor de superficie raspada:** Su función básica es la transferencia de calor de un medio a otro de forma continua, para formar una mezcla de fluido y hielo en suspensión (figura 1.10A).

El dispositivo permite mantener limpia la superficie de transferencia de calor, mediante el raspado de la capa de hielo que se forma en las paredes del intercambiador, asegurando una alta tasa de transferencia de calor.

La mayoría de los diseños comerciales se componen de un sistema de doble tubo. El tubo interior de plástico o acero inoxidable, tiene unas cuchillas acopladas que efectúan el raspado del hielo formado por el enfriamiento de las paredes que están en contacto con el tubo exterior por donde fluye el líquido refrigerante. Las cuchillas se accionan a través de un motor mecánico (Habib y Mohammed 2006). Figura 1.10B.



**Fig. 1.10** (A) Esquema de un proceso de crioconcentración en suspensión; (B) la estructura interna de un intercambiador concéntrico de superficie raspada.

La elección del diseño del equipo depende de las necesidades de procesamiento del producto. El diseño se basa en el concepto de transferencia de calor continua entre el producto en movimiento con eliminación periódica del líquido en la pared fría del cilindro en forma de hielo.

Las principales características de diseño incluyen el número de cuchillas, el ángulo entre las cuchillas y el eje, la longitud de los tubos y el número de los tubos.

El intercambiador de calor de superficie raspada, representa aproximadamente el 30% de los costos totales de inversión en una planta crioconcentración en suspensión (Habib y Mohammed 2006).

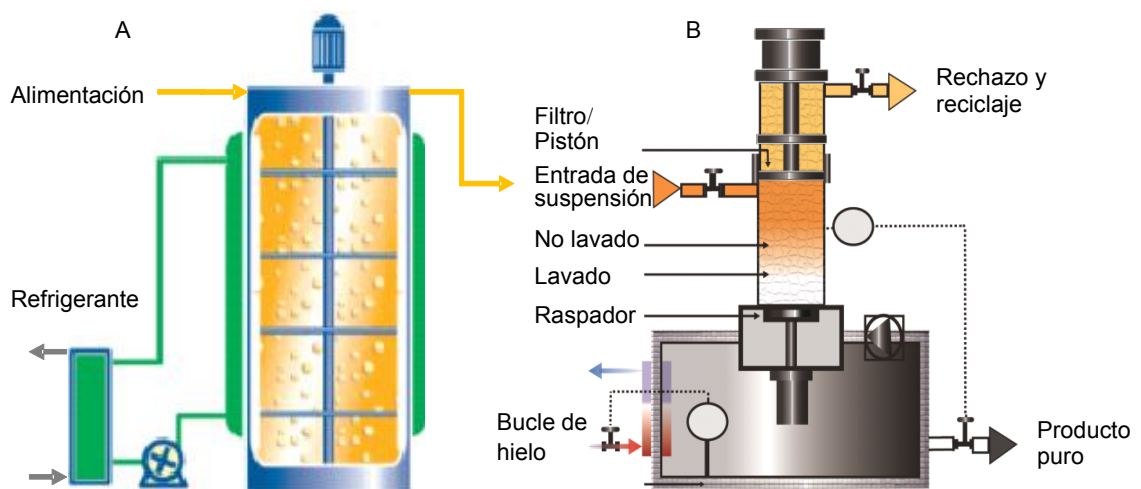
Actualmente existen métodos alternativos al intercambiador de calor de superficie raspada como es el intercambiador de calor en lecho fluidificado. Es más simple en diseño, fabricación y funcionamiento y mucho más barato.

Los intercambiadores de calor en lecho fluidificado permiten obtener coeficientes de transmisión de calor más elevados y tiempos de congelación más cortos.

La principal diferencia con respecto a los intercambiadores de superficie rascada es debido al empleo de partículas de acero inoxidable o vidrio que trabajan como lecho fluido. Estas partículas se extienden por el interior del intercambiador de calor, y son arrastradas por un flujo turbulento, que provoca la colisión de dichas partículas con las paredes del intercambiador. El objetivo es separar y fragmentar el hielo generado en la superficie del intercambiador.

**Cristalizador:** La función básica del cristalizador es aumentar el tamaño de los cristales de hielo, (figura 1.11 A).

**Columnas de lavado:** lleva a cabo la separación de los cristales de hielo del fluido concentrado. En la industria se han aplicado varios tipos de columnas de lavado, que difieren en los diversos mecanismos de transporte del cristal Verdoes et al (1997). El cristal puede ser transportado por gravedad, mecánicamente (pistón y tornillo), o por presión hidráulica, los dos últimos son conocidos como columnas de lavado con transporte forzado (figura 1.11 B).



**Fig. 1.11** (A) Cristalizador. (B) Columnas de lavado (Adaptado de Niro Process Technology. GEA Messo PT Principles of Melt Crystallization. [www.gea-messo-pt.com](http://www.gea-messo-pt.com))

#### 1.3.4.2. Concentración por congelación y deshielo

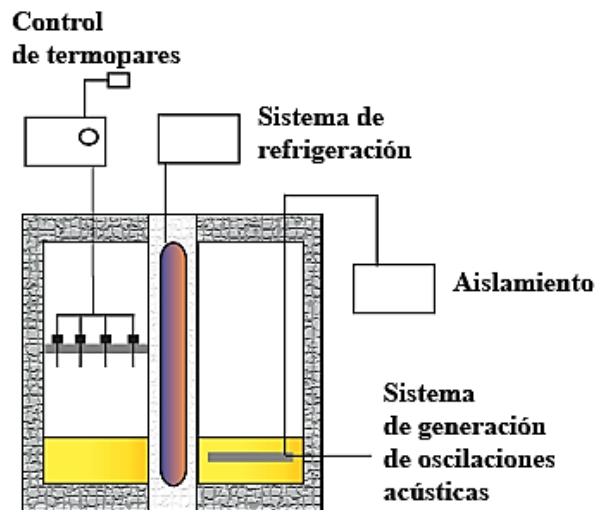
Recientemente, se ha desarrollado un nuevo enfoque de crioconcentración. Básicamente consiste en la congelación de una solución acuosa seguido del deshielo parcial de la masa congelada y la posterior separación de la fracción concentrada (Aider y Halleux 2008).

El proceso se clasifica en:

- Concentración por congelación parcial y deshielo.
- Concentración por congelación total del fluido (sin llegar al punto eutéctico) y deshielo.

La concentración por congelación parcial y deshielo ha sido descrito por. Burdo (2005); Aider y Halleux (2009); Nakagawa et al (2010a); Miyawaki et al (2011).

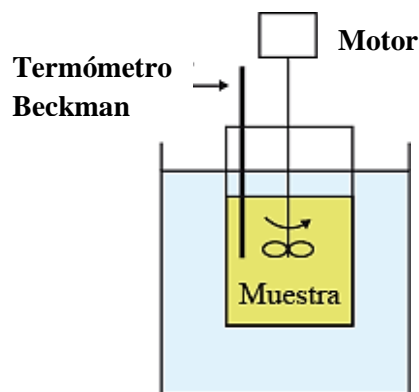
La técnica consiste en introducir una cantidad determinada de fluido alimenticio, en un cristalizador, donde se congela parcialmente desde el centro mediante la introducción de un tubo por el cual se hace circular líquido refrigerante. A medida que aumenta el bloque de hielo, aumenta la concentración de la solución.



**Fig. 1.12** Esquema del proceso de criocentración por congelación parcial y deshielo, Burdo et al (2008)

Concentración por criocentración por congelación total (sin llegar al punto eutéctico) y deshielo (figura 1.13), es un proceso donde el fluido alimenticio tiende a solidificar completamente. Generalmente se realiza en una cámara frigorífica a una temperatura de entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , posteriormente se descongela, bajo condiciones parcialmente controladas Yee et al (2003); para recuperar la fracción de líquido con mayor concentración. Consta de tres etapas: congelación, deshielo y separación de la fracción líquida concentrada (Moreno et al 2013) La viabilidad técnica del método ha sido propuesta por varios investigadores. Yee et al (2003); Miyawaki et al (2005); Aider y Halleux (2008, 2009); Petzold et al (2013); Moreno et al (2013).

Ciertos autores han informado que la separación de soluto es controlado por la fase de deshielo (Nakagawa et al 2010b)



**Fig. 1.13** Esquema del proceso de criocentración por congelación total (sin llegar al punto eutéctico) y deshielo

#### **1.3.4.3. Criocentración en película**

El proceso consiste en poner en contacto la solución a concentrar con una superficie fría, para formar hielo y conseguir aumentar su concentración.

Según la forma de establecer el contacto entre el fluido y la unidad de refrigeración se clasifica en cristalización indirecta en modo estático y cristalización indirecta en modo dinámico. Mediante el modo estático el fluido se mantiene inmóvil en frente de la superficie enfriada. El modo dinámico

representa todos los procesos donde el fluido alimenticio es transportado a la superficie fría mediante dispositivo mecánico en forma de película descendente, ascendente o ambos.

Normalmente en la literatura se encuentran dos formas de denominar el proceso: crioconcentración progresiva y crioconcentración en capa en película descendente.

#### ***a. Crioconcentración progresiva***

Históricamente, la crioconcentración progresiva (PFC) fue propuesta como una técnica de concentración a pequeña escala por motivos analíticos, aplicable tanto a las soluciones acuosas como a soluciones orgánicas (Miyawaki et al 2005). Básicamente, se trata de la solidificación lenta en la parte inferior o en los lados de un vaso o tubo por enfriamiento indirecto.

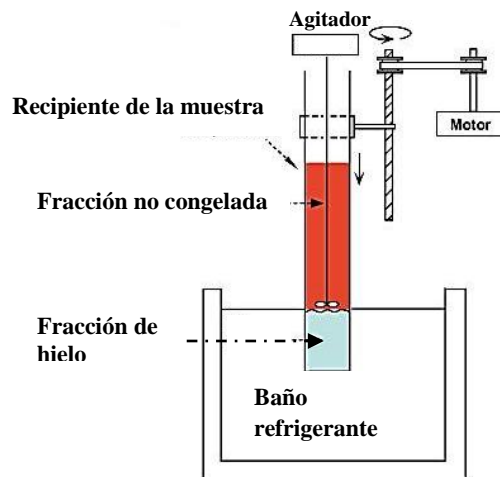
A diferencia de la crioconcentración en suspensión donde se forman pequeños y numerosos cristales de hielo que dificultan su separación, en la (PFC) la formación del hielo se establece sobre una superficie fría (cristalizador) donde se forma una única masa de hielo de gran tamaño, que facilita el proceso de separación. (Miyawaki et al 2005) describió dos sistemas:

##### ***Crioconcentración progresiva por congelación vertical***

El tipo de congelación es indirecta del modo dinámico.

Esta técnica ha sido aplicada a la concentración de jugo de tomate (Liu et al 1999) y en diferentes concentraciones de glucosa, (Liu et al 1997)

Se compone de un recipiente rectangular vertical acoplado a un dispositivo con soporte, un mecanismo de doble hélice que permite el movimiento (1 cm/h) y un depósito que contiene el líquido refrigerante (figura 1.14).



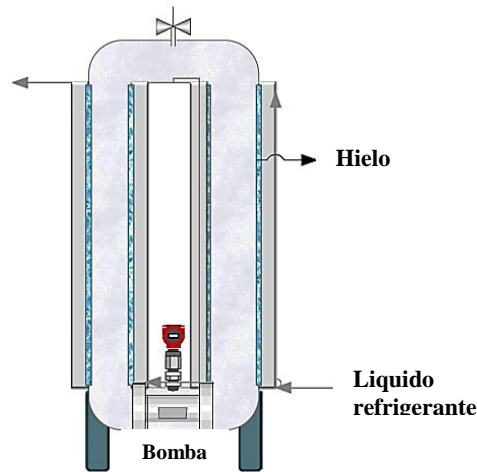
**Fig. 1.14** Crioconcentración progresiva por congelación vertical

##### ***Crioconcentración progresiva vertical tubular con flujo circulante***

El tipo de congelación es indirecta del modo dinámico.

El sistema se compone de dos tubos rectos, tubos doblados en la parte superior y la parte inferior, y la bomba de circulación (figura 1.15). Las tuberías rectas se enfrían mediante una camisa por donde circula el refrigerante. El conjunto se aísla térmicamente para reducir al mínimo la transferencia de calor desde el medio ambiente Miyawaki et al (2005).





**Fig. 1.15** Crioconcentración progresiva vertical tubular con flujo circulante

(Miyawaki et al 2005) reporta ensayos realizados con los sistemas mencionados anteriormente, con soluciones de sacarosa y zumo manzana y se puede concluir que hay un alto porcentaje de solutos retenidos en el hielo, lo que hace ineficiente los dos sistemas (tabla 1.6).

**Tabla 1.6.** Resultados de crioconcentración progresiva con diferentes fluidos

CPV			
	$C_{LI}$ (%)	$C_{LF}$ (%)	SMFI (%)
Sacarosa	10	17,9	3,7
	20	32,0	8,9
	30	42,3	17,3
	40	51,3	25,9
CPVC			
	$C_{LI}$ (%)	$C_{LF}$ (%)	SMFI (%)
Manzana	11,9	21,3	5,3
Manzana	15,3	28,4	7,5
Tomate	5,3	7,9	1,2

**Fuente:** Miyawaki (2005)

***b. Crioconcentración en Capa en Película Descendente***

El método se basa en la concentración por congelación parcial indirecta de un fluido alimenticio que desciende en forma de película sobre una superficie fría. La mayor eficiencia del proceso, en términos de mayor concentración del fluido y menor retención de solutos en el hielo, puede obtenerse cuando se establecen tasas relativamente bajas de crecimiento del hielo.

Actualmente, el proceso de concentración por congelación en capa en película descendente se aplica en varios campos de separación de fluidos, por ejemplo en el tratamiento de aguas residuales, la concentración de zumos de fruta o alimentos líquidos y en la industria química.

La tabla 1.7 establece una comparación entre la crioconcentración en capa en película descendente y la crioconcentración en suspensión.

**Tabla 1.7.** Comparación entre crioconcentración en capa en película descendente y crioconcentración en suspensión

	Técnica crioconcentración en capa	Técnica crioconcentración en suspensión
Temperatura Deshielo	Alta, pero cercana a la temperatura de solidificación	Debajo de la temperatura de solidificación
Eliminación de Calor	A través de capa cristal	A través de deshielo
Tasa de crecimiento cristal	Alta, $10^{-5}$ - $10^{-7}$ m/s	Baja, $10^{-7}$ - $10^{-8}$ m/s
Interfaz relativa, cristal/deshielo	Pequeña, cerca de $10^{-10^2}$ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	Grande, cerca de $10^4$ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
Aparato (sistema)	Sin movimiento de partes excepto válvulas y bomba	Movimiento de partes
Tasa flujo de masa	Grande	Pequeña
Problemas de incrustación	No	Si
Transportación del producto	Fácil, todo líquido	Problemas, debido al manejo de sólidos
Separación liquido-sólido	Fácil, solo drenando	Difícil
Ampliación a escala	Fácil	Difícil

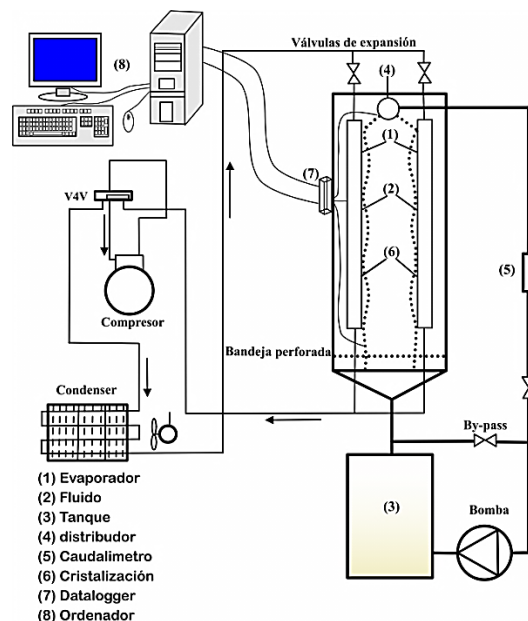
Fuente: Peters-Erjawetz et al (1999)

Este proceso requiere un equipo simple y sin partes móviles sin la necesidad de un dispositivo complejo de separación sólido-líquido, como es el caso del proceso de crioconcentración en suspensión.

Se compone de dos circuitos independientes (figura 1.16):

**Circuito del fluido a concentrar:** Una bomba transporta el fluido desde un depósito hasta un colector donde se distribuye por todas las placas enfriadoras, mediante unos orificios. La solución fluye hacia abajo sobre la pared del intercambiador de calor. Los cristales de hielo se forman sobre la superficie fría bajo la película descendente de fluido. La forma de caída de la película de fluido sobre la superficie aumenta el coeficiente de transferencia de masa. Esta particularidad promueve el transporte de las impurezas en la interfaz sólido líquido (Ulrich, y Neumann 1997).

**Circuito frigorífico:** Una planta enfriadora suministra el fluido frigorífico, que circula a través de la placa enfriadora.



**Fig. 1.16** Crioconcentración en capa en película descendente

### **Factores que afectan el proceso**

Como se mencionó en el apartado 1.3, una propiedad característica del proceso de crioconcentración en capa en película descendente es la limitación de la concentración, de aproximadamente un 50% (w/w), (ver tabla 1) debido principalmente al aumento de la viscosidad y la inclusión de solutos en los cristales de hielo. Flesland (1995); Chen et al (1998), Liu et al (1999), Miyawaki et al (2005); Habib y Mohammed (2006); Ràventós et al (2007); Sánchez et al (2011).

**Tabla 1.8.** Resultados experimentales de ensayos de crioconcentración en capa. Retención de solutos

Descripción	Producto	Concentración máxima (% w/w)	Retención de solutos en el hielo (% w/w)
Flesland (1995)	solución de sacarosa	5,0	0,3
	solución de sacarosa	40,5	20,0
Chen (2000)	solución de sacarosa	20,0	10,0

Etapa	zumo de naranja			lactosuero		
	°Brix concentrado	°Brix hielo	Impureza relativa (%)	°Brix concentrado	°Brix hielo	Impureza relativa (%)
1	15,50	4,40	28,38	12,00	2,80	23,33
2	20,40	8,00	39,21	17,20	5,88	34,19
3	25,10	9,80	39,04	20,40	8,65	42,40
4	28,80	16,40	56,94	21,80	10,10	46,33

Fuente: Sánchez et al (2011)

El incremento de la concentración y la disminución de la temperatura del fluido causan un aumento de la viscosidad durante el proceso, estas condiciones permiten que el fluido tienda a minimizar el gradiente de movimiento sobre la superficie de la placa. Esto aumenta la retención de solutos en el hielo y la dificultad de crioconcentración. Ràventós et al (2007), Flesland (1995).

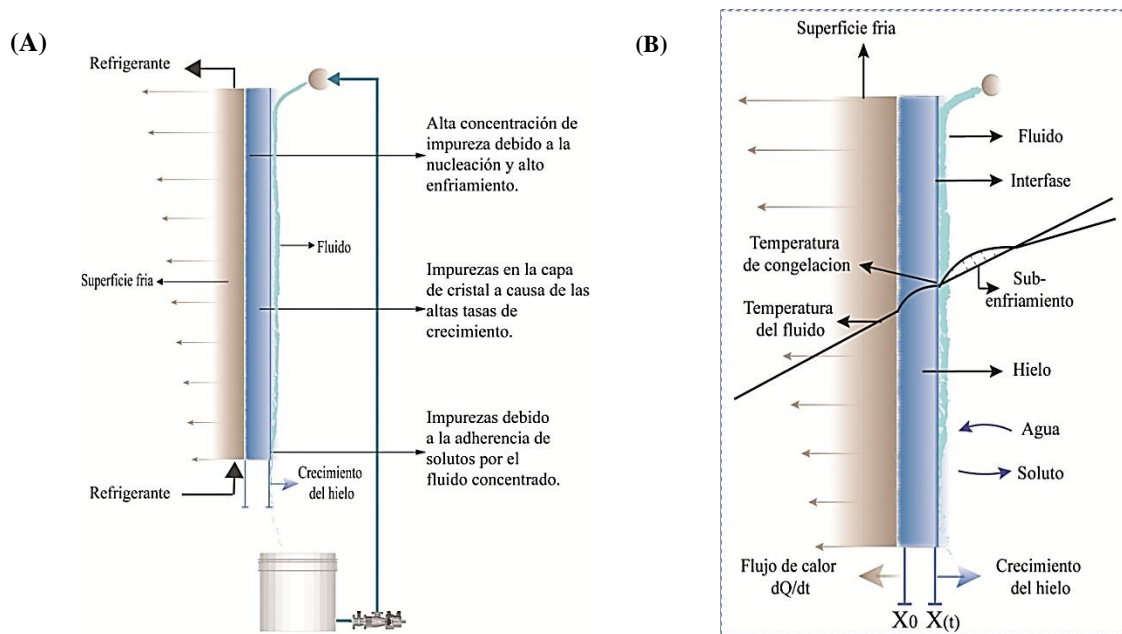
### **Inclusión de solutos en el hielo**

Cuando el hielo crece sobre una superficie fría, la tasa de crecimiento afecta la distribución y la inclusión de solutos en la capa de hielo (Ulrich et al 1996). Este fenómeno es causado por el gradiente temperatura y concentración cerca de la interface sólido-líquido. Hay dos comportamientos recíprocos de impurezas en la cristalización del hielo en capa: una es la inclusión de soluto durante el crecimiento de la capa de hielo y la otra es la migración del soluto atrapados durante el proceso.

Las inclusiones de soluto son atrapadas en la capa de hielo durante su crecimiento y alejadas al mismo tiempo por el gradiente de temperatura entre la superficie enfriada y la interfaz solido líquido. Los parámetros importantes para determinar el comportamiento del soluto en el crecimiento de la capa de hielo son los perfiles de temperatura y la concentración en la capa

límite, cercana a la interface solido liquido. Es difícil hacer una medición y estimación de estos dos aspectos (Ulrich et al 1996).

Scholz (1993), Ulrich y Henning (1996) han identificado que, el proceso de inclusión de solutos en el hielo puede considerarse como una secuencia de tres fases individuales: el alto sub-enfriamiento y nucleación, la tasa de crecimiento del hielo y la concentración del fluido al final del proceso (figura 1.17 A, B).



**Fig. 1.17** (A) Inclusión de solutos en el hielo. (B) Crecimiento de hielo sobre superficie refrigerada y perfil de temperaturas (Modificado de Sánchez 2011)

Como se puede observar en la figura 1.17 (A) en la primera zona, se retiene soluto en el hielo debido al alto sub-enfriamiento que experimenta el fluido al entrar en contacto con la placa fría, este fenómeno se debe a un descenso de temperatura por debajo del punto de congelación, Navarrete et al (1998).

En la segunda zona la retención de solutos se rige por la velocidad de crecimiento del hielo, es decir, a mayor tasa de crecimiento mayor retención de solutos Chen et al (1998) y la tercera zona, es debido a la alta viscosidad provocada por la concentración del fluido y el alto enfriamiento.

#### 1.4. PRECEDENTES DE ESTUDIO

En general como se mencionó antes, la crioconcentración se ha utilizado en zumos de fruta y soluciones de azúcar (Sánchez et al 2009, 2010, 2011a, 2011b; Hernández et al 2009, 2010; Ramteke et al 1993; Ràventós et al 2007 Braddock y Marcy, 1985; Dette y Jansen, 2010; Braddock y Marcy, 1987, Deshpande et al 1982, 1984; Rane y Jabade 2005; productos lácteos, Zhang y Hartel, 1996; Dickey et al 1995; y Vanmil y Bouman, 1990; bebidas alcohólicas Clary et al 2006; aplicaciones no alimentarias, Belén et al 2012.

Gran parte de los estudios sobre concentración por congelación en película han investigado la estructura de la capa sólida, la distribución de solutos y la eficiencia de procedimientos de post-congelación respecto a la eliminación de solutos en el hielo (Guardini et al 2001) También el efecto de las condiciones del proceso como la temperatura de sub-enfriamiento y el tiempo de congelación, que tiene influencia en la incorporación de soluto en la capa de hielo.

El particular interés en el desarrollo de un proceso de crioconcentración es saber o cuantificar el coeficiente de distribución  $K_{dist}$ , definida como la relación entre la concentración formada en el hielo ( $SMFI$ ) y la concentración inicial del fluido ( $C_{LI}$ )

$$K_{dist} = \frac{SMFI}{C_{LI}} \quad (1.8)$$

Ulrich y Neumann, (1997), utilizaron modelo matemático semi-empírico que predice la eficacia de la purificación en el proceso de crioconcentración en capa.

Peters-Erjawetz et al (1999), demostró el potencial del proceso de crioconcentración en capa para fraccionamiento de la grasa de la leche. Comparó en términos económicos los procesos de crioconcentración en suspensión y crioconcentración en capa.

Kwang-Joo y Ulrich (2001), Establece, un algoritmo de cálculo para un proceso de cristalización en capa, que permite predecir los perfiles de temperatura y concentración, tanto en el hielo al inicio y durante el proceso, como la concentración al final del proceso.

Kwang-Joo y Joachim Ulrich (2002), Empleando sustancias inorgánicas, estableció un modelo que permite determinar para el proceso de crioconcentración en capa la pureza y el rendimiento del hielo durante el proceso de deshielo.

Scholz (1993), mediante un modelo numérico describe el efecto combinado de atrapamiento y migración de soluto en el hielo.

También, la velocidad máxima de crecimiento en el hielo, relacionando variables como: gradiente de temperatura, coeficiente de transmisión de masa, coeficiente de difusión y el coeficiente de transmisión de calor. Concluye que:

- El movimiento de inclusiones en el hielo es una causa de difusión producido por el proceso y los solutos tienden a moverse siempre hacia el final más caliente.
- La retención de solutos se incrementa cuando disminuye la velocidad del fluido sobre la placa.
- Establece que para cada etapa del proceso se puede calcular los perfiles de concentración de la capa de hielo.

A partir de estos resultados propone el proceso de deshielo fraccionado como forma de recuperación de solutos.

Flesland (1995), en ensayos de crioconcentración en película descendente sobre una placa refrigerada con una solución de agua y sacarosa, indica que la tasa de crecimiento de hielo aumenta con la diferencia entre la temperatura de la solución y la placa, de igual forma, establece que a una temperatura de refrigerante muy baja, el sobre-enfriamiento es mayor. Por esta razón, la inclusión de soluto en el hielo es mayor para una tasa de crecimiento superior. En caso contrario, en la medida que avanza el proceso la concentración de soluto aumenta cerca del frente de hielo y disminuye el punto de congelación. Esto reduce la tasa de crecimiento del hielo y puede crear "sub-enfriamiento constitucional", es decir, sub-enfriamiento frente a la interfaz líquido sólido, originada por el cambio de la concentración de solutos.

Concluye que:

- Con el fin de evitar inclusiones en el hielo, la tasa de crecimiento de hielo real debe estar por debajo de la velocidad máxima de crecimiento.
- El soluto debe ser transportado lejos del interfaz con el fin de lograr una capa de hielo puro.

La transferencia de masa de la sacarosa lejos del frente de hielo mejora el efecto de separación para un sistema de concentración por congelación en capa en película descendente, propone un proceso de crioconcentración multi-etapa en combinación con ósmosis inversa.

Chen et al (2000), A partir de ensayos con diferentes fluidos y concentraciones y variando la velocidad del fluido sobre la placa y la velocidad de crecimiento del hielo, obtuvo correlaciones de carácter específico y general.

#### ***Correlación de variables características de la solución***

$$K_{dist} = A_c + B_c w_s + C_c \frac{v_g}{v_s^{0.5}}; K_{dist} = \frac{w_g}{w_s} \quad (1.9)$$

Donde,  $K_{dist}$ , se define como el coeficiente de distribución,  $w_g$  es el tanto por ciento de peso del soluto en el hielo,  $w_s$  es el tanto por ciento del peso del soluto en la disolución.  $A_c$ ,  $B_c$  y  $C_c$  son constantes características para cada fluido (zumo) que hay que determinar experimentalmente,  $v_g$  es la velocidad media de crecimiento del hielo puro en  $\mu\text{m/s}$ , dado por la ecuación siguiente:

$$v_g = \frac{p}{S \cdot t \cdot \rho_{ice}} (1 - w_g) \quad (1.10)$$

Donde,  $p$  es el peso de la muestra de hielo en kg,  $S$  es el área del evaporador en  $\text{m}^2$ ,  $t$  es el tiempo de proceso en segundos,  $\rho_g$  es la densidad del hielo puro en  $\text{kg/m}^3$ ,  $v_s$  es la velocidad de jugo en la placa en  $\text{m/s}$ .

#### ***Correlación con el tamaño de la partícula***

Se ha observado relación entre la fracción másica  $K_{dist}$  y el peso molecular efectivo (PME). Fijando la concentración al 5%, la velocidad de crecimiento del hielo a 1  $\text{m/s}$  si el peso molecular efectivo (PME), buscan la siguiente ecuación de correlación:

$$K_{dist} = \frac{m}{PME^n}; k_{dist} = \frac{w_g}{w_s} \quad (1.11)$$

#### ***Correlación en función de las variables de temperatura, velocidad de crecimiento de hielo y velocidad de zumo***

Chen P. et al (2000) establecen que  $K_{dist} = f(FPD, v_g, v_s)$ . La ecuación empírica de la correlación es:

$$K_{dist} = a_c + b_c FPD + c_c FPD^2 + d_c \frac{v_g}{v_s^{0.5}}; \quad (1.12)$$

$a_c$ ,  $b_c$ ,  $c_c$  y  $d_c$  son coeficientes experimentales, obtenidos con correlación de diferentes soluciones. FPD es el valor absoluto del punto de congelación en  $^{\circ}\text{C}$ .

Rane y Jabade (2005), establecen un algoritmo, que estudia la viabilidad de la utilización de un criocentrador de capas para concentrar zumo de caña de azúcar de 20 °Brix a 40 °Brix. El modelo matemático se definió tomando en consideración el efecto de la variación del espesor del hielo en función del tiempo, la temperatura del evaporador, la capacidad del compresor y el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor.

Determinó para sus ensayos el coeficiente de distribución mediante la aplicación de la correlación de Chen et al (2000):

$$K_{dist} = -0,145 + 2,05w_s + 0,139 \frac{v_g}{v_s^{0,5}}; \quad (1.13)$$

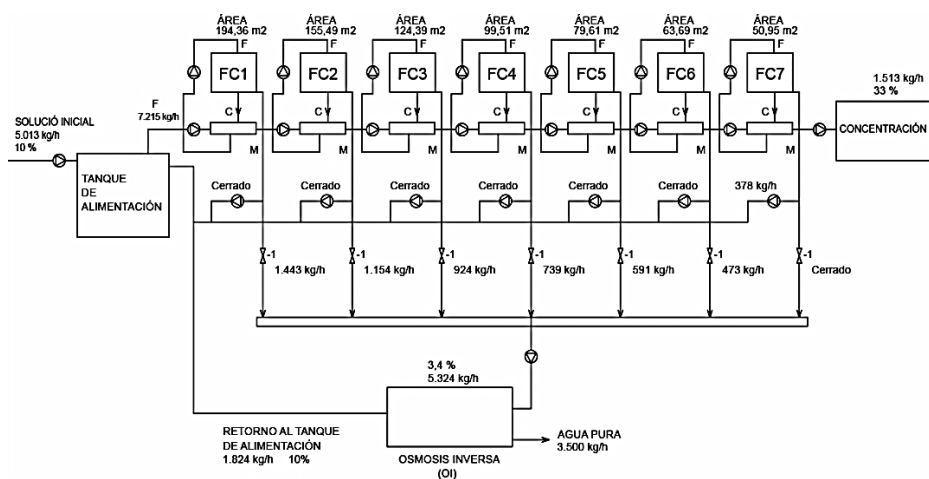
Concluye que:

- La inclusión de soluto es mayor, a una tasa de crecimiento de hielo alta, debido a que la tasa de crecimiento del frente de hielo puede llegar a ser demasiado elevado para que el soluto consiga moverse hacia la parte externa.
- El aumento de la velocidad del fluido aumenta el coeficiente de transferencia de masa.

Auleda et al (2011), fijando determinadas variables resuelve la correlación general de Chen y Chen (2000), permitiendo determinar la concentración final, cantidad y concentración del hielo generado, el tiempo total empleado y la superficie requerida en el proceso, también se puede determinar la cantidad de energía consumida en cada etapa y la capacidad productiva de la instalación.

Una alternativa en la recuperación de solutos ocluidos en hielo generado por el proceso de criocentración en capa en película descendente es la planteada por Flesland (1995) y Auleda et al (2011), consiste en aumentar la concentración de un fluido alimenticio de forma gradual y fraccionada, (figura 1.18) el sistema se compone de una unidad de refrigeración y varios evaporadores por donde circula el fluido alimenticio que se va concentrando, formándose placas de hielo hasta alcanzar la concentración deseada. Posteriormente se detiene el proceso y el hielo formado se separa por procedimientos mecánicos o se deshiela en la maquina (inversión de ciclo).

El planteamiento de ésta alternativa no aporta tiempos de deshielo e igualmente no aprovecha el deshielo de forma eficiente al no realizarlo fraccionadamente, por tanto ésta investigación contribuye en este sentido al desarrollo de la alternativa expuesta.



**Fig. 1.18** Esquema del proceso de criocentración en película descendente de forma continua descrito por Flesland (1995). Concentración de 1.513 kg/h de zumo de naranja

## 1.5. DESHIELO FRACCIONADO

### *Deshielo*

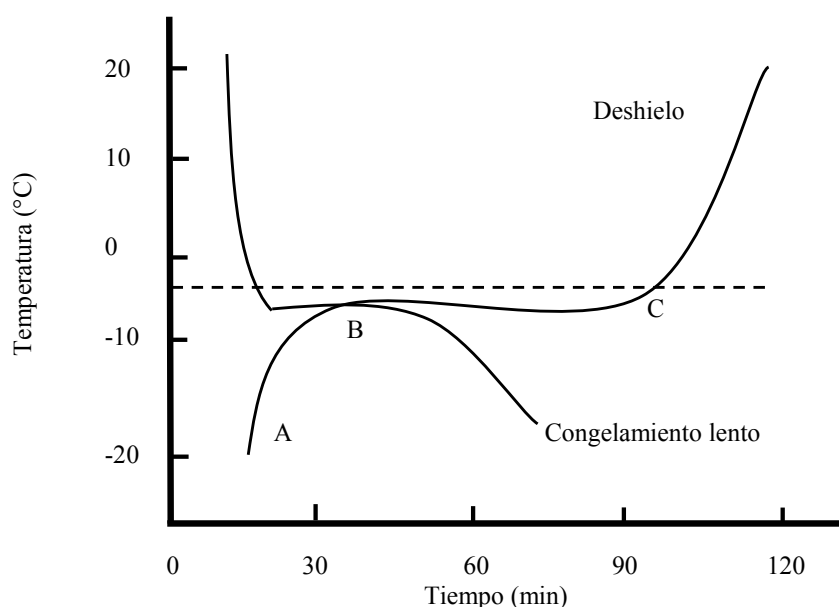
Cuando el alimento se descongela por convección, el hielo de la superficie se funde para formar una capa de agua. El agua tiene una menor conductividad térmica y una menor difusividad térmica que el hielo. Por tanto la capa de la superficie que contiene agua o agua más soluto, reduce la velocidad a la que conduce el calor al interior del producto. Este efecto aislante aumenta a medida que la capa de agua aumenta en la superficie del alimento. El deshielo es un proceso considerablemente más largo que la congelación cuando las diferencias de temperatura y otras condiciones son similares (Felow 1993).

La crioconcentración a nivel comercial, debe tener en cuenta la mínima pérdida o cantidad de soluto retenido en el hielo. Esto requiere eficaces condiciones de formación y separación del hielo durante el proceso. En algunos dispositivos o mecanismos de separación como la centrifugación, filtración o el uso de presión puede haber pérdidas de solutos alrededor de 1% a 5% (Schwartzberg 1990).

Durante el deshielo, el rápido aumento inicial de la temperatura (AB figura 1.19) se debe a la ausencia de una capa significativa de agua alrededor del alimento. Hay entonces un largo período cuando la temperatura del alimento se acerca a la temperatura de fusión del hielo (BC figura 1.19).

Algunos equipos utilizados en separación de componentes en el proceso de crioconcentración son: microondas, estufa de laboratorios (Aider y Halleux 2008) Yee et al (2003); Miyawaki et al (2005); Aider y Halleux. (2008); Aider y Halleux. (2009), Petzold et al (2013), Moreno et al (2013), ventiladores Brent (2006).

Los equipos de microondas son caros a escala comercial y causan un calentamiento desigual. Un problema importante con el deshielo por medio de microondas es la calefacción run-away (recalentamientos localizados), donde una parte del producto se calienta mientras que otras siguen congeladas (Brent 2006).



**Fig. 1.19** Cambios de temperatura durante el deshielo Felow (1993)

La técnica de deshielo fraccionado como proceso de concentración y recuperación de solutos ocluidos en el hielo ha suscitado el interés en la investigación de la técnica de crioconcentración, con resultados promisorios Yee et al (2003, 2004).



El deshielo fraccionado es una técnica complementaria en el proceso de crioconcentración en capa en película descendente, consiste en aportar calor al hielo y recoger de forma gravitacional y fraccionada el fluido.

Diferentes publicaciones indican que a partir del deshielo fraccionado se puede obtener fluidos altamente concentrados (Shirai et al 1985).

Aider y Halleux (2008), en sus ensayos con suero y aplicando el deshielo fraccionado mediante la aportación de calor asistido por microondas, pudo comprobar la eficiencia del proceso.

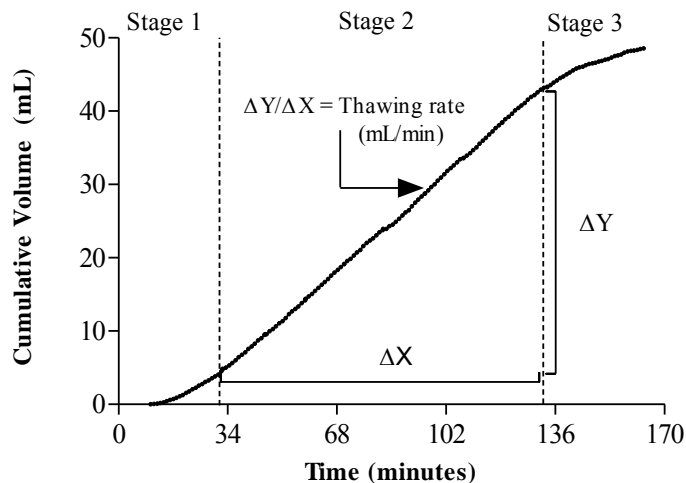
Nakagawa et al (2010a), reporta, la concentración por congelación y deshielo para solución de tinte acuoso y demostró que la solución obtenida en la primera fase de deshielo fue superior a la solución original.

Durante el deshielo fraccionado se diferencian tres etapas (figura 1.20):

Primera etapa: Se trata de un régimen transitorio con una variación rápida de la distribución de temperatura.

Segunda etapa: Se trata de un régimen regular, a partir de un cierto instante las condiciones iniciales son de importancia secundaria y desde este momento el proceso está completamente determinado por las condiciones de enfriamiento de la superficie del cuerpo y el medio, las propiedades físicas del cuerpo, su forma geométrica y sus dimensiones.

Tercera etapa: El régimen se asemeja al del proceso estacionario, en que la temperatura de todos los puntos del cuerpo es la misma, estableciéndose un equilibrio térmico con el medio.



**Fig. 1.20** Volumen obtenido a lo largo del tiempo de deshielo de la sacarosa con  $ff$  de  $167 \text{ m}^{-1}$ , Temperatura de deshielo  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y SMFI  $1.0 \text{ }^\circ\text{Brix}$ . Gulfo et al (2013)

La relación entre el volumen y el tiempo se definen como la velocidad de deshielo, Yee et al (2003).

## 1.6. TIEMPO DE DESHIELO

El disponer de la evolución del tiempo en función de las principales variables características del hielo (concentración y factor de forma) es fundamental para abordar el proceso de deshielo.

La información sobre tiempos de deshielo en el proceso de crioconcentración en capa en película descendente permite avanzar en el desarrollo de las relaciones existentes entre las cantidades de solutos recuperados frente a los solutos totales, esto aporta al técnico que estudia el proceso su optimización.

Actualmente es muy limitada la información referente a tiempos de deshielo. Nakagawa et al (2010a), establece un modelo de deshielo para tinte acuoso, donde define la tasa de deshielo en mg/minutos sin establecer tiempos totales del proceso.

## **1.7. ALGORITMO DE CÁLCULO**

La resolución de la ecuación de Chen y Chen (2000), mediante el procedimiento desarrollado por Auleda et al (2011) permite la acotación de las principales variables del proceso de concentración en capa en película descendente como:

- Concentración y cantidad del fluido.
- Concentración y cantidad de hielo.
- Temperatura inicial y final de congelación de la etapa de proceso.
- Superficies necesarias de placas.
- Temperatura media de la placa.
- Velocidad media de crecimiento del hielo.
- Duración del proceso.

Partiendo de ésta información y utilizando el procedimiento de deshielo fraccionado se determinan:

- Tiempos de deshielo para una fracción del deshielo y tiempos de deshielo entre fracciones.
- Índice de concentración obtenida en una determinada fracción e índice de concentración acumulado.

Con la resolución de las variables descritas anteriormente se puede obtener una visión global de la técnica de crioconcentración en capa en película descendente, aportando las herramientas necesarias para diseñar de forma óptima el proceso.

Así mismo aprovechando la baja concentración de las últimas fracciones del proceso de deshielo fraccionado (las más diluidas) se puede lograr la desalinización del agua de mar.

## 2. OBJETIVO

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

- Investigar la recuperación de solutos ocluidos en el hielo proveniente de un criocentrador de capa, relacionando variables características del proceso como: tiempo de deshielo, concentración inicial del hielo y la relación superficie/volumen (*ff*).

### 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinación de la uniformidad y distribución del soluto en la masa de hielo.
- Caracterización de las capas de hielo de las distintas etapas del proceso de criocentración.
- Analizar la eficiencia del proceso de criocentración a partir de fluidos de ensayo de fructosa, glucosa, sacarosa y zumo de melocotón (*s*).
- Analizar la concentración del deshielo fraccionado de fructosa, glucosa y sacarosa y zumo de melocotón (*s*) a temperaturas de 20 °C 25 °C y 30 °C.
- Determinar la mejora de la eficiencia del proceso de criocentración a partir del deshielo fraccionado.
- Validación de los ensayos de deshielo fraccionado.
- Determinar la relación existente entre el tiempo de deshielo, concentraciones a diferentes temperaturas de deshielo y factor de forma.
- Establecer un modelo de cálculo que permita acotar las principales variables del sistema (tiempo de deshielo, índice de concentraciones de la fracción, índices acumulados).

### 3. PLAN DE TRABAJO

Para la obtención de los objetivos del presente estudio se plantea el siguiente plan de trabajo:

1. Revisión bibliográfica.

#### *Fase I*

##### *Crioconcentración*

1. Puesta a punto del equipo de crioconcentración de la planta piloto.
2. Preparación de fluidos de ensayos (fructosa, glucosa, sacarosa y zumo de melocotón (s)) a distintas concentraciones: 5 °Brix, 10 °Brix, 15 °Brix y 20 °Brix.
3. Obtención de las placas de hielo.
4. Caracterización de las placas de hielo.
5. Análisis de los datos experimentales obtenidos de las capas de hielo.

#### *Fase II*

##### *Deshielo Fraccionado*

1. Puesta a punto de la estufa de laboratorio.
2. Obtención de las muestras de ensayo a partir de las capas de hielo.
3. Determinación del factor de forma de las capas de hielo y de las muestras de ensayo.
4. Deshielo fraccionado de las muestras de ensayo.
5. Análisis de los datos experimentales obtenidos de las muestras de ensayo.
6. Corrección de los tiempos de deshielo.
7. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado.
8. Determinación y análisis de la tasa de deshielo.
9. Validación de los deshielos fraccionados de las muestras de ensayo a partir de los deshielos de las capas de hielo.
10. Análisis del efecto combinado del tiempo de deshielo concentración y factor de forma.
11. Análisis del efecto combinado tiempo de deshielo e índice de concentración acumulado.
12. Comparación del resultado del deshielo fraccionado del melocotón (s) con los azúcares básicos.
13. Aplicación del algoritmo de cálculo para zumo de naranja.

## 4. MÉTODOLÓGIA (MATERIALES Y METODOS)

### 4.1. EQUIPO PILOTO DE CRIOCONCENTRACIÓN Y MATERIAL DE ENSAYO

El equipo experimental de crioconcentración dispuesto en la Planta Piloto de Industrias Alimentarias de la ESAB es el resultado del esfuerzo y la labor realizado desde el año 2001 por un grupo de personas formado por la Dra. Merced Raventós y el Dr. Nacenta, J. junto con los ingenieros Auleda, J.M. Duarte S. y Hernández E. Desde entonces, se han obtenido una serie de resultados que están consolidados por artículos publicados en diversas revistas de carácter científico.

#### *Crioconcentrador*

El sistema de crioconcentración se compone por una unidad de congelación, un sistema hidráulico y un sistema eléctrico (Hernández 2008; Auleda 2008), en la figura 4.1 se describe esquemáticamente el sistema de crioconcentración.

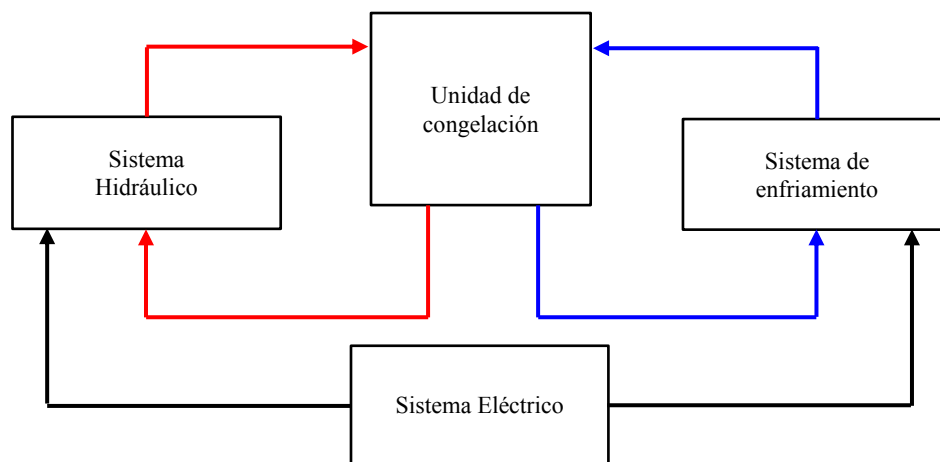


Fig. 4.1 Esquema básico del proceso de crioconcentración Hernández et al (2008)

El sistema de cristalización es del tipo por contacto indirecto, con enfriamiento interno y formación de hielo por capa. La transferencia de calor en la unidad de evaporación se establece por conducción entre el fluido y cinco placas paralelas, dispuestas de forma vertical. Cada placa está formada por dos caras, soldadas entre si, en cuyo interior circula en forma de serpiente el liquido refrigerante R-507.

El circuito hidráulico está formado por una bomba que succiona el fluido alimenticio desde un depósito ubicado en la parte inferior del crioconcentrador hasta un colector ubicado en la parte superior donde distribuye el fluido sobre la superficie de los evaporadores en forma de película a través de unos orificios de pequeño diámetro.

El sistema eléctrico está formado por un conjunto de elementos útiles para el transporte y la distribución de la energía eléctrica, provisto de mecanismos de control, seguridad y protección.

#### *Unidad de congelación.*

La unidad de congelación se compone de cuatro elementos unidos entre sí por medio de líneas frigoríficas: el compresor, el condensador, válvula de expansión y el evaporador cuyo diseño y fabricación se encargó explícitamente.

### **Compresor**

El equipo dispone de un compresor modelo de TFH4531Z Unité Hermétique (Tecumseh Europa, La Verpillière, Francia), de pistón, con efecto único, una etapa y con cilindros verticales. El eje del motor y el cigüeñal del compresor están en el mismo eje. El modelo utilizado en este experimento es un compresor hermético con transformador trifásico de tensión secundaria 230/400 V, 50 Hz, figura 4.2. El tipo de refrigerante usado es R-507. El poder calórico o de salida del compresor dependerá de la temperatura de evaporación y la condensación del fluido refrigerante.

Las características del compresor se describen en la tabla 4.1:

**Tabla 4.1.** Características de compresor

Compresor marca/modelo	Electrolux/ TFH3531Z
Potencia	2 ½ CV
Gas Congelamiento	R-507
Tensión	400 V
Intensidad	5,27 A
Potencia Congelamiento	
T evap.: 7°C	7,780 W
0°C	5,710 W
-5°C	3,320 W
-10°C	3,300 W
Cilindrado	56,65 cm <sup>3</sup>

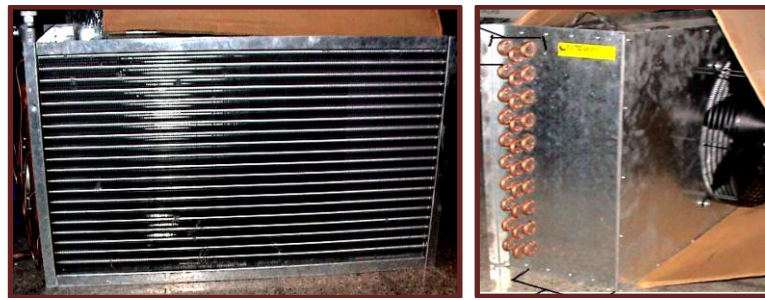


**Fig. 4.2** Esquema del compresor hermético del equipo de crioconcentración

### **Condensador**

El condensador es un intercambiador de calor enfriado por aire con circulación forzada. El circuito de disipación del condensador está formado por una máquina enfriadora del tipo ventilador axial de 0.16 kW de potencia. El núcleo del condensador está formado por 60 tubos, dispuestos de tres filas, como se observa en la figura 4.3.

La potencia térmica del condensador es de 5.760 kcal/h con un  $\Delta T$  de 12 °C, conveniente para remover el calor del compresor más el calor extraído por el evaporador.



**Fig. 4.3** Condensador instalado en el equipo de crioconcentrador

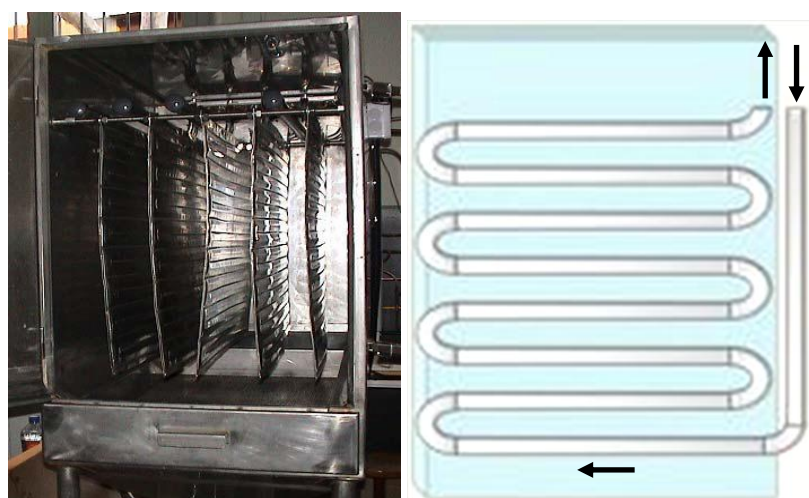
### ***Evaporador***

El dispositivo refrigerador, se encuentra en el interior de una unidad tipo armario que tiene como función aislar el equipo del medio.

El armario está formado por un revestimiento de acero inoxidable, que consta de una tapa ubicada en la parte superior, una puerta frontal y una ventana lateral. El revestimiento a su vez está aislado con cinta autoadhesiva Armaflex de polietileno expandido, de 50 mm x 3 mm, cuya finalidad es disminuir la transferencia de calor entre la unidad y el medio.

En la parte interior del armario se encuentran ubicadas cinco placas evaporadoras dispuestas de forma vertical en paralelo, separadas entre sí por aproximadamente 10 cm. Cada placa puede enfriar simultáneamente por las dos caras (figura 4.4).

Cada una de las placas está constituida por dos láminas lisas de acero INOX AISI – 316 L, unidas y soldadas en los extremos con una abertura en la parte superior por donde pasa el tubo que transporta el refrigerante. El tubo refrigerante realiza un recorrido en forma de serpentín a contracorriente (fotografía) Por el interior circula el líquido frigorífico a poca presión. Las láminas presentan un grosor de 0,8 mm, con una superficie nominal de 800 mm (ancho) × 600 mm (alto) y una superficie efectiva de 750 × 550 mm.



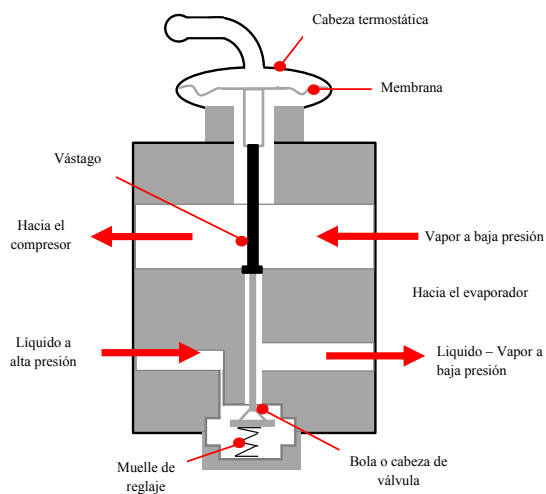
**Fig. 4.4** Esquema de placas evaporadoras de crioconcentrador

### ***Válvulas de expansión***

Son utilizadas como reguladoras de la máquina de compresión de vapor. La válvula de expansión (figura 4.5) asegura el suministro regular de refrigerante al evaporador siempre manteniendo un recalentamiento específico a la salida del evaporador. Se ubican en cada una de las placas para funcionar de manera independiente. También, hay una situada en el condensador para realizar la inversión de ciclo.

La válvula termostática es de la marca Danfoss TES 2 con código 068Z3303, con equilibrador externo y con rango de temperatura de vaporización de  $-30/ +10$  °C, con una presión máxima de trabajo de 35 bar.

La válvula dispone de un tornillo de regulación de potencia. Para poder modificar la capacidad, éstas disponen de unos cartuchos que se pueden sustituir por otros con orificios de diferentes diámetros.



**Fig. 4.5** Descripción esquemática de válvula de expansión

### ***Presostatos***

Se utilizan para proteger contra presiones de aspiración demasiado bajas ó presiones de descarga elevadas. Los controles se utilizan también para arrancar y parar los compresores y ventiladores en los condensadores.

El equipo de crioconcentración dispone de cuatro presostatos con las siguientes funciones:

Controlar el final del deshielo, regular el ciclo de ventilación del condensador, proteger contra cargas bajas, detener el compresor en caso de un descenso anormal de la presión de aspiración, protección si se produce una elevación anormal en la presión de descarga.

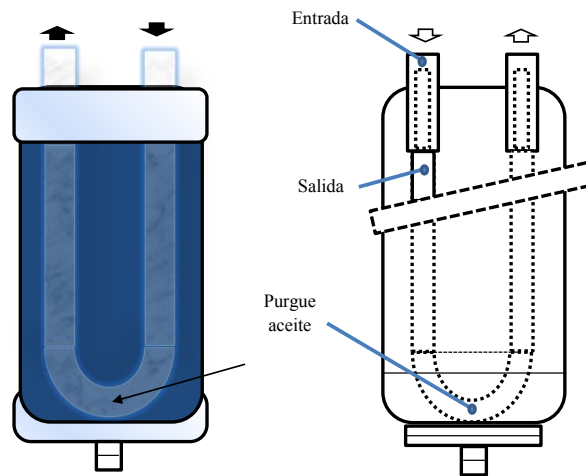
### ***Manómetros***

Nos permite obtener información muy importante respecto al funcionamiento de la instalación. La instalación del crioconcentrador cuenta con un par de manómetros que permiten determinar baja y alta presión. El manómetro de baja presión es de color azul, suele estar comprendido entre  $-1$  y  $+10$  bar y esta conectado a la aspiración del compresor (presión de evaporación). El manómetro de alta presión es de color rojo, de  $0$  a  $35$  bar, está conectado a la tubería de descarga, estableciendo lectura en momento real de la presión del gas a la salida del compresor (presión de condensación).



### ***Recipiente anti golpe de líquido***

Situado antes del compresor, su función básica es impedir la llegada de líquido al compresor, el líquido que se deposita puede eventualmente vaporizarse con calor de fuentes externas (figura 4.6).

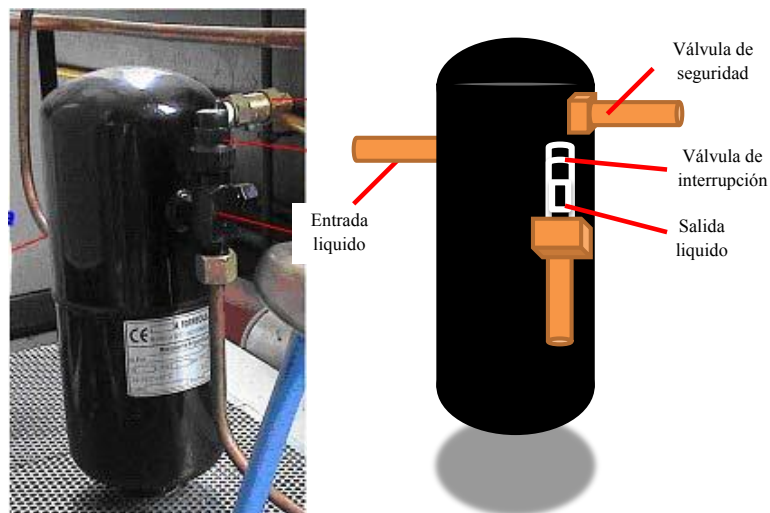


**Fig. 4.6** Recipiente anti-golpe de líquido

### ***Deposito de líquido***

El compresor está diseñado para comprimir solo el vapor. Un acumulador de la línea de succión evita daños en el compresor de un aumento repentino de líquido refrigerante debido a que el aceite podría entrar en el compresor de la línea de succión. El acumulador de la línea de succión es un depósito temporal, diseñado para que tanto el líquido refrigerante y el aceite retornen al compresor a una velocidad aceptable. Esto evita el daño a las válvulas, pistones, bielas y cigüeñales.

Este depósito de acero (figura 4.7) tiene la misión de recoger el fluido frigorífico en caso de querer hacer una intervención en el circuito frigorífico. En el depósito se instala una válvula de seguridad, dimensionada para abrirse cuando la presión llegue a un valor de tarado escogido y que es inferior al límite soportado por los materiales.



**Fig. 4.7** Recipiente de líquido y válvula de seguridad

### ***Válvula de retención***

Las válvulas de retención se instalan principalmente en equipos bombas de calor y estas tienen la función de dejar pasar el refrigerante en un sentido pero no en sentido contrario. Se pueden encontrar del tipo de bola y de pistón.

### ***Válvula de inversión de ciclo***

Es la encargada de realizar el cambio de dirección del refrigerante dentro del circuito frigorífico. Su funcionamiento consiste en la actuación de la bobina electromagnética sobre un patín interior, el cual es capaz de provocar el cambio de dirección del refrigerante de manera que el evaporador se convierte en condensador y el condensador se convierte en evaporador, lo que completa una fase de ciclo invertido.

### ***Válvula solenoide***

Se emplea como mecanismo de cierre de paso en las tuberías. Tanto el cierre como la apertura se producen de forma electromagnética. El campo magnético creado actúa sobre un eje, que abre el paso del fluido frigorífico y cuando se detiene la corriente, un muelle, restituye el eje a la posición de origen cerrando el paso.

### ***Cuadro de mando***

Los mecanismos de mando y protección se alojan en el cuadro general de mando y protección donde se montan todos los elementos de seguridad, protección y control. Los elementos que componen el cuadro general de mando y protección, son:

- Interruptor electromagnético (PIA) que actúa sobre todos los elementos eléctricos protegiendo las líneas contra los sobrecalentamientos y cortocircuitos. Se utiliza como elemento de corte general de la instalación y tendrá la capacidad de corte suficiente para la intensidad de cortocircuito que pueda producirse en el punto de su instalación.
- Protección diferencial de 0,03 A, encargado de controlar los posibles corrientes de fuga. Todas las masas de la instalación se han puesto con toma de tierra.
- Protección magneto-térmica.
- Borne de tierra.

### ***Fluido frigorífico***

Es el fluido utilizado en la transmisión de calor. Absorbe calor a bajas temperaturas y presión, cediéndolo a temperaturas y presión más elevadas. Este proceso tiene lugar con cambios de estado del fluido.

El refrigerante contenido en el circuito frigorífico del criocentrador es R-507. Es una mezcla azeotrópica (sustancias binarias o ternarias). Se compone de pentafluoretano (R125) y de 1,1,1-trifluoretano (R143a). Los dos componentes están mezclados en una proporción de 1:1 en peso. Es del tipo de refrigerante hidrofluorcarbonados, su ODP es cero. Se desarrolló con el fin de sustituir el refrigerante R-502.

Las principales características se describen comparativamente se describen en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Comparación de las principales características de refrigerantes R - 507 y R - 502

Tipo de gas	Unidad	R-507	R-502
Presión de evaporación	bar	1,74	1,61
Presión de licuación	bar	21,19	18,80
Relación de compresión		12,18	11,68
Diferencia de presiones	bar	19,45	17,19
Temperatura de compresión	°C	72,65	82,01
Flujo masico del agente refrigerante	kg/s	1,17	1,22
Potencia de acondicionemieno de compresor	kW	76,63	71,96
Volumen efectivo del recorrido	m <sup>3</sup> /h	476,90	479,05
Indice de potencia frigorifica		1,30	1,39

### ***Sistema hidráulico***

El sistema hidráulico transmite potencia entre dos puntos situados a cierta distancia:

- El depósito que se encuentra en la parte inferior.
- El colector ubicado en la parte superior.

El desplazamiento del fluido alimenticio, se desarrolla normalmente en sistemas de distribución, que implica conducciones rectas, generalmente cilíndricas de diámetros variados, enlazadas por uniones convenientes, curvaturas, codos, válvulas, etc. A través de estos sistemas el fluido fluye mediante una bomba.

### ***Bomba***

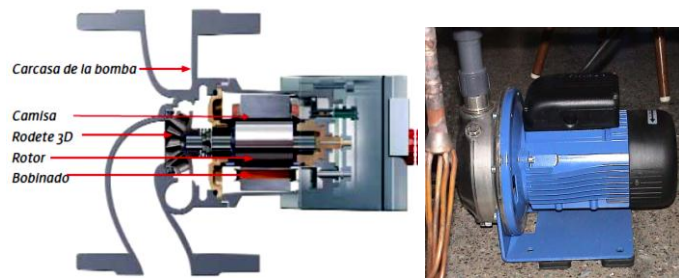
El sistema de bombeo se basa en los siguientes conceptos:

- carga de aspiración o succión, es el valor de la energía que posee el fluido al llegar a la boca de succión de la bomba hidráulica. Se define como la suma de la carga de presión, la carga cinética y la altura o cota en la boca de succión de la bomba.
- Carga de impulsión: Es el valor de la energía que posee el fluido justo en el punto de salida de la bomba hidráulica. Se define como la suma de la carga de presión, la carga cinética y la altura en la boca de impulsión de la bomba.

La bomba es centrífuga, de la marca Lowara, tipo CEA80-5-A (Lowara Srl, Montecchio Maggiore (VI), Italia), de 0,75 kW de potencia y caudal 30-100 L/min.

Su funcionamiento se establece a través de un motor eléctrico que acciona el eje de la bomba en el cual está montado el rodete. El fluido que entra axialmente en el rodete a través de la boca de

aspiración y el cuello de aspiración se desvía mediante las paletas del rodete en dirección radial. Las fuerzas centrífugas, que actúan en cada partícula de líquido, originan durante el paso del líquido por la zona de las paletas un aumento de la presión y de la velocidad de impulsión (figura 4.8).



**Fig. 4.8** Bomba centrífuga instalada

### ***Válvulas***

Las válvulas son elementos que regulan la presión o el caudal del fluido enviado por una bomba hidráulica. Según su función las válvulas de regulación del caudal del fluido en la instalación se clasifican en: válvulas distribuidoras, válvulas de bloqueo, válvulas de caudal, válvulas de cierre.

### ***Circuito de distribución***

Para que el fluido alimenticio llegue hasta el colector de distribución es necesario una red de tuberías. Esta red está construido con unas tuberías de PVC y es encargado de conducir el fluido al colector de distribución, donde hay instalados un tubos de PVC de  $\varnothing$  32 mm perforados linealmente con orificios circulares de 2 mm de diámetro y separados 1-2 cm.

### ***Aparatos de medida instalados al crioconcentrador***

Necesitamos poder medir los parámetros de funcionamiento del circuito, y comprobar que están dentro del rango normal de funcionamiento. Para conocer dichos parámetros se utilizan los siguientes aparatos:

**Caudalímetro:** con el fin de medir el caudal se instala un caudalímetro electromagnético no invasivo. El caudalímetro instalado es del tipo electromagnético de la marca Isoil modelo MS501 construido con acero inoxidable para fluidos de conductividad superior a  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ . El rango de medición es de 0,13 a 3,37 l/s y la precisión del 0,3%.

**Amperímetro y voltímetro:** para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico y medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico se instalan un amperímetro y un voltímetro de clase 1-2, está provisto de transformadores en una relación 100/5. El amperímetro permite hacer medidas a cada una de las fases R, S y T.

## **4.2. FLUIDOS DE ENSAYO**

Se utilizan soluciones modelo de azúcares que permiten simular y representar resultados de distintos fluidos alimenticios específicamente zumo de melocotón. Los azúcares básicos usados para elaborar las soluciones que son aplicadas en los ensayos de crioconcentración son:

Fructosa (f): D(-) fructosa, cristalizada blanca, 99%, (Azúcar de fruta natural, producto de Diet Rádisson Pagesa, España).

Glucosa (g): D (+) Glucose Anhydrous, extra pure, Ph, Eur, USP, BP. (GL01251000, producto químico comercializada por Scharlau, España).

Sacarosa (s): comercial cristalizada blanca; ( $\alpha$ -D-glucopiranosil  $\beta$ -D-fructofuranósido; sacarosa, azúcar de caña producto azucarera, España).

Modelo de zumo de melocotón y zumo de naranja basado en los porcentajes en peso (w/w) de azúcares básicos (f, g, s) obtenidos del análisis HPLC de zumo de melocotón Auleda et al (2011a):

Zumo de melocotón, porcentajes proporcionales al porcentaje total de azúcares: glucosa 18,80%; fructosa 25,50%; sacarosa 55,70%.

Zumo de naranja, porcentajes proporcionales al porcentaje total de azúcares: glucosa 32,6%; fructosa 32,0%; sacarosa 35,5%.

### 4.3. INSTRUMENTACIÓN BÁSICA: REFRACTOMETRO, BALANZAS Y SONDAS DE TEMPERATURA

#### 4.3.1. Instrumento de medida de la concentración de solutos

La concentración de sólidos solubles, expresada en °Brix, se midió con un aparato óptico de precisión, marca Atago (modelo DBX-55; Japón), con una precisión de  $\pm 0,1$  y rango de medida de 0 a 55 °Brix. Las mediciones se realizaron a una temperatura de  $20 \pm 1,5$  °C. Las características se representan en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Características de Refractómetro Atago DBX - 55

Rango de medida	Brix 0,0 a 55,0%	
Unidad Mínima	Brix %	0,1% o 0,01% seleccionable
	Temperatura	0.1 °C
Exactitud de medida	Brix %: $\pm 0,1\%$ o $-0,15$ a $+0,13\%$ (a 10°C–30°C) Brix%: $\pm 0,2\%$ o $-0,25$ a $+0,23\%$ (a 5°C–10°C o 30-30°C)	
Temperatura ambiente necesaria	5 °C a 30 °C	
Temperatura de medida	5°C a 30°C (con compensación automática de temperatura)	
Método a partir de cero	Con agua destilada y la tecla “ZERO SET”	
Tiempo de medida	3 segundos aproximadamente	
Cantidad de muestra	0,2 – 0,3 mL	
Salida a terminales	Salida Impresora: Centronics Salida Ordenador: RS-232C	
Requerimientos eléctricos	110, 220 V i 230 V (adaptador AC) 50 – 60 Hz	
Consumo	10 VA	
Dimensiones y peso	12 x 27 x 9 cm, 2 kg	

#### Calibración

La calibración se realiza diariamente, previamente antes de tomar mediciones, y entre una serie larga de mediciones.

El procedimiento se realiza según especifica la guía de usuario de fabricante de refractómetro:

- Usando pipetas de plástico, se llena la célula de medición con agua destilada o des-ionizada.
- Se realiza la medición. Si no aparecen mensajes de error, la unidad está calibrada.

### 4.3.2. Instrumentos para la determinación del peso

Se utilizaron los siguientes instrumentos.

- Balanza digital (GRAM: Modelo APS - 60, con una precisión de  $\pm 20$  g, y rango de medición de 0,2 a 60 kg) fue utilizada para el pesaje de las capas de hielo obtenidas en el proceso de concentración por congelación.
- Balanza digital (KERN: Modelo W 109 887, con una precisión de  $\pm 0,01$  g y un rango de medición de 1 a 1.210 g) se utilizó para el pesaje de las muestras durante el deshielo fraccionado.

### Calibración

Antes de iniciar la calibración se realiza una inspección visual para comprobar el buen estado de las balanzas.

El procedimiento de calibración consiste en medir pesas patrón en puntos distribuidos a lo largo de la escala utilizable en la práctica de la balanza, incluyendo los límites del intervalo de medidas. Si el intervalo de medida coincide con el rango de indicaciones de la balanza, se inician los ensayos. En caso contrario se procede a estandarizar las balanzas con las pesas patrón.

### 4.3.3. Instrumentos de medición de la temperatura

En el caso del sistema de medida de temperatura se ha optado por la utilización de termo-sensores tipo Termopar y termómetros Beckman.

#### Termo-sensor tipo Termopar con Data logger

Las sondas utilizadas son del tipo Termopar, flexible, 1500 mm de longitud, Teflón. Se trata de dos conductores metálicos diferentes unidos por sus extremos, formando un circuito. El monitor de temperatura Data logger, es un instrumento portátil de medición, capaz de registrar de forma autónoma la temperatura durante un período de tiempo definido. Se utilizó para controlar y recopilar datos de temperatura de los ensayos de crioconcentración y deshielo fraccionado. Los principales datos técnicos se presentan en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Datos técnicos de Data Logger Testo 177-T4

Datos técnicos	
Parámetro	Temperatura (°C/°F)
Sensores	T/C-Tipo K o T (4 x externo)
No. de canales	4 canales (externol)
Rango	Tipo K: -100 °C a +1000 °C Tipo T: -100 °C a +400 °C
Resolución	0,1 °C
Exactitud/Instr. $\pm 1$ dígito	$\pm 0,3$ °C; -100 a +70 °C $\pm 0,5\%$ de la lectura; +70 a +1000 °C
Memoria	48.000 lecturas
Temp. aplicación	0 °C a +70 °C
Temp. almacenam	-40 °C a +85 °C

### ***Termómetro Beckman***

Los termómetros diferenciales Beckman Según normas DIN 12781 presentan las siguientes características, tabla 4.5:

**Tabla 4.5.** Características de Termómetro Beckman

Rango de Medida	División	Líquido	Tipo de Capilar	Cuerpo	Vástago	Inmersión	Longitud
-10 a +100 °C	0,5 °C	Hg	Prismático transparente	275xØ11mm	200xØ8 mm	180 mm	475 mm

#### ***Calibración de termo-sensores***

Data logger y las sondas termopar cuenta con un Certificado de calibración DKD/Temperatura.

Para los otros termo-sensores tipo Beckman el método de calibración se estableció haciendo una comparación con un sistema de referencia, en éste caso el Data logger y las sondas termopar antes descritas. Esta comparación es importante debido a que permite saber, si es el caso, que tan desviados están los datos de los termómetros que se utilizan en los ensayos, así como tener un mejor control de las variables de estudio. Los instrumentos a calibrar son 5 termómetros. Se realiza el siguiente procedimiento:

Método de agua helada: Se llena de hielo molido en un recipiente, se añade agua destilada fría hasta que ésta cubra el hielo y se agita bien. Se sumerge el termómetro siguiendo la recomendación del fabricante, se toman varias lecturas cada 5 minutos y se compara con las lecturas del termómetro patrón.

Método del punto de ebullición: Se calienta agua destilada en un recipiente hasta que alcance el punto de ebullición. Se sumerge el termómetro sin que toque el recipiente. Siguiendo la recomendación del fabricante, se toma varias lecturas cada 5 minutos y se compara con las lecturas del termómetro patrón.

## **4.4. OPERATIVA DE ENSAYOS**

En esta sección se instauran los criterios de inicio del proceso de crioconcentración y la metodología para la obtención de las capas de hielo que posteriormente se utilizan en los ensayos de deshielo fraccionado.

### ***4.4.1. Condiciones iniciales de circuito de distribución y evaporadores***

Se estableció un procedimiento de inicio conducente a la puesta a punto del equipo de crioconcentración con el objetivo de comprobar el funcionamiento de la unidad de congelación, el sistema hidráulico, y sistema eléctrico. El protocolo consiste en establecer ciclos consecutivos e intermitentes de congelación con agua en el equipo de crioconcentración. Con el procedimiento se pudo observar en la unidad de congelación cierta desigualdad en la formación de hielo sobre las placas, en algunos casos se formaba mas hielo en la parte inferior, en otros se formaba en los bordes. Todo esto se debe en parte a la irregular distribución del fluido sobre las placas. Se propone, entonces, utilizar las placas 5 y 3 y (figura 4.9).

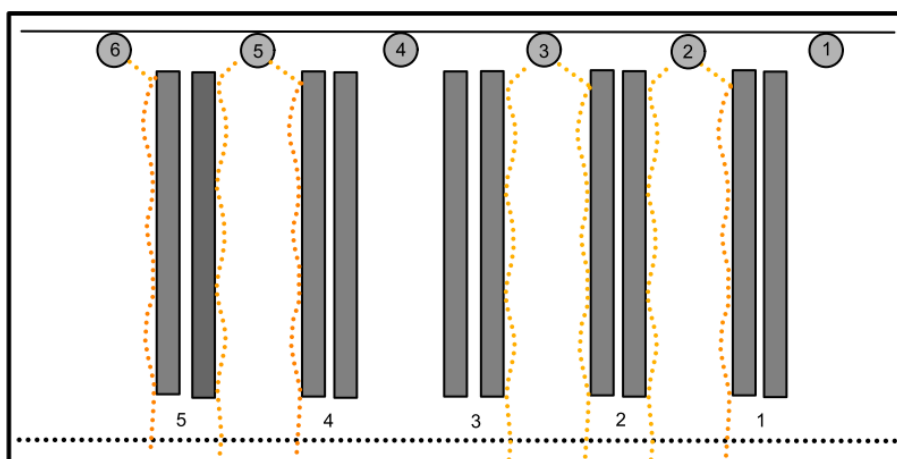


Fig. 4.9 Esquema de las placas utilizadas en los ensayos de crioconcentración

#### 4.4.2. Temperatura de las placas evaporadoras

Los ensayos preliminares fijan la temperatura de evaporación entre  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura de evaporación del refrigerante se puede variar abriendo o cerrando la válvula de desvío de descarga del evaporador (Hernández 2008). Por tanto, dependiendo la concentración del fluido y de las condiciones del equipo se regula la temperatura de ensayos de crioconcentración.

#### 4.4.3. Obtención de las capas de hielo de las distintas etapas del proceso de crioconcentración

Los ensayos de crioconcentración para obtener las capas de hielo se realizaron con 40 L de solución de agua destilada y azúcares básicos, fructosa, glucosa y sacarosa (*f*, *g*, *s*). Así mismo, una solución modelo de zumo de melocotón, basado en los porcentajes en peso (w/w) de azúcares básicos (*f*, *g*, *s*) obtenidos del análisis HPLC descrito por Auleda et al (2011a), Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Proporción de azúcares en los zumos de frutas

%	Melocotón	Manzana	Pera
Glucosa	18,80 ± 0,20	22,00 ± 0,16	39,00 ± 0,30
fructosa	25,50 ± 0,15	62,00 ± 0,22	52,50 ± 0,03
Sacarosa	55,70 ± 0,25	16,00 ± 0,30	8,50 ± 0,40

Fuente: Auleda et al (2011a).

Para cada azúcar básico y solución modelo de zumo de melocotón (*s*) se establecieron cuatro etapas del proceso (EP), con concentraciones iniciales de 5, 10, 15, y 20 °Brix.

Cuando la concentración en el fluido alimenticio alcanza el nivel predeterminado, la bomba se detiene y el alimento líquido concentrado en el circuito fluye fuera del sistema por gravedad. Entonces, el compresor se para y se quita la capa de hielo del evaporador. La capa de hielo, así obtenida, se caracteriza determinado: su peso, longitud, anchura, grosor y la concentración de sólidos presentes °Brix. Una vez caracterizada las capas de hielo, se almacena en una cámara frigorífica a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



#### 4.4.4. Caracterización de las capas de hielo del proceso de criocentración

a) Con el fin de determinar la fracción de soluto en masa en el hielo SMFI, definido como la cantidad de solutos ocluidos en el hielo (Flesland 1995; Chen et al 1998), en las diversas etapas de crecimiento del hielo, la capa se divide en tres zonas:

Zona 1. Superficie en contacto con el evaporador.

Zona 2. Parte intermedia de la capa de hielo.

Zona 3. Superficie en contacto con el líquido.

En cada una de estas zonas se llevó a cabo un número de raspados, como se indica en la figura 4.10.

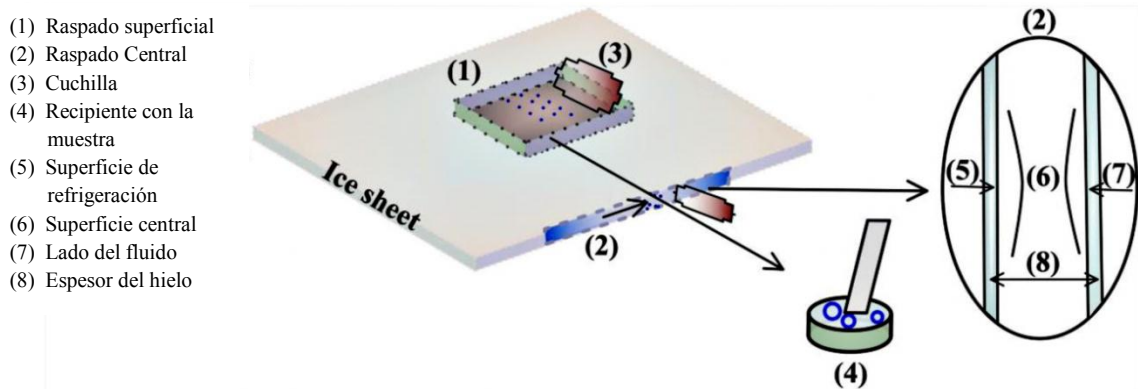


Fig. 4.10 Extracción de muestras de las tres zonas de la capa de hielo

Las muestras se tomaron por triplicado en un área de 30 mm x 120 mm. Después, se determinaron el peso y la anchura. Finalmente la concentración de cada muestra se midió con el refractómetro.

b) Con el fin de verificar la similitud entre las muestras utilizadas en los estudios de deshielo y las capa de hielo obtenida a partir de la concentración por congelación, se investigó la uniformidad de la SMFI mediante el análisis de muestras de varias partes de la capa de hielo .

Extracciones de muestra se llevaron a cabo de manera uniforme en puntos distribuidos de manera uniforme, creando una matriz de 3 filas por 4 columnas (figura 4.11) Las muestras extraídas se descongelaron y se midió la concentración de solutos °Brix.

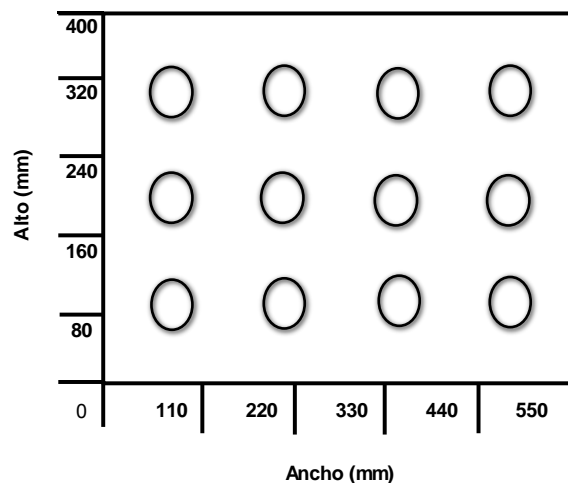
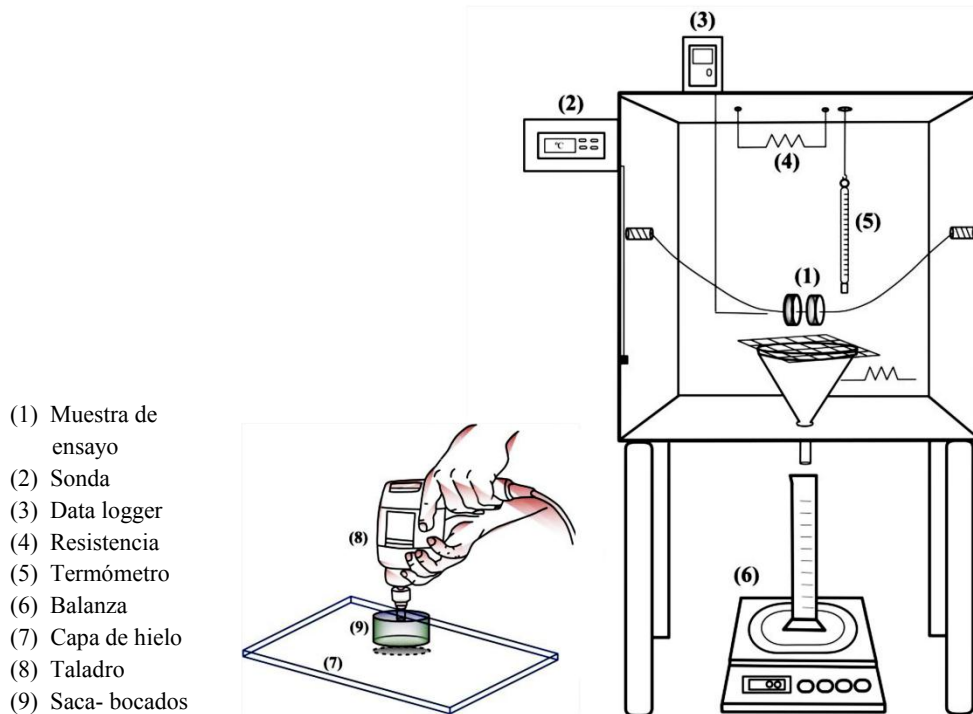


Fig. 4.11 Esquema de la distribución de soluto en la capa de hielo

## 4.5. EQUIPO EXPERIMENTAL DE DESHIELO FRACCIONADO Y ENSAYOS

### 4.5.1. Estufa de laboratorio

La estufa de laboratorio utilizada (figura 4.12) tiene como finalidad lograr que la temperatura sea constante durante los ensayos de deshielo fraccionado.



**Fig. 4.12** Esquema de extracción de muestras de ensayo y estufa de laboratorio

#### *Características técnicas*

Fabricado en acero inoxidable, con imprimación de color gris. La parte exterior está cubierta con una capa de 3 mm de material aislante térmico adhesivo (basada en isopreno con agregado resinas y materiales de relleno sintético).

Medidas máximas 480 x 480 x 480 mm. (ancho x fondo x alto).

Soportes cilíndricos de altura de 415 mm.

La apertura de la estufa de laboratorio se realiza por la parte posterior mediante una puerta de metacrilato transparente. Esta característica permite en todo momento observar los ensayos de deshielo fraccionado.

La aportación de calor en el interior de la estufa de laboratorio se establece mediante resistencias ubicadas tanto en la parte superior como en la parte inferior, de ésta forma se asegura una mejor distribución del calor. El consumo de las resistencias oscila entre 40 a 300 W, regulado por un controlador piezoeléctrico (Pie Electro Dit, modelo 551 11, 0 a 300 W) y una sonda de temperatura NTC/PTC (Mundo central, OSAKA, midiendo el rango de -50 a + 150 °C). La estufa de laboratorio está equipada con un registrador de datos de 4 canales Testo 177-T4, separadamente termómetros Beckman descritos en el apartado 4.3.3, que permiten en todo momento controlar la temperatura dentro de la estufa de laboratorio. Tanto las resistencias de calentamiento y el registrador de datos utilizan la tensión estándar alimentación 230 V AC.

#### **4.5.2. Método de deshielo fraccionado**

Las muestras para los estudios de deshielo fraccionados fueron obtenidas de las capas de hielo de cada etapa de proceso de crioconcentración, (apartado 4.4.3). Las extracciones de las muestras se realizaron mediante el uso de herramienta eléctrica tipo taladro equipado con instrumento con boca hueca y cortes afilados "sacabocados" (Esgarret, España) con un diámetro de 60 mm (figura 4.12). Usando un instrumento para medir dimensiones de objetos relativamente pequeños "calibre o pie de rey", se realizan 4 mediciones tanto al espesor como al diámetro.

Utilizando una broca pequeña se realizó un agujero de 0,5 mm de diámetro en las muestras cilíndricas. Posteriormente se atraviesa un hilo y se cuelga dentro de la estufa de laboratorio. Para realizar los deshielos fraccionados se fijan temperaturas de 20 °C, 25 °C y 30 °C. Debido a la temperatura ambiente (superior a 20 °C) de la planta piloto los ensayos a 20 °C, se realizan dentro de una cámara frigorífica con una temperatura 15 °C, 5 °C por debajo de la temperatura en el cual se realiza el deshielo. Para los estudios de deshielo a 25 °C y 30 °C se instala la cámara en el exterior, dentro del recinto de la planta piloto a temperatura ambiente. El deshielo se llevó a cabo en posición vertical, similar a la posición que tienen las capas de hielo en el crioconcentrador, como se muestra en la figura 4.12.

#### ***Deshielo fraccionado***

El goteo de producto de la fusión del hielo es recogido por un embudo y está dirigido a un tubo de ensayo ubicado en una balanza que mide el peso. El peso del líquido obtenido se registra como función de los tiempos de deshielo tiempo. Las mediciones se realizan en diez fracciones de igual peso.

De esta manera, se realizaron estudios deshielos fraccionados obtenidos de los ensayos de crioconcentración en cuatro etapas del proceso, para cada uno de los azúcares básicos y para el modelo de zumo de melocotón.

### **4.6. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE ESTUDIO**

#### ***4.6.1. Relación de similitud. Factor de forma (ff)***

La relación  $ff$  ha sido utilizada por Isachenko (1973) para definir propiedades sobre el calentamiento-enfriamiento de los cuerpos, estableciendo que la propagación de calor de un cuerpo depende de la relación entre su superficie y su volumen.

Las capas de hielo obtenidas del proceso de crioconcentración, dadas sus dimensiones, es físicamente inadecuado, por las condiciones de diseño del equipo (variables no controlables), realizar los deshielos fraccionados. Por tanto, es importante contar con muestras más pequeñas que permitan efectuar los ensayos de forma repetitiva, así como también relacionar el comportamiento de las variables de deshielo con las capas de hielo obtenidas en el crioconcentrador. La forma de mantener la similitud entre las variables de deshielo de las capas de hielo y las muestras de ensayo está determinada por su forma geométrica o factor de forma ( $ff$ ) que relaciona la superficie con el volumen:

$$ff = \frac{S}{V} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (4.1)$$

Donde  $S$  es el área de la superficie ( $m^2$ ) y  $V$  es el volumen ( $m^3$ ). El factor de forma ( $ff$ ) para las capas de hielo obtenidas del proceso de crioconcentración están determinadas por (largo x ancho x grosor)  $a \times b \times e$  dada en la ecuación:

$$ff = \frac{2(a.b) + 2e(a + b)}{a.b.e} \quad (m^{-1}) \quad (4.2)$$

El factor de forma par alas muestras de ensayo es calculado por la ecuación:

$$ff = \frac{2(R + e)}{R.e} \quad (m^{-1}) \quad (4.3)$$

#### **4.6.2. Porcentaje de soluto acumulado (%)**

El porcentaje de soluto acumulado se calcula mediante la ecuación (4.4):

$$\text{Solute acumulado} = 100 \times \frac{\text{masa total del soluto acumulado hasta la fracción descongela da/masa soluto inicial}}{\text{masa soluto inicial}} \quad (\%) \quad (4.4)$$

#### **4.6.3. Porcentaje de volumen acumulado (%)**

El porcentaje del volumen acumulado se calcula mediante la ecuación (4.5):

$$\text{Volumen Acumulado} = 100 \times \frac{\text{volumen acumulado hasta la fracción descongela da/volumen soluto inicial}}{\text{volumen soluto inicial}} \quad (\%) \quad (4.5)$$

#### **4.6.4. Índice de concentración**

Para analizar la concentración alcanzada en las diferentes fracciones de deshielo se emplea el ratio índice de concentración adoptado por Yee et al (2003):

$$IC = \frac{\text{Concentración de la fracción}}{SMFI} \quad (4.6)$$

Donde:

La concentración de la fracción es el valor de la concentración de solutos en la fracción descongela da expresada en °Brix, y SMFI es el valor de la concentración promedio de la muestra expresada en °Brix.

#### **4.6.5. Índice de concentración Acumulado**

El índice acumulado es la suma de  $n$  índice de concentración dividido por  $n$ :

$$IA = \frac{\sum_{i=1}^n IC_i}{n} \quad (4.7)$$

Donde:

$IA$  es el índice acumulado,  $IC$  el índice de concentración,  $n$  es el número de fracciones de deshielo.

#### **4.6.6. Densidad del hielo**

Para hallar la densidad del hielo del proceso a la temperatura de estudio, establecemos una recta con dos puntos extremos, establecidos por el hielo puro, equivalente a 0 °Brix y el hielo a 100 °Brix formado solo por carbohidrato. Con esta recta, obtenemos la ecuación de la densidad del hielo de proceso en función de los °Brix.

La densidad del carbohidrato en función de la temperatura viene dada por la ecuación (Ibarz et al 2005):

$$\rho_c = 1,5991 \cdot 10^3 - 0,31046 T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.8)$$

La densidad del hielo función de la temperatura viene dada por la ecuación (Ibarz et al 2005):

$$\rho_{ice} = 916,89 - 0,3071 T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.9)$$

Remplazando  $T$  por la temperatura de la cámara (-18 °C), se obtienen los valores 1.604,68 y 919,24 (kg/m<sup>3</sup>), éstos corresponden a 100 °Brix y 0 °Brix, respectivamente.

Finalmente, suponiendo una relación lineal entre la densidad y la concentración (en °Brix), a partir de los dos pares de datos se obtiene ( $\rho_1$ , °Brix), (1.604,68, 100) y (919,24, 0), y resulta la ecuación lineal:

$$\rho_{-18^\circ C} = 6,85 Bx + 919,24 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.10)$$

#### **4.6.7. Determinación del tiempo de deshielo**

##### **4.6.7.1. Corrección del tiempo de deshielo**

Las muestras para realizar los deshielos fraccionados obtenidas de las capas de hielo (apartado 4.4.3), fueron extraídas a la temperatura de la cámara frigorífica (-18 °C), lugar donde se almacenaron después del proceso de crioconcentración.

Es importante, a efectos de ensayos, considerar que la temperatura de las capas de hielo una vez finalizado el proceso de crioconcentración es considerablemente más alta.

Por tanto, es necesario determinar el tiempo que se necesita para aumentar la temperatura de las muestras de ensayo de su valor preliminar (-18 °C) a la temperatura en la cual se inician los deshielos fraccionados (temperatura de las capas de hielo al final del proceso de crioconcentración). Una vez determinado la magnitud del tiempo se establece la corrección.

Este proceso se realizó en base al cálculo de transferencia de calor para sistemas de concentrados, descrito por Yunus (2007).

La tabla 4.7 describe las correlaciones básicas relacionadas con las propiedades físicas del hielo, que permiten determinar la corrección del tiempo de las diferentes muestras utilizadas en los deshielos fraccionados.

**Tabla 4.7.** estimación de la corrección del tiempo de deshielo

Propiedades físicas	Correlación	Referencias
Calor específico para carbohidratos	$C_{e1} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3}T_a - 5,9399 \cdot 10^{-6}T_a$	(4.11) Ibarz et al (2005)
Calor específico para el hielo	$C_{e2} = 2,0623 + 6,076910 \cdot 10^{-3}T_a$	(4.12) Ibarz et al (2005)
Fracción de masa del hielo	$X_{ice} = \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100}$	(4.13)
Fracción de masa del soluto	$X_c = \frac{Bx \cdot p}{100}$	(4.14)
Fracción de masa total	$X_T = X_{ice} + X_c$	(4.15)
Densidad del hielo (-18 °C)	$\rho_{-18^\circ C} = 6,85Bx + 919,2$	(4.10) Gulfo et al (2013)
Depresión del punto de congelación	$FPD = \frac{K_c X_c}{(1 - X_c - b_{ni} X_c) \cdot M_S}$	(4.16) Auleda et al (2011a)
Numero adimensional (1)	$\theta_1 = \frac{FPD - T_{amb}}{T_{ref} - T_{amb}}$	(4.17) Yunus (2007)
Constante de tiempo	$b_2 = \frac{-\ln \theta_1}{t}$	(4.18) Yunus (2007)
Temperatura promedio en el hielo	$T_{ats} = -(-FPD + 1,995)$	(4.19) Auleda et al (2011a)
Numero adimensional (2)	$\theta_2 = \frac{T_{ats} - T_{amb}}{T_{ref} - T_{amb}}$	(4.20) Yunus (2007)
Magnitud de tiempo corrector	$t_2 = \frac{-\ln \theta_2}{b_2}$	(4.21) Yunus (2007)
Magnitud de tiempo Corregido	$t_{ct} = t_2 - t_1$	(4.22)
Temperatura promedio en la muestra (-18 °C)	$T_a = \frac{T_{ref}}{2}$	(4.23)
Coefficiente de transferencia de calor	$\alpha = 1000 \cdot b_2 \cdot \rho_{-18^\circ C} \cdot \frac{X_T}{ff}$	(4.24)
Coefficiente de conducción de calor	$k = (2,2196 - 6,248910 \cdot 10^{-3} \cdot T_a) + 1,01551^{-4} \cdot T_a^2$	(4.25)
Numero de Biot	$Biot = \frac{\alpha}{k \cdot ff}$	(4.26)

Según Yunus (2007), el análisis de sistemas concentrados se supone una distribución uniforme de temperatura en todo el cuerpo, el cual es el caso sólo cuando la resistencia térmica de éste a la conducción de calor (la resistencia a la conducción) sea cero. Por consiguiente, el análisis de sistemas concentrados es exacto cuando  $Bi = 0$  y aproximado cuando  $Bi > 0$ . Por supuesto, entre más pequeño sea el número  $Bi$ , más exacto es el análisis de los sistemas concentrados. En general se acepta que el análisis de sistemas concentrados es aplicable si  $Bi \leq 0,1$ . Cuando se satisface este criterio, las temperaturas dentro del cuerpo con relación a la de los alrededores permanecen dentro de un margen de 5% entre sí. Como consecuencia, cuando  $Bi < 0,1$  la variación de la temperatura con la ubicación dentro del cuerpo es ligera y, de manera razonable, se puede considerar como si fuera uniforme.

Todos los tiempos de deshielo de los ensayos realizados en el presente documento fueron corregidos con el procedimiento antes descrito, realizándose los calculos con Mathcad 14 software

#### **4.6.7.2. Porcentaje de tiempo de deshielo**

El porcentaje de tiempo de deshielo se obtiene de la relación entre el tiempo parcial de deshielo de las muestras y el tiempo total.

El porcentaje del tiempo de deshielo se calculó utilizando la ecuación (4.27):

$$\text{Tiempo} = 100 \times \frac{\text{tiempo acumulado hasta la fracción descongelada}}{\text{tiempo total}} \quad (\%) \quad (4.27)$$

#### **4.6.7.3. Tiempo acumulado**

El tiempo acumulado es la suma de los n tiempos de las fracciones de deshielo fraccionado:

$$AT = \sum_{i=1}^n t_i \quad (\text{minutos}) \quad (4.28)$$

Donde:

$AT$  es el índice de tiempo acumulado,  $t_i$  es el tiempo de cada fracción, y  $n$  es el número de fracciones.

#### **4.6.7.4. Velocidad de deshielo:**

La relación entre el volumen y el tiempo se definen como la velocidad de deshielo, (Yee et al 2003):

$$v_{des} = \frac{V}{t} = \frac{M}{t \rho} \quad (\text{minutos}) \quad (4.29)$$

Donde:

$v_{des}$  es velocidad de deshielo,  $V$  es el volumen,  $t$  es el tiempo,  $M$  es la masa y  $\rho$  es la densidad.

#### 4.6.7.5. Relación tiempo y $ff$

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton:

$$Q = \alpha S \Delta T \quad (\text{W}) \quad (4.30)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $S$  es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección,  $\Delta T = T_{\text{amb}} - T_{\text{deshielo}}$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_{\text{deshielo}}$  es la temperatura de la superficie del hielo y  $T_{\text{amb}}$  es la temperatura del fluido, suponiendo que el deshielo se establece aproximadamente a  $0^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{deshielo}} = 0$ , entonces:  $\Delta T = T_{\text{amb}}$ .

Si la temperatura ambiente se mantiene constante durante el deshielo, se puede suponer que  $\Delta T$  es constante  $\Delta T = K_T$  y que tiene el valor de la temperatura ambiente a la que se realiza el deshielo.

Si el fluido alrededor de la fusión del hielo (aire o gas inerte), se encuentra en las mismas condiciones durante todo el proceso, se puede suponer que durante el deshielo  $\alpha$  es constante  $\alpha = K_\alpha$ . También se supone que las desviaciones entre las principales variables de deshielo para las  $N$  fracciones son pequeñas (se estima constante). La ecuación (4.30) se puede simplificar a:

$$Q = k_\alpha k_T S \quad (\text{W}) \quad (4.31)$$

El calor de fusión queda determinado por la ecuación:

$$h = M H_{ice} \quad (\text{kJ}) \quad (4.32)$$

Donde  $M$  es la masa de hielo (kg) y  $H_{ice} = 335 \text{ kJ kg}^{-1}$ , y el flujo de calor ( $Q = h/t$ ):

$$Q = \frac{M H_{ice}}{t} \quad (\text{W}) \quad (4.33)$$

Combinado (4.31) y (4.33) y sustituyendo  $M = V \rho_{CI}$  se obtiene la ecuación (4.34):

$$k_\alpha k_T S = \frac{V \rho_{CI} H_{ice}}{t} \quad (4.34)$$

Sustituyendo la ecuación (4.1) en (4.34), queda definida como:

$$t = \frac{\rho_{CI} H_{ice}}{K_\alpha K_T ff} \quad (\text{s}) \quad (4.35)$$

Reduciendo (3.33):

$$t = \frac{\rho_{ice} K}{ff} \quad (\text{s}) \quad (4.36)$$

Donde:



$\rho_{ice}$  = densidad del hielo durante el proceso ( $\text{kg/m}^3$ )

$K$  = Coeficiente de deshielo ( $\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ )

$ff$  = factor de forma ( $\text{m}^{-1}$ )

## 4.7. HERRAMIENTAS DE ANALISIS ESTADISTICO

### 4.7.1. Análisis simple de varianza (One-Way ANOVA)

Para comprobar la normalidad de la distribución experimental se realizan los gráficos de probabilidad con el Minitab 16 Statistical Software.

Antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA), se verificó que los datos cumplían el criterio de homocedasticidad. La prueba usada para contrastar si varias muestras son homocedásticas (tiene la misma varianza) es la prueba de Bartlett, y de comparaciones múltiples entre medias se utiliza la prueba de Tukey.

Los ensayos de deshielos fraccionados se realizaron por triplicado y los datos obtenidos se indican como el valor medio de las mismas. Con el fin de verificar si las medias y las varianzas de las muestras son similares, se realiza un análisis simple de la varianza (One-Way ANOVA) a un nivel de significación del 95%.

El análisis de varianza (ANOVA) es la herramienta estadística básica para evidenciar la presencia o no de diferencias significativas entre las medias de grupos de datos. En diversos escenarios el error de medición o la propia variabilidad del proceso analizado hace muy dificultoso demostrar diferencias significativas, fundamentalmente cuando el orden de variación de estas es moderadamente pequeño y no es posible estimar con claridad si hay o no diferencias entre diferentes subgrupos ya que estas se confunden con la variación del conjunto de datos. Partiendo de éste supuesto, se recurre al test de Bartlett, que determina la desigualdad de las varianzas.

La metodología para poner a prueba la hipótesis de igualdad de medias consiste en obtener un estadístico, llamado F, que muestra el grado de semejanza existente entre las medias que se están comparando. El numerador del estadístico F es una estimación de la varianza poblacional basada en la variabilidad existente entre las medias de cada grupo. El denominador del estadístico F es también una estimación de la varianza poblacional, pero basada en la variabilidad existente dentro de cada grupo.

El análisis de varianza se aplicó a los datos de tiempos de deshielo fraccionado e índices de concentración.

Los cálculos de la recta de Henri, ANOVA, prueba de Bartlett y prueba de Tukey, se realizaron con el Software GraphPad Prism 5 y Excel (Microsoft).

### 4.7.2. Root Mean Square RMS

Con la información recopilada se realiza una predicción del proceso y esta debe contrastarse con la información estimada en el análisis de resultados; la diferencia entre ambas es el error del modelo. Este error deberá ser suficientemente pequeño para considerar el modelo como válido, en caso contrario deberá reconsiderarse. Este procedimiento se establece para los resultados de zumo de melocotón simulado y azúcares básicos.

La calidad del ajuste la comprobamos mediante la root mean square (RMS) dada por la ecuación:

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{\sum \left( \frac{V_{EXP} - V_{PRED}}{V_{PRED}} \right)^2}{N}} \quad (4.37)$$

Donde:

$V_{EXP}$  y  $V_{PRED}$  son, valores experimentales y valores de la predicción respectivamente,  $N$  es el número de datos experimentales disponibles. Los cálculos se realizan utilizando Excel software (Microsoft).

#### 4.7.3. Coeficiente de correlación ( $r$ ) de Pearson

Para obtener una medida de correlación entre los valores experimentales y las predicciones del modelo se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ):

$$r = \frac{\sum (V_E - \overline{V_E}) (V_P - \overline{V_P})}{\sqrt{\sum (V_E - \overline{V_E})^2 \sum (V_P - \overline{V_P})^2}} \quad (4.38)$$

$\overline{V_E}$  y  $\overline{V_P}$  son los valores obtenidos a partir de experimentos y de predicción numérica, respectivamente.

El coeficiente de relación expresa en qué grado las muestras tienen el mismo orden en las variables  $\overline{V_E}$  y  $\overline{V_P}$ . Si la correlación es perfecta ( $r = 1$ ) el orden de las muestras en ambas variables es el mismo y el diagrama de dispersión coincidirá con una recta (la recta de regresión). Supone también, relaciones lineales en las que a un mayor valor en  $\overline{V_E}$  corresponde un mayor valor de  $\overline{V_P}$ , como se ve gráficamente en los diagramas de dispersión.

La variable criterio o dependiente  $\overline{V_P}$  es la que buscamos explicar o estimar (o predecir) por su relación con la variable  $\overline{V_E}$ , que es la variable independiente, explicativa.

La intención será entender, y explicar las diferencias en la variable  $\overline{V_P}$  a partir de su relación con la variable  $\overline{V_E}$ .

#### 4.7.4. Coeficiente de variación

La comparación de la variabilidad de muestras con medias distintas se determina a través del coeficiente de variación, el cual constata la dispersión relativa de la desviación típica dividida por la media (en consecuencia, no tiene unidades), se denota por  $Cv$  y se define como:

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} 100 \quad (4.39)$$

Donde:

$\sigma$  es la desviación estándar y  $\mu$  es la media.

Esta medida se utiliza para comparar la variabilidad de un grupo de datos que se exponen en mismo test aplicado en circunstancias distintas.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

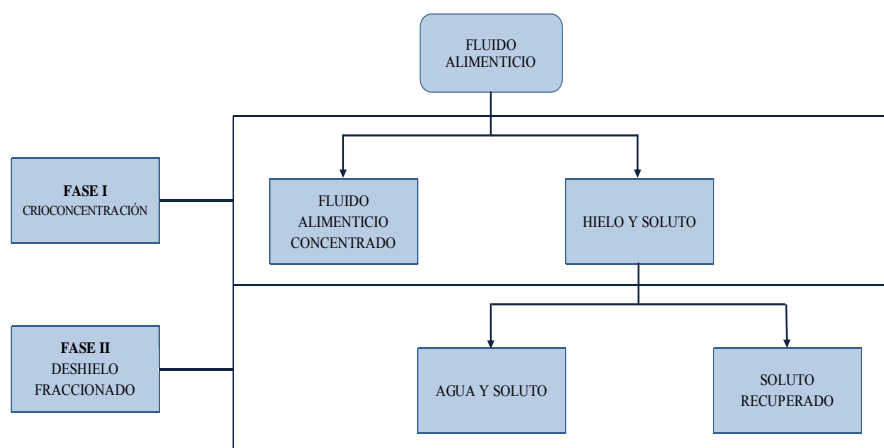
### 5.1. INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en el apartado 1.4 gran parte de los estudios sobre concentración por congelación en película han investigado la estructura de la capa sólida, la distribución de solutos y la eficiencia de procedimientos de post-congelación respecto a la eliminación de solutos en el hielo. También el efecto de las condiciones del proceso como la temperatura de sub-enfriamiento y el tiempo de congelación, que tiene influencia en la incorporación de soluto en la capa de hielo.

Estos estudios de alguna forma ejemplifican la dificultad de concatenar la concentración de fluido con una mínima cantidad de solutos ocluidos en el hielo.

Por esta razón se pretende analizar el proceso de deshielo fraccionado como método para recuperar los solutos ocluidos en el hielo formado en un criocentrador en capa en película descendente determinando los tiempos de deshielo y analizando las principales variables generadas por el sistema.

El esquema básico de la metodología utilizada en éste apartado se puede ver en la figura 5.1:



**Fig. 5.1** Esquema básico de la metodología utilizada en el proceso de criocentración y deshielo fraccionado

### 5.2. FASE I

#### 5.2.1. Criocentración

Se realizan ensayos de concentración de fluidos en el equipo piloto de criocentración en capa en película descendente descrito en el apartado 4.1, con soluciones de fructosa (*f*), glucosa (*g*), sacarosa (*s*) y zumo de melocotón simulado con concentraciones iniciales aproximadas de 5, 10, 15 y 20 °Brix en 4 etapas del proceso (tabla 5.1).

**Tabla 5.1.** Etapas del proceso de criocentración

Etapas	FRUCTOSA		GLUCOSA		SACAROSA		ZUMO DE MELOCOTÓN	
	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)
1	5,1	6,5	4,9	6,6	5,0	7,2	5,1	6,6
2	9,9	12,4	10,0	12,8	10,0	12,4	10,0	12,8
3	15,0	18,0	15,0	17,9	15,0	17,2	14,9	17,9
4	19,9	22,8	20,0	23,4	20,0	22,2	20,0	24,1

## ***Discusión***

En la Tabla 5.1 se recogen los valores de concentración de las diferentes etapas del proceso. Cada etapa finaliza cuando se alcanza una concentración final del fluido en el intervalo de 2,0 a 2,65 °Brix ( $\pm 0,5$  °Brix) superior a la concentración inicial.

Se observan diferencias en las concentraciones iniciales y finales por las siguientes razones:

- A. Los valores finales se deben al propósito para obtener las condiciones aproximadas en cuanto a homogeneidad en la forma de las capas de hielo. Es decir se establece una concentración final en función de las características de similitud geométrica de las capas de hielo (superficie y volumen).
- B. Así mismo los valores iniciales y finales están determinados por la condición de medición del refractómetro. °Brix se define como el porcentaje en peso de sacarosa pura que contiene una solución. por tanto para las muestras que contienen sacarosa la medición de °Brix es mas precisa. Para las soluciones de fructosa y glucosa, los valores están determinados como un valor relativo. Es decir los valores pueden diferir o ajustarse más a los valores de medición de las muestras que contienen sacarosa (tabla 5.1).

Aunque la designación de °Brix es rigurosamente válida sólo para soluciones cuyos sólidos son en su totalidad sacarosa, la industria utiliza la medición libremente para referirse a cualquier fluido con contenido de azúcares en un producto.

Según la bibliografía, para las muestras de fructosa, glucosa y zumo de melocotón simulado, la medida se puede realizar directamente del refractómetro, sin tener en cuenta las posibles diferencias (Hernández 2008).

- C. Otra causa de la posible diferenciación de los valores se debe a los mecanismos de interacción agua-azúcar, y pueden ser interpretados en términos de variaciones en la estructura del agua. La fructosa, glucosa, y sacarosa en concentraciones bajas se comportan como estructura intermedia en la formación de agua, mientras que a concentraciones más altas pueden actuar como responsables de la estructura.

### ***5.2.1.1. Obtención y caracterización de las capas de hielo de las distintas etapas del proceso de crioconcentración***

El hielo se obtiene de los ensayos de concentración de fluidos en el equipo piloto de crioconcentración en capa en película descendente descritos en el apartado 4.1. y 5.2.1. Posteriormente a la formación del hielo, éste se separa de la unidad evaporadora y se almacena en una cámara frigorífica a  $-18$  °C, durante algunas horas (entre 60 y 240 minutos), donde se caracteriza y clasifica para realizar el muestreo.

Los resultados generales del proceso de obtención del hielo se describen en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Características generales del hielo obtenido del proceso de crioconcentración

Descripción	Fructosa		Glucosa		Sacarosa		Zumo de Melocotón	
	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo
Ancho (cm)	35,2	39,5	33,5	43,8	34,7	43,5	34,6	38,6
Largo (cm)	55,0	57,0	55,0	55,6	49,5	56,0	54,5	55,3
Grosor (cm)	1,4	1,5	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4
Tiempo (min)	96,4	207,0	115,0	230,0	208,0	227,0	141,7	190,0
Peso (g) <sup>a</sup>	5500,0		5200,0		4900,0		5000,0	

<sup>a</sup>Peso promedio total para cada etapa del proceso para los diferentes fluidos

### ***Discusión***

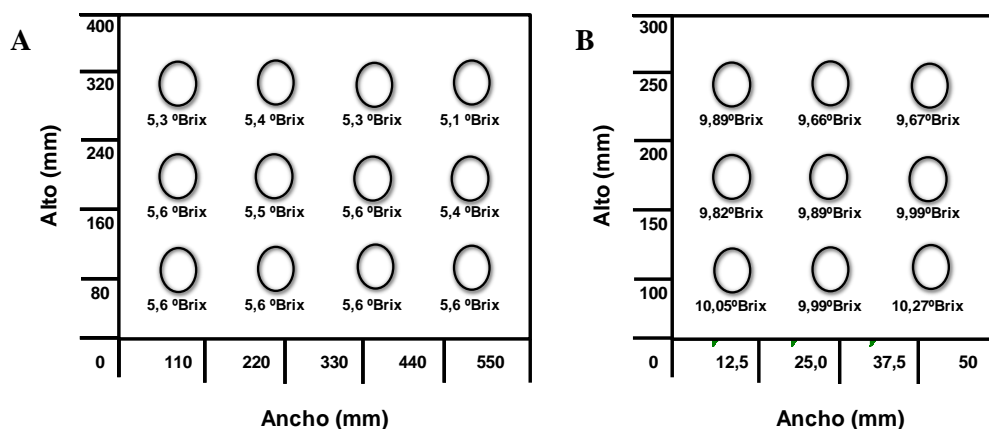
Los resultados de la tabla 5.2 representan los valores de las medias para cada fluido del hielo generado en las 4 etapas del proceso en el equipo piloto de concentración. Cabe destacar que las dimensiones de las placas son medidas que se han realizado tal y como han sido separadas de la unidad de evaporación, se tiene en cuenta la irregularidad de forma de las capas a causa de la formación normal del hielo.

De igual forma el tiempo representa la magnitud de los ensayos para obtener las capas de hielo, y se corresponden con los ensayos realizados por Hernández (2008) y Auleda (2008), para ensayos de los azúcares básicos.

El peso es el total del hielo generado en cada una de las placas útiles para los ensayos de crioconcentración se realizaron con las placas 5 y 3 (ver figura 4.9).

#### ***5.2.1.2. Uniformidad del soluto en la masa de hielo***

Con el fin de comprobar la analogía de las muestras utilizadas en el deshielo con las placas obtenidas del proceso en el equipo piloto de concentración se analiza la uniformidad del soluto en la masa de hielo en distintos puntos de la placa como se describe en el apartado 4.4.4. Las muestras extraídas se deshielan y se miden los °Brix. Los resultados se reflejan en la figura 5.2.



**Fig. 5.2** Distribución de soluto en la capa de hielo. A, resultados del hielo obtenido con una etapa de concentración de 14,8 a 18,2 °Brix. B, Ensayos realizados por Chen et al (1998) con concentración de 20 °Brix. Soluto sacarosa<sup>1</sup>

### Discusión

Chen et al (1998, 1999), realizó un estudio similar donde determinó la distribución espacial de la inclusión de soluto en la capa de hielo a lo largo de la placa y los efectos de la velocidad de la solución y la temperatura del refrigerante, los ensayos se realizaron en un cristizador de película descendente con soluciones de sacarosa.

Como se puede observar en la figura 5.2 A, los valores en cuanto a uniformidad de los niveles de inclusión de soluto en el hielo en diferentes puntos de la capa son muy homogéneos.

Los valores se analizaron mediante la utilización del coeficiente de variación, así mismo se realizó una comparación con los valores obtenidos por Chen et al (1998) figura 5.2 B, los resultados se pueden ver en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3.** Comparación entre los valores de ensayos y los resultados obtenidos por Chen P. et al (1998)

Valores de ensayos (°Brix)								Valores de ensayos (°Brix) Chen P et al (1998)						
1	2	3	4	DS	Media	Cv		1	2	3	DS	Media	Cv	
1	5,3	5,4	5,3	5,1	0,1	5,3	2,4	1	9,9	9,7	9,7	0,1	9,7	1,3
2	5,6	5,5	5,6	5,4	0,1	5,5	1,7	2	9,8	9,9	10,0	0,1	9,9	0,9
3	5,6	5,6	5,6	5,6	0,0	5,6	0,0	3	10,1	10,0	10,3	0,1	10,1	1,5
DS	0,2	0,1	0,2	0,3				DS	0,1	0,2	0,3			
Media	5,5	5,5	5,5	5,4			Cv total = 3,05	Media	9,9	9,8	10,0			Cv total = 1,92
Cv	3,1	1,8	3,1	4,7				Cv	1,2	1,7	3,0			

DS: Desviación estándar. Cv: coeficiente de variación expresado en (%)

Se observa un coeficiente de variación menor para los ensayos realizados por Chen et al (1998), éste comportamiento se puede explicar por la diferencia en las dimensiones de la placa y

<sup>1</sup> Todas las figuras a partir de la figura 5.2 se sustituye la coma de separación del decimal por punto

probablemente a la diferencias en la velocidad de la solución a lo largo de las respectivas placas. También para el caso del equipo piloto de crioconcentración se puede ver a partir de los coeficientes de variación parcial establecidos por columnas presentan mayor variación que los coeficientes de variación dados por filas, esto puede ser por el efecto de transferencia de masa provocado por la formación del hielo y la caída del fluido sobre la placa de arriba hacia abajo.

### 5.2.1.3. Caracterización del soluto en la masa de hielo

Los valores de distribución de soluto se obtienen siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.4.4. (a), la tabla 5.4 representa los valores de los diferentes etapas del proceso y para las diferentes soluciones de azúcares básicos y zumo de melocotón simulado.

**Tabla 5.4.** Resultados de la distribución del soluto en la masa del hielo

Descripción		Etapa 1 (°Bx)	Etapa 2 (°Bx)	Etapa 3 (°Bx)	Etapa 4 (°Bx)
Sacarosa	Concentración inicial del fluido	5,0±0,1	10,0±0,1	15,0±0,1	20,0±0,1
	Concentración Final del fluido	7,2±0,1	12,4±0,1	17,2±0,1	22,2±0,1
	SMFI <sup>a</sup>	1,0±0,1	3,4±0,1	5,8±0,1	8,6±0,1
	Superficie en contacto con evaporador	2,3 (0,153) <sup>b</sup>	7,6 (0,153) <sup>b</sup>	9,3 (0,252) <sup>b</sup>	10 (0,351) <sup>b</sup>
	Zona intermedia del hielo	1,2 (0,153) <sup>b</sup>	3,6 (0,200) <sup>b</sup>	5,8 (0,153) <sup>b</sup>	9,5 (0,252) <sup>b</sup>
	Superficie en contacto con fluido	1,4 (0,058) <sup>b</sup>	3,9 (0,252) <sup>b</sup>	6,7 (0,200) <sup>b</sup>	9,7 (0,351) <sup>b</sup>
Fructosa	Concentración Final del fluido	6,5±0,1	12,4±0,1	18±0,1	22,8±0,1
	SMFI <sup>a</sup>	1,7±0,1	2,4±0,1	4,5±0,1	8,8±0,1
	Superficie en contacto con evaporador	2,5 (0,153) <sup>b</sup>	6,4 (0,252) <sup>b</sup>	9,4 (0,252) <sup>b</sup>	13,7 (0,351) <sup>b</sup>
	Zona intermedia del hielo	1,4 (0,058) <sup>b</sup>	3,9 (0,153) <sup>b</sup>	6,5 (0,200) <sup>b</sup>	8,8 (0,153) <sup>b</sup>
	Superficie en contacto con fluido	1,9 (0,153) <sup>b</sup>	4,4 (0,252) <sup>b</sup>	7,5 (0,252) <sup>b</sup>	6,0 (0,300) <sup>b</sup>
Glucosa	Concentración Final del fluido	6,6±0,1	12,8±0,1	17,9±0,1	23,4±0,1
	SMFI <sup>a</sup>	1,2±0,1	3,3±0,1	5,6±0,1	7,7±0,1
	Superficie en contacto con evaporador	2,9 (0,058) <sup>b</sup>	6,7 (0,153) <sup>b</sup>	11,9 (0,351) <sup>b</sup>	16,8 (0,451) <sup>b</sup>
	Zona intermedia del hielo	1,3 (0,058) <sup>b</sup>	3,6 (0,100) <sup>b</sup>	6,9 (0,200) <sup>b</sup>	8,4 (0,252) <sup>b</sup>
	Superficie en contacto con fluido	1,4 (0,100) <sup>b</sup>	4,8 (0,351) <sup>b</sup>	7,5 (0,252) <sup>b</sup>	8,7 (0,351) <sup>b</sup>
Zumo de melocotón (s)	Concentración Final del fluido	6,6±0,1	12,8±0,1	17,9±0,1	24,1±0,1
	SMFI <sup>a</sup>	1,3±0,1	3,0±0,1	5,7±0,1	7,8±0,1
	Superficie en contacto con evaporador	2,4 (0,100) <sup>b</sup>	6,1 (0,153) <sup>b</sup>	7,7 (0,252) <sup>b</sup>	14,4 (0,351) <sup>b</sup>
	Zona intermedia del hielo	1,4 (0,153) <sup>b</sup>	3,9 (0,153) <sup>b</sup>	6,2 (0,252) <sup>b</sup>	8,8 (0,300) <sup>b</sup>
	Superficie en contacto con fluido	1,6 (0,153) <sup>b</sup>	4,0 (0,252) <sup>b</sup>	7,0 (0,300) <sup>b</sup>	11,1 (0,351) <sup>b</sup>

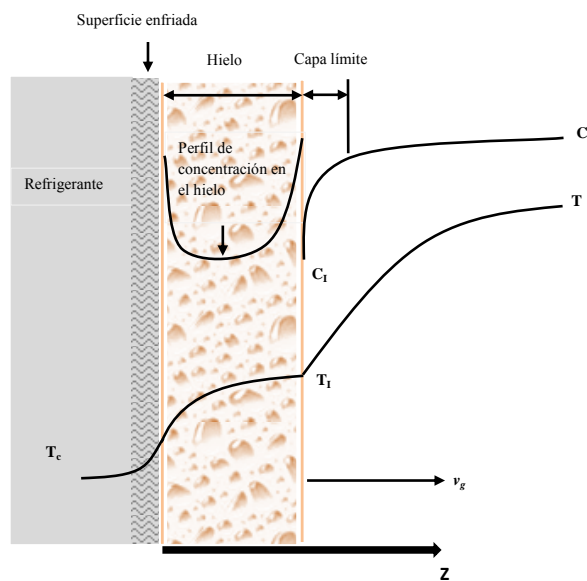
<sup>a</sup>SMFI (Fracción de soluto en la masa de hielo) <sup>b</sup>Desviación estandar

### Discusión

Los valores de la tabla 5.4 representan las concentraciones de las superficies de las diferentes placas de hielo de soluciones de fructosa, glucosa, y sacarosa.

Los resultados establecen:

- El hielo en contacto con el evaporador tiene una concentración de soluto más alta que la SMFI. Esta mayor impureza del hielo se debe a la nucleación y al elevado sub-enfriamiento. Estos resultados también fueron observados por Scholz (1993).
- De la misma manera, el hielo en contacto con el fluido tiene una concentración mayor que la SMFI, debido a sub-enfriamiento constitucional y la oclusión de soluto desde el líquido concentrado en contacto con la superficie del hielo. Los perfiles de temperatura y la concentración cerca de la interface sólido-líquido afectan la tasa de crecimiento de la capa de hielo, estas variables tienen una influencia en la estructura y la cantidad de inclusiones de impurezas en la capa de hielo (Kwang-Joo y Ulrich 2001). Sánchez et al (2011), sugiere que el crecimiento de dendritas y la oclusión soluto en el hielo son consecuencias de sub-enfriamiento en la interfaz sólido-líquido. Laari et al (1990) presentó un estudio con soluciones de lactosa y xilosa, y encontró que a concentraciones superiores a 3% w/w, el factor predominante en el crecimiento de los cristales es la transferencia de solutos cerca de la superficie de hielo.
- En la zona interna del hielo, la concentración de soluto es muy similar al SMFI. Esto puede atribuirse a la tasa de crecimiento de hielo decreciente. Esto permite el movimiento de solutos en el frente del hielo. Chen et al (1998) reportaron que la tasa de crecimiento de hielo disminuye cuando aumenta el grosor del hielo, figura 5.3.



**Fig. 5.3** Perfiles de temperatura y concentración en la capa de hielo, modificado de Chen et al (1998)

### ***Análisis de la concentración del proceso de criocentración***

El análisis de la concentración del proceso de criocentración se establece a partir de los conceptos: eficiencia del proceso ( $E$ ) y coeficiente de distribución ( $K_{dist}$ ), apartado 1.3 y apartado 1.4, respectivamente.

El coeficiente de distribución medio se puede utilizar para relacionar fracciones de masa de soluto en el hielo y la solución concentrada (Tiller 1963).

Bayindirli (1993) reportó coeficientes de distribución en función de la concentración media de los sólidos en las fases de hielo y líquidos para el zumo de manzana. Flesland (1995) compara la fracción media de masa de solutos en capas de hielo formadas a partir de la criocentración en



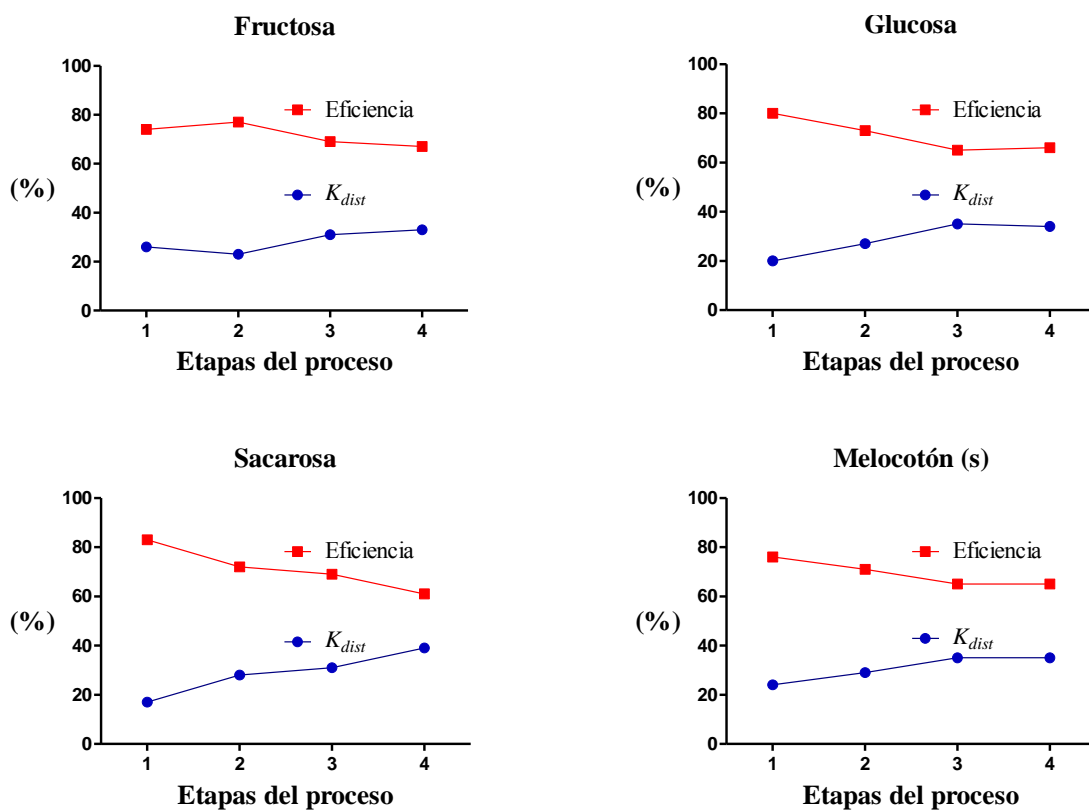
capa en película descendente con solución de sacarosa. Presentó la relación de los coeficientes de distribución media y la proporción de la tasa de crecimiento del hielo para el coeficiente de transferencia de masa. Miyawaki (2011), estudió la mejora de rendimientos de la concentración mediante la aplicación del deshielo fraccionado en el proceso de crioconcentración progresiva con soluciones de sacarosa.

Para analizar los resultados de la concentración del proceso de crioconcentración (Tabla 5.5) se tiene en cuenta el coeficiente de distribución determinado por la concentración en el hielo (SMFI) y la concentración del fluido al final del proceso:

**Tabla 5.5.** Concentración del fluido al final de cada etapa de proceso y SMFI

Etapas	Fructosa		Glucosa		Sacarosa		Zumo de	
	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)	$C_{LI}$ (°Bx)	$C_{LF}$ (°Bx)
1	6,5	1,7	6,6	1,3	7,2	1,2	6,6	1,6
2	12,4	2,9	12,8	3,5	12,4	3,5	12,8	3,7
3	18,0	5,5	17,9	6,2	17,2	5,3	17,9	6,2
4	22,8	7,6	23,4	8,0	22,2	8,6	24,1	8,4

A partir de la tabla 5.5 se obtiene la eficiencia en la figura 5.4.



**Fig. 5.4** Eficiencia y el coeficiente de distribución del proceso de crioconcentración

## ***Discusión***

La figura 5.4 se refiere al grado de aumento de la concentración en proporción con la cantidad de soluto retenido en el hielo para cada etapa del proceso de crioconcentración. Se puede observar que el fluido con mayor eficiencia en las primeras etapas del proceso es la sacarosa mientras que para la fructosa y glucosa los niveles de eficiencia fueron menores. Lo anterior coincide con los resultados expuestos por Raventós et al (2007).

Durante las etapas iniciales del proceso de concentración, la eficiencia es mayor, en las etapas de mayor concentración la eficiencia disminuyó considerablemente. Este efecto se esperaba debido al aumento en la viscosidad de las soluciones y corresponde con lo expuesto por Petzold et al (2013). Otros autores han atribuido la disminución en la eficiencia al aumento de la concentración inicial en función de presencia de agua ligada Aider y de Halleux, (2008). En los ensayos de crioconcentración de zumos de albaricoque y cereza, Aider y de Halleux, (2008) argumentaron que la cantidad de agua ligada aumenta en una solución al aumentar la concentración, y que este tipo de agua no se congela fácilmente, ya que se une a los azúcares. Por tanto, teniendo en cuenta que el agua ligada apenas puede congelar, se espera que la cantidad de éste tipo de agua aumente con el aumento de la concentración inicial de la solución.

Otro aspecto relevante en la figura 5.4 en cuanto a la eficiencia y el coeficiente de distribución es la tendencia de normalización de la curva a partir de la tercera etapa del proceso debido entre otros aspectos a la disminución del rendimiento del evaporador. A medida que la solución se vuelve más concentrada, la cantidad de agua eliminada en forma de hielo aumenta gradualmente.

En cuanto al coeficiente de distribución se puede observar una tendencia creciente. A mayor concentración en el fluido mayor es la retención de soluto en el hielo. Este sesgo se puede considerar como un punto débil en el proceso de crioconcentración en capa en película descendente, y para cualquier otro proceso de crioconcentración. Es por ello que se propone el deshielo fraccionado como herramienta de mejora en el rendimiento del proceso. Estos resultados coinciden con los reportados por Hernández et al (2009) para zumos de manzana, y pera, donde para concentraciones de entre 15 °Brix y 20 °Brix (aproximadamente), alcanzó coeficientes de distribución entre 30% y 39%. (Flesland 1995) realizó ensayos de crioconcentración en capa en película descendente y usando una mezcla binaria de agua y sacarosa alcanzó concentraciones de sacarosa en el hielo, entre 0,4% a 26,5% para concentraciones de sacarosa de 5% a 40%, respectivamente. De igual forma Miyawaki (2012) aplicando la crioconcentración progresiva, con soluciones de sacarosa consiguió mejorar los coeficientes de distribución entre un 21% y 28% para concentraciones de fluidos de 10 °Brix a 20 °Brix.

## **5.3. FASE II**

### ***5.3.1. Deshielo fraccionado de las muestras de ensayo***

En el apartado anterior (5.2.1.2 y 5.2.1.3) los resultados referentes a la caracterización del hielo obtenido del proceso de crioconcentración establecieron una buena uniformidad y distribución del soluto en las capas de hielo. No obstante una propiedad importante de los ensayos de deshielo fraccionado para el presente trabajo es la relación de similitud entre las muestras, determinadas por el factor de forma, apartado 4.6.1.

El factor de forma se establece como una relación de similitud de diseño de los deshielos fraccionados. Es una magnitud fijada en un intervalo determinado que permite comparar los resultados de las características preestablecidas en el presente estudio (tiempos de deshielo, índice de

concentración), de los diferentes deshielos fraccionados de las muestras y entre las muestras de ensayo.

### **Resultados**

La finalidad de los ensayos es evaluar el comportamiento de algunos componentes importantes de zumos de fruta como son los azúcares básicos (fructosa, glucosa y sacarosa) en solución, y zumo de melocotón simulado, durante el proceso de crioconcentración y en el post-proceso de recuperación del solutos retenido en el hielo aplicando la técnica de deshielo fraccionado.

A continuación se presentan los resultados de los deshielos fraccionados de las muestras de ensayo descritas en el apartado 4.5.2. Se evaluaron un total de 96 muestras. Los ensayos se realizan por duplicado, para cada una de las etapas del proceso a temperaturas de 20, 25 y 30 °C.

Previamente a los ensayos las muestras son pesadas. Posteriormente el peso de las muestras se divide en 10 partes y se establecen lecturas de tiempo y concentración, apartado 4.5.2.

Cabe anotar que la temperatura media de las muestras en el momento de realizar los deshielos fraccionados se aproxima a la temperatura de la cámara frigorífica (-18 °C). Por tanto las lecturas de los tiempos inicialmente se realizan teniendo en cuenta ésta referencia.

Una vez determinados los tiempos de deshielo de las muestras a temperatura de la cámara frigorífica (-18 °C), se establece el procedimiento de corrección de tiempos descrito en el apartado 4.6.7.1.

Todos los tiempos utilizados para el análisis del presente trabajo están corregidos a la temperatura media de las capas de hielo (ecuación 4.19).

Para establecer la corrección de tiempos de las muestras se consideran los siguientes valores:

Temperatura ambiente de deshielo:	$T_a = 20, 25 \text{ y } 30 \text{ °C}$ (según el ensayo)
Temperatura inicial de deshielo:	$T_{ref} = -18 \text{ °C}$ (temperatura de la cámara frigorífica)
Constante crioscópica del agua:	$K_c = 1860$
Fracción de soluto en el hielo:	$SMFI = \text{°Brix}$
El peso de la muestra:	$p$ (kg)
Peso molecular de fructosa:	$M_s = 180,16 \text{ g/mol}$
Peso molecular de glucosa:	$M_s = 180,16 \text{ g/mol}$
Peso molecular de sacarosa:	$M_s = 342,30 \text{ g/mol}$
Constante de fructosa. Chen (1986):	$b_{ni} = 0,10$
Constante de glucosa. Chen (1986):	$b_{ni} = 0,18$
Constante de sacarosa. Chen (1986):	$b_{ni} = 0,26$
Tiempo de caída de la primera gota	$t_{exp}$ (seg)
Factor de forma:	$ff$ (m <sup>-1</sup> )

Con las variables y mediante la aplicación del procedimiento de corrección de tiempos descrito en el apartado 4.6.7.1, se consiguen los valores de las restantes variables que permiten obtener los tiempos de corrección que se muestra en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6.** Variables del proceso de corrección de tiempo y tiempo corrector(\*)

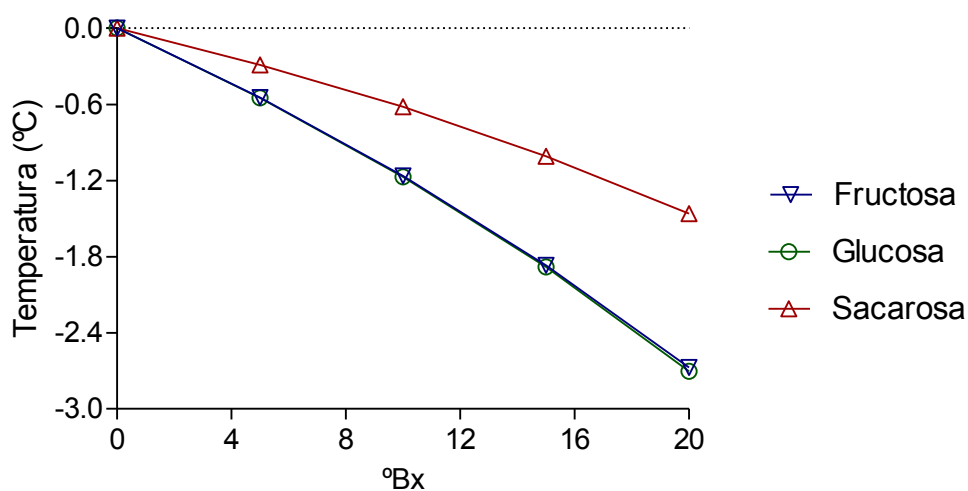
DESCRIPCIÓN	Variables del proceso de corrección de tiempo										
	T <sub>a</sub> (°C)	EP	SMFI (Brix)	FPD (°C)	<i>ff</i> (m <sup>-1</sup> )	$\theta_1$	$\theta_2$	<i>b</i> <sub>2</sub> (1/s)	<i>t</i> <sub>1</sub> (minutos)	<i>t</i> <sub>2</sub> (minutos)	<i>t</i> <sub>exp</sub> (minutos)
Fructosa ( <i>f</i> )	20	1	1,8	-0,19	177	0,53	0,58	6,023·10 <sup>-4</sup>	17,5	14,9	2,6
		2	3,0	-0,32	168	0,53	0,59	4,882·10 <sup>-4</sup>	21,4	18,2	3,2
		3	5,6	-0,62	180	0,54	0,60	7,629·10 <sup>-4</sup>	13,4	11,3	2,0
		4	7,3	-0,82	176	0,55	0,60	7,117·10 <sup>-4</sup>	14,1	12,0	2,1
Glucosa ( <i>g</i> )	20	1	1,4	-0,15	194	0,53	0,58	7,992·10 <sup>-4</sup>	13,2	11,3	2,0
		2	3,7	-0,40	190	0,54	0,59	6,790·10 <sup>-4</sup>	15,3	13,0	2,3
		3	6,2	-0,69	179	0,54	0,60	4,513·10 <sup>-4</sup>	22,5	19,1	3,4
		4	8,0	-0,91	204	0,55	0,60	7,094·10 <sup>-4</sup>	14,0	11,9	2,1
Sacarosa ( <i>s</i> )	20	1	1,3	-0,07	167	0,53	0,58	1,064·10 <sup>-3</sup>	10,0	8,5	1,5
		2	3,5	-0,20	200	0,53	0,58	9,394·10 <sup>-4</sup>	11,2	9,5	1,7
		3	5,1	-0,30	254	0,53	0,59	9,111·10 <sup>-4</sup>	11,5	9,8	1,7
		4	8,4	-0,51	164	0,54	0,59	4,384·10 <sup>-4</sup>	23,4	19,9	3,5
Melocoton ( <i>s</i> )	20	1	1,6	-0,11	171	0,53	0,58	5,438·10 <sup>-4</sup>	19,5	16,6	2,9
		2	3,7	-0,27	171	0,53	0,59	4,878·10 <sup>-4</sup>	21,5	18,3	3,2
		3	6,3	-0,47	186	0,54	0,59	4,125·10 <sup>-4</sup>	25,0	21,2	3,8
		4	8,3	-0,63	186	0,54	0,60	5,047·10 <sup>-4</sup>	20,2	17,1	3,0
Fructosa ( <i>f</i> )	25	1	1,6	-0,17	185	0,59	0,63	7,978·10 <sup>-4</sup>	11,2	9,6	1,6
		2	3,0	-0,32	173	0,59	0,64	6,157·10 <sup>-4</sup>	14,3	12,3	2,1
		3	5,4	-0,59	172	0,60	0,64	7,807·10 <sup>-4</sup>	11,1	9,5	1,6
		4	8,6	-0,98	226	0,60	0,65	9,188·10 <sup>-4</sup>	9,1	7,8	1,3
Glucosa ( <i>g</i> )	25	1	1,3	-0,14	177	0,58	0,63	7,912·10 <sup>-4</sup>	11,3	9,7	1,6
		2	3,3	-0,36	188	0,59	0,64	8,002·10 <sup>-4</sup>	11,0	9,4	1,6
		3	6,2	-0,69	175	0,60	0,64	5,982·10 <sup>-4</sup>	14,4	12,3	2,1
		4	8,1	-0,92	207	0,60	0,65	6,868·10 <sup>-4</sup>	12,3	10,5	1,8
Sacarosa ( <i>s</i> )	25	1	1,0	-0,06	195	0,58	0,63	1,800·10 <sup>-3</sup>	5,0	4,3	0,7
		2	3,4	-0,19	187	0,59	0,63	5,828·10 <sup>-4</sup>	15,3	13,1	2,2
		3	5,1	-0,30	189	0,59	0,63	6,094·10 <sup>-4</sup>	14,5	12,4	2,1
		4	9,0	-0,55	189	0,59	0,64	6,622·10 <sup>-4</sup>	13,1	11,2	1,9
Melocoton ( <i>s</i> )	25	1	1,6	-0,11	178	0,58	0,63	4,883·10 <sup>-4</sup>	18,4	15,8	2,6
		2	3,9	-0,28	166	0,59	0,63	4,567·10 <sup>-4</sup>	19,4	16,6	2,8
		3	5,8	-0,43	194	0,59	0,64	5,364·10 <sup>-4</sup>	16,3	14,0	2,3
		4	8,8	-0,67	181	0,60	0,64	4,478·10 <sup>-4</sup>	19,2	16,4	2,8
Fructosa ( <i>f</i> )	30	1	1,8	-0,19	179	0,63	0,67	6,670·10 <sup>-4</sup>	11,6	10,0	1,6
		2	2,8	-0,30	180	0,63	0,67	6,121·10 <sup>-4</sup>	12,5	10,8	1,7
		3	5,5	-0,61	179	0,64	0,68	8,241·10 <sup>-4</sup>	9,1	7,8	1,3
		4	6,9	-0,77	185	0,64	0,68	8,732·10 <sup>-4</sup>	8,5	7,3	1,2
Glucosa ( <i>g</i> )	30	1	1,1	-0,11	190	0,63	0,67	1,179·10 <sup>-3</sup>	6,6	5,7	0,9
		2	3,5	-0,38	197	0,63	0,67	1,007·10 <sup>-3</sup>	7,6	6,5	1,1
		3	6,1	-0,67	165	0,64	0,68	6,496·10 <sup>-4</sup>	11,5	9,9	1,6
		4	7,9	-0,90	204	0,64	0,69	8,794·10 <sup>-4</sup>	8,4	7,2	1,2
Sacarosa ( <i>s</i> )	30	1	1,3	-0,07	167	0,63	0,67	1,284·10 <sup>-3</sup>	6,1	5,2	0,8
		2	3,6	-0,20	172	0,63	0,67	7,722·10 <sup>-4</sup>	10,0	8,6	1,4
		3	5,6	-0,32	200	0,63	0,67	6,958·10 <sup>-4</sup>	11,0	9,5	1,5
		4	8,5	-0,52	172	0,64	0,68	6,862·10 <sup>-4</sup>	11,0	9,5	1,5
Melocoton ( <i>s</i> )	30	1	1,5	-0,11	177	0,63	0,67	7,067·10 <sup>-4</sup>	11,0	9,5	1,5
		2	3,6	-0,26	160	0,63	0,67	5,342·10 <sup>-4</sup>	14,4	12,4	2,0
		3	6,6	-0,49	179	0,64	0,68	4,893·10 <sup>-4</sup>	15,5	13,3	2,2
		4	8,2	-0,62	195	0,64	0,68	5,701·10 <sup>-4</sup>	13,1	11,3	1,8

\*Los resultados de *t*<sub>2</sub> están calculados en el anexo B

De acuerdo con los resultados obtenidos en la publicación en el trabajo de Hagiwara et al (2005) y con las condiciones de almacenamiento para las muestras utilizadas en el experimento la re-cristalización está en niveles bajos y no tiene importancia en nuestro proceso.

El FPD de soluciones de azúcares  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , se da en la figura. 5.5. El FPD de zumos puede estimarse utilizando el procedimiento descrito por Auleda et al (2011a).

Todos los tiempos de deshielo ( $tt$ ) mencionados en este trabajo se han corregido de acuerdo con el procedimiento establecido anteriormente. Los números de Biot obtenidos son menores que 0,1 por lo que se acepta el sistema de análisis concentrados Yunus (2007).



**Fig. 5.5** Punto de congelación de fructosa, glucosa y sacarosa

#### ***Resultados de tiempos de deshielo corregido, peso y concentración***

Los resultados de tiempos de deshielo corregidos, peso y concentración de las diferentes muestras, se presentan en las tablas 5,7 (20 °C), 5,8 (25 °C) y 5,9 (30 °C).

**Tabla 5.7.** Tiempos de deshielo corregidos, peso y concentración a temperatura de 20 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	$ff^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	177	1,8	<i>f</i>	t <sup>d</sup>	19,6	29,7	38,8	44,9	54,0	62,2	70,6	80,7	92,8	115,8
				p <sup>e</sup>	9,5	18,9	28,2	37,5	46,8	56,1	65,5	74,8	84,1	93,8
				c <sup>f</sup>	5,3	4,1	2,8	2,1	1,4	1,0	0,6	0,3	0,2	0,1
	194	1,4	<i>g</i>	t	24,0	34,5	45,8	55,0	64,5	74,6	85,6	97,8	112,1	139,4
				p	8,9	17,8	26,7	35,7	44,6	53,4	62,3	71,2	80,0	91,5
				c	4,5	3,0	2,1	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
	167	1,3	<i>s</i>	t	23,9	37,1	49,7	61,7	73,8	86,8	98,8	110,9	124,9	154,9
				p	9,6	19,2	28,7	38,3	47,8	57,4	67,0	76,6	86,3	96,8
				c	3,0	2,5	1,9	1,7	1,3	1,0	0,7	0,6	0,3	0,1
	171	1,6	<i>m</i>	t	21,5	33,1	44,1	54,1	65,3	76,8	89,2	101,8	116,3	144,3
				p	9,1	18,3	27,3	36,3	45,5	54,5	63,5	72,6	81,7	92,4
				c	4,3	3,1	2,4	2,0	1,5	1,1	0,8	0,5	0,3	0,1
10	168	3,0	<i>f</i>	t	20,4	28,7	36,1	43,2	50,5	57,7	66,0	75,3	85,5	112,8
				p	8,9	17,8	26,9	35,9	45,0	54,0	62,9	71,7	80,6	93,8
				c	8,9	6,3	5,1	3,8	2,8	1,9	1,2	0,7	0,4	0,1
	190	3,7	<i>g</i>	t	19,6	28,8	37,3	45,5	53,1	60,2	68,3	78,9	91,3	105,7
				p	8,7	17,6	26,3	35,0	43,7	52,5	61,4	70,3	79,1	85,7
				c	10,1	7,5	6,0	5,1	3,4	2,2	1,1	0,5	0,2	0,1
	200	3,5	<i>s</i>	t	20,7	29,0	34,4	40,4	45,5	52,5	59,5	68,6	81,1	97,1
				p	7,3	14,6	21,9	29,3	36,7	44,0	51,3	58,5	65,9	71,9
				c	10,6	6,9	5,2	4,2	3,1	2,2	1,4	0,7	0,3	0,1
	171	3,7	<i>m</i>	t	22,6	34,1	44,4	54,7	64,7	74,9	85,3	96,7	110,2	133,2
				p	9,1	18,3	27,3	36,5	45,8	54,9	64,0	73,0	82,1	92,4
				c	11,4	8,3	6,0	4,6	3,1	2,1	1,1	0,5	0,2	0,1
15	180	5,6	<i>f</i>	t	22,3	31,3	37,9	44,1	52,2	59,7	67,8	76,3	86,9	112,0
				p	9,0	18,0	27,0	36,0	44,9	53,9	62,8	71,8	80,7	91,0
				c	16,4	11,6	8,7	6,7	5,3	3,6	2,3	1,2	0,6	0,2
	179	6,2	<i>g</i>	t	21,5	31,9	41,2	50,3	58,6	66,9	75,2	84,3	94,4	108,6
				p	9,2	18,4	27,6	36,9	46,1	55,2	64,3	73,5	83,0	92,7
				c	16,4	12,4	9,7	8,0	6,5	4,8	2,8	1,2	0,6	0,2
	254	5,1	<i>s</i>	t	16,7	24,7	31,8	38,8	45,8	52,9	59,9	67,9	77,0	92,0
				p	5,7	11,3	17,1	22,7	28,2	34,0	39,7	45,3	51,0	57,9
				c	16,2	10,6	8,0	6,2	4,6	3,2	2,0	1,1	0,5	0,1
	186	6,3	<i>m</i>	t	16,9	26,1	34,5	42,0	49,5	56,7	64,7	73,0	83,1	102,2
				p	8,7	17,3	25,9	34,5	43,2	51,7	60,4	69,0	77,6	88,8
				c	15,6	12,3	10,2	8,7	7,2	5,4	3,4	1,4	0,6	0,1
20	176	7,3	<i>f</i>	t	19,4	30,6	39,8	47,8	55,9	63,4	71,5	79,9	89,3	106,9
				p	8,6	17,3	25,9	34,5	43,1	51,6	60,3	69,0	77,5	87,7
				c	22,2	15,2	11,5	8,9	6,9	4,8	3,0	1,3	0,4	0,1
	204	8,0	<i>g</i>	t	20,1	28,4	35,5	41,7	47,8	53,8	59,8	65,2	70,4	80,8
				p	7,3	14,6	21,7	29,2	36,4	43,7	51,0	58,5	65,8	73,1
				c	21,6	14,8	11,8	9,6	7,8	6,3	4,4	2,5	1,1	0,5
	164	8,4	<i>s</i>	t	19,5	29,6	38,6	46,6	54,6	63,7	72,7	81,7	90,8	115,9
				p	9,4	18,8	28,2	37,6	47,1	56,6	66,0	75,4	84,8	98,9
				c	22,4	18,2	13,4	11,2	9,3	6,7	4,0	2,0	0,9	0,2
	186	8,3	<i>m</i>	t	19,4	28,5	36,1	43,3	50,4	57,4	64,5	71,7	80,1	95,2
				p	8,2	16,5	24,6	32,9	41,1	49,3	57,5	65,9	74,3	83,6
				c	21,3	16,2	12,8	10,7	9,1	6,8	4,2	2,2	0,2	0,8

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración (PS); <sup>b</sup> factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo;

<sup>d</sup> tiempo (minutos); <sup>e</sup> peso (g); <sup>f</sup> concentración (°Brix)

**Tabla 5.8.** Tiempos de deshielo corregidos, peso y concentración a temperatura de 25 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	<i>ff</i> <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	185	1,6	<i>f</i>	t <sup>d</sup>	15,7	25,0	33,5	41,9	50,1	58,5	67,8	77,3	90,4	114,4
				p <sup>e</sup>	8,8	17,5	26,1	34,8	43,6	52,4	61,1	69,9	78,7	88,9
				c <sup>f</sup>	4,5	3,2	2,5	1,9	1,5	1,1	0,7	0,5	0,3	0,1
	177	1,3	<i>g</i>	t	18,1	27,3	34,9	42,4	50,6	59,1	67,5	77,1	89,2	111,6
				p	8,8	17,8	26,8	35,9	44,8	53,8	62,5	71,3	80,2	90,4
				c	3,7	2,6	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1
	195	1,0	<i>s</i>	t	12,2	20,5	28,6	37,0	44,3	53,0	62,4	73,0	84,6	106,6
				p	7,3	14,6	21,9	29,2	36,3	43,6	51,0	58,3	65,5	72,5
				c	3,2	2,1	1,4	1,0	0,9	0,8	0,5	0,2	0,1	0,1
	178	1,6	<i>m</i>	t	18,7	28,2	37,3	45,7	54,7	63,9	73,4	83,9	96,2	119,2
				p	9,2	18,5	27,8	37,1	46,4	55,7	65,0	74,3	83,5	93,3
				c	4,1	2,9	2,5	2,0	1,6	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1
10	173	3,0	<i>f</i>	t	15,4	24,5	32,5	39,9	47,3	55,4	64,9	74,1	85,6	105,7
				p	9,6	19,1	28,7	38,2	47,7	57,3	66,7	76,2	85,7	95,7
				c	8,9	6,5	4,5	3,4	2,5	1,8	1,2	0,6	0,2	0,1
	188	3,3	<i>g</i>	t	18,9	27,4	35,6	43,0	50,3	57,6	64,8	73,0	82,5	101,9
				p	8,0	16,1	24,2	32,4	40,4	48,5	56,7	64,9	73,0	82,4
				c	10,5	6,6	5,0	4,1	3,3	2,2	1,2	0,7	0,2	0,1
	187	3,4	<i>s</i>	t	15,8	24,3	32,5	40,7	48,3	55,8	63,8	73,1	83,5	103,8
				p	7,7	15,4	23,2	30,9	38,6	46,3	54,0	61,7	69,4	78,5
				c	9,4	7,2	5,8	4,4	3,2	2,1	1,3	0,7	0,3	0,1
	166	3,9	<i>m</i>	t	21,1	31,7	41,0	49,5	58,0	67,0	76,5	87,0	100,2	122,2
				p	10,6	21,2	31,7	42,4	53,1	63,7	74,3	85,0	95,6	105,2
				c	10,9	8,6	6,4	5,2	3,8	2,1	1,1	0,6	0,3	0,1
15	172	5,4	<i>f</i>	t	16,8	25,9	33,4	40,7	50,8	54,3	61,4	69,5	79,1	96,1
				p	9,5	19,2	28,9	38,5	48,2	57,6	67,3	76,9	86,8	97,5
				c	15,6	11,3	8,8	6,6	5,2	3,2	2,2	1,0	0,4	0,2
	175	6,2	<i>g</i>	t	16,1	23,4	29,7	35,8	41,9	48,2	54,7	62,0	70,3	86,8
				p	9,5	18,9	28,2	37,6	46,9	56,2	65,5	74,9	84,2	93,5
				c	16,9	12,4	9,8	7,9	6,4	4,4	2,3	1,1	0,5	0,2
	189	5,1	<i>s</i>	t	14,1	22,1	29,2	36,2	43,2	50,2	57,2	65,3	76,3	99,3
				p	7,3	14,7	22,0	29,3	36,6	44,0	51,2	58,4	65,8	74,2
				c	15,8	11,0	8,1	5,9	4,3	2,9	1,8	1,1	0,6	0,2
	194	5,8	<i>m</i>	t	14,4	22,4	28,8	35,1	41,6	48,0	55,1	62,6	71,1	86,5
				p	8,0	16,1	24,1	32,1	40,3	48,4	56,5	64,6	72,6	82,3
				c	16,2	12,2	9,4	7,8	6,1	4,2	2,2	1,0	0,3	0,1
20	226	8,6	<i>f</i>	t	13,6	20,1	25,6	30,8	35,3	39,7	44,7	50,1	55,6	62,1
				p	6,6	13,2	19,9	26,5	33,1	39,7	46,4	53,1	59,8	64,9
				c	24,0	16,3	12,7	10,5	8,2	5,8	3,4	1,7	1,1	0,6
	207	8,1	<i>g</i>	t	15,1	22,4	28,7	34,3	39,6	45,9	50,9	56,5	62,7	73,2
				p	7,7	15,2	22,8	30,3	37,9	46,8	53,3	60,8	68,5	77,1
				c	22,0	15,3	12,2	9,8	8,1	6,2	4,7	2,2	0,9	0,4
	189	9,0	<i>s</i>	t	18,9	24,9	31,0	36,0	41,1	45,7	51,7	57,7	66,8	78,8
				p	9,6	19,2	28,8	38,4	47,9	57,5	67,1	76,8	86,4	95,9
				c	21,2	17,3	14,3	12,3	10,3	7,5	4,1	2,1	0,7	0,3
	181	8,8	<i>m</i>	t	16,0	24,6	32,0	39,2	45,6	52,8	59,1	66,7	75,9	88,9
				p	9,4	18,8	28,1	37,5	46,9	57,8	66,3	75,6	85,0	93,9
				c	22,0	17,2	13,9	11,4	9,0	6,7	4,2	1,8	0,6	0,2

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración (PS); <sup>b</sup> factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo;

<sup>d</sup> tiempo (minutos); <sup>e</sup> peso (g); <sup>f</sup> concentración (°Brix)

**Tabla 5.9.** Tiempos de deshielo corregidos, peso y concentración a temperatura de 30 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	<i>ff</i> <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	179	1,8	<i>f</i>	t <sup>d</sup>	13,1	21,2	27,7	34,7	41,9	48,5	55,8	64,1	75,2	98,3
				p <sup>e</sup>	8,7	16,5	25,3	34,1	42,8	51,6	60,4	69,2	78,0	87,0
				c <sup>f</sup>	4,5	3,6	2,9	2,3	1,7	1,3	0,9	0,5	0,2	0,1
	190	1,1	<i>g</i>	t	14,0	21,3	27,8	34,4	41,8	50,0	59,1	67,4	77,9	95,0
				p	8,1	16,3	24,6	32,9	41,0	49,3	57,4	65,6	73,7	83,0
				c	2,9	2,2	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
	167	1,3	<i>s</i>	t	14,0	22,2	29,6	37,0	45,0	53,3	62,4	72,7	85,1	115,2
				p	9,5	19,0	28,4	37,9	47,3	56,9	66,4	75,8	85,2	95,9
				c	3,0	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6	0,3	0,1
	177	1,5	<i>m</i>	t	14,7	22,1	28,7	35,7	42,7	50,0	58,1	67,3	77,7	98,7
				p	9,1	18,2	27,2	36,2	45,5	54,6	63,7	73,0	82,0	92,1
				c	3,5	3,0	2,3	2,0	1,6	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1
10	180	2,8	<i>f</i>	t	13,8	21,2	27,7	34,7	41,1	48,2	55,7	64,0	73,5	92,6
				p	9,9	19,7	29,7	39,6	49,5	59,5	69,3	79,2	89,1	99,6
				c	8,3	5,8	4,4	3,3	2,3	1,8	1,3	0,7	0,2	0,0
	197	3,5	<i>g</i>	t	15,4	22,6	28,1	33,3	38,4	43,7	49,2	55,4	62,5	76,5
				p	7,9	15,9	23,9	31,9	39,9	48,0	56,0	63,8	71,7	80,1
				c	9,8	7,2	5,7	4,4	3,1	2,2	1,6	0,8	0,3	0,1
	172	3,6	<i>s</i>	t	13,7	21,2	27,8	34,1	40,5	47,7	55,0	62,5	72,2	91,3
				p	9,0	18,2	27,4	36,5	45,4	54,5	63,5	72,5	81,4	93,2
				c	8,9	6,9	5,8	4,6	3,7	2,9	1,9	1,1	0,6	0,2
	160	3,6	<i>m</i>	t	15,0	23,0	30,0	37,1	44,1	51,1	59,1	68,1	77,2	98,2
				p	10,9	21,3	32,2	43,1	54,0	64,9	75,9	86,8	97,7	109,8
				c	8,5	7,3	5,8	4,7	3,3	2,7	2,1	1,2	0,6	0,1
15	179	5,5	<i>f</i>	t	13,6	20,8	26,2	31,3	36,4	41,6	47,0	53,6	63,8	81,0
				p	8,1	16,5	24,6	32,8	41,0	49,9	57,5	65,7	73,9	82,5
				c	15,7	10,7	8,2	6,6	5,1	3,7	2,4	1,7	1,0	0,3
	165	6,1	<i>g</i>	t	12,8	19,2	25,4	31,0	37,0	43,2	49,6	56,9	65,5	86,0
				p	10,5	20,9	31,6	42,2	52,8	63,4	73,9	84,5	95,1	106,8
				c	16,9	13,3	9,5	7,6	6,1	4,1	2,3	1,2	0,5	0,1
	200	5,6	<i>s</i>	t	12,7	20,0	26,1	32,2	38,4	44,4	50,7	57,3	65,8	77,9
				p	7,1	14,1	21,2	28,3	36,2	43,2	50,3	57,3	64,4	71,5
				c	16,4	11,8	8,8	6,6	4,6	3,1	2,2	1,3	0,6	0,2
	179	6,6	<i>m</i>	t	12,4	18,8	25,1	31,2	36,6	42,1	48,2	54,7	62,0	76,0
				p	9,1	18,1	27,3	36,5	45,6	54,8	64,0	72,0	82,2	92,5
				c	15,7	13,0	11,0	9,2	7,1	5,0	3,1	1,7	0,7	0,1
20	185	6,9	<i>f</i>	t	14,6	21,7	27,8	33,8	39,9	45,3	50,6	56,7	64,0	76,3
				p	8,6	17,1	25,6	34,1	42,7	51,2	59,6	68,1	76,7	85,6
				c	21,7	14,0	10,3	8,1	6,5	4,3	2,3	1,0	0,5	0,1
	204	7,9	<i>g</i>	t	12,3	18,3	23,4	28,0	32,4	36,6	41,0	45,5	51,5	64,8
				p	7,6	15,4	23,0	30,5	38,2	45,8	53,5	61,0	68,7	77,9
				c	22,9	15,1	11,9	9,3	7,6	5,6	3,6	2,3	1,3	0,5
	172	8,5	<i>s</i>	t	12,1	18,6	24,7	30,7	37,0	43,2	49,4	56,5	64,7	82,8
				p	10,0	19,9	29,9	39,9	49,9	59,9	69,9	79,9	89,9	101,0
				c	22,8	19,1	14,8	11,1	8,5	5,3	2,6	1,2	0,5	0,1
	195	8,2	<i>m</i>	t	11,9	18,3	23,8	29,9	33,9	38,9	44,1	49,6	57,9	68,9
				p	8,2	16,3	24,5	34,5	40,7	48,9	57,2	65,5	73,6	83,3
				c	20,4	16,6	13,1	10,5	8,7	6,9	4,1	2,0	0,8	0,2

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración (PS); <sup>b</sup> factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo;

<sup>d</sup> tiempo (minutos); <sup>e</sup> peso (g); <sup>f</sup> concentración (°Brix)



### 5.3.2. Análisis de la concentración del deshielo de fructosa, glucosa y sacarosa y zumo de melocotón (s) a temperaturas de 20 °C 25 °C y 30 °C

El análisis de la concentración se realiza teniendo en cuenta los resultados de concentración del proceso de crioconcentración y los resultados del proceso de deshielo fraccionado.

Para comparar la concentración alcanzada en las diferentes fracciones de deshielo se emplea el ratio índice de concentración descrito en el apartado 4.6.4 y adoptado por Yee et al (2003). El resumen de los resultados se detalla en las tablas 5.10, 5.11 y 5.12.

Así mismo se comparan los resultados eficiencia del proceso ( $E$ ) y coeficiente de distribución ( $K_{dist}$ ), en las diferentes etapas del proceso.

**Tabla 5.10.** Concentración e índice de concentración a temperatura de 20 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	$ff^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	177	1,8	<i>f</i>	c <sup>d</sup>	5,3	4,1	2,8	2,1	1,4	1,0	0,6	0,3	0,2	0,1
				IC <sup>e</sup>	2,9	2,3	1,6	1,2	0,8	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1
	194	1,4	<i>g</i>	c	4,5	3,0	2,1	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
				IC	3,2	2,1	1,5	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	0,1
	167	1,3	<i>s</i>	c	3,0	2,5	1,9	1,7	1,3	1,0	0,7	0,6	0,3	0,1
				IC	2,3	1,9	1,5	1,3	1,0	0,8	0,5	0,5	0,2	0,1
	171	1,6	<i>m</i>	c	4,3	3,1	2,4	2,0	1,5	1,1	0,8	0,5	0,3	0,1
				IC	2,7	2,0	1,5	1,3	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
10	168	3,0	<i>f</i>	c	8,9	6,3	5,1	3,8	2,8	1,9	1,2	0,7	0,4	0,1
				IC	3,0	2,1	1,7	1,3	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	190	3,7	<i>g</i>	c	10,1	7,5	6,0	5,1	3,4	2,2	1,1	0,5	0,2	0,1
				IC	2,7	2,0	1,6	1,4	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,0
	200	3,5	<i>s</i>	c	10,6	6,9	5,2	4,2	3,1	2,2	1,4	0,7	0,3	0,1
				IC	3,0	2,0	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	171	3,7	<i>m</i>	c	11,4	8,3	6,0	4,6	3,1	2,1	1,1	0,5	0,2	0,1
				IC	3,1	2,2	1,6	1,3	0,8	0,6	0,3	0,1	0,1	0,0
15	180	5,6	<i>f</i>	c	16,4	11,6	8,7	6,7	5,3	3,6	2,3	1,2	0,6	0,2
				IC	2,9	2,1	1,5	1,2	1,0	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	179	6,2	<i>g</i>	c	16,4	12,4	9,7	8,0	6,5	4,8	2,8	1,2	0,6	0,2
				IC	2,6	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0
	254	5,1	<i>s</i>	c	16,2	10,6	8,0	6,2	4,6	3,2	2,0	1,1	0,5	0,1
				IC	3,2	2,1	1,6	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	186	6,3	<i>m</i>	c	15,6	12,3	10,2	8,7	7,2	5,4	3,4	1,4	0,6	0,1
				IC	2,5	1,9	1,6	1,4	1,1	0,9	0,5	0,2	0,1	0,0
20	176	7,3	<i>f</i>	c	22,2	15,2	11,5	8,9	6,9	4,8	3,0	1,3	0,4	0,1
				IC	3,0	2,1	1,6	1,2	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,0
	204	8,0	<i>g</i>	c	21,6	14,8	11,8	9,6	7,8	6,3	4,4	2,5	1,1	0,5
				IC	2,7	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1
	164	8,4	<i>s</i>	c	22,4	18,2	13,4	11,2	9,3	6,7	4,0	2,0	0,9	0,2
				IC	2,7	2,2	1,6	1,3	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0
	186	8,3	<i>m</i>	c	21,3	16,2	12,8	10,7	9,1	6,8	4,2	2,2	0,2	0,8
				IC	2,6	2,0	1,5	1,3	1,1	0,8	0,5	0,3	0,0	0,1

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración; <sup>b</sup>Factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo;

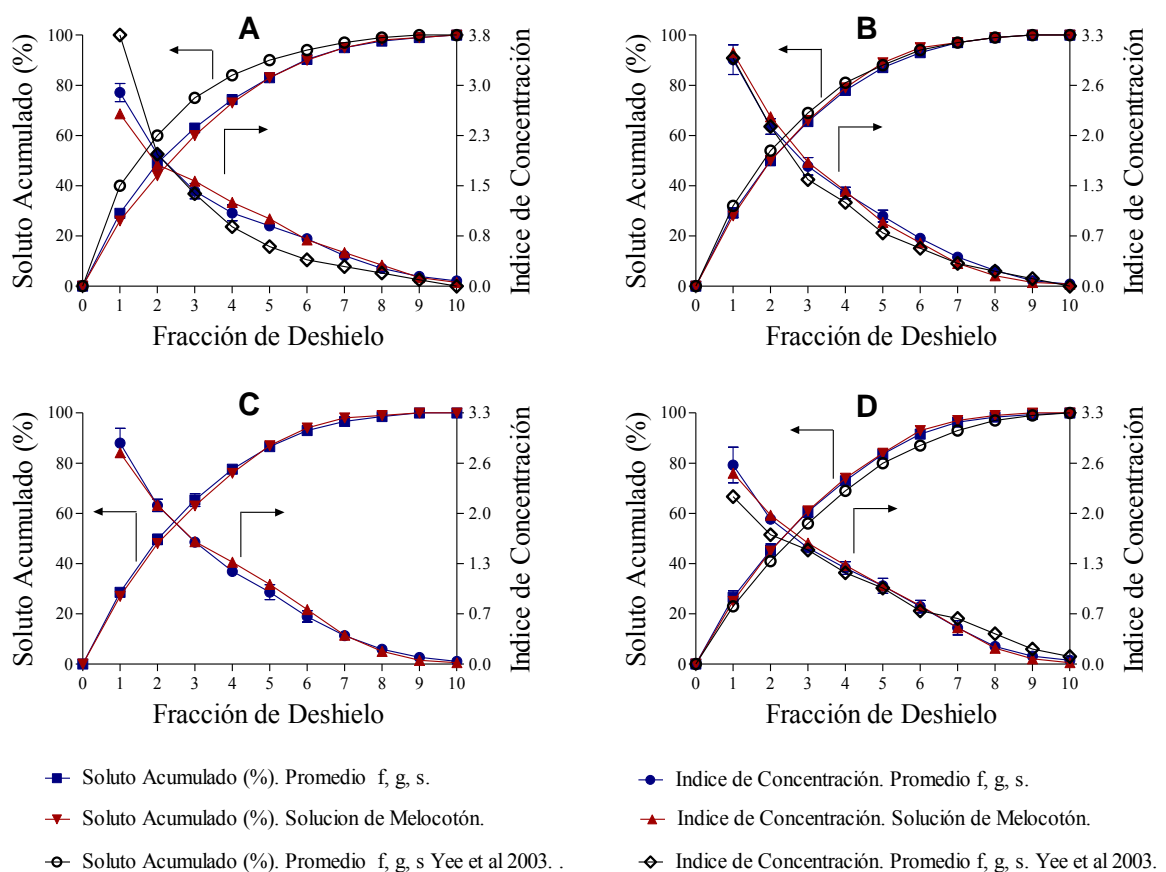
<sup>d</sup> Concentración (°Brix); <sup>e</sup> Índice de concentración

La tabla 5.10 indica los resultados de concentración (°Brix) e índice de concentración a temperatura de 20 °C para cada una de las variables seleccionadas en las diferentes etapas del proceso de crioconcentración: factor de forma, fracción de soluto en el hielo (SMFI), azúcares básicos (*glucosa*, *fructosa* y *sacarosa*) y zumo de melocotón (*s*).

El análisis estadístico se efectúa sobre la base del factor índice de concentración, entendiéndose que éste factor considera implícita la variable concentración.

La prueba de Bartlett contrasta las muestras de índice de concentración y establece que son homocedásticas, no hay diferencia significativa entre las varianzas con. ( $P < 0,05$ ). La prueba de Tukey con significancia ( $P < 0,05$ ), determina que las muestras pareadas no presentan diferencias significativas.

Los resultados de ANOVA establecen, para la razón-F, en este caso (20 °C) es igual a  $9,1 \cdot 10^{-4}$  y es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95,0% de confianza.



**Fig. 5.6** Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 20 °C. (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,5 °Brix; ff 167-194 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix; ff 171 m<sup>-1</sup>. (B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,5 °Brix; ff 168-200 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,7 °Brix; ff 171 m<sup>-1</sup>. (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix; ff 179-254 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 6,3 °Brix; ff 254 m<sup>-1</sup>. (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,9 °Brix; ff 164-204 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,3 °Brix; ff 186 m<sup>-1</sup>.

### Discusión de la concentración e índice de concentración a 20 °C

La figura 5.6 describe los resultados del deshielo fraccionado de las muestras de las capas de hielo obtenidas a partir de las cuatro etapas del proceso de crioconcentración. En cada gráfico se muestran

el índice de concentración y el porcentaje de soluto acumulado para cada fracción de deshielo. Los resultados expuestos son los valores medios para las soluciones de azúcar de  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , con  $ff$  entre  $164 \text{ m}^{-1}$  y  $254 \text{ m}^{-1}$  y los valores para el zumo de melocotón simulado ( $s$ ) con  $ff = 171 \text{ m}^{-1}$  a  $186 \text{ m}^{-1}$ , todos obtenidos a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se comparan con los resultados obtenidos por Yee et al (2003), similares para azúcares básicos a concentraciones de  $5 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{Brix}$  y  $20 \text{ }^\circ\text{Brix}$  y a temperatura de deshielo de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , (figura 5.6 C).

- La relación del porcentaje de soluto acumulado entre el promedio de los azúcares básicos y el zumo de melocotón simulado en las cuatro etapas del proceso (figura 5.6 A, B, C y D) no presenta variación significativa con temperatura de deshielo de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se observa, en promedio para los azúcares básicos, en la fracción 3<sup>a</sup>, se puede recuperar más del 50% de los solutos retenidos en el hielo y en la 5<sup>a</sup> más del 80%.
- Si comparamos los resultados del porcentaje de soluto acumulado tanto del promedio de azúcares básicos como de zumo de melocotón con los resultados obtenidos por Yee et al (2003), se observa en la primera y segunda etapa a  $5 \text{ }^\circ\text{Brix}$  y  $10 \text{ }^\circ\text{Brix}$  respectivamente, el proceso establecido por Yee et al (2003), establece mejor eficiencia de recuperación de soluto, sin embargo se debe tener en cuenta la temperatura de deshielo para éste proceso es de ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), de igual modo, el factor de forma difiere y la forma en realizar el deshielo (las muestras se apilan). En la cuarta etapa la tendencia es más favorable para el proceso de deshielo a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Se entiende por eficiencia en éste caso como el mayor porcentaje de recuperación de solutos retenidos en el hielo en relación al SMFI.

- la relación de los valores de índice de concentración entre el promedio de azúcares básicos y zumo de melocotón simulado en las cuatro etapas del proceso (figura 5.6 A, B, C y D) no presenta una variación significativa a temperatura de deshielo de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se observa cierta desviación en el caso de los azúcares básicos, debido básicamente al  $ff$  entre las muestras.
- los resultados obtenidos del factor índice de concentración se compararon con los obtenidos por Yee et al (2003), se puede ver mayor índice en las primeras etapas (1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup>), se explica por el porcentaje de recuperación de solutos en las primeras fracciones de deshielo en comparación con la fracción de soluto promedio en el hielo (SMFI). Resultados similares obtuvo Nakagawa et al (2010a).

La tabla 5.11 registra el resumen de valores de la concentración ( $^\circ\text{Brix}$ ) e índice de concentración a temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  para cada una de las variables seleccionadas: etapas del proceso de crioconcentración, factor de forma, fracción de soluto en el hielo (SMFI), azúcares básicos ( $f$ ,  $g$ ,  $s$ ) y zumo de melocotón ( $s$ ).

**Tabla 5.11.** Concentración e índice de concentración a temperatura de 25 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	ff <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	185	1,6	<i>f</i>	c <sup>d</sup>	4,5	3,2	2,5	1,9	1,5	1,1	0,7	0,5	0,3	0,1	
				IC <sup>e</sup>	2,8	2,0	1,6	1,2	0,9	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1	
	177	1,3	<i>g</i>	c	3,7	2,6	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	
				IC	2,9	2,0	1,4	1,2	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	
	195	1,0	<i>s</i>	c	3,2	2,1	1,4	1,0	0,9	0,8	0,5	0,2	0,1	0,1	
				IC	3,1	2,0	1,4	1,0	0,9	0,8	0,5	0,2	0,1	0,1	
	178	1,6	<i>m</i>	c	4,1	2,9	2,5	2,0	1,6	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,1
				IC	2,6	1,8	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1	0,1	
	10	173	3,0	<i>f</i>	c	8,9	6,5	4,5	3,4	2,5	1,8	1,2	0,6	0,2	0,1
					IC	3,0	2,2	1,5	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
188		3,3	<i>g</i>	c	10,5	6,6	5,0	4,1	3,3	2,2	1,2	0,7	0,2	0,1	
				IC	3,2	2,0	1,5	1,2	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,0	
187		3,4	<i>s</i>	c	9,4	7,2	5,8	4,4	3,2	2,1	1,3	0,7	0,3	0,1	
				IC	2,8	2,1	1,7	1,3	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0	
166		3,9	<i>m</i>	c	10,9	8,6	6,4	5,2	3,8	2,1	1,1	0,6	0,3	0,1	
				IC	2,8	2,2	1,6	1,3	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	
15		172	5,4	<i>f</i>	c	15,6	11,3	8,8	6,6	5,2	3,2	2,2	1,0	0,4	0,2
					IC	2,9	2,1	1,6	1,2	1,0	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	175	6,2	<i>g</i>	c	16,9	12,4	9,8	7,9	6,4	4,4	2,3	1,1	0,5	0,2	
				IC	2,7	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,0	
	189	5,1	<i>s</i>	c	15,8	11,0	8,1	5,9	4,3	2,9	1,8	1,1	0,6	0,2	
				IC	3,1	2,2	1,6	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0	
	194	5,8	<i>m</i>	c	16,2	12,2	9,4	7,8	6,1	4,2	2,2	1,0	0,3	0,1	
				IC	2,8	2,1	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,0	
	20	226	8,6	<i>f</i>	c	24,0	16,3	12,7	10,5	8,2	5,8	3,4	1,7	1,1	0,6
					IC	2,8	1,9	1,5	1,2	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1
207		8,1	<i>g</i>	c	22,0	15,3	12,2	9,8	8,1	6,2	4,7	2,2	0,9	0,4	
				IC	2,7	1,9	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,3	0,1	0,0	
189		9,0	<i>s</i>	c	21,2	17,3	14,3	12,3	10,3	7,5	4,1	2,1	0,7	0,3	
				IC	2,4	1,9	1,6	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0	
181		8,8	<i>m</i>	c	22,0	17,2	13,9	11,4	9,0	6,7	4,2	1,8	0,6	0,2	
				IC	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0	

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración; <sup>b</sup>Factor de forma <sup>c</sup>Fracción de soluto en el hielo;

<sup>d</sup> Concentración (°Brix); <sup>e</sup> Índice de concentración

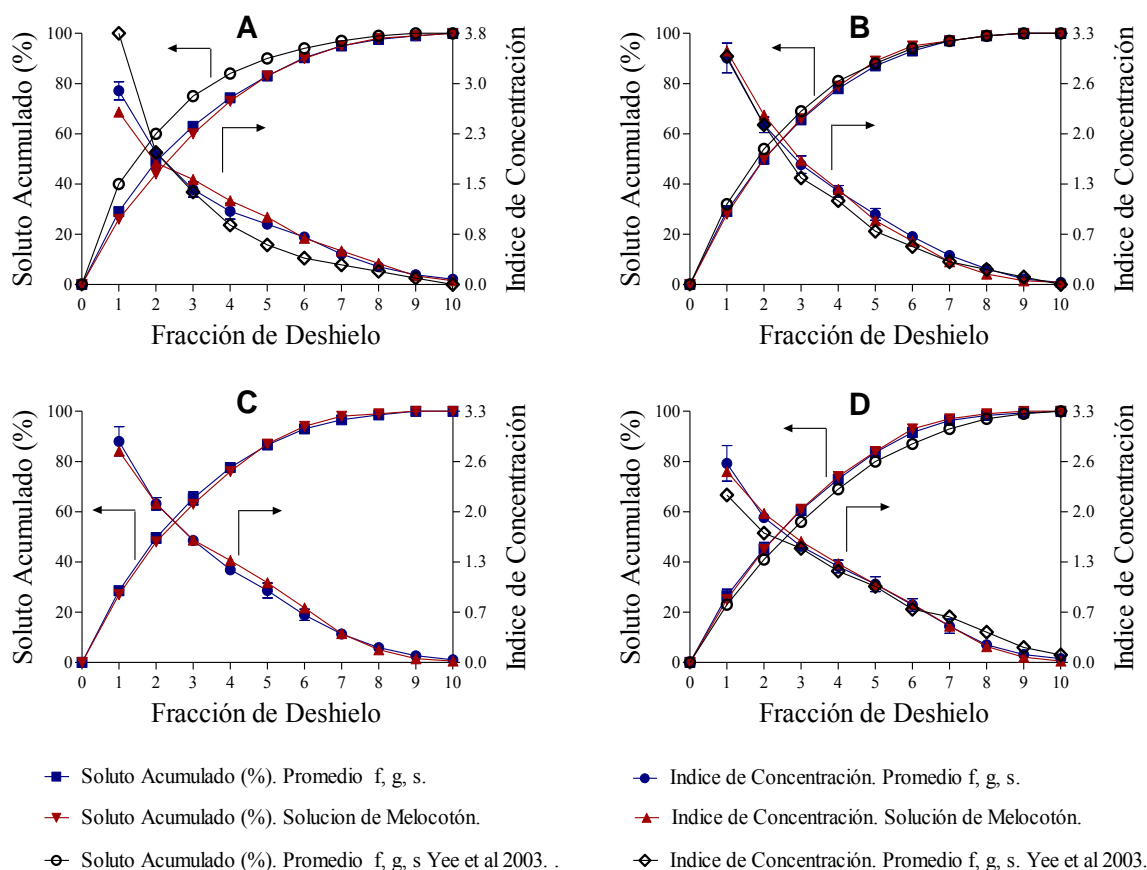
El análisis estadístico se realiza sobre la base de los resultados de la tabla 5.11 de la variable índice de concentración, entendiéndose que la variable considera la relación entre la concentración de cada fracción y la masa de soluto en la fracción del hielo (SMFI).

Los valores de índice de concentración se ha controlado que provienen de una distribución normal. Indican que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

La prueba de Bartlett para contrastar si varias muestras de índice de concentración son homocedásticas establece que no hay diferencia significativa entre las varianzas con (P < 0,05). En una primera aproximación para estudiar el factor índice de concentración, se ha realizado la separación de medias mediante la prueba de Tukey con significancia (P < 0,05), no se muestran los resultados. Se ha observado que las muestras pareadas no presentan diferencias significativas.

Los resultados de ANOVA establece para la razón-F, en este caso (25 °C) es igual a  $2,3 \cdot 10^{-3}$  y es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la

razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 16 variables con un nivel del 95,0% de confianza.



**Fig. 5.7** Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 25 °C  
 (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,3 °Brix;  $ff$  177-195  $m^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix;  $ff$  178  $m^{-1}$ .  
 (B) Etapa 2 *f, g, s*, SMFI 3,2 °Brix;  $ff$  166-188  $m^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 3,9 °Brix;  $ff$  166  $m^{-1}$ .  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix;  $ff$  172-194  $m^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 5,8 °Brix;  $ff$  194  $m^{-1}$ .  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 8,6 °Brix;  $ff$  181-226  $m^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 8,8 °Brix;  $ff$  181  $m^{-1}$

### Discusión de la concentración e índice de concentración a 25 °C

La figura 5.7 muestra los resultados del deshielo fraccionado de las muestras de las capas de hielo obtenidas a partir de las cuatro etapas del proceso de crioconcentración. En cada gráfico se muestran el índice de concentración y el porcentaje de soluto acumulado para cada fracción de deshielo. Los resultados mostrados son los valores medios para las soluciones de azúcar de *f, g, s*, con  $ff$  entre 166  $m^{-1}$  y 226  $m^{-1}$  y los valores para el zumo de melocotón simulado (*s*) con  $ff = 166 m^{-1}$  a 194  $m^{-1}$ , todos obtenidos a 25 °C. Se comparan los con los resultados obtenidos por Yee et al (2003), similares para azúcares básicos a concentraciones de 5 °Brix, 10 °Brix y 20 °Brix y a temperatura de deshielo de 10 °C, (figura 5.7 C).

- La relación del porcentaje de soluto acumulado entre el promedio de los azúcares básicos y zumo de melocotón simulado en las cuatro etapas del proceso (figura 5.7 A, B, C y D) no presenta variación significativa con temperatura de deshielo de 20 °C y 25 °C. En promedio se mantiene la tendencia de recuperación de soluto (más del 80% en la fracción 5ª).
- Si comparamos los resultados de Yee et al (2003) en cuanto a porcentaje de soluto acumulado, e índice de concentración se mantiene la misma tendencia observada a temperatura de 20 °C.

Esta tabla 5.12 presenta el resumen para cada una de las variables seleccionadas, concentración y el factor índice de concentración a temperatura de 30 °C. Los valores se consideran que provienen de una distribución normal. Indican que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

**Tabla 5.12.** Concentración e índice de concentración a temperatura de 30 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	ff <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	179	1,8	<i>f</i>	c <sup>d</sup>	4,5	3,6	2,9	2,3	1,7	1,3	0,9	0,5	0,2	0,1
				IC <sup>e</sup>	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1	0,1
	190	1,1	<i>g</i>	c	2,9	2,2	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
				IC	2,7	2,0	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1
	167	1,3	<i>s</i>	c	3,0	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6	0,3	0,1
				IC	2,4	1,7	1,5	1,3	1,0	0,9	0,6	0,5	0,2	0,1
	177	1,5	<i>m</i>	c	3,5	3,0	2,3	2,0	1,6	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1
				IC	2,3	2,0	1,5	1,3	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
10	180	2,8	<i>f</i>	c	8,3	5,8	4,4	3,3	2,3	1,8	1,3	0,7	0,2	0,0
				IC	3,0	2,1	1,6	1,2	0,8	0,6	0,5	0,3	0,1	0,0
	197	3,5	<i>g</i>	c	9,8	7,2	5,7	4,4	3,1	2,2	1,6	0,8	0,3	0,1
				IC	2,8	2,1	1,6	1,3	0,9	0,6	0,5	0,2	0,1	0,0
	172	3,6	<i>s</i>	c	8,9	6,9	5,8	4,6	3,7	2,9	1,9	1,1	0,6	0,2
				IC	2,5	1,9	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1
	160	3,6	<i>m</i>	c	8,5	7,3	5,8	4,7	3,3	2,7	2,1	1,2	0,6	0,1
				IC	2,4	2,0	1,6	1,3	0,9	0,8	0,6	0,3	0,2	0,0
15	179	5,5	<i>f</i>	c	15,7	10,7	8,2	6,6	5,1	3,7	2,4	1,7	1,0	0,3
				IC	2,8	1,9	1,5	1,2	0,9	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1
	165	6,1	<i>g</i>	c	16,9	13,3	9,5	7,6	6,1	4,1	2,3	1,2	0,5	0,1
				IC	2,8	2,2	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,0
	200	5,6	<i>s</i>	c	16,4	11,8	8,8	6,6	4,6	3,1	2,2	1,3	0,6	0,2
				IC	3,0	2,1	1,6	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0
	179	6,6	<i>m</i>	c	15,7	13,0	11,0	9,2	7,1	5,0	3,1	1,7	0,7	0,1
				IC	2,4	2,0	1,7	1,4	1,1	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0
20	185	6,9	<i>f</i>	c	21,7	14,0	10,3	8,1	6,5	4,3	2,3	1,0	0,5	0,1
				IC	3,2	2,0	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,0
	204	7,9	<i>g</i>	c	22,9	15,1	11,9	9,3	7,6	5,6	3,6	2,3	1,3	0,5
				IC	2,9	1,9	1,5	1,2	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
	172	8,5	<i>s</i>	c	22,8	19,1	14,8	11,1	8,5	5,3	2,6	1,2	0,5	0,1
				IC	2,7	2,2	1,7	1,3	1,0	0,6	0,3	0,1	0,1	0,0
	195	8,2	<i>m</i>	c	20,4	16,6	13,1	10,5	8,7	6,9	4,1	2,0	0,8	0,2
				IC	2,5	2,0	1,6	1,3	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0

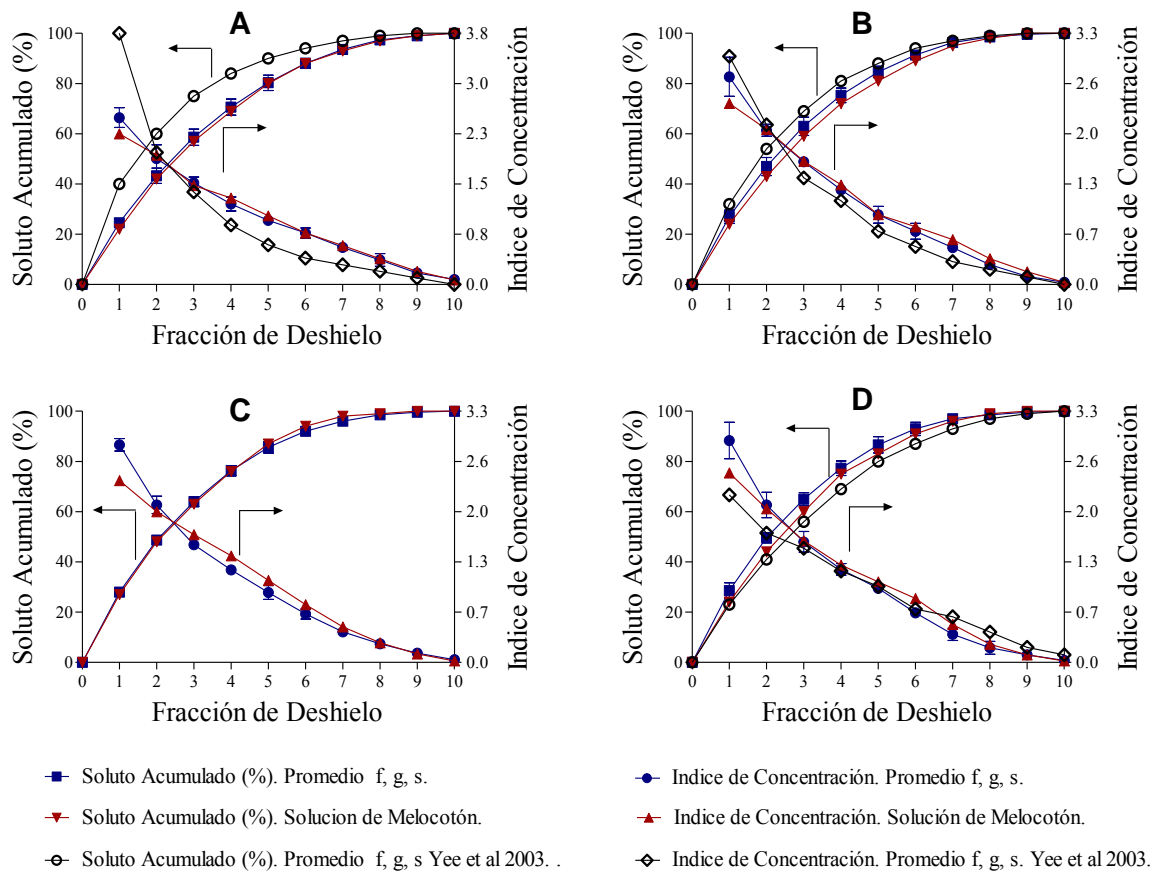
<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración; <sup>b</sup> Factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo;

<sup>d</sup> Concentración (°Brix); <sup>e</sup> Índice de concentración

La prueba de Bartlett para contrastar si varias muestras son homocedásticas establece que no hay diferencia significativa entre las varianzas con. ( $P < 0,05$ ). En una primera aproximación para estudiar el factor índice de concentración, se ha realizado la separación de medias mediante la prueba de Tukey con Significancia ( $P < 0,05$ ). Se ha observado que las muestras pareadas no presentan diferencias significativas.

Los resultados de ANOVA establece para la razón-F, a temperatura de 30 °C es igual a  $1,8 \cdot 10^{-3}$  y es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95,0% de confianza. Entendiéndose que la variación de las

medias es mucho menor para una temperatura de 30 °C, si la comparamos con las temperaturas de 20 °C y 25 °C.



**Fig. 5.8** Porcentaje de soluto acumulado e índice de concentración a temperatura de 30 °C  
 (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,4 °Brix;  $\bar{f}$  167-190  $\text{m}^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 1,5 °Brix;  $\bar{f}$  177  $\text{m}^{-1}$ .  
 (B) Etapa 2 *f, g, s*, SMFI 3,3 °Brix;  $\bar{f}$  172-197  $\text{m}^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 3,6 °Brix;  $\bar{f}$  160  $\text{m}^{-1}$ .  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,7 °Brix;  $\bar{f}$  179-200  $\text{m}^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 6,6 °Brix;  $\bar{f}$  179  $\text{m}^{-1}$ .  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,8 °Brix;  $\bar{f}$  172-204  $\text{m}^{-1}$ ; SMFI melocotón (*s*): 8,2 °Brix;  $\bar{f}$  195  $\text{m}^{-1}$

### Discusión de la concentración e índice de concentración a 30 °C

En la figura 5.8 se muestran el índice de concentración y el porcentaje de soluto acumulado para cada fracción de deshielo. Los resultados mostrados son los valores medios para las soluciones de azúcar de *f, g, s*, con  $\bar{f}$  entre 160  $\text{m}^{-1}$  y 204  $\text{m}^{-1}$  y los valores para el zumo de melocotón simulado (*s*) con  $\bar{f}$  = 166  $\text{m}^{-1}$  a 194  $\text{m}^{-1}$ , todos obtenidos a 30 °C. Se comparan con los resultados obtenidos por Yee P. et al (2003), similares para azúcares básicos a concentraciones de 5 °Brix, 10 °Brix y 20 °Brix y a temperatura de deshielo de 10 °C, (figura 5.8 A, B y C). Los resultados muestran mayor índice de concentración y mayor soluto acumulado en los resultados obtenidos por Yee et al (2003) en las primeras etapas del proceso (figura 5.8 A y B), sin embargo en la cuarta etapa son inferiores, esto indica que a medida que aumenta la concentración y mayor es la temperatura de deshielo, menor es el rendimiento en la recuperación de solutos. Esto coincide con los resultados propuestos por Nakagawa et al (2010) para tinte acuoso con temperaturas de deshielo entre 5 °C y 30 °C. Cabe anotar que el rendimiento de recuperación de solutos para el hielo obtenido del equipo de crioconcentración mediante el deshielo fraccionado a temperatura de 30 °C es mayor (más del 50% de solutos recuperados en un 30% de deshielo) que el proceso obtenido por Nakagawa et al (2010b) (40% de solutos recuperados en un 30% de deshielo).

### ***5.3.3. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado***

#### ***5.3.3.1. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado a 20 °C.***

Para optimizar la eficiencia del proceso de crioconcentración aplicamos el siguiente procedimiento: consistente en tomar el promedio de las tres primeras fracciones a partir de una etapa superior a la inicial.

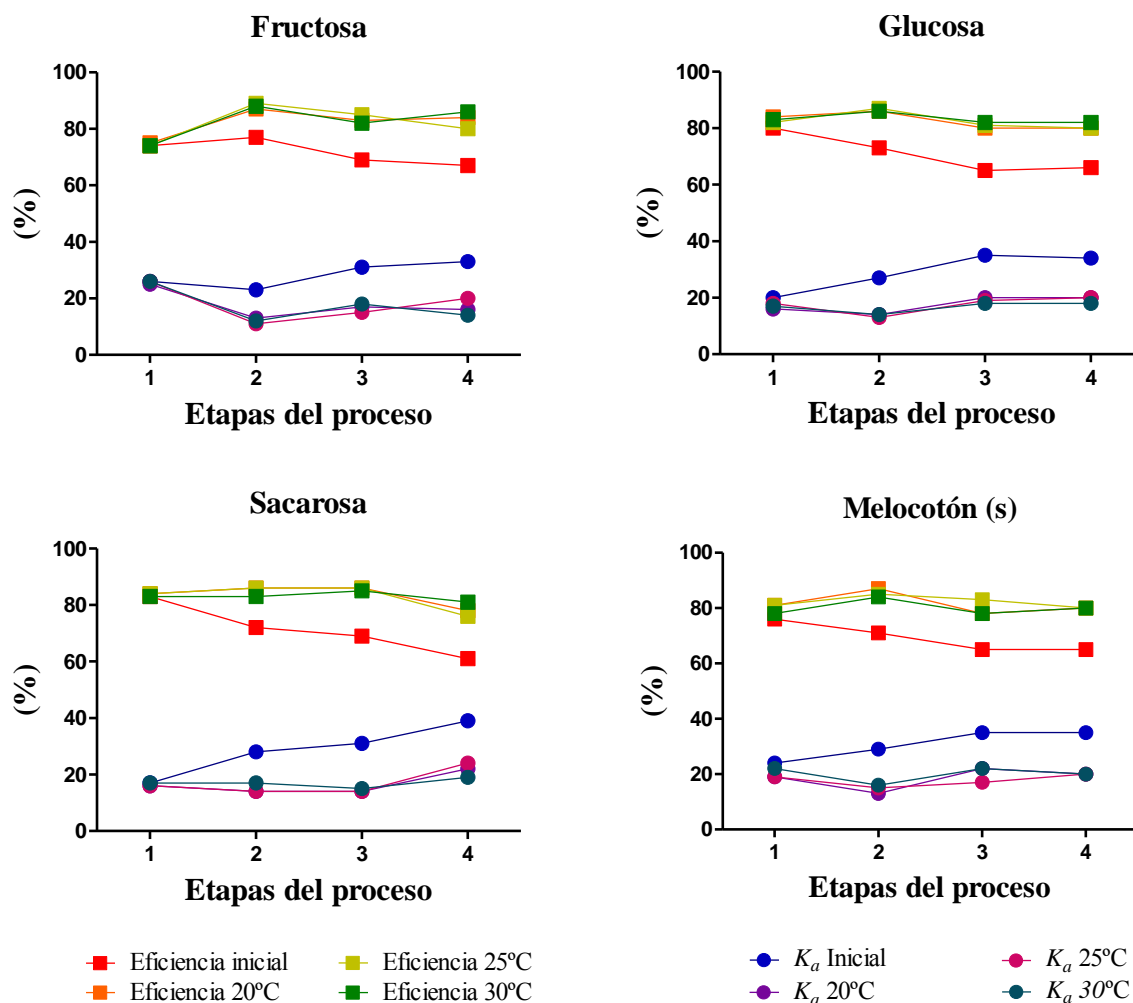
En la etapa 1 se adiciona al fluido final, el fluido generado del promedio de las primeras tres fracciones de deshielo de la etapa 2.

En la etapa 2 se adiciona al fluido final, el fluido generado del promedio de las primeras tres fracciones de deshielo de la etapa 3 y así sucesivamente.

Cabe anotar que para la primera etapa el aumento de la eficiencia se logra a partir del aumento de la concentración del fluido final a partir del deshielo fraccionado de las primeras tres fracciones de la segunda etapa del proceso, y en la cuarta etapa a partir de la disminución de la concentración en la SMFI. Se puede observar que a partir de la tercera etapa se puede recuperar mas del 50% de los solutos retenidos en hielo, tal y como se muestra en la figura 5.8 (gráfica anterior).

Con el deshielo fraccionado a temperatura de 20 °C Se consigue aumentar la eficiencia en la concentración del fluido al final de la etapa del proceso entre un 1% y 22% (figura 5.9). En el caso de la sacarosa es el fluido donde se logra alcanzar mayor promedio de eficiencia en la etapas iniciales del proceso, (22%) debido principalmente al mejor comportamiento del deshielo fraccionado a 20 °C en cuanto a recuperación de soluto se refiere. Es importante destacar que el factor de forma para la sacarosa es mayor en comparación con las otras muestras, lo que implica mayor superficie en función del menor volumen durante el deshielo fraccionado. El menor aumento de la eficiencia se consigue con la fructosa en promedio un 12%.





**Fig. 5.9** Eficiencia y coeficiente de distribución  $K_a$ , del proceso de criocentración y promedio de azúcares básicos (*f*, *g*, *s*) a temperatura de 20 °C, 25 °C y 30 °C

El coeficiente de distribución experimenta una tendencia inversa en relación a la eficiencia, con la misma proporción porcentual. La mayor retención de solutos en el fluido se alcanza con la fructosa en promedio un 12%. La menor retención se alcanza con la sacarosa.

### 5.3.3.2. Mejora de la eficiencia del proceso de criocentración a partir del deshielo fraccionado a 25 °C

Se consigue aumentar la eficiencia de la concentración un 20% con el deshielo fraccionado a 25 °C. En el caso del zumo de melocotón es el fluido donde se logra alcanzar mayor promedio de eficiencia, (22%) seguido de la glucosa y la sacarosa con un 14% en ambos casos. El menor aumento se consigue con la fructosa en promedio un 12%. Si comparamos los mismos fluidos con diferentes temperaturas de deshielo (20 °C y 25 °C), encontramos que la fructosa sigue siendo el soluto donde se consigue menos eficiencia, y en el caso opuesto la sacarosa en promedio donde mayor eficiencia se alcanza. Es significativo observar que en la medida que aumenta la concentración en el fluido y donde hay mayor retención de solutos en el hielo (últimas etapas del proceso) con el deshielo fraccionado se consigue aumentar en mayor proporción la eficiencia del proceso. Esto se puede confirmar con el coeficiente de distribución que experimenta una tendencia inversa en relación a la eficiencia, con la misma proporción porcentual.

### ***5.3.3.3. Mejora de la eficiencia del proceso de crioconcentración a partir del deshielo fraccionado a 30 °C***

La eficiencia de la concentración con el deshielo fraccionado a 30 °C se consigue aumentar un 25% para el caso de la sacarosa. La menor eficiencia se alcanza con la fructosa y el zumo de melocotón un 13% en promedio para ambos fluidos. En promedio para las tres temperaturas de deshielo la eficiencia se aumenta un 14%, notándose el mayor valor alcanzado para la sacarosa a 30%.

La retención de solutos en el hielo con solución de sacarosa podría ser debido a su estructura química que facilita la retención de agua mediante la integración de las dos moléculas que compone el disacárido (Raventós et al 2007). Es importante tener en cuenta que la viscosidad de las soluciones, tiene un efecto limitante en el proceso de crioconcentración, es más alta con sacarosa, seguido de la glucosa y la fructosa.

### ***5.3.4. Análisis tiempo de fructosa, glucosa y sacarosa a 20 °C 25 °C y 30 °C***

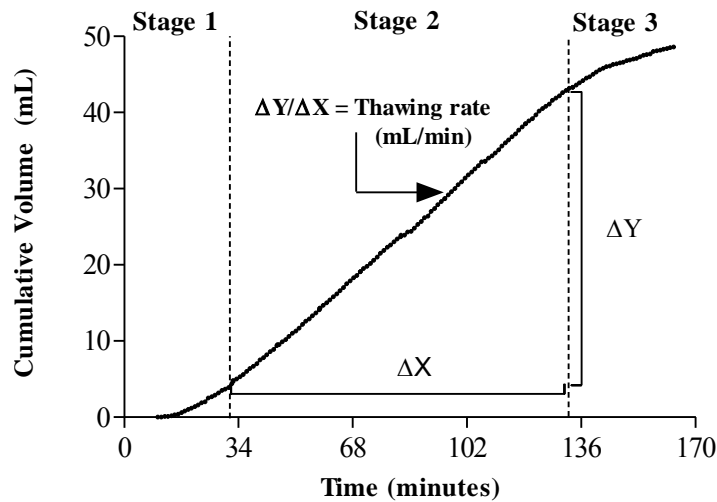
Para estudiar los resultados de tiempo para los diferentes fluidos de ensayo (fructosa, glucosa y sacarosa), previamente se comprobó la hipótesis de homocedasticidad mediante el post test de Bartlett, y la prueba de comparación múltiple de Tukey simultáneamente se realizó el análisis de varianza (ANOVA). Inicialmente para cada temperatura de deshielo (20 °C, 25 °C, 30 °C) y después, para los resultados del conjunto de las temperaturas de deshielo.

Se cotejó la hipótesis de homocedasticidad mediante el post test de Bartlett para cada grupo de variables a diferentes temperaturas (20 °C, 25 °C y 30 °C) comprobando que no hay variación con ( $P < 0.05$ ). Igualmente la prueba de comparación múltiple de Tukey, no muestra diferencia significativa ( $P < 0.05$ ).

Los resultados del análisis de varianza determinan que la razón-F, para cada temperatura de 20 °C, 25 °C y 30 °C es igual a 0,98, 0,76 y 0,45 respectivamente y es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95,0% de confianza.

### ***5.3.5. Tasa de deshielo***

Si el volumen obtenido se representa gráficamente frente al tiempo de deshielo, se obtiene un gráfico tal como la figura 5.10, con características similares para todos los estudios realizados de deshielo fraccionado.



**Fig. 5.10** Deshielo de sacarosa con  $ff$  de  $167 \text{ m}^{-1}$ , temperatura de proceso de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y la fracción de masa de soluto en el hielo de  $1,3 \text{ }^\circ\text{Brix}$

### Discusión

La figura 5.10 muestra tres fases de deshielo, como se ha descrito en el apartado 1.5, con las siguientes características térmicas:

La velocidad promedio de deshielo para cada periodo está dada por la ecuación 4.29.

Primer período: Se trata de un régimen transitorio que se caracteriza por una fuerte influencia de la temperatura inicial. Durante este período, la variación de la temperatura en la muestra depende de la temperatura inicial. Esta temperatura suele experimentar un aumento rápido debido a la ausencia de agua en forma líquida alrededor de la capa de hielo (apartado 1.5). Se llama el período de enfriamiento irregular. La tasa de deshielo está aumentando. La tasa media de deshielo (figura 5.10) de la primera fase es  $V_{\text{fase1}} = 0,19 \text{ mL/min}$ .

Segundo período: el sistema está en un estado de equilibrio. A partir de cierto momento, las condiciones iniciales son menos importantes. Desde este punto en adelante, el proceso se determina predominantemente por la transferencia de calor relacionado con la temperatura externa, las propiedades físicas del cuerpo, la forma y el tamaño de la muestra. Este período se denomina período de enfriamiento regular. La velocidad de deshielo es constante y alcanza su valor máximo durante esta fase (Figura 5.10)  $V_{\text{fase2}} = 0,39 \text{ mL/min}$ .

Tercer periodo: Este régimen es similar a un proceso en el que la temperatura de todos los puntos del cuerpo es la misma. La tasa de deshielo está disminuyendo. La velocidad media (figura 5.10) de la tercera periodo es  $V_{\text{fase3}} = 0,18 \text{ mL/min}$ .

Los tres períodos son similares a los definidos por Isachenko et al (1973), y también tienen similitudes con los períodos de transferencia de calor definidos por Yee et al (2003).

Los resultados experimentales obtenidos del deshielo de sacarosa con  $ff$  de  $167 \text{ m}^{-1}$ , temperatura de proceso de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y fracción de masa de soluto en el hielo de  $1,3 \text{ }^\circ\text{Brix}$  se ajusta a una función de tipo sigmoide:

$$V = X_1 + \frac{X_2 - X_1}{1 + 10^{(X_3 - t) \cdot X_4}} \quad (5.1)$$

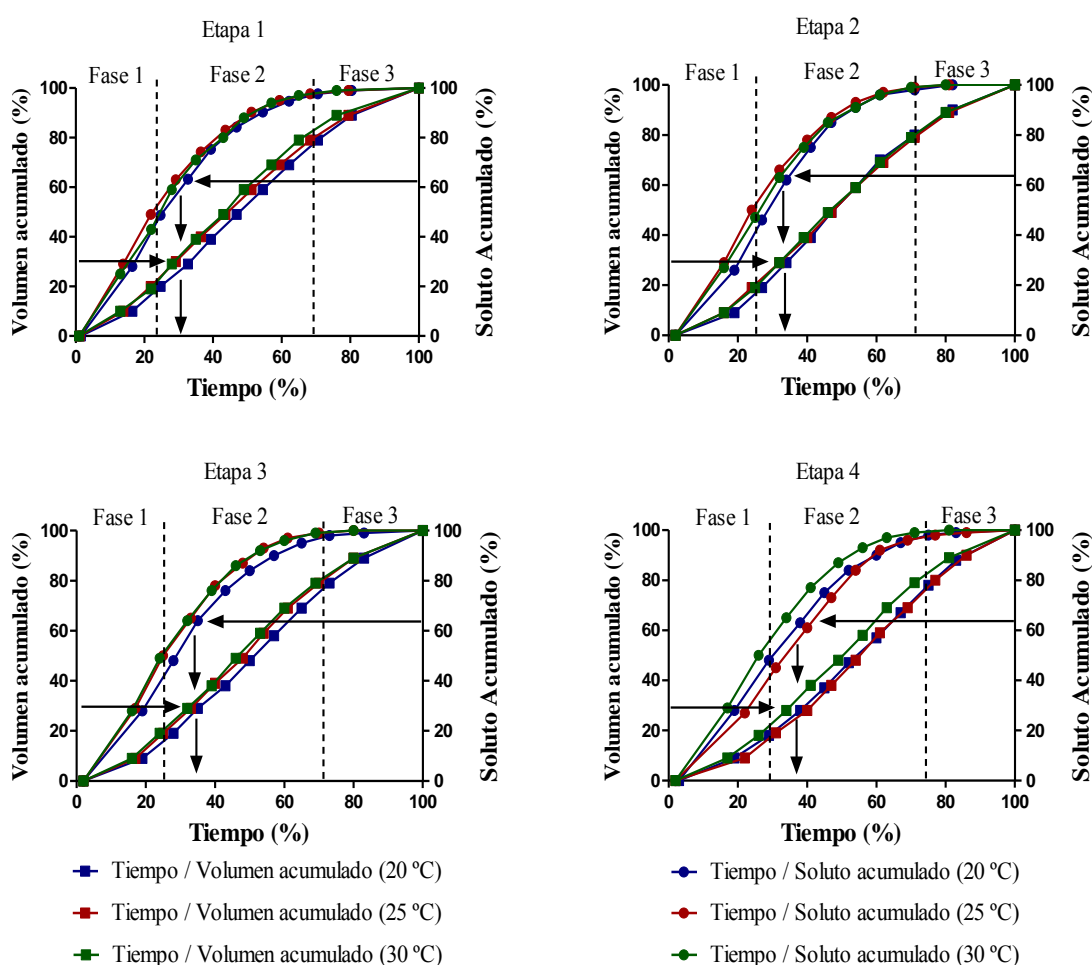
Donde  $v$  es el volumen,  $t$  es el tiempo y  $X_1, X_2, X_3$  y  $X_4$  son constantes características del ensayo y se especifican en la tabla 5.13.

**Tabla 5.13.** Parámetros resultantes del ajuste al modelo sigmoide descrito en la ecuación (5.1)

Parametros	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$R^2$
Constantes	-10,61	56,58	72,42	0,01	0,999

### 5.3.6. Porcentaje de tiempo de deshielo

El porcentaje de tiempo de deshielo se obtiene de la relación descrita en el apartado 4.6.7.2. Los valores son representados en figura 5.11.



**Fig. 5.11** Relación de porcentajes promedio de azúcares básicos ( $f, g, s$ ) entre tiempo / volumen acumulado, tiempo / soluto acumulado en la cuatro etapas del proceso de crioconcentración y temperaturas de deshielo

La figura 5.11, representa los resultados en porcentajes de tiempo, volumen acumulado y soluto acumulado en las distintas etapas del proceso de crioconcentración a temperaturas de deshielo (20 °C, 25 °C y 30 °C). La figura se ha generado a partir de las tablas 5.7, 5.8 y 5.9.

Si relacionamos en la grafica 5.11 el porcentaje del promedio de los azúcares básicos de: volumen acumulado, soluto acumulado y tiempo, en las cuatro etapas del proceso de crioconcentración,

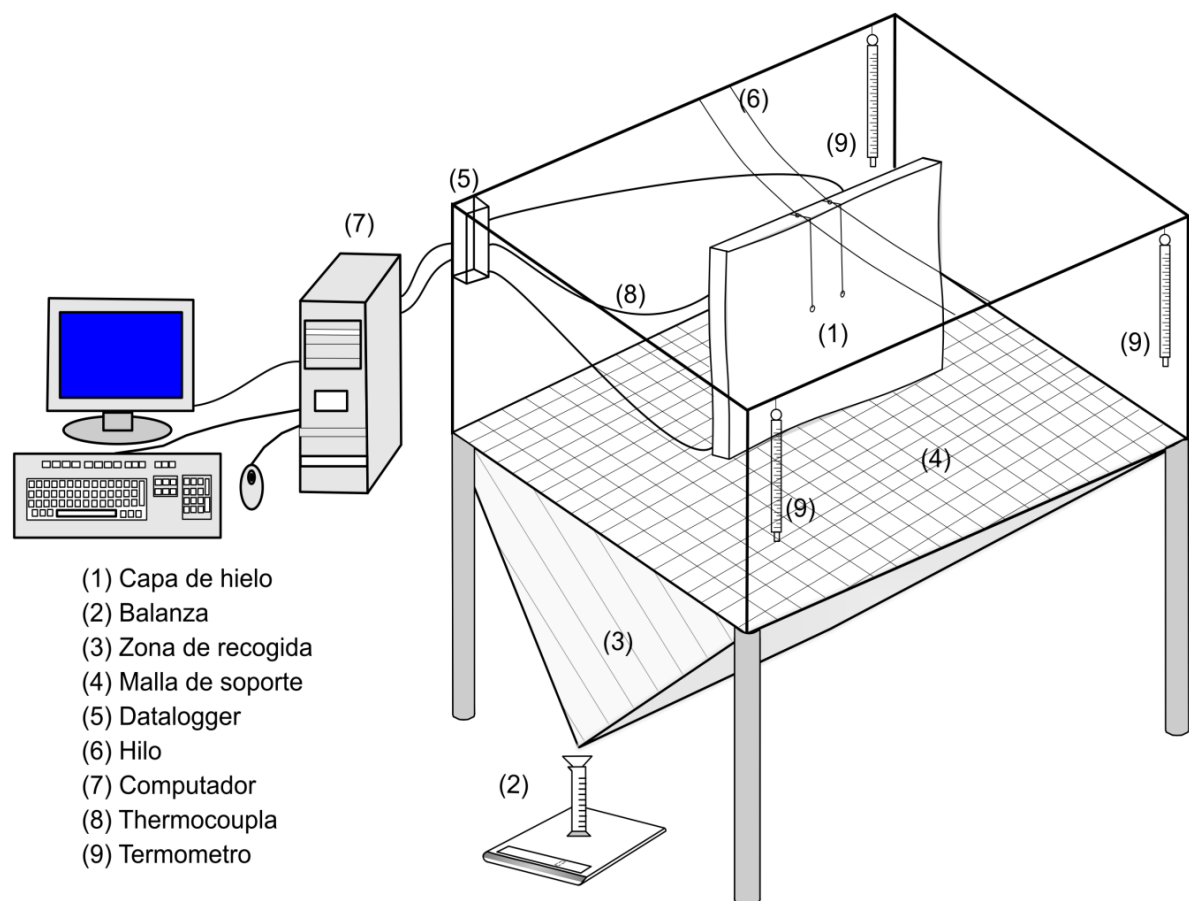
observamos la recuperación de solutos retenidos en el hielo entre 60% (etapa 1) y 64% (etapas 2 y 3), en la etapa 4 se notó un ligero descenso del porcentaje de recuperación de solutos (63%), esto debido principalmente a la variación del factor de forma. Es importante destacar que ésta recuperación de solutos se alcanza entre un 30% (etapa 1) y un 37% (etapa 4) del tiempo de deshielo, y volumen acumulado de 30% (todas las etapas).

Si comparamos los resultados anteriores con la mejora en la eficiencia del proceso de crioconcentración mediante la aplicación del proceso de deshielo fraccionado, esto supuesto aumentar la eficiencia un 22% a 25% en un 30% a 37% del tiempo total de deshielo.

### 5.3.7. Validación de los ensayos de deshielo fraccionado.

Para validar los ensayos de deshielo fraccionado de las muestras descritas en el apartado 4.5.2, se debe realizar ensayos con muestras que presenten características (superficie, volumen y peso) similares de las capas de hielo obtenidas del proceso de crioconcentración (figura 5.12).

La finalidad de estos ensayos es constatar si el comportamiento de las variables de deshielo (tiempos de deshielo e índice de concentración), manteniendo un intervalo de factor de forma determinado, es similar tanto para las muestras de forma cilíndrica (pequeñas), como las muestras de forma de paralelepípedo (placas grandes).



**Fig. 5.12** Esquema del método de ensayos de deshielo fraccionado de las capas de hielo a temperatura de 20 °C

La tabla 5.14 muestra los resultados obtenidos de los deshielos de las capas de hielo (placas grandes) obtenidas de la cuarta etapa de proceso de crioconcentración (PS 4) con soluciones de fructosa,

glucosa y sacarosa sin corrección de tiempos, es decir a temperatura aproximada de la cámara frigorífica (-18 °C).

**Tabla 5.14.** Tiempos de deshielo (sin corrección) de las capas de hielo de la cuarta etapa de proceso de crioconcentración

PS 4 <sup>a</sup> (°Bx)	$ff^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	164	6,8	<i>f</i>	<i>t</i> <sup>d</sup>	27,4	37,9	46,3	52,8	60,2	67,3	73,6	80,9	89,4	114,7
20	178	6,8	<i>g</i>	<i>t</i>	24,1	32,5	41,0	46,6	53,7	60,1	67,3	74,4	80,9	103,3
	185	7,7	<i>s</i>	<i>t</i>	26,5	36,0	44,2	51,5	58,0	64,2	71,2	78,5	86,8	110,9

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración (PS 4); <sup>b</sup> factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo; <sup>d</sup> tiempo (minutos).

Una vez determinados los tiempos de deshielo de las muestras a la temperatura de la cámara frigorífica a -18 °C, se establece el procedimiento de corrección de tiempos para cada azúcar (*f*, *g*, *s*) descrito en el apartado 4.6.7.1, las variables se muestran en la tabla 5.15.

**Tabla 5.15.** Variables del proceso de corrección de tiempo y tiempo corrector

DESCRIPCIÓN	Variables del proceso de corrección de tiempo										
	T <sub>a</sub> (°C)	EP	SMFI (Brix)	FPD (°C)	$ff$ (m <sup>-1</sup> )	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$b_2$ (1/s)	$t_1$ (minutos)	$t_2$ (minutos)	$t_{exp}$ (minutos)
Fructosa ( <i>f</i> )	20	4	7,6	-0,76	165	0,55	0,60	1,26·10 <sup>-3</sup>	6,8	8,0	1,2
Glucosa ( <i>g</i> )	20	4	7,7	-0,87	178	0,55	0,60	1,25·10 <sup>-3</sup>	6,8	8,0	1,2
Sacarosa ( <i>s</i> )	20	4	7,8	-0,47	185	0,54	59,00	1,15·10 <sup>-3</sup>	7,7	9,0	1,4

Biot es menor que 0.1, se acepta el análisis de sistemas concentrados.

Los valores de tiempos corregidos con el procedimiento antes descrito y los valores de índice de concentración se presentan en la tabla 5.16. Los resultados se cotejaran posteriormente con los obtenidos de los deshielos de las muestras de ensayo.

**Tabla 5.16.** Tiempos de deshielo (corregidos) e índice de concentración de las capas de hielo de la cuarta etapa de proceso de crioconcentración

PS 4 <sup>a</sup> (°Bx)	$ff^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	164	6,8	<i>f</i>	<i>t</i> <sup>d</sup>	20,6	31,1	39,5	46,0	53,5	60,5	66,8	74,1	82,6	108,0
				CI <sup>e</sup>	3,1	2,3	1,8	1,3	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0	0,0
20	178	6,8	<i>g</i>	<i>t</i>	17,3	25,8	34,2	39,9	46,9	53,3	60,5	67,7	74,1	96,5
				CI	3,2	2,4	1,7	1,3	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0
	185	7,7	<i>s</i>	<i>t</i>	18,9	28,3	36,5	43,8	50,3	56,5	63,6	70,9	79,2	103,2
				CI	3,1	2,2	1,8	1,3	0,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0

<sup>a</sup> Etapa del proceso de concentración (PS 4); <sup>b</sup> factor de forma <sup>c</sup> Fracción de soluto en el hielo; <sup>d</sup> tiempo (minutos); <sup>e</sup> Índice de concentración

Estos resultados fueron comparados con los obtenidos por los deshielos fraccionados en la cuarta etapa del proceso (tabla 5.7). La prueba de Bartlett contrasta las muestras de índice de concentración

y establece que son homocedásticas, no hay diferencia significativa entre las varianzas con ( $P < 0,05$ ). La prueba de Tukey con significancia ( $P < 0,05$ ), determina que las muestras pareadas no presentan diferencias significativas.

Los resultados de ANOVA establecen, para la razón-F, es igual a  $1,1 \cdot 10^{-3}$  y es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95,0% de confianza.

El análisis evidencia que las capas de hielo y las muestras de deshielo exponen un comportamiento similar durante el proceso de deshielo, en cuanto a tiempos de deshielo e índice de concentración se refiere. Esto demuestra que los resultados del deshielo de las capas de hielo son comparables con las muestras de ensayo.

### 5.3.8. Efecto combinado del tiempo de deshielo concentración y factor de forma

Los productos derivados de fruta, específicamente los zumos de fruta están sometidos durante las distintas fases del proceso de crioconcentración y de deshielo a cambios en tiempos, concentración y factor de forma. Resulta útil, por tanto, obtener una única expresión que relacione el tiempo, la concentración y el factor de forma.

La expresión (4.36) correspondiente al tiempo de deshielo, se puede redefinir, a partir de los resultados obtenidos en lo referente a deshielos fraccionado ( $^{\circ}\text{Brix}$ ,  $ff$ , tiempo de deshielo).

$$t = \frac{\rho_{CI} K}{ff} \quad (\text{s})$$

Donde:

$\rho_{CI}$  es la densidad del hielo durante el proceso ( $\text{kg/m}^3$ ) y se obtiene siguiendo el procedimiento 4.6.6:

La densidad del carbohidrato en función de la temperatura viene dada por la ecuación 4.8 (Ibarz et al 2005).

$$\rho_C = 1,5991 \cdot 10^3 - 0,31046 T \quad (\text{kg/m}^3)$$

La densidad del hielo función de la temperatura viene dada por la ecuación 4.9 (Ibarz et al 2005):

$$\rho_I = 916,89 - 0,13071 T \quad (\text{kg/m}^3)$$

La media aritmética entre la temperatura de la superficie del intercambiador de calor en contacto con la capa de hielo y de la temperatura de la superficie de la capa de hielo que toca el líquido concentrado (corresponde al FPD para concentraciones de 5  $^{\circ}\text{Brix}$ , 10  $^{\circ}\text{Brix}$ , 15  $^{\circ}\text{Brix}$  y 20  $^{\circ}\text{Brix}$ ) es  $-4,0^{\circ}\text{C}$  (ecuación 4.19). Este valor se inserta en la ecuación (4.8) y la ecuación (4.9), y se obtienen los valores de la densidad  $1.597,85$  y  $916,36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Estas densidades corresponden a 100  $^{\circ}\text{Brix}$  y 0  $^{\circ}\text{Brix}$ , respectivamente. Finalmente, suponiendo una relación lineal entre la densidad y la concentración ( $^{\circ}\text{Brix}$ ), a partir de los dos pares de datos ( $\rho_{IC}$ ,  $^{\circ}\text{Brix}$ ), ( $1.597,85 - 100$ ) y ( $916,36 - 0$ ) se obtuvo la ecuación lineal (5.2):

$$\rho_{CI} = 6,83 Bx + 917,41 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.2)$$

Mediante la sustitución de la densidad en la ecuación (4.36) se convierte en:

$$t = \frac{K(6,83Bx + 917,4)}{ff} \quad (\text{min}) \quad (5.3)$$

Despejando  $K$  de la ecuación (5.3) se obtiene:

$$K = \frac{t ff}{(6,83Bx + 917,4)} \quad (\text{s.m}^2.\text{kg}^{-1}) \quad (5.4)$$

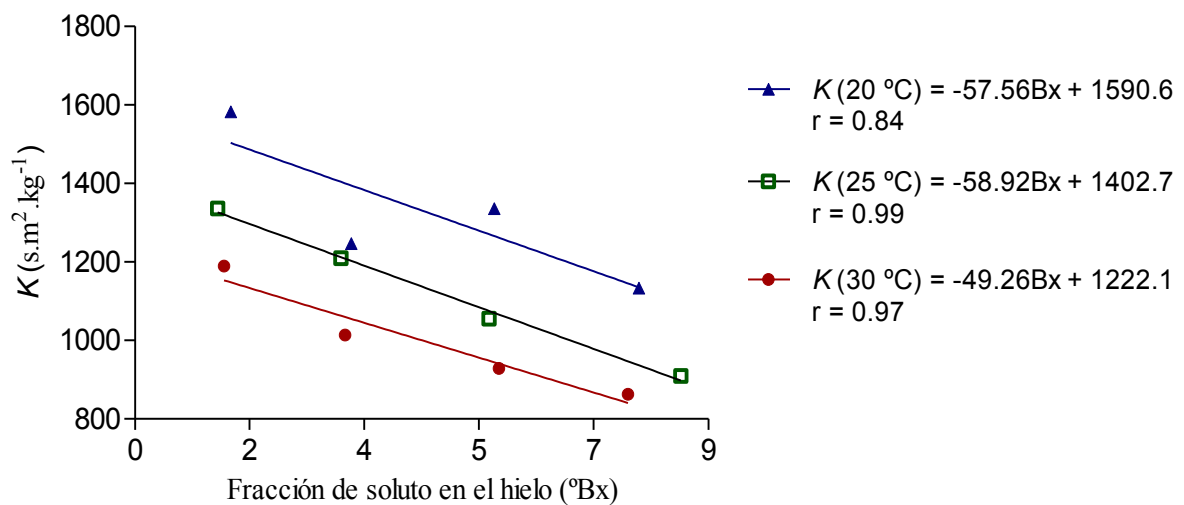
Sustituyendo en la ecuación (5.4) el  $ff$ , el tiempo total de deshielo, y la concentración, ajustable para los diversos datos de las tablas 5.7, 5.8 y 5.9, se obtienen los valores de  $K$ , que se muestran en la tabla 5.17:

**Tabla 5.17.** Valores medios de soluciones de  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , para las cuatro etapas del proceso

ETAPAS	1	2	3	4
20°C				
$ff^a$ (m <sup>-1</sup> )	179,0	186,0	204,0	181,0
SMF <sup>b</sup> (° Brix)	1,5	3,4	5,6	7,9
Tiempo total (minutos)	136,7	105,2	104,2	101,2
$K$ (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1582,9	1247,4	1336,4	1133,5
25°C				
$ff$ (m <sup>-1</sup> )	186,0	183,0	179,0	207,0
SMFI <sup>1</sup> (° Brix)	1,3	3,2	5,6	8,6
Tiempo total (minutos)	110,9	103,8	94,1	71,4
$K$ (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1336,0	1209,9	1055,7	909,7
30°C				
$ff$ (m <sup>-1</sup> )	179,0	183,0	181,0	187,0
SMFI <sup>1</sup> (° Brix)	1,4	3,3	5,7	7,8
Tiempo total (minutos)	102,8	86,8	81,6	74,6
$K$ (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1189,3	1013,6	928,6	862,8

<sup>a</sup>Factor de forma; <sup>b</sup>fracción de soluto en la masa de hielo (SMFI).

Trazando los valores de  $K$  frente a la SMFI (°Brix), a temperaturas de deshielo (20 °C, 25 °C y 30 °C) se obtienen líneas rectas como se indica en la figura 5.13.



**Fig. 5.13**  $K$  frente SMFI (°Brix) para las cuatro etapas de proceso a temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C



Se deduce de la figura 5.13 la disminución de  $K$  con el aumento de la concentración, y esta tendencia es descrita por una relación lineal.

Sustituyendo en la ecuación (4.36) la relación lineal de  $K = f$  (°Brix a partir de la fig. 5.13) se obtienen para el tiempo de deshielo a temperaturas de 20 °C, 25 °C y 30 °C, las siguientes ecuaciones:

$$t_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{-6,55Bx^2 - 699,10Bx + 24320,54}{ff} \quad (\text{min}) \quad r = 0,77 \quad (5.5)$$

Valido para  $ff$  entre 164 y 254, ( $\text{m}^{-1}$ ), SMFI entre 1.3 y 8.4 °Brix, y temperatura de 20 °C.

$$t_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{-6,71Bx^2 - 741,16Bx + 21447,52}{ff} \quad (\text{min}) \quad r = 0,96 \quad (5.6)$$

Valido para  $ff$  entre 172 y 226, ( $\text{m}^{-1}$ ), SMFI entre 1.0 y 9.0 °Brix y temperatura de 25 °C.

$$t_{30^{\circ}\text{C}} = \frac{-5,61Bx^2 - 614,14Bx + 18686,11}{ff} \quad (\text{min}) \quad r = 0,94 \quad (5.7)$$

Valido para  $ff$  entre 165 y 204, ( $\text{m}^{-1}$ ), SMFI entre 1,1 y 8,5 °Brix y temperatura de 25 °C.

Las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7 muestran que el tiempo de deshielo disminuye con el aumento del factor de forma y la disminución de la concentración (°Brix). De igual forma a mayor temperatura menor tiempo de deshielo. Se puede admitir que un cambio del 10% en el  $ff$  induce un cambio del 10% en el tiempo de deshielo, mientras que un cambio de 10% en la concentración (°Brix) sólo induce un cambio del 2% en el tiempo de deshielo. En otras palabras, el tiempo de deshielo es más sensible a las variaciones del  $ff$  que a las variaciones en la concentración de (°Brix).

Utilizando las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7, los valores experimentales de  $ff$  y concentración (°Brix) que forman las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 se calculó los tiempos totales de deshielo para cada etapa del proceso. Estos fueron comparados con los tiempos de deshielo determinados experimentalmente utilizando el error medio cuadrático (RMS). Se obtuvieron los siguientes resultados: RMS = 10,1% a 20 °C; 4,5% a 25 °C y el 4,8% a 30 °C, se consideran valores inferiores al 25% lo que indica un buen ajuste del modelo (Lewicki 2000). Valores que siguen la tendencia de los coeficientes de correlación ( $r$ ) de las ecuaciones. 5.5, 5.6 y 5.7.

De igual forma se observa que un aumento de la temperatura de deshielo de 5 °C en el intervalo, de 20 a 30 °C, reduce el promedio de los tiempos totales de deshielo en el orden de 10 a 15 minutos.

Con los aumentos de temperatura del deshielo no se han detectado variación significativa de los índices de concentración (se ha comprobado el ANOVA, Bartlett y Tukey a un nivel de certidumbre del 95%), lo que permite reducir los tiempos de proceso sin reducción de los índices de concentración.

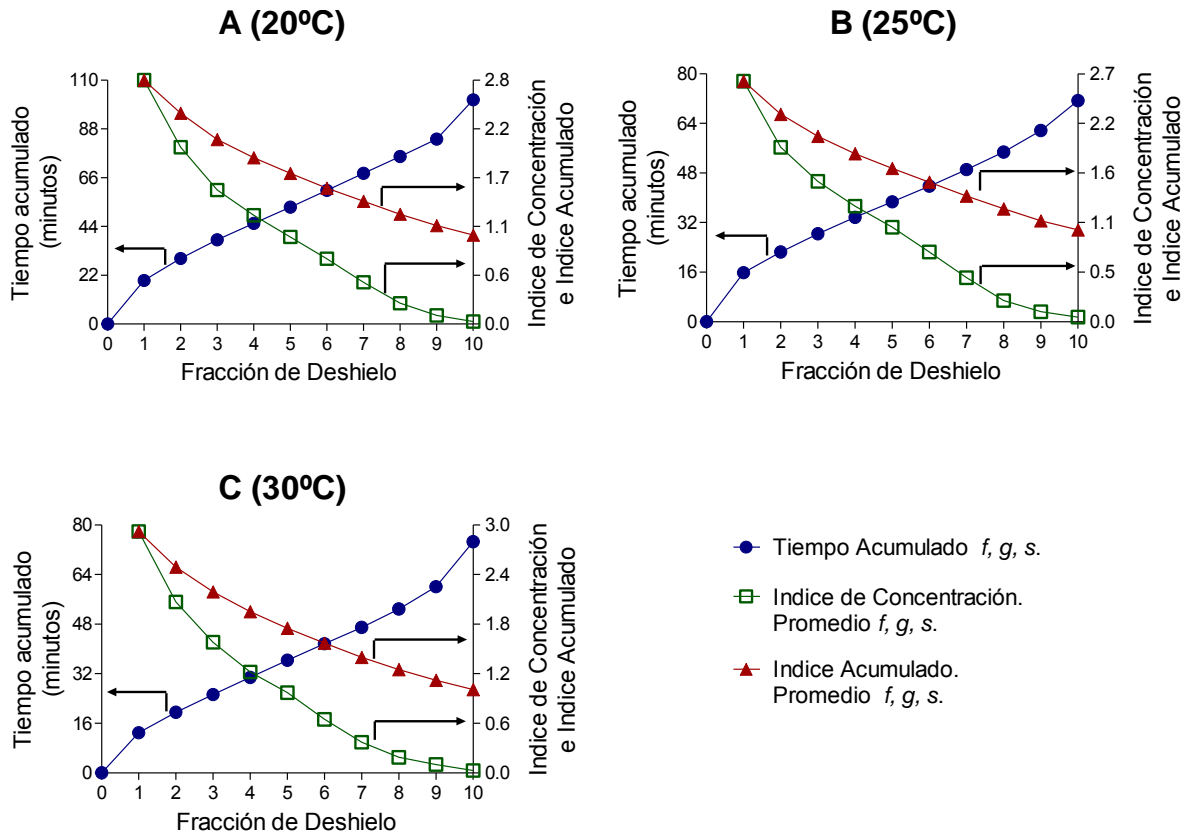
### **5.3.9. Efecto combinado tiempo de deshielo e índice de concentración acumulado**

Con la información de las tablas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, en la presente sección se establece un procedimiento de cálculo para la cuarta etapa del proceso de crioconcentración que permite determinar la siguiente información:

- Tiempos de deshielo para una fracción o tiempos de deshielo entre fracciones.

- Índice de concentración obtenida en una determinada fracción.
- Índice de concentración acumulado.

Con las tablas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, se realiza la figura 5.14 (validas para los parámetros con que se han obtenido).



**Fig. 5.14** Valores medios de: tiempos acumulados, índices e índices acumulados para *f, g, s*,

- A. *ff* 166 a 206 m<sup>-1</sup>, SMFI 7,3 a 8,4 °Brix, 20 °C
- B. *ff* 191 a 225 m<sup>-1</sup>, SMFI 8,6 a 9,0 °Brix, 25 °C
- C. *ff* 172 a 206 m<sup>-1</sup>, SMFI 6,9 a 8,5 °Brix, 30 °C

Los gráficos permiten obtener de forma directa tiempos de deshielo, índices de concentración e índice acumulado, también de forma indirecta la velocidad de deshielo (mL/min).

Se observa que el aumento de las temperaturas provoca la disminución de los tiempos de deshielo, y el aumento en la tasa de deshielo. De manera similar que el apartado 5.3.5, el gráfico muestra tres períodos de deshielo Yee et al (2003); Gulfo et al (2013):

En primer período (0 a 1): Se trata de un régimen transitorio.

Segundo período (1 a 9): el sistema está en un estado de equilibrio. Este período se denomina período de enfriamiento regular. La velocidad de deshielo es constante y alcanza su valor máximo durante este período, por esta razón el RMS de 25 °C y 30 °C se reducen con respecto a 20 °C, esta tendencia también es apoyado por el coeficiente de correlación *r* ecuaciones 5.4, 5.5 y 5.6.

En tercer período (9 a 10): Este régimen es similar a un proceso en el que la temperatura de todos los puntos del cuerpo es la misma.

Estas propiedades ponen de manifiesto que suministrar calor para realizar el deshielo permite de forma selectiva disminuir el tiempo de deshielo en aquellas fracciones que se recuperan más solutos (las primeras) sin merma de la concentración obtenida.

### 5.3.10. Comparación del resultado del deshielo fraccionado del melocotón (s) con los azúcares básicos

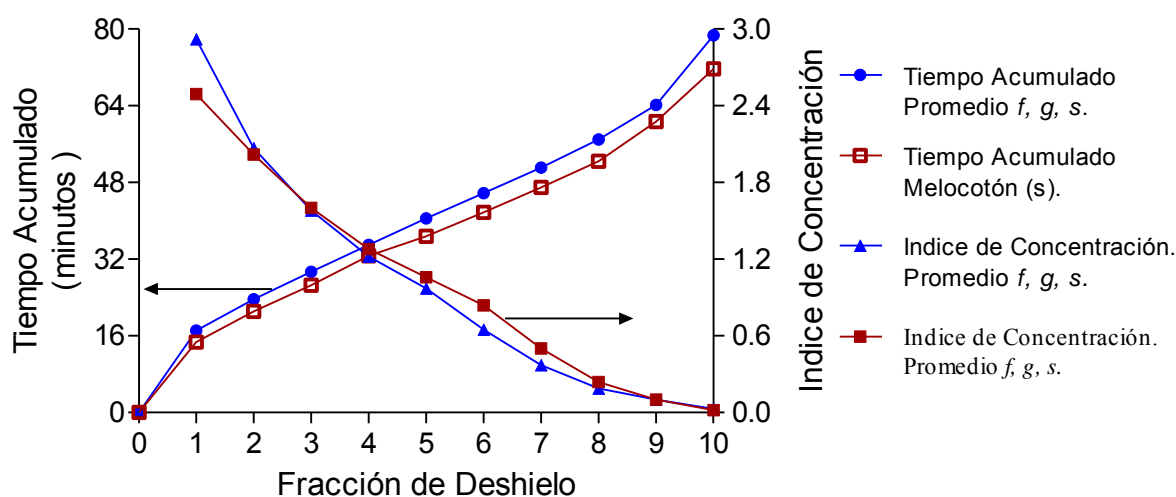
A partir de muestras de hielo obtenidas de fluidos, zumo de melocotón (s) como se describe en el apartado 4.2 se realizaron experimentos de deshielo fraccionado obteniéndose los resultados para cada fracción de deshielo, índice de concentración, tiempo de deshielo, tabla 5.18.

**Tabla 5.18.** Fracción de deshielo de melocotón (s) e índice de concentración con  $ff$  195 m<sup>-1</sup>, SMFI 8,2 °Brix a temperatura de 30 °C

Fracción de deshielo	Tiempo (min)	Índice de concentración <sup>c</sup>
1	11,90	2,49
2	6,40	2,02
3	5,45	1,60
4	6,15	1,28
5	4,02	1,06
6	5,02	0,84
7	5,18	0,50
8	5,47	0,24
9	8,29	0,10
10	11,02	0,02

<sup>a</sup> Factor de forma, <sup>b</sup>Fracción de soluto en el hielo, <sup>c</sup>Índice de concentración.

Los valores representados en la figura 5.14 (C) y los valores de la tabla 5.18, se obtiene la figura 5.15.



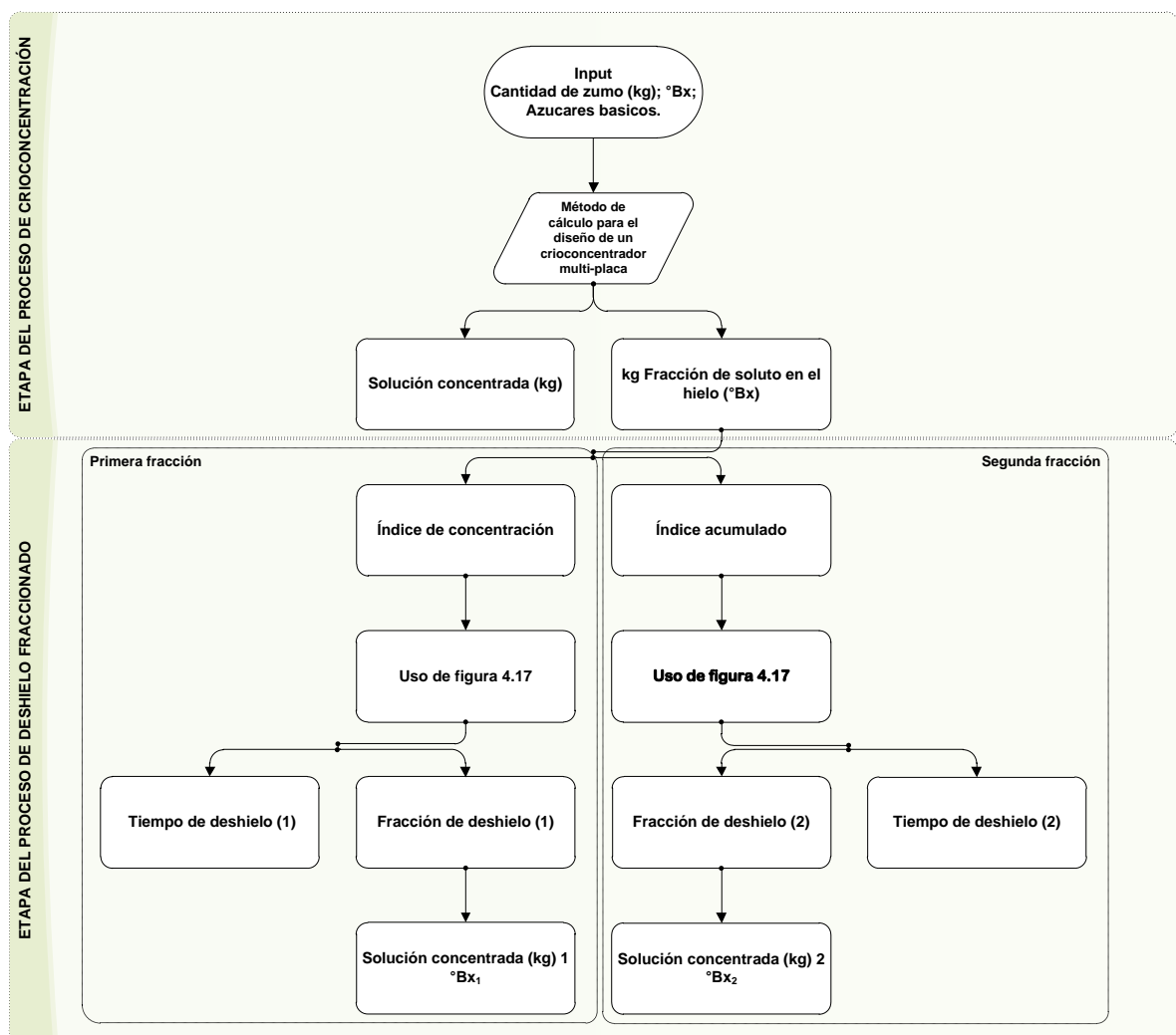
**Fig. 5.15** Valores promedios de tiempos acumulados e índice de concentración de la 4 etapa del proceso de crioconcentración para soluciones de *f, g, s*, ( $ff = 187$  m<sup>-1</sup>, 7,7 °Brix, 30 °C) y para el zumo de melocotón simulado (*s*) ( $ff = 195$  m<sup>-1</sup>, 8,2 °Brix, 30 °C)

La Figura 5.15 indica que el deshielo fraccionado de zumo de melocotón (s) muestra un comportamiento muy similar al promedio de los tres azúcares básicos. Para verificar la similitud entre los resultados obtenidos, se calcularon los RMS, sobre la base de las diferencias entre los

valores medios de  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , y el zumo de melocotón ( $s$ ). El RMS obtenido fue de 5,7%, para el tiempo acumulado y 17,2% para el índice de concentración. Se consideran valores inferiores al 25% lo que indica un buen ajuste del modelo (Lewicki 2000). El hecho de que el comportamiento del zumo de melocotón ( $s$ ) describa un buen comportamiento en relación al promedio de los tres azúcares básicos, es probablemente causado por la composición del jugo (18,80%, glucosa, fructosa 25,50%, 55,70% de sacarosa), que relativamente coincide con la igual distribución entre los tres azúcares (33,3% para cada uno de los azúcares). Este criterio es válido para las condiciones experimentales de los datos representados en la figura 5.15. El procedimiento de cálculo explicado anteriormente proporciona una aproximación de los tiempos de deshielo y la SMFI durante el deshielo fraccionado de soluciones de azúcar.

### 5.3.11. Aplicación del algoritmo de cálculo para zumo de naranja

Sobre la base del análisis anteriormente descrito, se desarrolló un algoritmo de cálculo que se presenta en la figura. 5.16.



**Fig. 5.16** Algoritmo para el cálculo de una etapa de un proceso de concentración por congelación

A continuación se presenta un esquema general del proceso de criocentración en capa en película descendente aplicado al zumo de naranja.

Previo al proceso de criocentración el zumo de naranja es pasteurizado. Se inicia el proceso de criocentración con una cantidad de 300 kg de zumo de naranja, y concentración inicial de 11,5

°Brix. El proceso se basa en una etapa de proceso y de recuperación de soluto por deshielo fraccionado.

### **Etapa del proceso de concentración por congelación**

La etapa del proceso se calcula por el método presentado por Auleda et al (2011b). Los parámetros conocidos son:

Descripción	Valor	Unidad
Composición (azúcares):		
Fructosa	32,0	%
Glucosa	32,6	%
Sacarosa	35,5	%
FPD incremento durante la etapa	0,5	°C
Flujo de calor a través de la placa	500	W/m <sup>2</sup>
Velocidad lineal de jugo en la placa	0,5	m/s
Espesor de la capa de hielo	1,0 10 <sup>-2</sup>	m

Los resultados de cálculo:

Descripción	Valor	Unidad
Punto inicial de congelación	-1,15	°C
Punto final de congelación	-1,64	°C
Temperatura de entrada del refrigerante	-8,1	°C
Tasa media de formación de hielo puro	1,58 · 10 <sup>-6</sup>	m/s
Duración de la etapa de procesamiento	6105	s
Cantidad de hielo formado	9,42	kg/m <sup>2</sup>
Flujo de masa por longitud de la placa	1,58	kg · s <sup>-1</sup> · m <sup>-1</sup>
Superficie necesaria después de la corrección (aumentado un 10%)	17,16	m <sup>2</sup>
Concentración al final de la etapa	15,57	°Bx
Cantidad de jugo concentrado	153,04	kg
Cantidad de hielo obtenido	146,95	kg
Concentración de solutos en el hielo (SMFI)	7,26	°Bx

### **Etapa del proceso de deshielo fraccionado**

Los resultados obtenidos en el cálculo definen las principales características del proceso de crioconcentración y deshielo fraccionado. Se procesa el deshielo para obtener:

- La cantidad de hielo a la concentración inicial del jugo y tiempo de deshielo.
- Tiempos de deshielo y concentración.

El procedimiento de cálculo de la sección 5.3.9 y 5.3.10 se utilizará para calcular el tamaño de las fracciones de deshielo y el tiempo del proceso.

En primer lugar, la ecuación (5.2) se utiliza para determinar la densidad de la capa de hielo obtenida. Esto es 967,00 kg/m<sup>3</sup>, el cual, para una superficie de placa de 1 m x 1 m, corresponde a un espesor de 0,098 m y un factor de forma de 204,1 m<sup>-1</sup>.

Para el cálculo del proceso de deshielo fraccionado, es usada la figura 5.14 (A), con el promedio de  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , ( $ff$  entre 166 y 206 m<sup>-1</sup>, SMFI entre 7,3 y 8,4 °Brix, 20 °C).

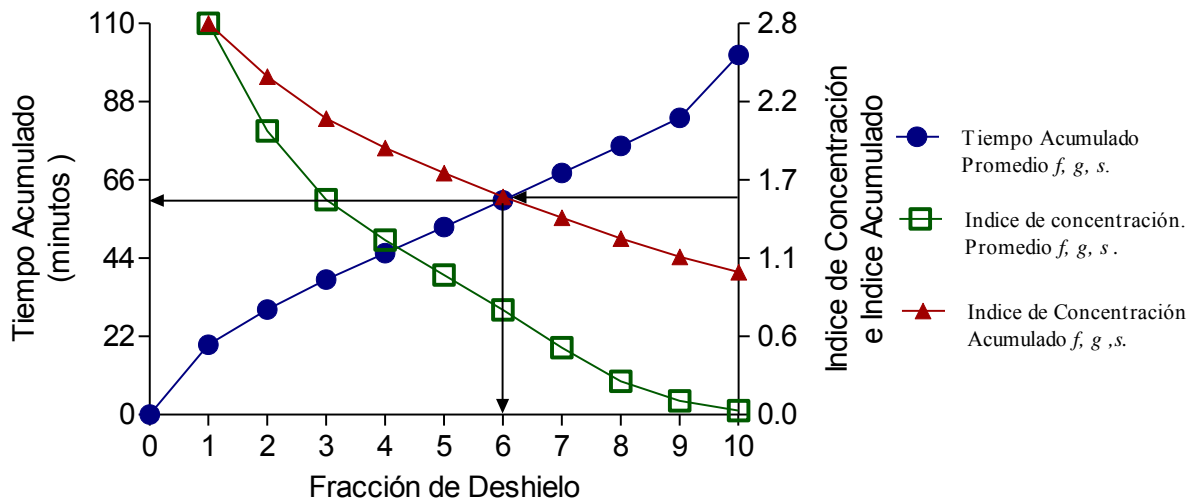


Fig. 5.17 Aplicación del proceso de cálculo para el zumo de naranja

**Primera fracción de deshielo:**

Como el objetivo es obtener una primera fracción con una concentración igual a la del jugo original (11,5 °Brix), el índice de concentración acumulado *IA* necesario es igual a:

$$CI = \frac{^{\circ}Brix}{^{\circ}Brix_{ICE}} = \frac{11,5}{7,26} = 1,58$$

Donde, el índice de concentración (*CI*) coincide aproximadamente con índice de concentración acumulado (*IA*):

$$IA = \frac{\sum_{i=1}^6 CI_i}{n} = \frac{2,80 + 2,07 + 1,57 + 1,23 + 1,00 + 0,77}{6} = 1,52$$

En el eje índice de concentración acumulado (*IA*) de la figura 5.17 se dibuja la línea horizontal *IA* = 1,52. Esta línea horizontal toca la línea que indica el número de fracciones en la fracción 6. Se ve así que 6/10 fracción del hielo necesita ser descongelado en la primera fracción. A medida que la cantidad total de hielo es 146,95 kg, la cantidad de hielo que necesita ser descongelado en la primera fracción es:

$$q_{df} = 0,6 \times 146,95 = 88,17 \quad kg$$

De manera similar, puede verse en la figura 5.17 que el tiempo de deshielo (*TT*) equivale a 60,3 minutos.

**Segunda fracción de deshielo:**

En la figura 5.17 el índice de concentración (*CI*) se obtiene valores de los pasos a descongelar 7 a 10, puede entonces, calcularse el índice de concentración acumulado (*IA*):

$$IA = \frac{\sum_{i=7}^{10} CI_i}{n} = \frac{0,50 + 0,25 + 0,15 + 0,05}{4} = 0,238$$

La cantidad de hielo a descongelar es:

$$q_{df} = 0,4 \times 146,96 = 58,78 \text{ kg}$$

La SMFI es entonces:

$$0,2 \times 7,26 = 1,45 \text{ °Brix}$$

La figura 5.17 muestra el tiempo total (101,2 minutos). Restando el tiempo de la primera fracción (60,3 minutos) resulta el tiempo de la segunda fracción 34,9 minutos.

Aunque este es un ejemplo concreto, con el procedimiento descrito se puede calcular la SMFI (contenido) y *TT* (minutos) para cualquier fracción de deshielo. El procedimiento puede ser aplicado a cualquier proceso de crioconcentración que utilice la técnica de deshielo fraccionado.

### **Estimación de la energía necesaria para el deshielo**

El calor necesario para descongelar es dado por la ecuación:

$$Q_T = (Q_{ice} + Q_{fusion})\gamma \quad (5.8)$$

Donde:

$Q_{ice}$ : la energía necesaria para pasar el hielo de la temperatura media del crioconcentrador a la temperatura de deshielo.

$Q_{fusion}$ : la energía necesaria para deshacer el hielo

$\gamma$ : es un coeficiente de seguridad para facilitar la puesta en régimen del equipo con valores superiores a 1,05.

## **5.4. DISCUSIÓN GENERAL**

La uniformidad y distribución de soluto en el hielo (tabla 5.3 y tabla 5.4 respectivamente), establecen una similitud en la correspondencia con las investigaciones de Chen et al (1998, 1999).

La uniformidad y la distribución de soluto en el hielo están determinados por el alto sub-enfriamiento y la nucleación, la tasa de crecimiento del hielo y la concentración del fluido al final del proceso (figura 1.17 A y 5.3), los resultados confirman lo planteado por Laari et al (1990), Scholz (1993), Flesland (1995), Ulrich y Henning (1996), Kwang-Joo y Ulrich (2001), Sánchez et al (2011). Es decir, cuando se inicia la nucleación y crecimiento del hielo sobre la placa refrigerada, inicialmente los solutos son atrapados debido al alto gradiente de temperatura entre la placa y el fluido alimenticio, posteriormente y debido a la tasa de crecimiento lenta del hielo sobre la placa, los solutos son rechazados hacia la parte mas externa de la misma (lado con temperatura mas elevada) acumulandose en la interfase sólido-líquido. Esta situación da lugar a una concentración de soluto en el líquido que rodea el frente de hielo, dando lugar a una modificación de la temperatura de equilibrio en la interfase sólido-líquido. Temperatura de equilibrio que disminuye al aumentar la concentración de soluto; por tanto, aumenta sub-enfriamiento en la zona frontal, denominado sub-enfriamiento constitucional. Bruin y Jongen

(2003) indican que, en soluciones de azúcares y alimentos líquidos con sub-enfriamientos elevados, los cristales crecen en forma dendrítica, lo que explica la razón de atrapamiento de soluto en el hielo.

Los resultados obtenidos a partir del deshielo fraccionado de la  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , (tablas 5.10, 5.11 y 5.12) coinciden con los reportados por Yee et al (2003).

Cuando las muestras se deshielan a 20 °C, la tendencia de los perfiles de concentración difiere con respecto a 30 °C, mientras que las diferencias entre los perfiles de 20 °C y 25 °C, 25°C y 30 °C son mínimas.

La temperatura de deshielo tiene efecto sobre el tiempo y la concentración, a mayor temperatura de deshielo menor tiempo y menor recuperación de solutos. Las fracciones iniciales contienen mayor concentración de soluto que las fracciones posteriores. Esta tendencia fue notable a 20 °C, y en las muestras de deshielo obtenidas de la cuarta etapa del proceso. A 20 25 y 30 °C, la concentración de la primera fracción de los diferentes fluidos de ensayo ( $f$ ,  $g$ ,  $s$  zumo de melocotón ( $s$ )) fue aproximadamente 2.7 superior a la SMFI. Estos resultados se corresponden con los expuestos por Yee et al (2003), Miyawaki et al (2012) Moreno et al (2013), Gunathilake et al (2014).

Desde el punto de vista de eficiencia el proceso se considera más eficiente con relación al tiempo de deshielo en la medida que aumenta la temperatura, es decir, cuanto mayor es la temperatura (30 °C), menor es el tiempo en recuperar los solutos retenidos en el hielo.

Se puede recuperar entre un 60% y 64% los solutos retenidos en el hielo en aproximadamente un 30% y 37% de tiempo total de deshielo. Esta información es relevante desde el punto de vista industrial, si tenemos en cuenta que uno de los factores limitantes del proceso es el alto porcentaje de solutos retenidos en el hielo. Flesland (1995), Raventos (2007), Sánchez et al (2011), indicaron que el proceso de crioconcentración en capa funciona mejor con soluciones iniciales de baja concentración, debido a la elevada retención de solutos en hielo, con los resultados de eficiencia del presente estudio, se puede establecer que la retención de solutos en el hielo deja de ser una limitante del proceso.

La representación gráfica de las velocidades obtenidas del deshielo muestra tres periodos característicos coincidentes con las definiciones de Isachenko et al (1973) y los resultados obtenidos por Yee et al (2003).

La velocidad de deshielo promedio para sacarosa con  $ff$  de  $167 \text{ m}^{-1}$ , temperatura de proceso de 20 °C y la fracción de masa de soluto en el hielo de 1,3 °Brix es 0,25 mL/min, mientras que resultados de Nakagawa (2010a) para tinte acuoso a 30 °C la velocidad de deshielo es 11 mg/s las diferencias se deben a las condiciones de deshielo y los fluidos de ensayo.

Los principales parámetros del proceso de crioconcentración por película descendente pueden calcularse resolviendo la ecuación presentada por Chen et al (2000) utilizando el procedimiento desarrollado por Auleda et al (2011b). No obstante el procedimiento muestra una limitación en la eficiencia que hace difícil su aplicación práctica.

La recuperación de los solutos del hielo pueden ser calculados por el procedimiento presentado en este trabajo de investigación desarrollado en esta tesis. La incorporación de esta recuperación abre las puertas a la viabilidad del proceso de crioconcentración al recuperar de forma eficiente los solutos retenidos en el hielo, haciendo del conjunto de crioconcentración y recuperación por deshielo un sistema que acota todas las variables del proceso y que puede ser aplicado de forma muy sencilla en el mismo crioconcentrador.



Con ambos procedimientos cualquier técnico que estudie el proceso de concentración puede establecer los principales costes de construcción y de explotación (como por ejemplo lo realizaría para calcular una cámara frigorífica). Estimando y acotando las principales variables del sistema y de éste modo comparar la viabilidad económica con el de otros procesos de concentración de zumos.

Los resultados experimentales muestran la necesidad de considerar la recuperación de solutos mediante el deshielo fraccionado como alternativa importante en la industria de crioconcentración. La técnica debe ser perfeccionada, e integrarse al criterio particular de cada necesidad dentro de la industria.

## 6. CONCLUSIONES

- En un criocentrador de película descendente los valores en cuanto a uniformidad de soluto en el hielo en diferentes puntos de la capa son muy homogéneos.
- La caracterización del hielo obtenido de los diferentes ensayos con fluidos de fructosa, glucosa y sacarosa en el equipo piloto con concentraciones iniciales de 5 °Brix, 10 °Brix, 15 °Brix, y 20 °Brix, establece tres zonas diferenciadas en términos de concentración. El hielo en contacto con el evaporador tiene una concentración de soluto más alta que la SMFI, con una ligera tendencia a la concentración del fluido inicial. El hielo en contacto con el fluido tiene una concentración mayor que la SMFI similar a la concentración del fluido al final del proceso. En la zona interna del hielo, la concentración de soluto es muy aproximada al SMFI. La inclusión de soluto en el hielo está determinada por el gradiente de temperatura al inicio, al final y durante el proceso entre la placa evaporadora y el fluido de ensayo.
- En lo relativo al proceso de criocentración la eficiencia es mayor durante las etapas iniciales, y es menor considerablemente en las etapas de mayor concentración. El coeficiente de distribución experimenta una tendencia creciente. A mayor concentración en el fluido mayor es la retención de soluto en el hielo. El fluido con mayor eficiencia en el proceso es la sacarosa mientras que para la fructosa y glucosa los niveles de eficiencia fueron menores.
- El análisis de la concentración del proceso de deshielo fraccionado, indica que el índice de concentración a temperatura de 20 °C, 25 °C y 30 °C para cada una de las variables seleccionadas en las diferentes etapas del proceso de criocentración: factor de forma, fracción de soluto en el hielo (SMFI), azúcares básicos (*glucosa*, *fructosa* y *sacarosa*) y zumo de melocotón (*s*), establece que son homocedásticas, no hay diferencia significativa entre las varianzas con ( $P < 0.05$ ). La prueba de Tukey con significancia ( $P < 0.05$ ), determina que las muestras pareadas no presentan diferencias significativas. El ANOVA determina que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95,0% de confianza. Por tanto, con los aumentos de temperatura del deshielo no se han detectado variación significativa de los índices de concentración lo que permite reducir los tiempos de proceso sin reducción de los índices de concentración.

El rendimiento de recuperación de solutos para el hielo obtenido del equipo de criocentración mediante el deshielo fraccionado a temperatura de 20 °C, 25 °C y 30 °C es mayor que 50% en un 30% de deshielo.

- Con el deshielo fraccionado a temperatura de 20 °C y 25 °C se consigue aumentar la eficiencia en la concentración del fluido al final de la etapa del proceso entre un 1% y 22%. En el caso de la sacarosa es el fluido donde se logra alcanzar mayor promedio de eficiencia, (22%). El coeficiente de distribución experimenta una tendencia inversa en relación a la eficiencia, con la misma proporción porcentual. La mayor retención de solutos en el fluido se alcanza con la fructosa. La eficiencia de la concentración con el deshielo fraccionado a 30 °C se consigue aumentar un 25% para el caso de la sacarosa. La menor eficiencia se alcanza con la fructosa y el zumo de melocotón un 13% en promedio para ambos fluidos. En promedio para las tres temperaturas de deshielo la eficiencia se aumenta un 14%, notándose el mayor valor alcanzado para la sacarosa. La menor retención se alcanza con la sacarosa.
- El comportamiento de las variables de deshielo (tiempos de deshielo e índice de concentración), manteniendo un intervalo de factor de forma determinado, es similar tanto para las muestras de forma cilíndrica (pequeñas), como las muestras de forma de paralelepípedo (grandes).

- El tiempo de deshielo disminuye con el aumento del factor de forma y la disminución de la concentración (°Brix). De igual forma a mayor temperatura menor tiempo de deshielo. Se puede admitir que un cambio del 10% en el  $ff$  induce un cambio del 10% en el tiempo de deshielo, mientras que un cambio de 10% en la concentración (°Brix) sólo induce un cambio del 2% en el tiempo de deshielo. En otras palabras, el tiempo de deshielo es más sensible a las variaciones del  $ff$  que a las variaciones en la concentración de (°Brix).
- El procedimiento de cálculo presentado relaciona la fracción de deshielo con la concentración y el tiempo, permitiendo operar por semejanza con los hielos de zumos obtenidos en un proceso de crioconcentración. También permite calcular la energía consumida, los residuos generados y consecuentemente los costes asociados del deshielo.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios.

La realización de la presente memoria de tesis doctoral ha sido posible gracias a la paciencia, apoyo y colaboración del grupo de trabajo representado por: Dra. Mercè Raventós Santamaría, Dr. Josep María Auleda y Dr. Eduard Hernández Yáñez.

Dr. Josep María Auleda Amorós, por su amistad, dedicación, talante, y eficaz labor de dirección sin duda ha sido y será un referente.

A mis Padres, mi Madre Rosa Elena Cabrales Martínez sin sus Oraciones no hubiese logrado el objetivo. Mi compañera y amiga Astrid Cecilia Lora Argel, paciencia, perseverancia, comprensión y cariño. Mi hijo Juan David Gulfo Lora, la razón de todo.

Finalmente a todos aquellos que de forma directa e indirecta han podido colaborar en la realización del presente trabajo.

## 8. REFERENCIAS

- Ahmed, J. & Rahman, M. S. (2009). *Thermal conductivity data of foods. Food Properties Handbook*. Boca Raton, FL: 2nd edn (ed. M.S. Rahman). CRC Press. PP 581 - 621.
- Aider, M. Halleux, D. & Akbache, A. (2007). Whey cryoconcentration and impact on its composition. *Journal of Food Engineering*, 82, 92 - 102.
- Aider, M. & Halleux, D. (2008). Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology. *Food Science and Technology*, (41), 1768 - 1775.
- Aider, M. & Halleux, D. (2009). Cryoconcentration technology in the bio-food industry: principles and applications. *Food Science and Technology*, 42, 679 - 685.
- Alvarado, J. D. & Romero, C. H. (1989). Physical properties of fruits. Density and viscosity of juices as function of soluble solids content and temperature. *Latin American Applied Research*, 19, 15-21.
- Arnold, P. M. (1945). *Patente n° 2540977*. US.
- Auleda, J. M. (2008). Procés de càlcul per concentrar fluids amb criocentrador de capa. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Barcelona. Catalunya.
- Auleda, J. M. Raventós, M. & Hernández, E. (2011). Calculation method for designing a multi-plate freeze-concentrator for concentration of fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 107, 27 - 35.
- Auleda, J. M. Raventós, M. Sánchez, J. & Hernández, E. (2011). Estimation of the freezing point of concentrated fruit juices for application in freeze concentration. *Journal of Food Engineering*, 105, 289 - 294.
- Azoubel, P. M. Cipriani, D. C. El-Aouar, A. A. Antonio, G. C. & Murr, F. E. (2004). Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. *Journal of Food Engineering*, 66, 413 - 417.
- Bayindirli, L. (1992). Mathematical analysis of variation of density and viscosity of apple juice with temperature and concentration. *Journal of Food Preservation*, 16, 23 - 28.
- Bayindirli, L. (1993). Density and viscosity of grape juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Preservation*, 17, 147 - 151.
- Belén, F. Sánchez, J. Hernández, E. Auleda, J.M. Raventós, M. (2012). One option for the management of wastewater from tofu production: Freeze concentration in a falling-film system. *Journal of Food Engineering*. 110, 364-373
- Berk, Z. (2009). *Food process engineering and technology. Food science and technology international series*. New York: Academic press (Elsevier). First edition.
- Boaz, H. & Mohammed, F. (2006). Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid-solid fluidized bed heat exchanger. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45, 69.
- Braddock, M. Braddock, R. j. & Marcy, J. E. (1985). Freeze concentration of pineapple juice. *Journal of Food Science*, 50, 1636 - 1639.

- Brennan, J. G. Butters, J. R. Cowell, N. D. & Lilly, A. E. V. (1998). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza: Ed. Acribia.
- Brent, A. A. (2006). Modeling the thawing of frozen foods using air impingement technology. *International Journal of Refrigeration*, 29, 294-304.
- Bruin, S. & Jongen, Th. R. (2003). Food Process Engineering: The Last 25 Years and Challenges Ahead. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2, 42 - 81.
- Burdo, O. G. (2005). Nanoscale effects in food-production technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 78, 90 - 96.
- Celso, O. Bejarano. Wallens. & Jim, V. (1995). *Emerging Freezing Technologies. Food Processing: Recent Developments*. A.G. Gaonkar (Editor) Elsevier Science B.V.
- Cepeda & Villarán, E. C. (1999). Density and viscosity of *Malus floribunda* juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 44, pp. 103-107.
- Chen, P. Chen, X. D. & Free, K. W. (1998). An experimental study on the spatial uniformity of solute inclusion in ice formed from falling film flows on a sub-cooled surface. *Journal of Food Engineering*, 39, 101-105.
- Chen, X. D. & Chen, P. (1996). Freezing of aqueous solution in a simple apparatus designed for measuring freezing point. *Food Research International*, 29, 723-729.
- Chen, P. Chen, X. D. & Free, K. W. (1998). Solute inclusion in ice formed from sucrose solutions on a sub-cooled surface. An experimental study. *Journal of Food Engineering*, 38, 1-13.
- Chen, P. & Chen, X. D. (2000). A generalized correlation of solute inclusion in ice formed from aqueous solutions and food liquids on sub-cooled surface. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78, 312-319.
- Chen, Y. H. Cao, E. & Cui, Z. F. (2001). An experimental study of freeze concentration in biological media. *Trans IChemE*, 79 35-40.
- Cheryan, M. (1999). *Encyclopedia of food science and technology. Second Edition*. New York: Frederick J. Francis, Wiley.
- Choi, Y. & Okos, M. R. (1986). Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications, Transport Phenomena*, vol. 1, 93-101.
- Clary, A. Gamache, M. Cliff, J. Fellman, C. & Edward. (2006). Flavor and aroma attributes of Riesling wines produced by freeze concentration and microwave vacuum dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30, 393-40.
- Constenla, J. L. Lozano, J. E. & Crapiste, G. H. (1989). Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Science*, 54, 663-668.
- Cook, K. L. & Hartel, R. W. (2010). Mechanisms of Ice Crystallization in Ice Cream Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 213-222.
- Deshpande, S. S. Bolin, H. R. & Salunkhe, D. K. (1982). Freeze concentration of fruit juices. *Food Technology*, 36, 68.

- Deshpande, S. S. Cheryan, M. Sathe, S. K. & Salunkhe, D. K. (1984). Freeze concentration of fruit juices. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 173-248.
- Dickey, J. C. Craig, E. R. Radewonuk, A. J. Mcaloon, V. H. & Holsinger. (1995). Low-temperature concentration of skim milk by direct freezing and vacuum evaporation. *Journal of Dairy Science*, 78, 1369-1376.
- Echavarría, A. P. Torras, J. Pagán & Ibarz, A. (2011). Fruit Juice Processing and Membrane Technology Application. *Food Engineering Reviews*, 3, 136-158.
- Englezos, P. (1994). The freeze concentration process and its applications. *Developments in Chemical Engineering and Mining Process*, 1, 3-15.
- Fellows, P. (1993). *Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y prácticas*. Zaragoza: Ed. Acribia.
- Flesland, O. (1995). Freeze concentration by layer crystallization. *Drying Technol*, 13, 1713-1739.
- Giner, J. Ibarz, A. Garza, S. & Xhian-Quan, S. (1996). Rheology of clarified cherry juices. *Journal of Food Engineering*, 30, 147-154.
- Guardani, R. Neiro, S. Bulau, H. & Ulrich, J. (2001). Experimental comparison and simulation of static and dynamic solid layer melt crystallization. *Chemical Engineering Science*, 56, 2371-2379.
- Gunathilake, M. Dozen, M. Shimmura, K. Miyawaki, O. (2014). An apparatus for partial ice-melting to improve yield in progressive freeze-concentration. *Journal of Food Engineering*. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.05.023.
- Gulfo, R. Auleda, J.M. Moreno, L. Ruiz, Y. Hernandez, E. & Raventós, M. Multi-plate freeze concentration. recovery of solutes occluded in the ice and determination of thawing time. *Food Science and Technology International*. DOI: 10.1177/1082013213489127 (online 19 June 2013).
- Habib, B. & Mohammed, F. (2006). Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid-solid fluidized bed heat exchanger. *Chemical Engineering and Processing*, 45, 698-710.
- Hagiwara, T. Mao, J. Susuki, T. & Takai, R. (2005). Ice Recrystallization in Sucrose Solutions Stored in a Temperature Range of -21 °C to -50 °C. *Food Sci. Technol. Res.* 11, 407-411.
- Hartel, R. W. & Chung, M. S. (1993). Contact nucleation of ice in fluid dairy products. *Journal of Food Engineering*, 18, 281-296.
- Heldman, D. R. & Hartel, R. W. (1998). Principles of Food Processing. *A Chapman and Hall Food Science Book*, 167-176.
- Heldman, D. R. & Lund, D. B. (1992). *Handbook of Food Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Hernández E. Chen, C.S. Johnson, J. & Carter, R.D. (1995). Viscosity changes in orange juice after ultrafiltration and evaporation. *Journal of Food Engineering*, 25, 387-396.
- Hernández, E. Y. (2008). *Crioconcentració de fluids alimentaris en un refredador de pel·lícula*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Barcelona. Catalunya.

- Hernández, E. Raventós, M. Auleda, J.M. & Ibarz, A. (2009). Concentration of apple and pear juices in a multi-plate freeze concentrator. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 348-355.
- Huige, N. T. (1972). *PhD dissertation. Nucleation and growth of ice crystals from water and sugar solutions in continuous stirred tank crystallizers*. TU Eindhoven.
- Huige, N. T. & Thijssen, H.A. (1972). Production of large crystals by continuous ripening in a stirred tank. *Journal of Crystal Growth*, 13, 483-487.
- Ibarz A. Vicente, & M. Graell, J. (1987). Rheological behaviour of apple juice and pear juice and their concentrates. *Journal of Food Engineering*, 6, 257-267.
- Ibarz, A. & Barbosa, C. G. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniera de alimentos*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Ibarz, A. & Miguelsanz, R. (1989). Variation with temperature and soluble solids concentration of the density of a depectinised and clarified pear juice. *Journal of Food Engineering*, 10, 319-323.
- Isachenko, V. Osipova, V. & Sukomel, A. (1973). Transmisión del calor. Marcombo. Boixareu Editores, Barcelona. pp.134-144
- James, Stocking H. & Judson King C. (1976). Secondary nucleation of ice in sugar solutions and fruit juices. *AIChE J*, 22, 131-140.
- James, C. Lejay, I. Tortosa, N. Aizpurua, X. & James, S. J. (2005). The effect of salt concentration on the freezing point of meat simulants. *International Journal of Refrigeration*, 28, 933-939.
- Juszczak, L. & Fortuna, T.(18 17–21.). Effect of temperature and soluble solid content on the viscosity of cherry juice concentrate. *International Agrophysics*, 2004.
- Khalil, K.E. Ramakrishna, P. Nanjundaswamy, A. M. & Patwardhan, M. V. (1989). Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. *Journal of Food Engineering*, 10, 231-240.
- Konstantinos, B. P. & Harris, N. L. (2001). Osmotic Dehydration Osmotic concentration of liquid foods. *Journal of Food Engineering*, 49, 2-3.
- Kwang-Joo, K. & Ulrich, J. (2001). Theoretical and experimental studies on the behaviour of liquid impurity in solid layer melt crystallizations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, 1308-1317.
- Kwang-Joo, K. & Ulrich, J. (2002). An estimation of purity and yield in purification of crystalline layers by sweating operations. *Separation Science and Technology*, 37 2717-2737.
- Lau, K. A. (1999). *Evaporation. Encyclopedia of food science and technology*. New York: Frederick J. Francis, Wiley.
- Laari A. Louhi M. Shirai Y. Matsuno R. & Palosaari S. (1990). Kinetics of freezeconcentration in sugar solutions. 11th. Symposium on Industrial Crystallization. Garmisch Partenkirchen 18: 34-41.
- Liu, L. Miyawaki, O. & Nakamura, K. (1997). Progressive freeze concentration of model liquid food. *Food Sci Technol Int Tokyo*, 3, 348-352.



- Liu, L. Miyawaki, O. & Hayakawa, K. (1999). Progressive Freeze-concentration of Tomato Juice. *Food Science and Technology Research*, 5, 108-112.
- Lewicki P.P. (2000). Raoult's law based food water sorption isotherm. *Journal of Food Engineering*, 43(1): 31-40.
- Macanás de Benito, J. (2006). *Memoria de tesis. Desarrollo de Nuevas Membranas Compuestas para la Separación de Iones Metálicos y Aplicaciones Electroquímicas*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Magerramov, M. A. Abdulagatov, A. I. & Azizov, N. I. (2006). Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, 80, 476-489.
- Mahmutoglu, T. & Esin, A. (1996). Distribution coefficients at the interface for carrot juice at slow freezing rates. *Journal Of Food Engineering*, 27, 291-295.
- Malcolm, C. & Bourne. (2002). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. *Food Science and Technology International Series*, ISBN 0-12-119062-5.
- Marshall, R. T. Goff, H. D. & Hartel, R. W. (2003). Ice Cream. *Klumer Academic/Plenum Publishers*, 371.
- Miyawaki, O. Liu, L. & Nakamura, K. (1998). Effective partition constant of solute between ice and liquid phases in progressive freeze-concentration. *Journal of Food Science*, 63, 756-758.
- Miyawaki, O. (2001a). Review. Analysis and Control of Ice Crystal Structure in Frozen Food and Their Application to Food Processing. *Food Sci. Technol. Res*, 7, 1-7.
- Miyawaki, O. (2001b). Progressive freeze-concentration: a new method for high-quality concentration of liquid food. *Food Engineering Progress*, 5, 190-194.
- Miyawaki, O. Liu, L. Shirai, Y. & Sakashita, S. (2005). Tubular ice system for scale-up of progressive freeze concentration. *Journal of Food Engineering*, 69, 107-113.
- Miyawaki, O. Kato, S. & Watabe, K. (2011). Yield improvement in progressive freeze-concentration by partial melting of ice. *Journal of Food Engineering*, 108, 377-382.
- Miyawaki, O. Kato S. Watabe K (2012). Yield improvement in progressive freeze-concentration by partial melting of ice. *Journal of Food Engineering*. 108, Pages 377-382
- Moreno, F. L. Robles, C. M. Sarmiento, Z. Ruiz, Y. & Pardo, J. (2013). Effect of separation and thawing mode on block freeze-concentration of coffee brews. *Food and Bioproducts*, 91,396-402.
- Müller, M. & Sekoulov, I. (1992). Wastewater reuse by freeze concentration with a falling film reactor. *Wat. Sci. Tech*, 26, 1475-1482.
- Nagashima, K. & Furukawa, Y. (2009). Time development of a solute diffusion field and morphological instability on a planar interface in the directional growth of ice crystals. *Journal of Crystal Growth*, 209, 167-174.
- Nakagawa, K. Maebashi, S. & Maeda, K. (2010a). Freeze-thawing as a path to concentrate aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 73, 403-408.

- Nakagawa, K. & Nagahama, S. (2010b). Usefulness of solute elution from frozen matrix for freeze-concentration technique. *Ingeniería Química Investigación y Diseño*, 88, 718-724.
- Navarrete, M. Grau, A. Boix, A. & Maupoey, P. (1998). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Valencia: Editorial U.P.V.
- Otero, L. Sanz, P. Guignon, B. & Sanz, P. D. (2012). Pressure-shift nucleation: A potential tool for freeze concentration of fluid foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 86-99.
- Pardo, J. M. Suess, F. & Niranjana, K. (2002). An investigation into the relationship between freezing rate and mean ice crystal size for coffee extracts. *Trans IchemE*, 80, 176-182.
- Peters-Erjawetz, S. Ulrich, J. Tiedtke, M. & Hartel. (1999). Milk fat fractionation by solid-layer melt crystallization. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 76, 579-584.
- Petzold, G. & Aguilera, J. M. (2009). Ice Morphology: Fundamentals and Technological Applications in Foods. *Food Biophysics*, 4, 378-396 .
- Petzold, K. & Niranjana, J. M. (2013). Vacuum-assisted freeze concentration of sucrose solutions. *Journal of Food Engineering*, 115, 357-361.
- Pronk, P. Infante Ferreira, C. A. & Witkamp, G. J. (2005). A dynamic model of Ostwald ripening in ice suspensions. *Journal of Crystal Growth*, 275, 1355-1361.
- Rahman, M. S. (2009). Food Stability beyond water activity and glass transition: Macro-micro region concept in the state diagram. *International Journal of Food Properties*, 12, 726-740.
- Ramos, A. M. & Ibarz, A. (1998). Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. *Journal of Food Engineering*, 35, 57-63.
- Ramteke, N. I. Singh, M. N. Rekha, & Eipeson, W. E. (1993). Methods for concentration of fruit juices – a critical-evaluation. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 30, 391-402.
- Rane, M. V. & Jabade, S. K. (2005). Freeze concentration of sugarcane juice in a jiggery making process. *Applied Thermal Engineering*, 25: 2122-2137.
- Rane, M. V. & Padiya, Y. S. (2011). Heat pump operated freeze concentration system with tubular heat exchanger for seawater desalination. *Energy Sustain. Dev*, 15, 184-191.
- Rao, M. A. Cooley, M. J. & Vitali, A. A. (1984). Flow properties of concentrated juices at low temperatures. *Food Technology*, 38, 113-119.
- Raventós, M. Hernández, E. Auleda, J. M. & Ibarz.(2007). Concentration of aqueous sugar solutions in a multi-plate cryoconcentrator. *Journal of Food Engineering*, 79, 577-585.
- Rohit, R. & Bijan, C. (2002). *Membrane Separation and Design. Handbook of Food Process Design*. Edited by Jasim Ahmed, PhD Mohammad Shafi ur Rahman, PhD. Wiley-Blackwell.
- Romero Gonzalez, J. F. (2010). *Control Avanzado en Procesos Industriales de Microfiltración y Ultrafiltración tangencial. Master de Automatica e Informatica Industrial*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

- Ruiz, Y. Sánchez, J. Hernández, E. Auleda, J. M. & Raventós, M. (2010). Viscosidad de zumos comerciales de melocotón, manzana y pera a temperaturas cercanas a la congelación. *Afinidad LXVI*, 546.
- Rulkens, W. H. & Thijssen, H. A. (1972). The retention of organic volatiles in spray-drying aqueous carbohydrate solutions. *International Journal of Food Science and Technology*, 7, 95-105.
- Rutter, J. W. & Chalmers, B. (1953). A prismatic structure formed during solidification metals. *Can J. Phys*, 31, 15-39.
- Sánchez, J. Ruiz, Y. Hernández, E. Auleda, J. M. & Raventos, M. (2009). Review. Freeze Concentrations in the Fruit Juices Industry. *Food Science and Technology International*, 15, 303-315.
- Sánchez, J. Ruiz, Y. Hernández, E. Auleda, J. M. & Raventos, M. (2010). Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 644-651.
- Sánchez, J. Hernández, E. Auleda, J. M. & Raventos, M. (2011a). Review: Freeze Concentration Technology Applied to Dairy Products. *Food Science and Technology International*, 17, 5.
- Sánchez, J. (2011b). *Concentración de Líquidos Alimentarios por Congelación: Sistemas y Perspectivas. Tesis doctoral*. Barcelona: Escola Superior d'Agricultura de Barcelona (ESAB).
- Saravacos, G. D. (1970). Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. *Journal of Food Science*, 35, 122-125.
- Saravacos George D. Kostaropoulos Athanasios E. (2002). Handbook of Food Processing Equipment *Refrigeration and Freezing Equipment*. Springer. Pages 384-451.
- Scholz, R. (1993). *Die Schichtkristallisation als thermisches Trennverfahren. Ph.D. Thesis*. Düsseldorf: Fortschritt-Berichte. VDI Reihe 3 Nr. 347, VDI-Verlag.
- Schwartzberg, H. G. (1990). *Freeze concentration. Encyclopedia of food science and technology. Second Edition*. New York: Frederick J. Francis, Wiley.
- Schwartzberg, H. G. (1976). Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *Journal of Food Science*, 41, 152-156.
- Shamsudin, R. Mohamed, I. O. & Yaman, N. K. (2005). Thermophysical properties of Thai seedless guava juice as affected by temperature and concentration. *Journal of Food Engineering*, 66, 395-399.
- Shigeru, Kobayashi, & Lee, G. F. (1964). Freeze-Concentration of Dilute Aqueous Solutions. *Analytical Chemistry*, 36, 2197-2198.
- Shirai, Y. Nakanishi, K. Matsuno, R. & Kamikubo. (1985). Effects of polymers on secondary nucleation of ice crystals. *Journal Food Sci*, 50, 401-406.
- Singh, R. P. & Heldman, D. R. (2006). *Introduction to Food Engineering*. Edition Elsevier pagina 543-566.
- Sogi, D. S. (2003). Effect of concentration and temperature on the viscosity of watermelon juice. *Journal of Food Science and Technology*, 40, 509-511.

- Sun, D.W. (2011). *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*. Boca Raton, Florida: CRC Press / Taylor & Francis.
- Telis-Romero, J. Telis, V. R. Gabas, A. L. & Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*, 38, 27-40.
- Tero Tähti. (2004). *Suspension Melt Crystallization in Tubular and Scraped Surface Heat Exchangers*. Ph D. Thesis. Halle: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Tiller, W. A. (1963). *Principles of Solidification in the Art and Science of Growing Crystals*. New York: Gilman, J. J. John Wiley.
- Tsen, J. H. & King, V. A.-E. (2002). Density of banana puree as a function of soluble solids concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 55, 305–308.
- Ulrich, J. Bierwirth, J. & Henning, S. (1996). Solid Layer Melt Crystallization. *Sep. Purif. Methods*, 25, 1–45.
- Ulrich, J. & Neumann, M. (1997). Purification by Solid Layer Melt Crystallization. *Journal of Thermal Analysis*, 48, 527-533.
- Ulrich, J. & Jones, M. J. (2009). *Heat and Mass Transfer Operations – Crystallization, Chemical engineering and chemical process technology. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Germany : TVT, Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg.
- Umer, S. Jamil, A. Waheed uz-Zaman, Rabia, R. Muhamma, & Amara Dar. (2012). Forced migration of soluble and suspended materials in water by freezing front in aqueous system. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6, 221-226.
- Van Mil, P. J. & Bouman, S. (1990). Freeze concentration of dairy products. *Neth. Milk Dairy J*, 44, 21-31.
- Van Weelden. (1994). *Freeze concentration: the alternative for single strength juices, Fruit Processing*. The Netherlands: Niro Process Technology, The Netherlands.
- Verdoes, D. Arkenbout, G. J. Bruinsma, O. S. Koutsoukos, P. G. & Ulrich, J. (1997). Improved procedures for separating crystals from the melt. *Applied Thermal Engineering*, 17: 879888.
- Vitali, A. A. & Rao, M. A. (1984). Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect on temperature and concentration. *Journal of Food Science*, 49. 882–888.
- Yee, P. L. Wakisaka, M. Shirai, Y. & Hassan, M. (2004). Effect of sodium chloride on freeze concentration of food components by freezing and thawing technique. *Japan J Food Eng*, 5, 97–102.
- Yee, P. L. Wakisaka, M. Shirai, Y. & Hassan, M. A. (2003). Effects of Single food components on freeze concentration by freezing and thawing technique. *Japan Journal of Food Engineering*, 4, 77-82.
- Yunus, A. Ç. (2007). *Heat and mass transfer. A practical approach*. México: McGraw-Hill .
- Zhang, Z. L. & Hartel, R. W. (1996). A multilayer freezer for freeze concentration of liquid milk. *Journal of Food Engineering*, 29, 23-38.

Zeki, B. (2009). Evaporation. *Food Process Engineering and Technology A volume in Food Science and Technology*, 429-458.

Zhonglai Zhang, & Hartel, W. R. (1995). A Multilayer Freezer for Freeze Concentration of Liquid Milk. *Journal of Food Engineering*, 29, 23-38.

Zulma, S. V. Catalina, R. Q. & Mauricio, P. (s.f.). *Evaluaton of Conditons Influence on Complete Block Cryoconcentration of Mango Pulp*. Chía, Colombia: Universidad de La Sabana .

### **Webgrafía**

Freeze Concentration. *Break barriers in liquid processing*. [En línea]: [Fecha de consulta 20-05-2014]. Disponible en: [www.gea-messo-pt.com](http://www.gea-messo-pt.com).

[http://www.gea-messo-pt.com/geacrystal/cmsresources.nsf/filenames/freezeconcentration-sm022010.pdf/\\$file/freezeconcentration-sm022010.pdf](http://www.gea-messo-pt.com/geacrystal/cmsresources.nsf/filenames/freezeconcentration-sm022010.pdf/$file/freezeconcentration-sm022010.pdf).

## **9. ANEXOS**

**ANEXO A. GRAFICOS DE PROBABILIDAD**

**ANEXO B. CORRECCIÓN DEL TIEMPO DE DESHIELO**

**ANEXO C. RESULTADOS ESTADISTICOS (ANOVA, BARTLETT, TUKEY)**

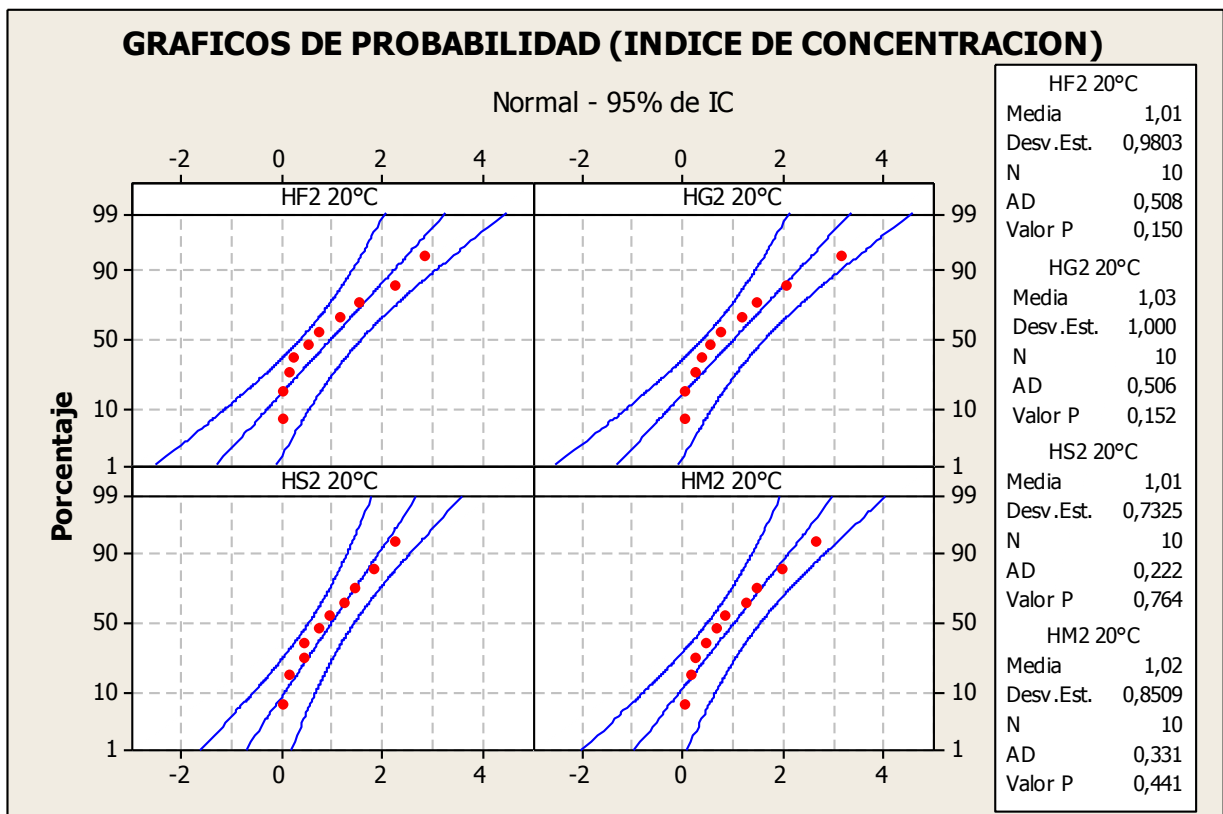
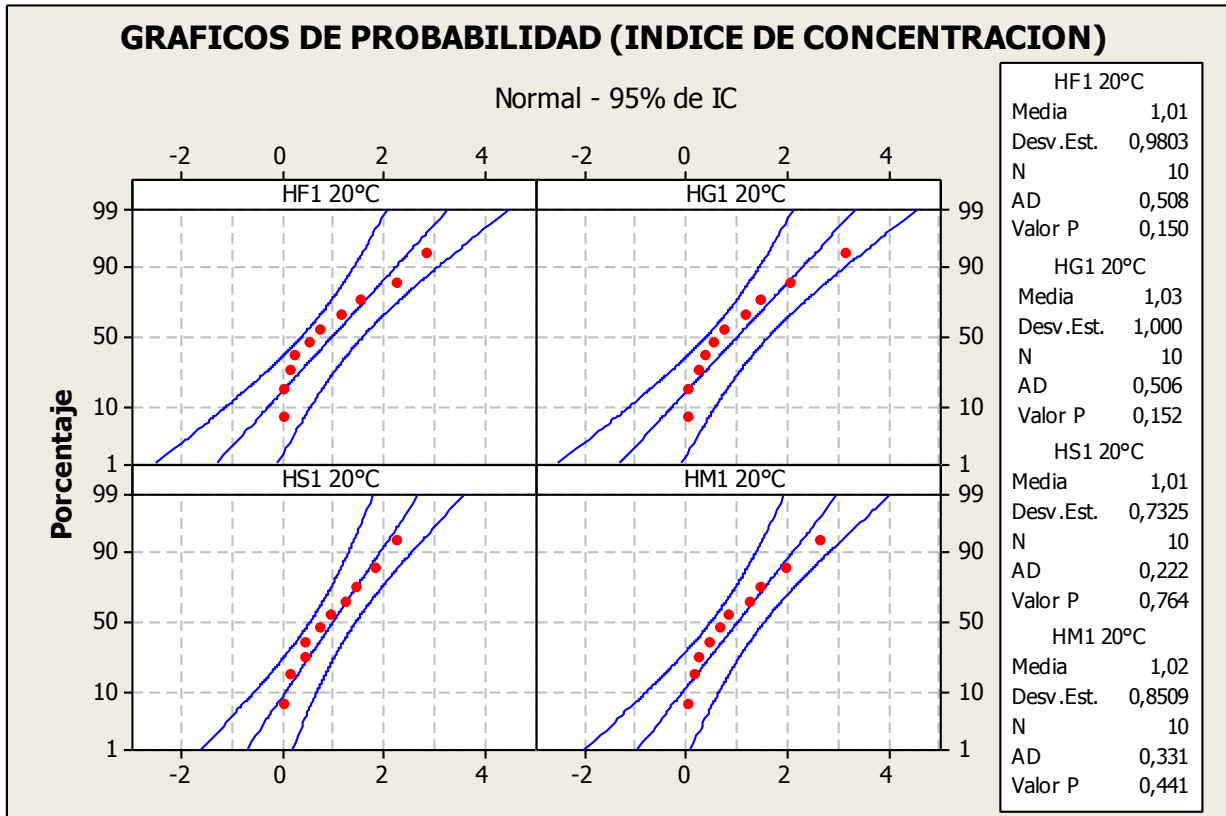
**ANEXO D. ROOT MEAN SQUARE (R.M.S)**

**ANEXO E. ARTICULOS PUBLICADOS**

# ANEXO A. GRAFICOS DE PROBABILIDAD

## NOMENCLATURA

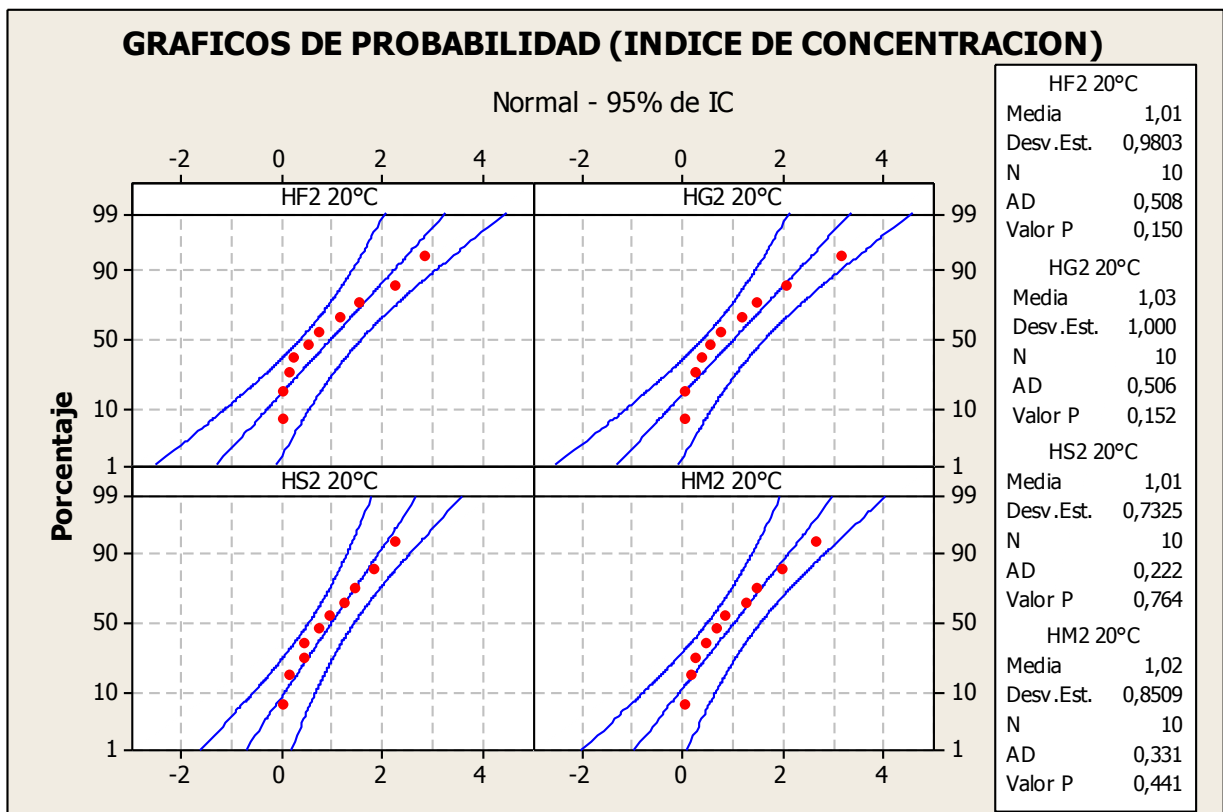
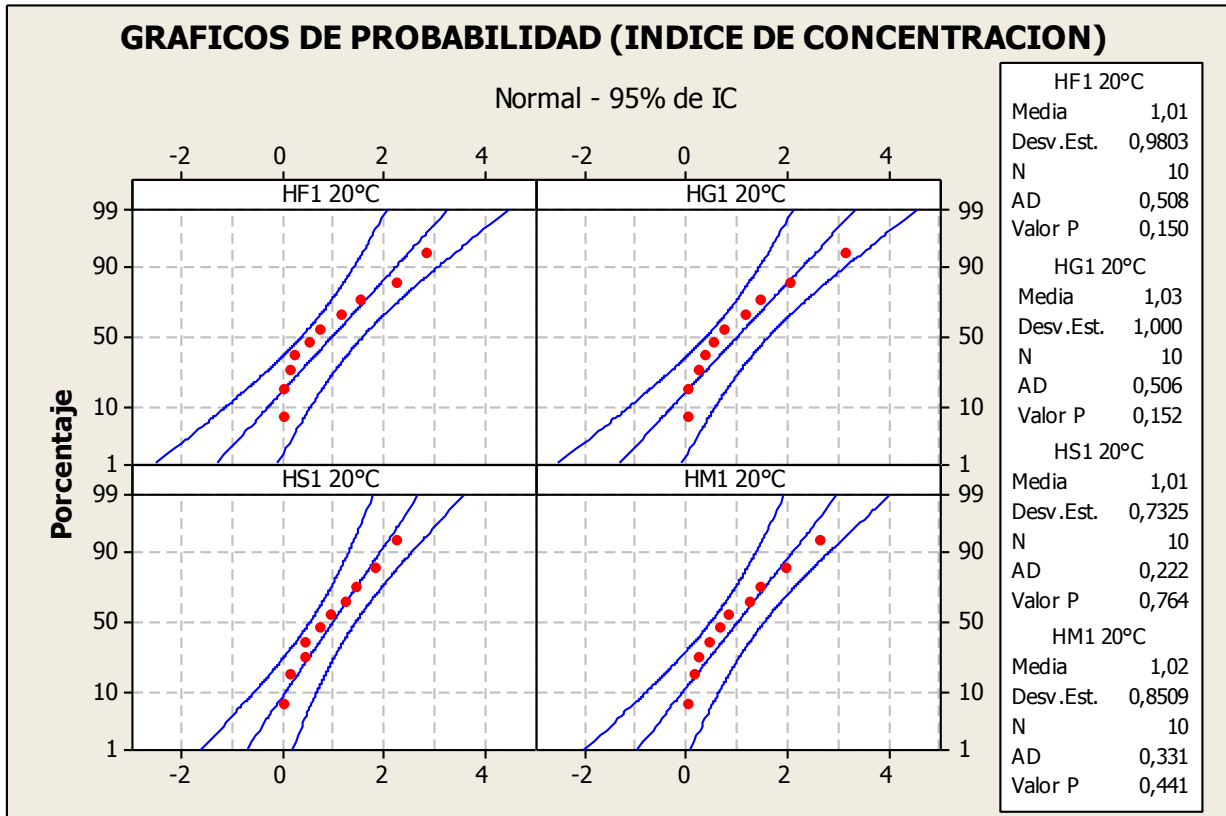
HF1: H = Hielo, F = Azucar (fructosa F, glucosa G, sacarosa S), 1 = Etapas del proceso (1,2,3,4)



# ANEXO A. GRAFICOS DE PROBABILIDAD

## NOMENCLATURA

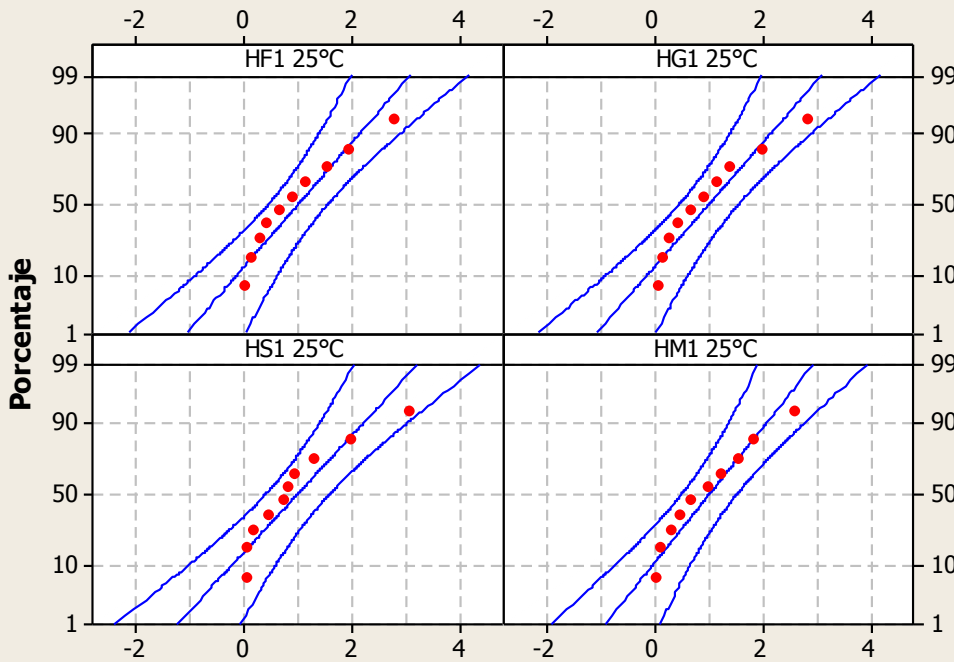
HF1: H = Hielo, F = Azucar (fructosa F, glucosa G, sacarosa S), 1 = Etapas del proceso (1,2,3,4)





## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

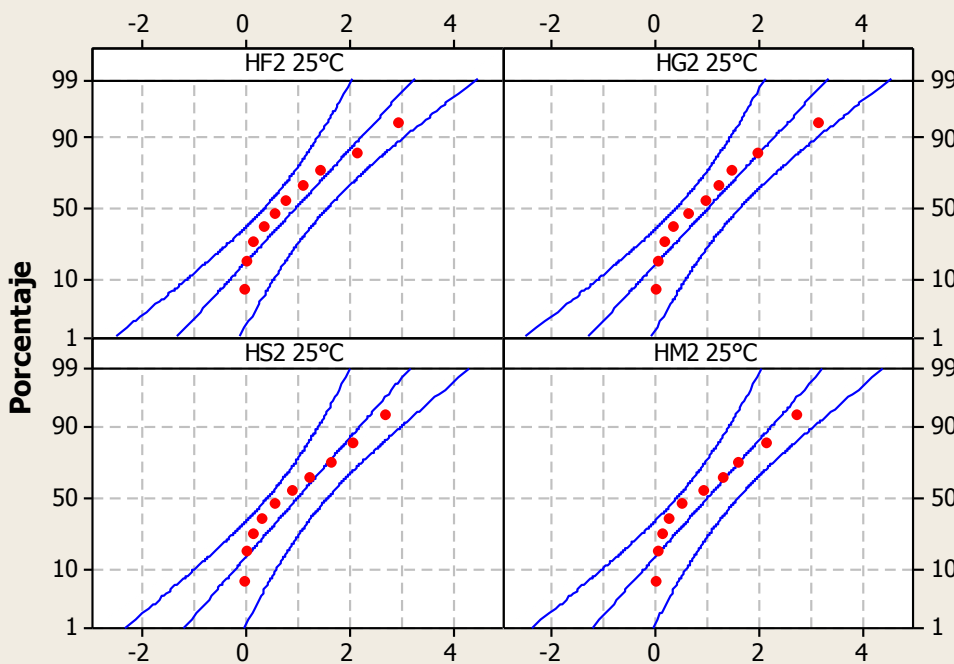
Normal - 95% de IC



HF1 25°C	
Media	1,023
Desv. Est.	0,8891
N	10
AD	0,342
Valor P	0,413
HG1 25°C	
Media	1,011
Desv. Est.	0,8931
N	10
AD	0,375
Valor P	0,341
HS1 25°C	
Media	0,9960
Desv. Est.	0,9540
N	10
AD	0,512
Valor P	0,146
HM1 25°C	
Media	1,005
Desv. Est.	0,8272
N	10
AD	0,251
Valor P	0,660

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

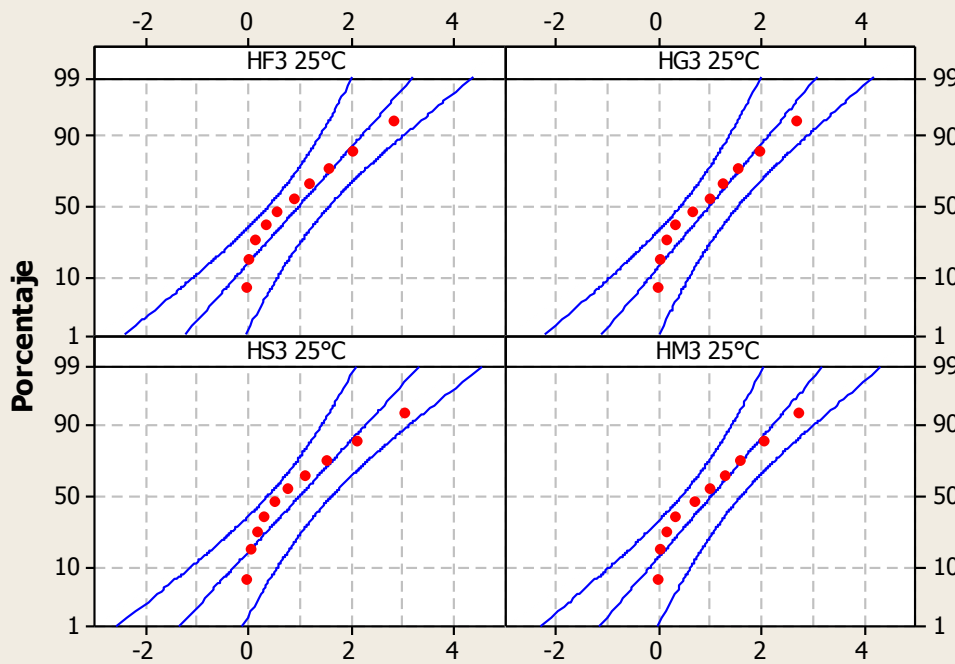
Normal - 95% de IC



HF2 25°C	
Media	1,003
Desv. Est.	0,9835
N	10
AD	0,430
Valor P	0,244
HG2 25°C	
Media	1,020
Desv. Est.	0,9947
N	10
AD	0,388
Valor P	0,315
HS2 25°C	
Media	1,017
Desv. Est.	0,9382
N	10
AD	0,350
Valor P	0,394
HM2 25°C	
Media	0,9925
Desv. Est.	0,9588
N	10
AD	0,410
Valor P	0,277

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

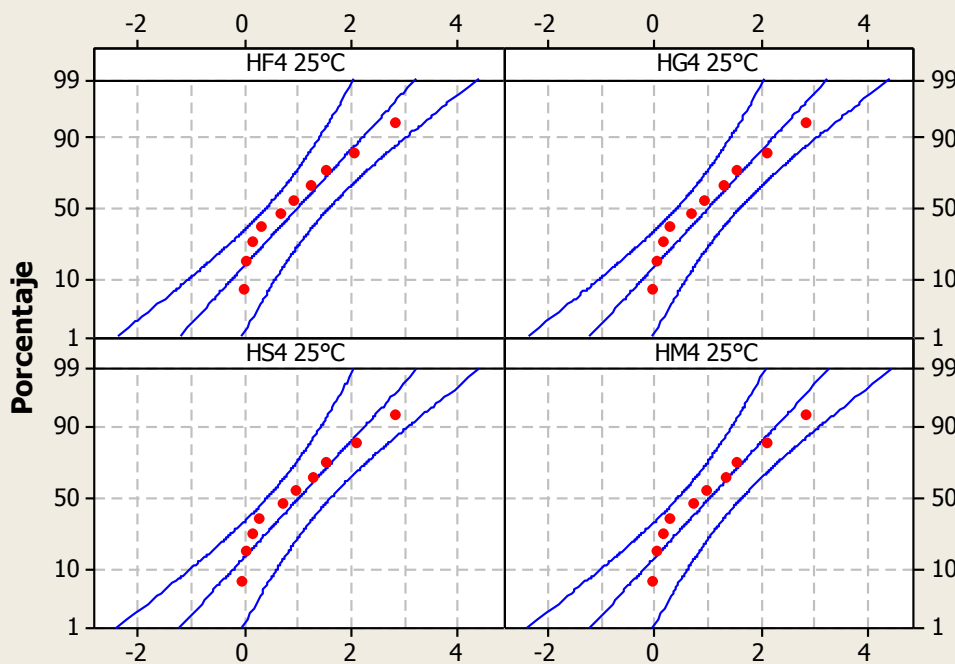
Normal - 95% de IC



HF3 25°C	
Media	1,014
Desv. Est.	0,9572
N	10
AD	0,363
Valor P	0,366
HG3 25°C	
Media	0,9966
Desv. Est.	0,9008
N	10
AD	0,302
Valor P	0,512
HS3 25°C	
Media	1,013
Desv. Est.	1,002
N	10
AD	0,466
Valor P	0,196
HM3 25°C	
Media	1,021
Desv. Est.	0,9352
N	10
AD	0,297
Valor P	0,521

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

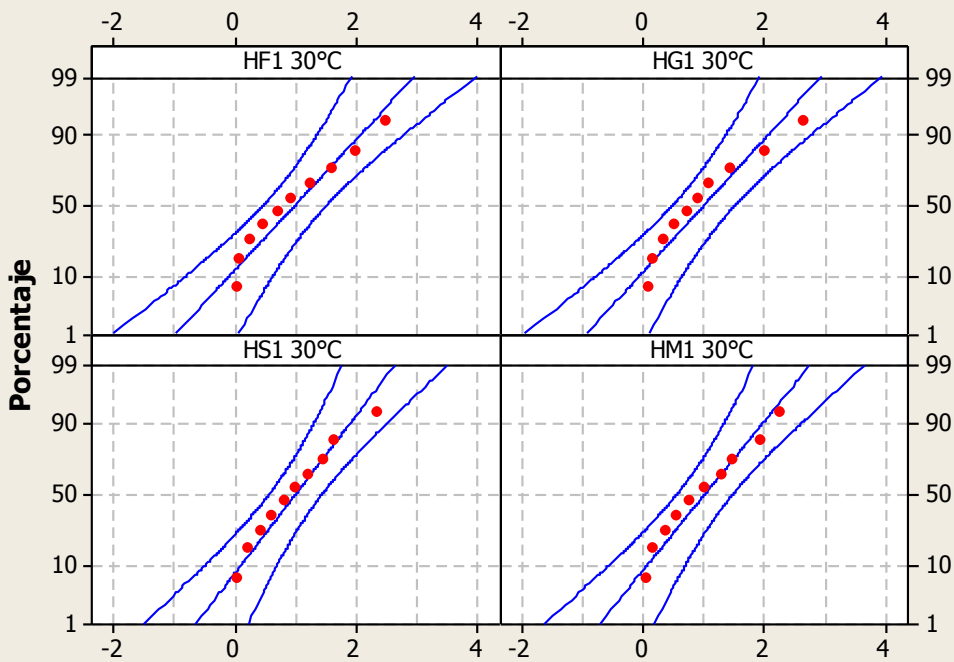
Normal - 95% de IC



HF4 25°C	
Media	1,021
Desv. Est.	0,9549
N	10
AD	0,329
Valor P	0,445
HG4 25°C	
Media	1,025
Desv. Est.	0,9583
N	10
AD	0,326
Valor P	0,454
HS4 25°C	
Media	1,028
Desv. Est.	0,9618
N	10
AD	0,324
Valor P	0,459
HM4 25°C	
Media	1,032
Desv. Est.	0,9654
N	10
AD	0,323
Valor P	0,461

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

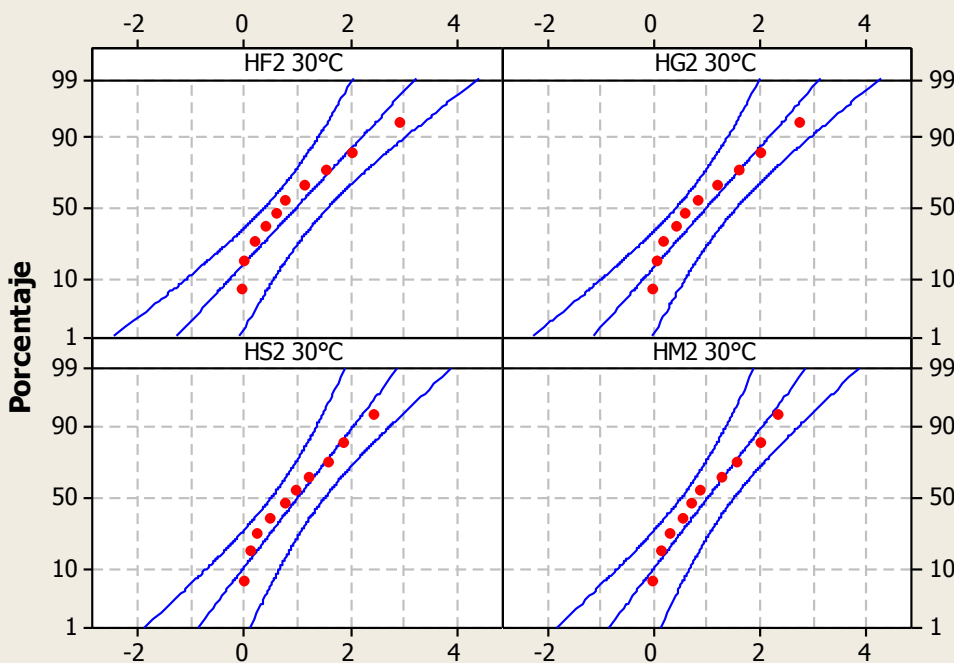
Normal - 95% de IC



HF1 30°C	
Media	1,016
Desv. Est.	0,8453
N	10
AD	0,264
Valor P	0,612
HG1 30°C	
Media	1,012
Desv. Est.	0,8320
N	10
AD	0,331
Valor P	0,441
HS1 30°C	
Media	1,011
Desv. Est.	0,7065
N	10
AD	0,155
Valor P	0,933
HM1 30°C	
Media	1,011
Desv. Est.	0,7467
N	10
AD	0,194
Valor P	0,853

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

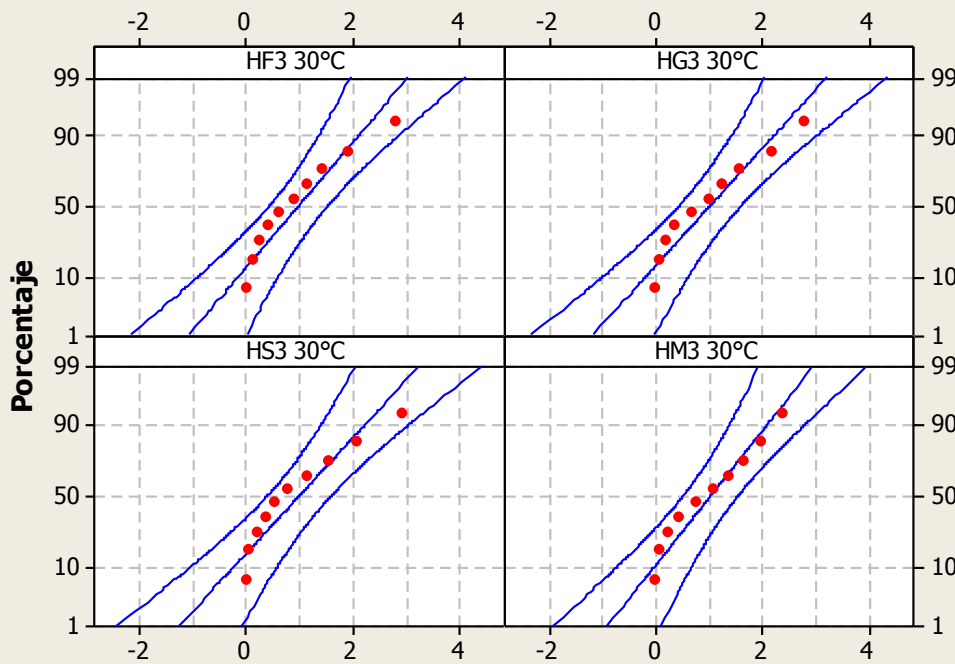
Normal - 95% de IC



HF2 30°C	
Media	1,012
Desv. Est.	0,9666
N	10
AD	0,370
Valor P	0,351
HG2 30°C	
Media	1,004
Desv. Est.	0,9194
N	10
AD	0,334
Valor P	0,432
HS2 30°C	
Media	1,030
Desv. Est.	0,8115
N	10
AD	0,216
Valor P	0,787
HM2 30°C	
Media	1,015
Desv. Est.	0,8016
N	10
AD	0,240
Valor P	0,699

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

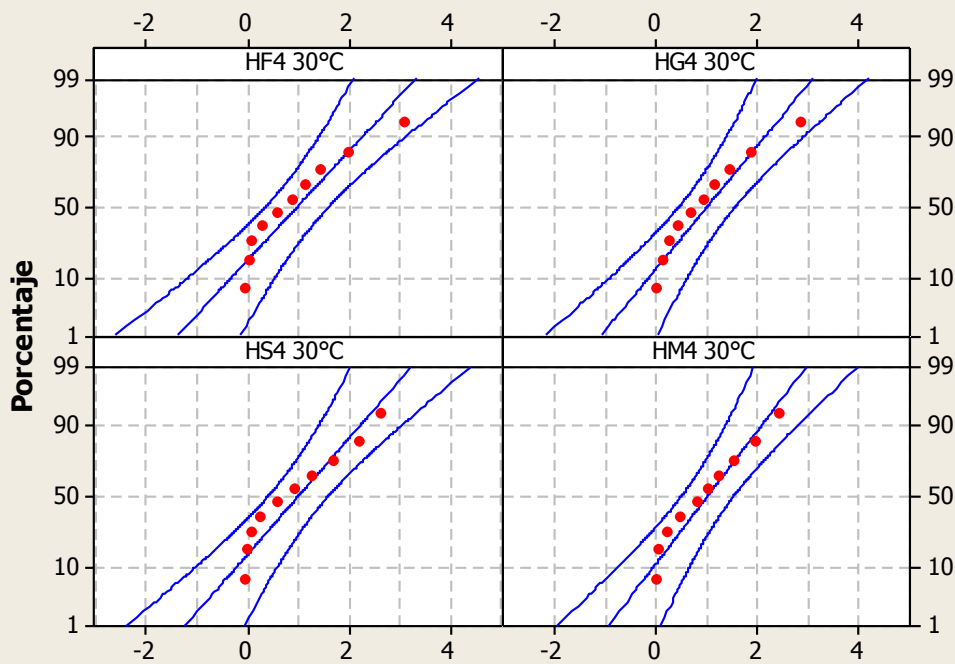
Normal - 95% de IC



HF3 30°C	
Media	1,004
Desv.Est.	0,8842
N	10
AD	0,349
Valor P	0,397
HG3 30°C	
Media	1,018
Desv.Est.	0,9418
N	10
AD	0,333
Valor P	0,435
HS3 30°C	
Media	1,001
Desv.Est.	0,9636
N	10
AD	0,429
Valor P	0,246
HM3 30°C	
Media	1,016
Desv.Est.	0,8292
N	10
AD	0,242
Valor P	0,694

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (INDICE DE CONCENTRACION)

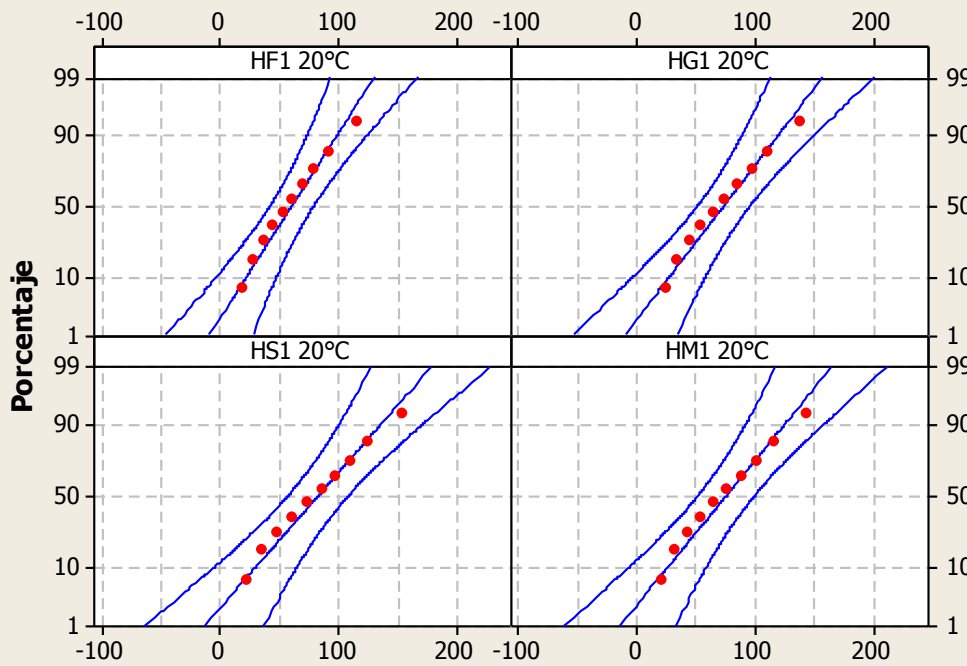
Normal - 95% de IC



HF4 30°C	
Media	1,003
Desv.Est.	1,010
N	10
AD	0,417
Valor P	0,264
HG4 30°C	
Media	1,018
Desv.Est.	0,8967
N	10
AD	0,341
Valor P	0,416
HS4 30°C	
Media	1,012
Desv.Est.	0,9579
N	10
AD	0,375
Valor P	0,340
HM4 30°C	
Media	1,015
Desv.Est.	0,8367
N	10
AD	0,222
Valor P	0,764

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

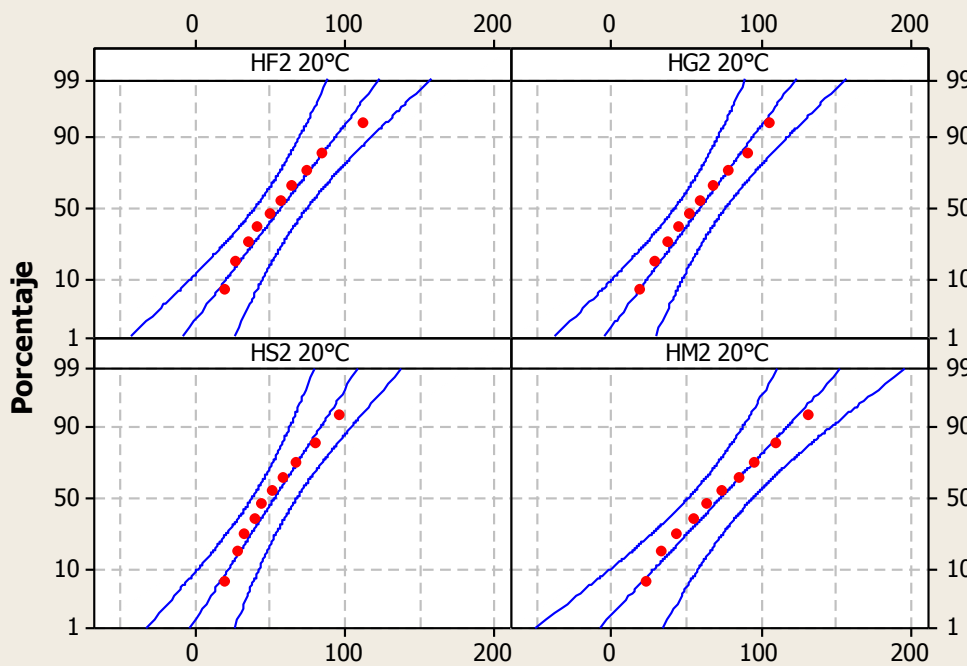
Normal - 95% de IC



HF1 20°C	
Media	60,90
Desv.Est.	29,80
N	10
AD	0,132
Valor P	0,969
HG1 20°C	
Media	73,35
Desv.Est.	36,11
N	10
AD	0,132
Valor P	0,969
HS1 20°C	
Media	82,25
Desv.Est.	41,12
N	10
AD	0,113
Valor P	0,987
HM1 20°C	
Media	74,66
Desv.Est.	38,78
N	10
AD	0,132
Valor P	0,969

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

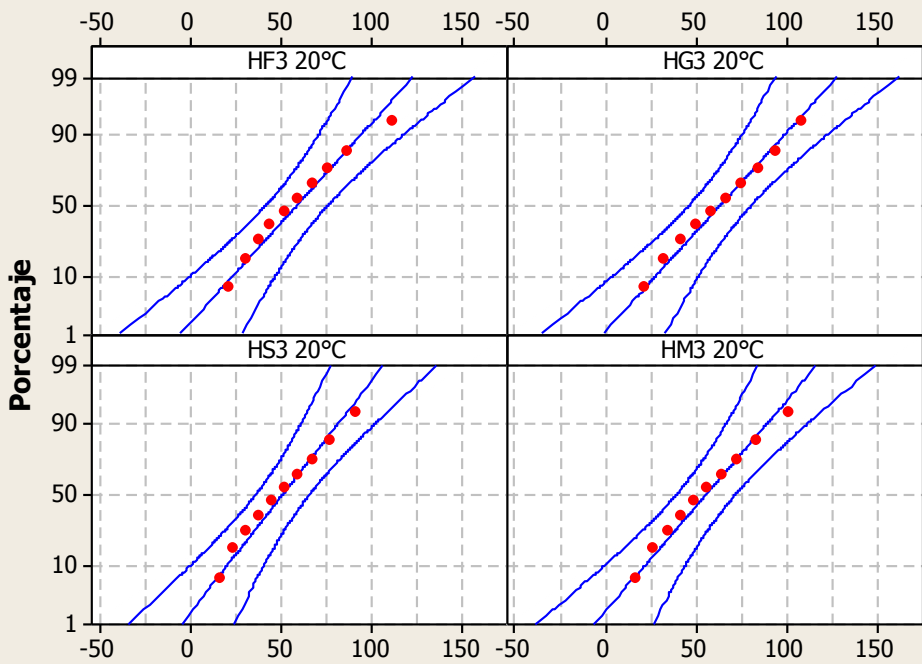
Normal - 95% de IC



HF2 20°C	
Media	57,64
Desv.Est.	28,18
N	10
AD	0,163
Valor P	0,918
HG2 20°C	
Media	58,86
Desv.Est.	27,61
N	10
AD	0,121
Valor P	0,981
HS2 20°C	
Media	52,87
Desv.Est.	24,03
N	10
AD	0,172
Valor P	0,901
HM2 20°C	
Media	72,06
Desv.Est.	34,94
N	10
AD	0,115
Valor P	0,986

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

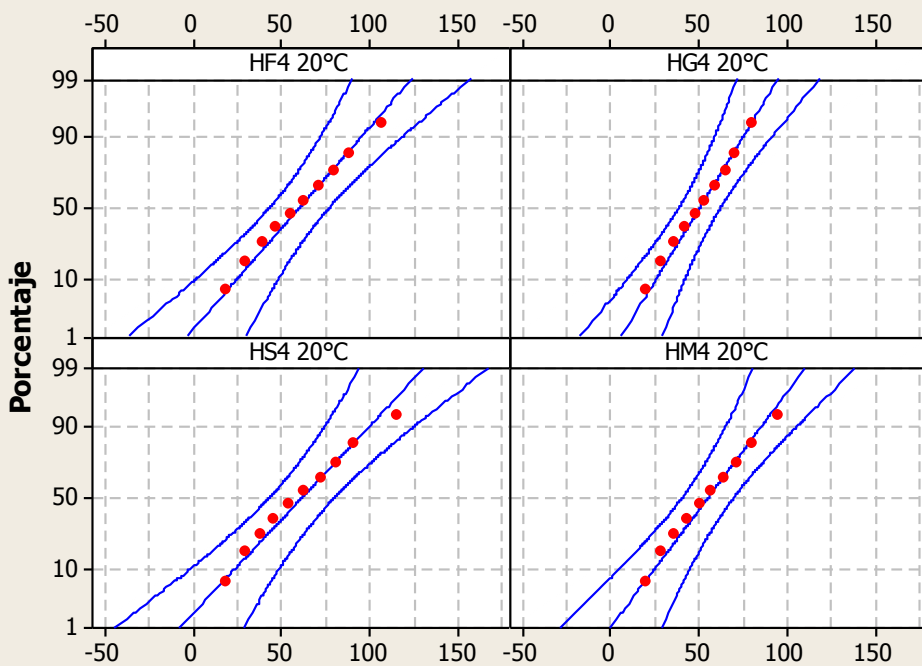
Normal - 95% de IC



HF3 20°C	
Media	59,04
Desv.Est.	27,49
N	10
AD	0,157
Valor P	0,930
HG3 20°C	
Media	63,3
Desv.Est.	27,94
N	10
AD	0,104
Valor P	0,992
HS3 20°C	
Media	50,74
Desv.Est.	23,89
N	10
AD	0,114
Valor P	0,986
HM3 20°C	
Media	54,87
Desv.Est.	26,54
N	10
AD	0,109
Valor P	0,989

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

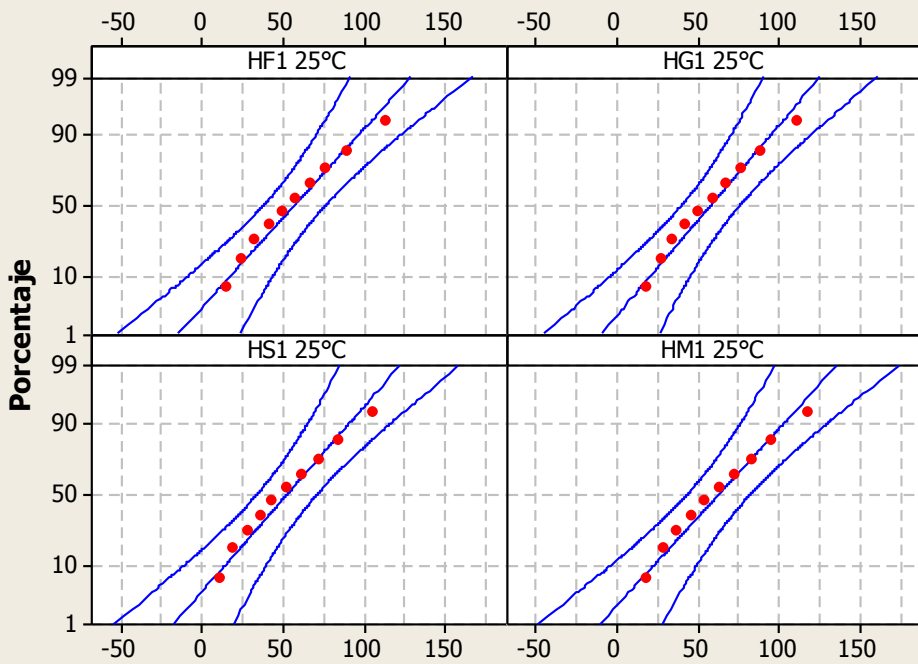
Normal - 95% de IC



HF4 20°C	
Media	60,44
Desv.Est.	27,24
N	10
AD	0,093
Valor P	0,996
HG4 20°C	
Media	50,37
Desv.Est.	19,29
N	10
AD	0,104
Valor P	0,992
HS4 20°C	
Media	61,37
Desv.Est.	29,68
N	10
AD	0,119
Valor P	0,982
HM4 20°C	
Media	54,65
Desv.Est.	23,82
N	10
AD	0,100
Valor P	0,994

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

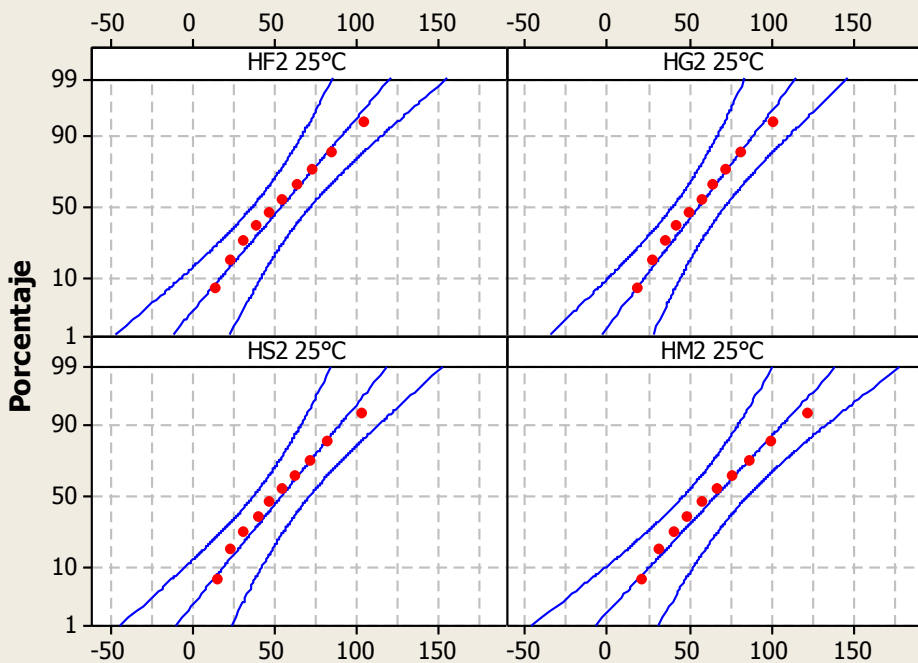
Normal - 95% de IC



HF1 25°C	
Media	57,45
Desv.Est.	30,73
N	10
AD	0,137
Valor P	0,962
HG1 25°C	
Media	57,77
Desv.Est.	29,19
N	10
AD	0,139
Valor P	0,960
HS1 25°C	
Media	52,22
Desv.Est.	29,84
N	10
AD	0,144
Valor P	0,951
HM1 25°C	
Media	62,11
Desv.Est.	31,62
N	10
AD	0,129
Valor P	0,972

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

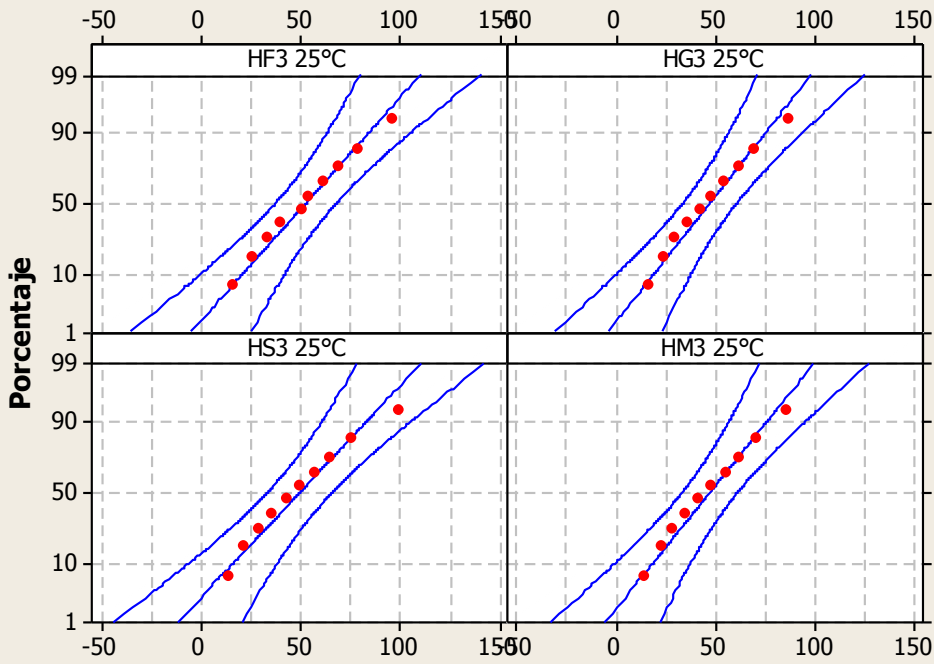
Normal - 95% de IC



HF2 25°C	
Media	54,53
Desv.Est.	28,39
N	10
AD	0,133
Valor P	0,969
HG2 25°C	
Media	55,50
Desv.Est.	25,79
N	10
AD	0,111
Valor P	0,988
HS2 25°C	
Media	54,15
Desv.Est.	27,53
N	10
AD	0,120
Valor P	0,981
HM2 25°C	
Media	65,41
Desv.Est.	31,68
N	10
AD	0,123
Valor P	0,979

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

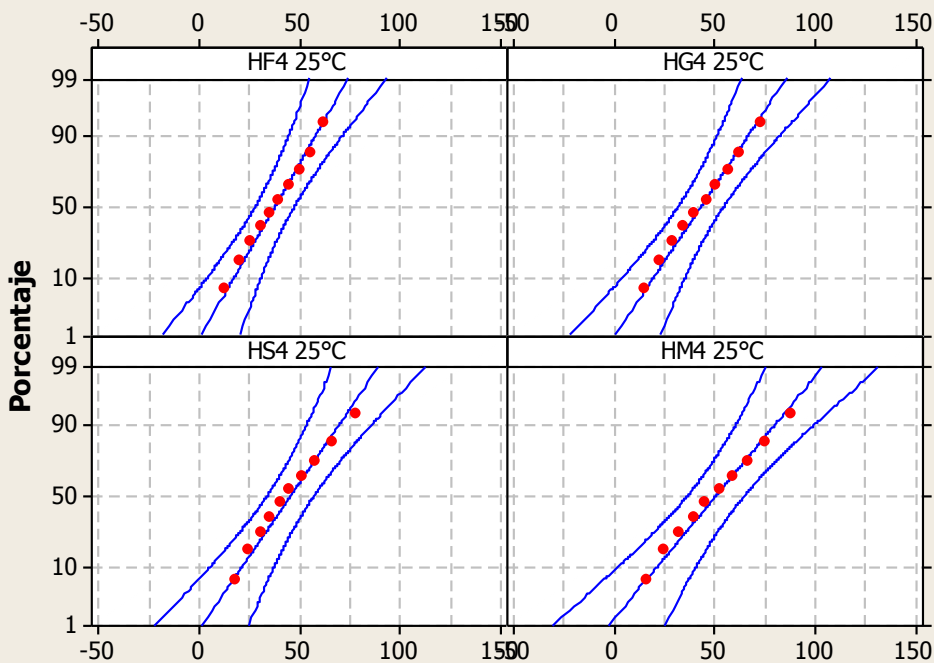
Normal - 95% de IC



HF3 25°C	
Media	52,79
Desv.Est.	24,66
N	10
AD	0,108
Valor P	0,990
HG3 25°C	
Media	46,88
Desv.Est.	22,05
N	10
AD	0,122
Valor P	0,980
HS3 25°C	
Media	49,31
Desv.Est.	26,12
N	10
AD	0,145
Valor P	0,950
HM3 25°C	
Media	46,56
Desv.Est.	22,66
N	10
AD	0,116
Valor P	0,985

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

Normal - 95% de IC

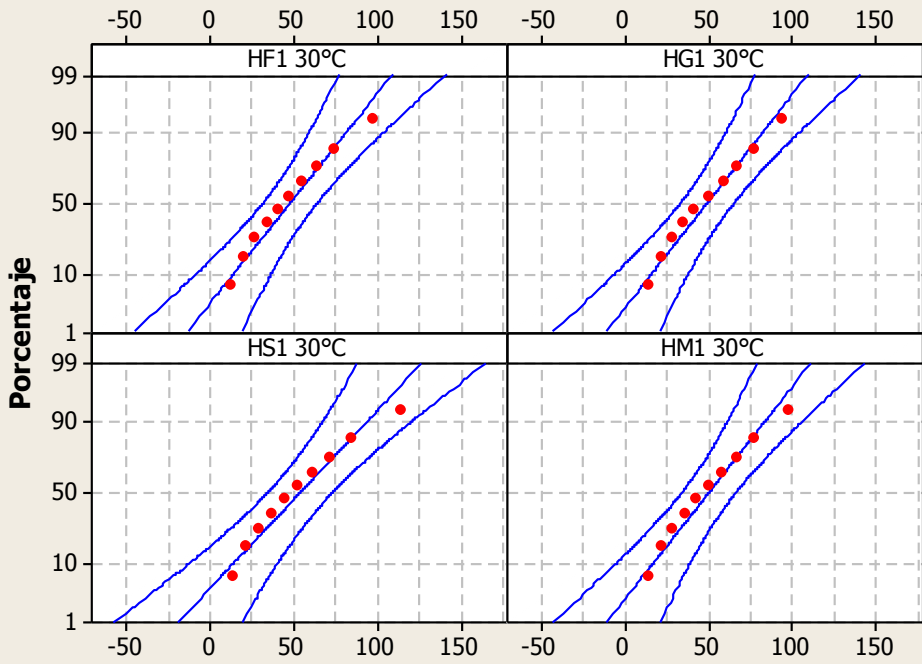


HF4 25°C	
Media	37,76
Desv.Est.	15,70
N	10
AD	0,105
Valor P	0,991
HG4 25°C	
Media	42,93
Desv.Est.	18,42
N	10
AD	0,100
Valor P	0,994
HS4 25°C	
Media	45,25
Desv.Est.	18,85
N	10
AD	0,125
Valor P	0,977
HM4 25°C	
Media	50,07
Desv.Est.	23,11
N	10
AD	0,103
Valor P	0,992



## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

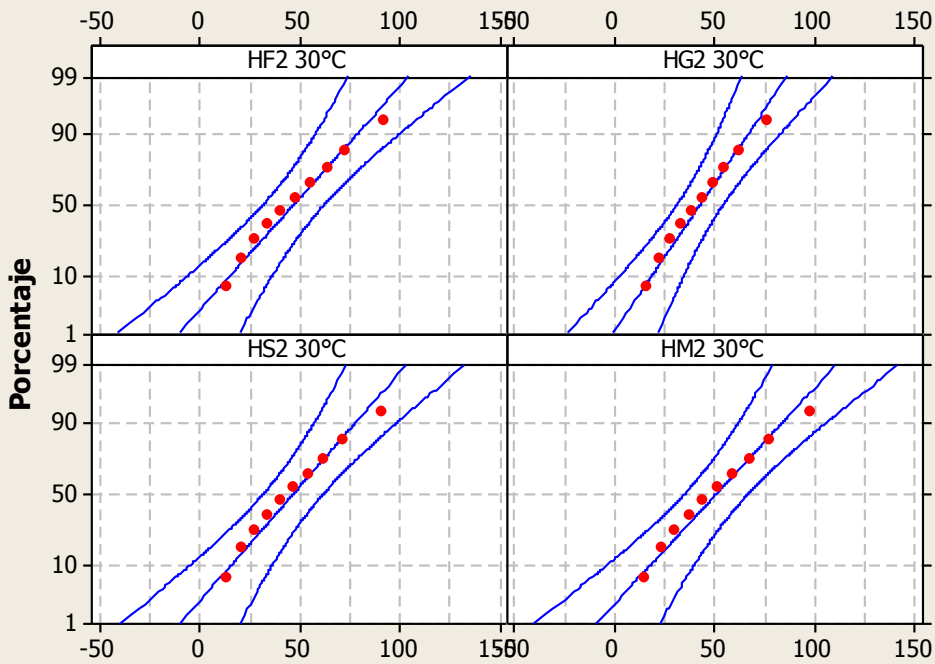
Normal - 95% de IC



HF1 30°C	
Media	48,04
Desv.Est.	26,15
N	10
AD	0,153
Valor P	0,937
HG1 30°C	
Media	48,86
Desv.Est.	26,03
N	10
AD	0,151
Valor P	0,940
HS1 30°C	
Media	53,64
Desv.Est.	31,12
N	10
AD	0,188
Valor P	0,871
HM1 30°C	
Media	49,56
Desv.Est.	26,34
N	10
AD	0,154
Valor P	0,936

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

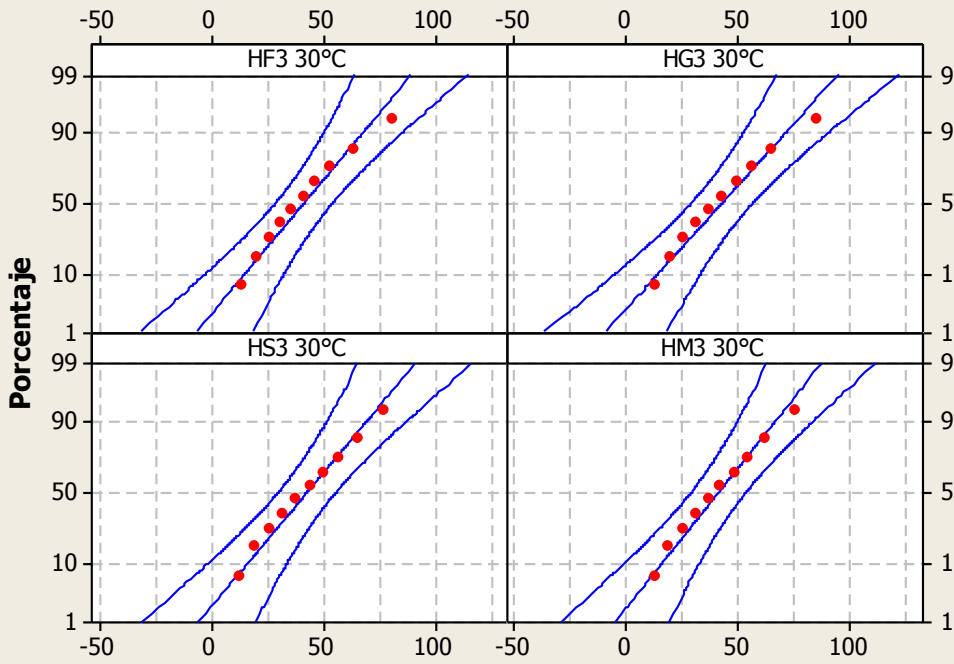
Normal - 95% de IC



HF2 30°C	
Media	47,24
Desv.Est.	24,67
N	10
AD	0,138
Valor P	0,962
HG2 30°C	
Media	42,52
Desv.Est.	18,88
N	10
AD	0,111
Valor P	0,988
HS2 30°C	
Media	46,59
Desv.Est.	24,16
N	10
AD	0,137
Valor P	0,962
HM2 30°C	
Media	50,29
Desv.Est.	25,87
N	10
AD	0,136
Valor P	0,964

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

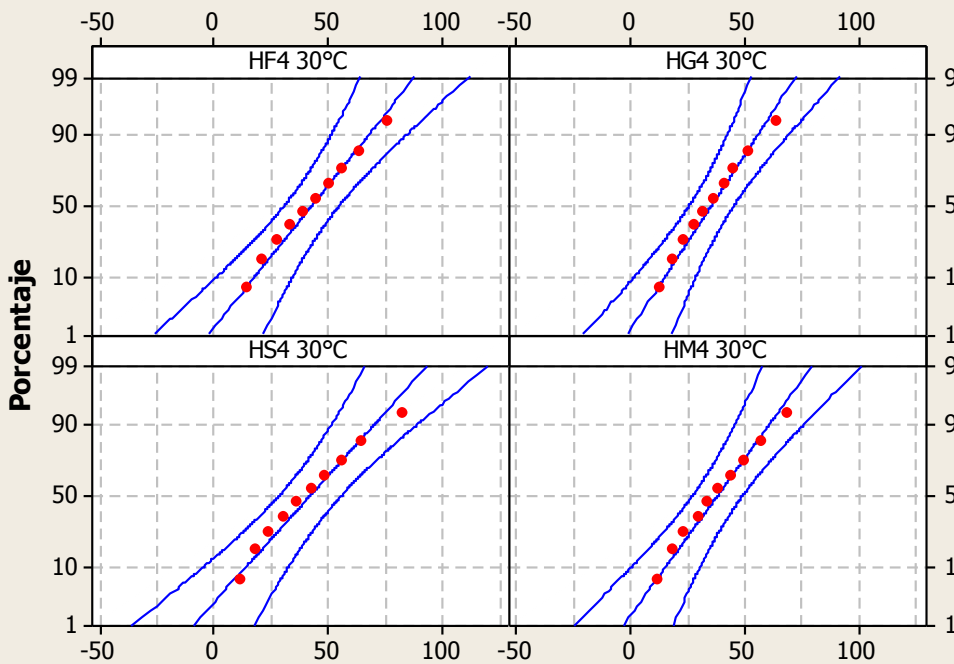
Normal - 95% de IC



HF3 30°C	
Media	41,52
Desv.Est.	20,56
N	10
AD	0,156
Valor P	0,932
HG3 30°C	
Media	42,64
Desv.Est.	22,50
N	10
AD	0,155
Valor P	0,934
HS3 30°C	
Media	42,55
Desv.Est.	20,75
N	10
AD	0,112
Valor P	0,988
HM3 30°C	
Media	40,71
Desv.Est.	19,97
N	10
AD	0,112
Valor P	0,988

## GRAFICOS DE PROBABILIDAD (TIEMPO DE DESHIELO)

Normal - 95% de IC



HF4 30°C	
Media	43,06
Desv.Est.	19,40
N	10
AD	0,101
Valor P	0,993
HG4 30°C	
Media	35,38
Desv.Est.	15,96
N	10
AD	0,108
Valor P	0,990
HS4 30°C	
Media	41,94
Desv.Est.	21,96
N	10
AD	0,134
Valor P	0,967
HM4 30°C	
Media	37,72
Desv.Est.	17,88
N	10
AD	0,108
Valor P	0,990

## **ANEXO B. CORRECCIÓN DEL TIEMPO DE DESHIELO**

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 1.80 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 1.80 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $B_x := 1.80$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{B_x \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{B_x}{100} - bg_2 \cdot \frac{B_x}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.19 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 17.5$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300$  m  $h := 0.0182$  m

$$S := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.085 \times 10^{-3} \quad m^2$$

$$V := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.146 \times 10^{-5} \quad m^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0468$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 176.56$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.023 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 893.55 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 14.89$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.608 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.242 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.744 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 8.424 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.999 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 909.457$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 931.545 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.35 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.016 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 3.0 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 3.0 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.0$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.32 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 21.37$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300$  m  $h := 0.0197$  m

$$S := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.368 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.57 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0497$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 168.19$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.882 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.32 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1090.37 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 18.17$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.197 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = 9.94 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.491 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)



$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9933 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 892.273$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 939.747 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.44 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 5.6 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 5.6 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.6$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.62 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 13.36$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298$  m  $h := 0.0177$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.894 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.938 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0454$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 180.11$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.629 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.61 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 680.52 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.34$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.018 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.088 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.542 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9809 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 919.391$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 957.517 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.03 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.02 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 7.30 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 7.30 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 7.30$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.82 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.09$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0302$  m  $h := 0.0182$  m

$$S := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.184 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.215 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0440$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 176.12$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.55$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.117 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.81 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 716.83 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.95$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.143 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.772 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 3.212 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9728 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 843.757$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 969.135 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 7.73 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.019 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 1.42 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 1.42 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.42$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.15 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 13.23$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0301$  m  $h := 0.0157$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.667 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.472 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0457$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 193.81$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$



b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s  $a := \theta$

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos}$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.992 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.14 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 675.67 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.26$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.969 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.919 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 6.489 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 1.022 \times 10^3$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 928.948 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 7.66 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.017 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 3.7 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 3.7 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.7$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.4 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 15.27$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298$  m  $h := 0.0163$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.632 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.547 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0430$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 189.81$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.79 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.39 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 778.78 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 12.98$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.29 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresion

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.161 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.591 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.99 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 945.58$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 944.531 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.72 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.016 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 6.21 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente [\(Glucosa a 6.21 °Bx\)](#)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.21$

Peso molecular [Glucosa](#)  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.69 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 22.45$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0301$  m  $h := 0.0177$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.045 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.041 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0464$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 179.42$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.513 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.69 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1143.03 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 19.05$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.4 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.417 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.881 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.978 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 920.393$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 961.686 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 4.78 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.012 \quad \text{ok}$$



## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 8.01 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 8.01 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.01$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.91 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.03$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0297$  m  $h := 0.0146$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.267 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.046 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0366$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 204.33$   $\frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.55$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.094 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.91 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 713.37 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.89$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.141 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.566 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.932 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9694 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 904.618$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 973.988 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.66 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 1.60 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 1.60 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.60$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.11 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 19.5$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0191 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.255 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0462$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 171.38 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.438 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.11 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 996.09 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 16.6$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.899 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.772 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 7.392 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 855.493$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 930.178 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.9 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.015 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 3.7 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 3.7 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.7$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5% de 180.16 fructosa y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.10, 0.26 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.27 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 21.48$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0191 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.255 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0462$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 171.38 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.878 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.26 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1096.31 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 18.27$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.208 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.247 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)



$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 1.709 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.99 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 855.493$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 944.531 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.35 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 6.31 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 6.31 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.31$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5% de 180.16 fructosa y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.10, 0.26 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.47 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 25$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0167 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.803 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.722 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0445$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 186.43 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.125 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.46 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1274.52 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 21.24$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.758 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.363 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 2.808 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9775 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 942.434$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 962.369 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 4.21 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 9.889 \times 10^{-3} \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 8.30 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 8.30 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.30$

He utilizado la temperatura de congelación del melocoton utilizando los datos de del articulo de Josep, he trazado una recta con los puntos de congeción de 10 a 20°Bx y he utilizado la ecuación para hallar los puntos de congelación de mi articulo. Los calculos los he hecho en la hoja electronica variables del articulo en la hoja °C melocoton

Peso molecular Melocoton  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.63 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caida de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 20.17$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303 \text{ m}$   $h := 0.0166 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.929 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.788 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0418$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 186.49 \frac{1}{\text{m}}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.047 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.63 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1027.31 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 17.12$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.048 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.051 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 3.469 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.968 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 873.038$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 975.97 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.2 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.012 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 1.3 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 1.3 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.30$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.07 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 10$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303 \text{ m}$   $h := 0.0198 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.538 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.711 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0485 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 167.02 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$



b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.064 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.07 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 510.92 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 8.52$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.485 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.455 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 6.305 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0014 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 849.261$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 928.128 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 11.83 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.031 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 3.53 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 3.53 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.53$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.2 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.21$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0301 \text{ m}$   $h := 0.0150 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.529 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.269 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0359 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 199.78 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 9.394 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.2 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 572.35 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.54$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.671 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = 9.083 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.267 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9908 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 840.853$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 943.369 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.83 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.019 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 5.14 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 5.14 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.14$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.3 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.47$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298 \text{ m}$   $h := 0.0107 \text{ m}$

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 7.583 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 2.985 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0289$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 254.03$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.53$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 9.111 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.29 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 585.31 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.76$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.715 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.196 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.485 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9831 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 968.126$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 954.373 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.79 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.012 \quad \text{ok}$$



## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 8.42 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 8.42 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.42$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.51 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 23.44$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0305 \text{ m}$   $h := 0.0203 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.735 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.933 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0494 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 164.1 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.384 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.51 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 1194.69 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 19.91$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 3.529 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = 3.665 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 4.159 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9674 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 832.686$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 976.79 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.13 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 1.59 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 1.59 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $K_h := 1860$

Deshielo en ° Bx  $B_x := 1.59$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{K_h \cdot \frac{B_x \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{B_x}{100} - bg_2 \cdot \frac{B_x}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.17 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.19$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0169 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.778 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0468 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 185.01 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.978 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.16 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 575.78 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.6$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.594 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.761 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 7.441 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 979.415$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 930.11 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.02 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.019 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 2.96 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 2.96 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 2.96$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.32 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.34$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303 \text{ m}$   $h := 0.0187 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.329 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.394 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0478 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 172.96 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.157 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.31 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 737.21 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 12.29$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.053 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -9.369 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.415 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)



$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9935 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 886.24$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 939.473 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.67 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.017 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 5.38 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 5.38 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.38$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.59 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.08$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0299 \text{ m}$   $h := 0.0191 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.205 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.364 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0487 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 171.6 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.807 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.59 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 568.64 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.48$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.603 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.133 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.62 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9819 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 907.828$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 956.013 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.62 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.022 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 8.6 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 8.60 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.60$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right)} \cdot M_{ss} \quad T_s = -0.98 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 9.14$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298 \text{ m}$   $h := 0.0126 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 7.939 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 3.515 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0324 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 225.84$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 9.188 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.98 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.65 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 467.88 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 7.8$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.342 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.462 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.786 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9666 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 921.705$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 978.02 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 7.82 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.015 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 1.29 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 1.29 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.29$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.14 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.31$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0301$  m  $h := 0.0181$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.121 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.155 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0452$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 176.92$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58$$



b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.912 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.13 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 582.07 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.7$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.609 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.311 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 5.831 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0015 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 876.776$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 928.059 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.31 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.021 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 3.32 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 3.32 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.32$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.36 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.00$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0304$  m  $h := 0.0164$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.939 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.761 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0412$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 187.74$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 8.002 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.35 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 565.36 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.42$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.577 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = 9.558 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.368 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9918 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 865.279$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 941.934 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.019 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 6.21 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 6.21 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.21$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.69 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.35$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300$  m  $h := 0.0184$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.123 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.202 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0467$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 175.36$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.982 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.69 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 735.98 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 12.27$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.084 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.433 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.9 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.978 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 897.649$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 961.686 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.49 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.016 \quad \text{ok}$$



## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 8.10 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 8.10 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.10$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.92 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 12.28$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0297$  m  $h := 0.0143$  m

$$S := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.211 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 3.963 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0355$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 207.2$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.868 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.92 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.65 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 628.85 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 10.48$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.799 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.52 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.875 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.969 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 895.838$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 974.603 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.36 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.013 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 1.57 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 1.57 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.57$

He utilizado la temperatura de congelación del melocoton utilizando los datos de del articulo de Josep, he trazado una recta con los puntos de congelación de 10 a 20°Bx y he utilizado la ecuación para hallar los puntos de congelación de mi articulo. Los calculos los he hecho en la hoja electronica variables del articulo en la hoja °C melocoton

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.11 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caida de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 18.36$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298 \text{ m}$   $h := 0.0180 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.95 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.022 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0466$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 178.23 \frac{1}{\text{m}}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.883 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 945.04 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 15.75$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.609 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.656 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 7.316 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0001 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 927.964$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 929.973 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.1 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.013 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 3.94 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 3.94 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.94$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.28 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 19.38$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0302 \text{ m}$   $h := 0.0200 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.526 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.731 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0526$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 166.23 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.567 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.28 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 996.5 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 16.61$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.772 \quad \text{minutos}$$

### **Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo**

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.546 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)



$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 2.072 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9888 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 917.893$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 946.171 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.17 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 5.83 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 5.83 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.83$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.43 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 16.32$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0299 \text{ m}$   $h := 0.0157 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.567 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.41 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0411$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 194.28 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.364 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.42 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 838.41 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 13.97$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.347 \quad \text{minutos}$$

### **Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo**

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.985 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 2.396 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9798 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 932.073$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 959.089 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.24 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.012 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 8.76 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 8.76 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.76$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.67 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 19.20$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0302 \text{ m}$   $h := 0.0174 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.032 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.986 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0469$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 181.17 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.478 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.66 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 984.86 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 16.41$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.786 \quad \text{minutos}$$

### **Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo**

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.639 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 4.108 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9658 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 940.719$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 979.114 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 4.76 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.011 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 1.0°Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 1.0 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.0$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.06 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 5$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303 \text{ m}$   $h := 0.0155 \text{ m}$

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.719 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.471 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0363 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 195.04 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.58$$



b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.8 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.05 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 257.45 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 4.29$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 0.709 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = 0 \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 3.63 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0028 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 811.97$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 926.077 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 17.12 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.038 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 3.39°Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 3.39 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.39$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.19 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 15.29$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0301 \text{ m}$   $h := 0.0166 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.832 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.725 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0392 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 186.93 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.828 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.19 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 786.63 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 13.11$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.179 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = 9.369 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.329 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9914 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 829.65$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 942.412 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.85 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 5.10°Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 5.10 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.10$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.3 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.51$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303 \text{ m}$   $h := 0.0162 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.853 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.673 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0371 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V} \quad ff = 189.46 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.094 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.29 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 746.04 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 12.43$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.076 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.521 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.892 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9833 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 794.006$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 954.099 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.09 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.014 \quad \text{ok}$$



## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 9°Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 9 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 9$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.55 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 13.10$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0305 \text{ m}$   $h := 0.0162 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.949 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.734 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0479 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 189.03 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.622 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.55 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 672.47 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.21$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.892 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor especifico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor especifico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.832 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 4.311 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9647 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 1.012 \times 10^3$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 980.754 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.75 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.016 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 1.77 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 1.77 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.77$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.19 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.59$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298 \text{ m}$   $h := 0.0178 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.913 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.966 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0435 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 179.47 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.67 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 599.45 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.99$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.599 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.349 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 7.699 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9992 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 875.965$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 931.34 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.92 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.017 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 2.78 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 2.78 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 2.78$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.3 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 12.53$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0295 \text{ m}$   $h := 0.0178 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.767 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.866 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0498 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 180.16 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.121 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.29 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 647.61 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 10.79$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.736 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -8.864 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.384 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)



$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9943 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 1.023 \times 10^3$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 938.243 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.36 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.015 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 5.52 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 5.52 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 5.52$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.61 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 9.10$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0178 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.01 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.033 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0412 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 179.03 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 8.241 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.68 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 469.38 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 7.82$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.277 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.862 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.274 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9813 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 818.625$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 956.97 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.73 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.021 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 6.86 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 6.86 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.86$

Peso molecular fructosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.77 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 8.49$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0169 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.778 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0428 \text{ kg}$   $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 185.01 \frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 8.732 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.76 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.68 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 437.44 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 7.29$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.199 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.508 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 2.936 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9749 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 895.704$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 966.128 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 9 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.021 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 1.09 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 1.09 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.09$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.11 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 6.59$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300$  m  $h := 0.0162$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.708 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.58 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0415$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 190.12$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$



b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s  $a := \theta$

$\theta := e^{-b \cdot t}$  despejando la b obtenemos

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.179 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.11 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 341 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 5.68$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 0.907 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -3.735 \times 10^{-5} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 4.524 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0024 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 906.026$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 926.693 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 11.51 \quad \frac{\text{W}}{\left(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}\right)}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.027 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 3.51 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 3.51 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.51$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.38 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 7.57$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300$  m  $h := 0.0153$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.539 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.326 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0400$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 197.39$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.007 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.37 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 391.05 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 6.52$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.052 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.004 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 1.404 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9909 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 924.647$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 943.232 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 9.58 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.021 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 6.05 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{ww} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 6.05 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.05$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.67 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caida de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11.49$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0303$  m  $h := 0.0203$  m

$$S_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.633 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{ww} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.855 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0535$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 164.53$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 6.496 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.67 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.68 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 592.39 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.87$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.617 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.702 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 3.237 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9788 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 913.74$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 960.592 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 7.5 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.02 \quad \text{ok}$$



## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 7.87 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Glucosa a 7.87 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 7.87$

Peso molecular Glucosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.9 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 8.35$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298$  m  $h := 0.0146$  m

$$S := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.313 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.073 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0390$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 204.1$   $\frac{1}{m}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 8.794 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.89 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.69 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 429.85 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 7.16$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.186 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.679 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 3.069 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9701 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 957.479$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 973.031 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 8.26 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.018 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 1.53 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 1.53 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 1.53$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.11 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 11$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0300 \text{ m}$   $h := 0.0182 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.085 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.146 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0405$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 176.56 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 7.067 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 569.21 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 9.49$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.513 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.147 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 6.196 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 2.0003 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 787.03$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 929.7 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 7.44 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.018 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 3.57 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 3.57 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 3.57$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.26 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 14.4$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0302 \text{ m}$   $h := 0.0214 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.791 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 6.132 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0549$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 159.68 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.63$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.342 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.25 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.67 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 744.46 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 12.41$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.992 \quad \text{minutos}$$

### **Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo**

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -1.411 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)



$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 1.96 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9906 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 895.354$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 943.642 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 6.28 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.017 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 6.56 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 6.56 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.56$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.49 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 15.46$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0314 \text{ m}$   $h := 0.0173 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 9.608 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 5.359 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0462$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 179.3 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 4.893 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.48 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.68 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 798.06 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 13.3$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 2.159 \quad \text{minutos}$$

### **Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo**

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.569 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 3.031 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9763 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 862.158$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 964.078 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.2 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.013 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Melocoton a 8.21 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Melocoton a 8.21 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 8.21$

He utilizado el peso molecular proporcional a la cantidad en tanto por ciento de zumo de melocoton 18.8% de 180.16 glucosa, 25.5 fructosa de 180.16 y 55.7% de 342.30 de sacarosa y en la constante se procedió de igual forma, 0.18, 0.26, 0.10 respectivamente.

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 270.47$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.15$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.62 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 13.14$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $r := 0.0298 \text{ m}$   $h := 0.0156 \text{ m}$

$$S_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad S = 8.501 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad V = 4.352 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0416$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 195.32 \frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.64$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 5.701 \times 10^{-4} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.62 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.68 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 677.69 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 11.29$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.845 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100} \quad X_1 = -2.999 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X2 := Bx \cdot \frac{p}{100} \quad X2 = 3.415 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9685 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 955.842$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho 1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho 2 \quad \rho T = 975.355 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 5.6 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot Tm\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot Tm^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.013 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Fructosa a 7.6 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

proceso de calculo es el siguiente (Fructosa a 7.6 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 6.80$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.10$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.76 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caida de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 8$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $l_1 := 0.2243\text{m}$   $h := 0.0138\text{m}$   $l_2 := 0.1833$

$$V := l_1 \cdot l_2 \cdot h$$

$$S = 1 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2$$

$$S := [(l_1 \cdot h) + (l_2 \cdot h) + (l_1 \cdot l_2)] \cdot 2 \quad V = 5.674 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$ff := \frac{S}{V}$$

$$ff = 164.755 \quad \frac{1}{\text{m}}$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.4554$  kg

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO



Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.55$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.26 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(-T_s + 1.995) \quad T_t = -2.75 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 407.15 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 6.79$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.214 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor específico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -0.026 \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 0.031 \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9752 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{p}{V} \quad \rho = 802.643$$

-----  
Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 965.718 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 14.58 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := \left(2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m\right) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.039 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Sacarosa a 7.8 °Bx)

### Resolución por análisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura inicial de deshielo  $T_{\text{ww}} := -18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente (Sacarosa a 7.8 °Bx)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 7.8$

Peso molecular sacarosa  $M_{ss} := 342.3$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.26$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.47 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caída de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 9$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $l_1 := 0.2223$   $h := 0.0120\text{m}$   $l_2 := 0.223$  m

$$S_{\text{ww}} := [(l_1 \cdot h) + (l_2 \cdot h) + (l_1 \cdot l_2)] \cdot 2 \quad S = 0.11 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{ww}} := l_1 \cdot l_2 \cdot h \quad V = 5.949 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.0481$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 184.63$   $\frac{1}{\text{m}}$

### DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.54$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.146 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del crioconcentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.47 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.59 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 458.82 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 7.65$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (crioconcentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.353 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = 3.271 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 3.752 \times 10^{-3} \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9704 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 80.857$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 972.553 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 11.89 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.028 \quad \text{ok}$$

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE FUSION (Glucosa a 7.7 °Bx)

### Resolución por analisis de sistemas concentrados

Variables conocidas determinadas experimentalmente

Temperatura ambiente de deshielo .  $T_2 := 20$  °C

Temperatura inicial de deshielo  $T_1 := -18$  °C

Temperatura final de deshielo coincide con la temperatura de congelación definida como la temperatura de SMFI

El proceso de calculo es el siguiente [\(Glucosa a 7.7 °Bx\)](#)

Kh es la constante crioscopica del agua  $Kh := 1860$

Deshielo en ° Bx  $Bx := 7.7$

Peso molecular [Glucosa](#)  $M_{ss} := 180.16$  constante de C.S.CHEN  $bg_2 := 0.18$

Ts es la temperatura de congelación temperatura SMFI

$$T_s := \frac{Kh \cdot \frac{Bx \cdot (-1)}{100}}{\left(1 - \frac{Bx}{100} - bg_2 \cdot \frac{Bx}{100}\right) \cdot M_{ss}} \quad T_s = -0.87 \quad T_t := T_s$$

Tiempo de caida de la primera gota determinado experimentalmente

t es el tiempo en caer la primera gota (hallado experimentalmente en min) se pasa de minutos a segundos

$t_2 := 8$  es una variable mas para distinguir mas adelante

$t := t_2 \cdot 60$  segundos

Dimensiones de la muestra:  $l_1 := 0.2223m$   $h := 0.0125m$   $l_2 := 0.223$

$$S := [(l_1 \cdot h) + (l_2 \cdot h) + (l_1 \cdot l_2)] \hat{S} = 0.11 \quad m^2$$

$$V := l_1 \cdot l_2 \cdot h \quad V = 6.197 \times 10^{-4} \quad m^3$$

El peso de la muestra es de  $p := 0.4852$  kg  $ff := \frac{S}{V}$   $ff = 177.97$   $\frac{1}{m}$

## DETERMINACION DE LA VARIABLE b PARA EL SISTEMA CONCENTRADO

Determinación del tiempo adimensional

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.55$$

b es la constante de tiempo y su unidad es 1/s

$$\theta := e^{-b \cdot t} \quad \text{despejando la b obtenemos} \quad a := \theta$$

$$b := \frac{-\ln(a)}{t} \quad b = 1.248 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{s}$$

Calculamos el tiempo adimensional, hallado a la temperatura media a la que se encuentra el hielo al salir del criocentrador (temperatura congelación mas 2 grados aprox.)

$$T_t := -(T_s + 1.995) \quad T_t = -2.87 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta := \frac{T_t - T_2}{T - T_2} \quad \theta = 0.6 \quad c := \theta$$

$$t_1 := \frac{-\ln(c)}{b} \quad t_1 = 406.86 \quad t_1 := \frac{t_1}{60} \quad t_1 = 6.78$$

Tiempo empleado de pasar la temperatura media del hielo (criocentrador) a la temperatura media del hielo

$$t_e := t_2 - t_1 \quad t_e = 1.219 \quad \text{minutos}$$

### Calculo de la temperatura media del hielo para determinar el calor especifico del hielo

La temperatura media del hielo es:

$$T_m := \frac{T + 0}{2}$$

$$T_m = -9$$

El calor específico del hielo (C1) viene dado por la expresión

$$C_1 := 2.0623 + 6.0769 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad C_1 = 2.008 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad (\text{A. Ibarz pag 345})$$

$$\rho_1 := 916.89 - 0.13071 \cdot T \quad \rho_1 = 919.24 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El calor específico del carbohidrato (C2)

$$C_2 := 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 \quad C_2 = 1.531 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\rho_2 := 1.59991 \cdot 10^3 - 0.31046 \cdot T_m \quad \rho_2 = 1.603 \times 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Fracción másica del hielo (X1)

$$X_1 := \frac{(1 - B_x) \cdot p}{100} \quad X_1 = -0.033 \quad \text{kg}$$

Fracción másica del carbohidrato (X2)

$$X_2 := B_x \cdot \frac{p}{100} \quad X_2 = 0.037 \quad \text{kg}$$

Fracción másica total del conjunto del hielo más carbohidrato (X3)

$$C3 := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot C1 + Bx \cdot \frac{C2}{100} \quad C3 = 1.9709 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

-----cal15-----  
 Cálculo de la densidad real ( $\rho$ ), relacionando el peso y el volumen

$$\rho := \frac{P}{V} \quad \rho = 783.008$$

-----  
 Calculo de la densidad por la fracción del peso

$$\rho_T := \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \cdot \rho_1 + \left(\frac{Bx}{100}\right) \rho_2 \quad \rho_T = 971.869 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En general se acepta el sistema de analisis concentrado si Biot es menor que 0.1

Comprobación

$$\alpha := 1000 \cdot b \cdot \rho_T \cdot \frac{C3}{ff} \quad \alpha = 13.43 \quad \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$$

$$k1 := (2.2196 - 6.2489 \cdot 10^{-3} \cdot T_m) + 1.0155 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^2 \quad k1 = 2.284 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

$$\text{Biot} := \frac{\alpha}{k1 \cdot ff} \quad \text{Biot} = 0.033 \quad \text{ok}$$



## ANEXO C.

Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) tiempos a 20 °C

(A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,5 °Brix; *ff* 167-194 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix; *ff* 171 m<sup>-1</sup>.

(B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,5 °Brix; *ff* 168-200 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,7 °Brix; *ff* 171 m<sup>-1</sup>.

(C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix; *ff* 179-254 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 6,3 °Brix; *ff* 254 m<sup>-1</sup>.

(D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,9 °Brix; *ff* 164-204 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,3 °Brix; *ff* 186 m<sup>-1</sup>.

Parameter					
Table Analyzed	ANOVA TIEMPO 20 °C				
One-way analysis of variance					
P value	0,4770				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,9822				
R squared	0,09282				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	10,16				
P value	0,8094				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	12960	15	864,3		
Residual (within columns)	126700	144	880,0		
Total	139700	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 20°C vs HG1 20°C	-12,40	1,322	No	ns	-58.83 to 34.03
HF1 20°C vs HS1 20°C	-21,30	2,271	No	ns	-67.73 to 25.13
HF1 20°C vs HM1 20°C	-13,50	1,439	No	ns	-59.93 to 32.93
HF1 20°C vs HF2 20°C	3,400	0,3624	No	ns	-43.03 to 49.83
HF1 20°C vs HG2 20°C	2,200	0,2345	No	ns	-44.23 to 48.63
HF1 20°C vs HS2 20°C	8,200	0,8741	No	ns	-38.23 to 54.63
HF1 20°C vs HM2 20°C	-11,00	1,173	No	ns	-57.43 to 35.43
HF1 20°C vs HF3 20°C	2,100	0,2239	No	ns	-44.33 to 48.53
HF1 20°C vs HG3 20°C	-2,200	0,2345	No	ns	-48.63 to 44.23
HF1 20°C vs HS3 20°C	10,20	1,087	No	ns	-36.23 to 56.63
HF1 20°C vs HM3 20°C	6,100	0,6503	No	ns	-40.33 to 52.53
HF1 20°C vs HF4 20°C	0,7000	0,07462	No	ns	-45.73 to 47.13
HF1 20°C vs HG4 20°C	10,70	1,141	No	ns	-35.73 to 57.13

HF1 20°C vs HS4 20°C	-0,6000	0,06396	No	ns	-47.03 to 45.83
HF1 20°C vs HM4 20°C	6,600	0,7036	No	ns	-39.83 to 53.03
HG1 20°C vs HS1 20°C	-8,900	0,9488	No	ns	-55.33 to 37.53
HG1 20°C vs HM1 20°C	-1,100	0,1173	No	ns	-47.53 to 45.33
HG1 20°C vs HF2 20°C	15,80	1,684	No	ns	-30.63 to 62.23
HG1 20°C vs HG2 20°C	14,60	1,556	No	ns	-31.83 to 61.03
HG1 20°C vs HS2 20°C	20,60	2,196	No	ns	-25.83 to 67.03
HG1 20°C vs HM2 20°C	1,400	0,1492	No	ns	-45.03 to 47.83
HG1 20°C vs HF3 20°C	14,50	1,546	No	ns	-31.93 to 60.93
HG1 20°C vs HG3 20°C	10,20	1,087	No	ns	-36.23 to 56.63
HG1 20°C vs HS3 20°C	22,60	2,409	No	ns	-23.83 to 69.03
HG1 20°C vs HM3 20°C	18,50	1,972	No	ns	-27.93 to 64.93
HG1 20°C vs HF4 20°C	13,10	1,396	No	ns	-33.33 to 59.53
HG1 20°C vs HG4 20°C	23,10	2,463	No	ns	-23.33 to 69.53
HG1 20°C vs HS4 20°C	11,80	1,258	No	ns	-34.63 to 58.23
HG1 20°C vs HM4 20°C	19,00	2,025	No	ns	-27.43 to 65.43
HS1 20°C vs HM1 20°C	7,800	0,8315	No	ns	-38.63 to 54.23
HS1 20°C vs HF2 20°C	24,70	2,633	No	ns	-21.73 to 71.13
HS1 20°C vs HG2 20°C	23,50	2,505	No	ns	-22.93 to 69.93
HS1 20°C vs HS2 20°C	29,50	3,145	No	ns	-16.93 to 75.93
HS1 20°C vs HM2 20°C	10,30	1,098	No	ns	-36.13 to 56.73
HS1 20°C vs HF3 20°C	23,40	2,494	No	ns	-23.03 to 69.83
HS1 20°C vs HG3 20°C	19,10	2,036	No	ns	-27.33 to 65.53
HS1 20°C vs HS3 20°C	31,50	3,358	No	ns	-14.93 to 77.93
HS1 20°C vs HM3 20°C	27,40	2,921	No	ns	-19.03 to 73.83
HS1 20°C vs HF4 20°C	22,00	2,345	No	ns	-24.43 to 68.43
HS1 20°C vs HG4 20°C	32,00	3,411	No	ns	-14.43 to 78.43
HS1 20°C vs HS4 20°C	20,70	2,207	No	ns	-25.73 to 67.13
HS1 20°C vs HM4 20°C	27,90	2,974	No	ns	-18.53 to 74.33
HM1 20°C vs HF2 20°C	16,90	1,802	No	ns	-29.53 to 63.33
HM1 20°C vs HG2 20°C	15,70	1,674	No	ns	-30.73 to 62.13
HM1 20°C vs HS2 20°C	21,70	2,313	No	ns	-24.73 to 68.13
HM1 20°C vs HM2 20°C	2,500	0,2665	No	ns	-43.93 to 48.93
HM1 20°C vs HF3 20°C	15,60	1,663	No	ns	-30.83 to 62.03
HM1 20°C vs HG3 20°C	11,30	1,205	No	ns	-35.13 to 57.73
HM1 20°C vs HS3 20°C	23,70	2,526	No	ns	-22.73 to 70.13
HM1 20°C vs HM3 20°C	19,60	2,089	No	ns	-26.83 to 66.03
HM1 20°C vs HF4 20°C	14,20	1,514	No	ns	-32.23 to 60.63
HM1 20°C vs HG4 20°C	24,20	2,580	No	ns	-22.23 to 70.63
HM1 20°C vs HS4 20°C	12,90	1,375	No	ns	-33.53 to 59.33
HM1 20°C vs HM4 20°C	20,10	2,143	No	ns	-26.33 to 66.53
HF2 20°C vs HG2 20°C	-1,200	0,1279	No	ns	-47.63 to 45.23
HF2 20°C vs HS2 20°C	4,800	0,5117	No	ns	-41.63 to 51.23
HF2 20°C vs HM2 20°C	-14,40	1,535	No	ns	-60.83 to 32.03
HF2 20°C vs HF3 20°C	-1,300	0,1386	No	ns	-47.73 to 45.13
HF2 20°C vs HG3 20°C	-5,600	0,5970	No	ns	-52.03 to 40.83
HF2 20°C vs HS3 20°C	6,800	0,7249	No	ns	-39.63 to 53.23
HF2 20°C vs HM3 20°C	2,700	0,2878	No	ns	-43.73 to 49.13
HF2 20°C vs HF4 20°C	-2,700	0,2878	No	ns	-49.13 to 43.73
HF2 20°C vs HG4 20°C	7,300	0,7782	No	ns	-39.13 to 53.73
HF2 20°C vs HS4 20°C	-4,000	0,4264	No	ns	-50.43 to 42.43

HF2 20°C vs HM4 20°C	3,200	0,3411	No	ns	-43.23 to 49.63
HG2 20°C vs HS2 20°C	6,000	0,6396	No	ns	-40.43 to 52.43
HG2 20°C vs HM2 20°C	-13,20	1,407	No	ns	-59.63 to 33.23
HG2 20°C vs HF3 20°C	-0,1000	0,01066	No	ns	-46.53 to 46.33
HG2 20°C vs HG3 20°C	-4,400	0,4690	No	ns	-50.83 to 42.03
HG2 20°C vs HS3 20°C	8,000	0,8528	No	ns	-38.43 to 54.43
HG2 20°C vs HM3 20°C	3,900	0,4157	No	ns	-42.53 to 50.33
HG2 20°C vs HF4 20°C	-1,500	0,1599	No	ns	-47.93 to 44.93
HG2 20°C vs HG4 20°C	8,500	0,9061	No	ns	-37.93 to 54.93
HG2 20°C vs HS4 20°C	-2,800	0,2985	No	ns	-49.23 to 43.63
HG2 20°C vs HM4 20°C	4,400	0,4691	No	ns	-42.03 to 50.83
HS2 20°C vs HM2 20°C	-19,20	2,047	No	ns	-65.63 to 27.23
HS2 20°C vs HF3 20°C	-6,100	0,6503	No	ns	-52.53 to 40.33
HS2 20°C vs HG3 20°C	-10,40	1,109	No	ns	-56.83 to 36.03
HS2 20°C vs HS3 20°C	2,000	0,2132	No	ns	-44.43 to 48.43
HS2 20°C vs HM3 20°C	-2,100	0,2239	No	ns	-48.53 to 44.33
HS2 20°C vs HF4 20°C	-7,500	0,7995	No	ns	-53.93 to 38.93
HS2 20°C vs HG4 20°C	2,500	0,2665	No	ns	-43.93 to 48.93
HS2 20°C vs HS4 20°C	-8,800	0,9381	No	ns	-55.23 to 37.63
HS2 20°C vs HM4 20°C	-1,600	0,1706	No	ns	-48.03 to 44.83
HM2 20°C vs HF3 20°C	13,10	1,396	No	ns	-33.33 to 59.53
HM2 20°C vs HG3 20°C	8,800	0,9381	No	ns	-37.63 to 55.23
HM2 20°C vs HS3 20°C	21,20	2,260	No	ns	-25.23 to 67.63
HM2 20°C vs HM3 20°C	17,10	1,823	No	ns	-29.33 to 63.53
HM2 20°C vs HF4 20°C	11,70	1,247	No	ns	-34.73 to 58.13
HM2 20°C vs HG4 20°C	21,70	2,313	No	ns	-24.73 to 68.13
HM2 20°C vs HS4 20°C	10,40	1,109	No	ns	-36.03 to 56.83
HM2 20°C vs HM4 20°C	17,60	1,876	No	ns	-28.83 to 64.03
HF3 20°C vs HG3 20°C	-4,300	0,4584	No	ns	-50.73 to 42.13
HF3 20°C vs HS3 20°C	8,100	0,8635	No	ns	-38.33 to 54.53
HF3 20°C vs HM3 20°C	4,000	0,4264	No	ns	-42.43 to 50.43
HF3 20°C vs HF4 20°C	-1,400	0,1492	No	ns	-47.83 to 45.03
HF3 20°C vs HG4 20°C	8,600	0,9168	No	ns	-37.83 to 55.03
HF3 20°C vs HS4 20°C	-2,700	0,2878	No	ns	-49.13 to 43.73
HF3 20°C vs HM4 20°C	4,500	0,4797	No	ns	-41.93 to 50.93
HG3 20°C vs HS3 20°C	12,40	1,322	No	ns	-34.03 to 58.83
HG3 20°C vs HM3 20°C	8,300	0,8848	No	ns	-38.13 to 54.73
HG3 20°C vs HF4 20°C	2,900	0,3091	No	ns	-43.53 to 49.33
HG3 20°C vs HG4 20°C	12,90	1,375	No	ns	-33.53 to 59.33
HG3 20°C vs HS4 20°C	1,600	0,1706	No	ns	-44.83 to 48.03
HG3 20°C vs HM4 20°C	8,800	0,9381	No	ns	-37.63 to 55.23
HS3 20°C vs HM3 20°C	-4,100	0,4371	No	ns	-50.53 to 42.33
HS3 20°C vs HF4 20°C	-9,500	1,013	No	ns	-55.93 to 36.93
HS3 20°C vs HG4 20°C	0,5000	0,05330	No	ns	-45.93 to 46.93
HS3 20°C vs HS4 20°C	-10,80	1,151	No	ns	-57.23 to 35.63
HS3 20°C vs HM4 20°C	-3,600	0,3838	No	ns	-50.03 to 42.83
HM3 20°C vs HF4 20°C	-5,400	0,5757	No	ns	-51.83 to 41.03
HM3 20°C vs HG4 20°C	4,600	0,4904	No	ns	-41.83 to 51.03
HM3 20°C vs HS4 20°C	-6,700	0,7142	No	ns	-53.13 to 39.73
HM3 20°C vs HM4 20°C	0,5000	0,05330	No	ns	-45.93 to 46.93
HF4 20°C vs HG4 20°C	10,00	1,066	No	ns	-36.43 to 56.43

HF4 20°C vs HS4 20°C	-1,300	0,1386	No	ns	-47.73 to 45.13
HF4 20°C vs HM4 20°C	5,900	0,6290	No	ns	-40.53 to 52.33
HG4 20°C vs HS4 20°C	-11,30	1,205	No	ns	-57.73 to 35.13
HG4 20°C vs HM4 20°C	-4,100	0,4371	No	ns	-50.53 to 42.33
HS4 20°C vs HM4 20°C	7,200	0,7675	No	ns	-39.23 to 53.63

Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) tiempos a 25 °C

- (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,3 °Brix; *ff* 177-195 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix; *ff* 178 m<sup>-1</sup>.  
 (B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,2 °Brix; *ff* 166-188 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,9 °Brix; *ff* 166 m<sup>-1</sup>.  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix; *ff* 172-194 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 5,8 °Brix; *ff* 194 m<sup>-1</sup>.  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 8,6 °Brix; *ff* 181-226 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,8 °Brix; *ff* 181 m<sup>-1</sup>

Parameter					
Table Analyzed	ANOVA TIEMPO 25 °C				
One-way analysis of variance					
P value	0,7233				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,7564				
R squared	0,07304				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	10,17				
P value	0,8089				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	7585	15	505,7		
Residual (within columns)	96270	144	668,5		
Total	103900	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 25°C vs HG1 25°C	-0,4000	0,04892	No	ns	-40.87 to 40.07
HF1 25°C vs HS1 25°C	5,100	0,6237	No	ns	-35.37 to 45.57
HF1 25°C vs HM1 25°C	-4,800	0,5871	No	ns	-45.27 to 35.67
HF1 25°C vs HF2 25°C	2,800	0,3424	No	ns	-37.67 to 43.27
HF1 25°C vs HG2 25°C	1,700	0,2079	No	ns	-38.77 to 42.17
HF1 25°C vs HS2 25°C	3,000	0,3669	No	ns	-37.47 to 43.47
HF1 25°C vs HM2 25°C	-8,100	0,9907	No	ns	-48.57 to 32.37
HF1 25°C vs HF3 25°C	4,500	0,5504	No	ns	-35.97 to 44.97
HF1 25°C vs HG3 25°C	10,40	1,272	No	ns	-30.07 to 50.87
HF1 25°C vs HS3 25°C	8,200	1,003	No	ns	-32.27 to 48.67
HF1 25°C vs HM3 25°C	10,80	1,321	No	ns	-29.67 to 51.27
HF1 25°C vs HF4 25°C	19,40	2,373	No	ns	-21.07 to 59.87
HF1 25°C vs HG4 25°C	14,30	1,749	No	ns	-26.17 to 54.77
HF1 25°C vs HS4 25°C	11,90	1,455	No	ns	-28.57 to 52.37

HF1 25°C vs HM4 25°C	7,100	0,8684	No	ns	-33.37 to 47.57
HG1 25°C vs HS1 25°C	5,500	0,6727	No	ns	-34.97 to 45.97
HG1 25°C vs HM1 25°C	-4,400	0,5381	No	ns	-44.87 to 36.07
HG1 25°C vs HF2 25°C	3,200	0,3914	No	ns	-37.27 to 43.67
HG1 25°C vs HG2 25°C	2,100	0,2568	No	ns	-38.37 to 42.57
HG1 25°C vs HS2 25°C	3,400	0,4158	No	ns	-37.07 to 43.87
HG1 25°C vs HM2 25°C	-7,700	0,9417	No	ns	-48.17 to 32.77
HG1 25°C vs HF3 25°C	4,900	0,5993	No	ns	-35.57 to 45.37
HG1 25°C vs HG3 25°C	10,80	1,321	No	ns	-29.67 to 51.27
HG1 25°C vs HS3 25°C	8,600	1,052	No	ns	-31.87 to 49.07
HG1 25°C vs HM3 25°C	11,20	1,370	No	ns	-29.27 to 51.67
HG1 25°C vs HF4 25°C	19,80	2,422	No	ns	-20.67 to 60.27
HG1 25°C vs HG4 25°C	14,70	1,798	No	ns	-25.77 to 55.17
HG1 25°C vs HS4 25°C	12,30	1,504	No	ns	-28.17 to 52.77
HG1 25°C vs HM4 25°C	7,500	0,9173	No	ns	-32.97 to 47.97
HS1 25°C vs HM1 25°C	-9,900	1,211	No	ns	-50.37 to 30.57
HS1 25°C vs HF2 25°C	-2,300	0,2813	No	ns	-42.77 to 38.17
HS1 25°C vs HG2 25°C	-3,400	0,4158	No	ns	-43.87 to 37.07
HS1 25°C vs HS2 25°C	-2,100	0,2568	No	ns	-42.57 to 38.37
HS1 25°C vs HM2 25°C	-13,20	1,614	No	ns	-53.67 to 27.27
HS1 25°C vs HF3 25°C	-0,6000	0,07338	No	ns	-41.07 to 39.87
HS1 25°C vs HG3 25°C	5,300	0,6482	No	ns	-35.17 to 45.77
HS1 25°C vs HS3 25°C	3,100	0,3791	No	ns	-37.37 to 43.57
HS1 25°C vs HM3 25°C	5,700	0,6971	No	ns	-34.77 to 46.17
HS1 25°C vs HF4 25°C	14,30	1,749	No	ns	-26.17 to 54.77
HS1 25°C vs HG4 25°C	9,200	1,125	No	ns	-31.27 to 49.67
HS1 25°C vs HS4 25°C	6,800	0,8317	No	ns	-33.67 to 47.27
HS1 25°C vs HM4 25°C	2,000	0,2446	No	ns	-38.47 to 42.47
HM1 25°C vs HF2 25°C	7,600	0,9295	No	ns	-32.87 to 48.07
HM1 25°C vs HG2 25°C	6,500	0,7950	No	ns	-33.97 to 46.97
HM1 25°C vs HS2 25°C	7,800	0,9540	No	ns	-32.67 to 48.27
HM1 25°C vs HM2 25°C	-3,300	0,4036	No	ns	-43.77 to 37.17
HM1 25°C vs HF3 25°C	9,300	1,137	No	ns	-31.17 to 49.77
HM1 25°C vs HG3 25°C	15,20	1,859	No	ns	-25.27 to 55.67
HM1 25°C vs HS3 25°C	13,00	1,590	No	ns	-27.47 to 53.47
HM1 25°C vs HM3 25°C	15,60	1,908	No	ns	-24.87 to 56.07
HM1 25°C vs HF4 25°C	24,20	2,960	No	ns	-16.27 to 64.67
HM1 25°C vs HG4 25°C	19,10	2,336	No	ns	-21.37 to 59.57
HM1 25°C vs HS4 25°C	16,70	2,042	No	ns	-23.77 to 57.17
HM1 25°C vs HM4 25°C	11,90	1,455	No	ns	-28.57 to 52.37
HF2 25°C vs HG2 25°C	-1,100	0,1345	No	ns	-41.57 to 39.37
HF2 25°C vs HS2 25°C	0,2000	0,02446	No	ns	-40.27 to 40.67
HF2 25°C vs HM2 25°C	-10,90	1,333	No	ns	-51.37 to 29.57
HF2 25°C vs HF3 25°C	1,700	0,2079	No	ns	-38.77 to 42.17
HF2 25°C vs HG3 25°C	7,600	0,9295	No	ns	-32.87 to 48.07
HF2 25°C vs HS3 25°C	5,400	0,6604	No	ns	-35.07 to 45.87
HF2 25°C vs HM3 25°C	8,000	0,9784	No	ns	-32.47 to 48.47
HF2 25°C vs HF4 25°C	16,60	2,030	No	ns	-23.87 to 57.07
HF2 25°C vs HG4 25°C	11,50	1,406	No	ns	-28.97 to 51.97
HF2 25°C vs HS4 25°C	9,100	1,113	No	ns	-31.37 to 49.57
HF2 25°C vs HM4 25°C	4,300	0,5259	No	ns	-36.17 to 44.77

HG2 25°C vs HS2 25°C	1,300	0,1590	No	ns	-39.17 to 41.77
HG2 25°C vs HM2 25°C	-9,800	1,199	No	ns	-50.27 to 30.67
HG2 25°C vs HF3 25°C	2,800	0,3424	No	ns	-37.67 to 43.27
HG2 25°C vs HG3 25°C	8,700	1,064	No	ns	-31.77 to 49.17
HG2 25°C vs HS3 25°C	6,500	0,7950	No	ns	-33.97 to 46.97
HG2 25°C vs HM3 25°C	9,100	1,113	No	ns	-31.37 to 49.57
HG2 25°C vs HF4 25°C	17,70	2,165	No	ns	-22.77 to 58.17
HG2 25°C vs HG4 25°C	12,60	1,541	No	ns	-27.87 to 53.07
HG2 25°C vs HS4 25°C	10,20	1,247	No	ns	-30.27 to 50.67
HG2 25°C vs HM4 25°C	5,400	0,6604	No	ns	-35.07 to 45.87
HS2 25°C vs HM2 25°C	-11,10	1,358	No	ns	-51.57 to 29.37
HS2 25°C vs HF3 25°C	1,500	0,1835	No	ns	-38.97 to 41.97
HS2 25°C vs HG3 25°C	7,400	0,9050	No	ns	-33.07 to 47.87
HS2 25°C vs HS3 25°C	5,200	0,6360	No	ns	-35.27 to 45.67
HS2 25°C vs HM3 25°C	7,800	0,9540	No	ns	-32.67 to 48.27
HS2 25°C vs HF4 25°C	16,40	2,006	No	ns	-24.07 to 56.87
HS2 25°C vs HG4 25°C	11,30	1,382	No	ns	-29.17 to 51.77
HS2 25°C vs HS4 25°C	8,900	1,088	No	ns	-31.57 to 49.37
HS2 25°C vs HM4 25°C	4,100	0,5014	No	ns	-36.37 to 44.57
HM2 25°C vs HF3 25°C	12,60	1,541	No	ns	-27.87 to 53.07
HM2 25°C vs HG3 25°C	18,50	2,263	No	ns	-21.97 to 58.97
HM2 25°C vs HS3 25°C	16,30	1,994	No	ns	-24.17 to 56.77
HM2 25°C vs HM3 25°C	18,90	2,312	No	ns	-21.57 to 59.37
HM2 25°C vs HF4 25°C	27,50	3,363	No	ns	-12.97 to 67.97
HM2 25°C vs HG4 25°C	22,40	2,740	No	ns	-18.07 to 62.87
HM2 25°C vs HS4 25°C	20,00	2,446	No	ns	-20.47 to 60.47
HM2 25°C vs HM4 25°C	15,20	1,859	No	ns	-25.27 to 55.67
HF3 25°C vs HG3 25°C	5,900	0,7216	No	ns	-34.57 to 46.37
HF3 25°C vs HS3 25°C	3,700	0,4525	No	ns	-36.77 to 44.17
HF3 25°C vs HM3 25°C	6,300	0,7705	No	ns	-34.17 to 46.77
HF3 25°C vs HF4 25°C	14,90	1,822	No	ns	-25.57 to 55.37
HF3 25°C vs HG4 25°C	9,800	1,199	No	ns	-30.67 to 50.27
HF3 25°C vs HS4 25°C	7,400	0,9050	No	ns	-33.07 to 47.87
HF3 25°C vs HM4 25°C	2,600	0,3180	No	ns	-37.87 to 43.07
HG3 25°C vs HS3 25°C	-2,200	0,2691	No	ns	-42.67 to 38.27
HG3 25°C vs HM3 25°C	0,4000	0,04892	No	ns	-40.07 to 40.87
HG3 25°C vs HF4 25°C	9,000	1,101	No	ns	-31.47 to 49.47
HG3 25°C vs HG4 25°C	3,900	0,4770	No	ns	-36.57 to 44.37
HG3 25°C vs HS4 25°C	1,500	0,1835	No	ns	-38.97 to 41.97
HG3 25°C vs HM4 25°C	-3,300	0,4036	No	ns	-43.77 to 37.17
HS3 25°C vs HM3 25°C	2,600	0,3180	No	ns	-37.87 to 43.07
HS3 25°C vs HF4 25°C	11,20	1,370	No	ns	-29.27 to 51.67
HS3 25°C vs HG4 25°C	6,100	0,7461	No	ns	-34.37 to 46.57
HS3 25°C vs HS4 25°C	3,700	0,4525	No	ns	-36.77 to 44.17
HS3 25°C vs HM4 25°C	-1,100	0,1345	No	ns	-41.57 to 39.37
HM3 25°C vs HF4 25°C	8,600	1,052	No	ns	-31.87 to 49.07
HM3 25°C vs HG4 25°C	3,500	0,4281	No	ns	-36.97 to 43.97
HM3 25°C vs HS4 25°C	1,100	0,1345	No	ns	-39.37 to 41.57
HM3 25°C vs HM4 25°C	-3,700	0,4525	No	ns	-44.17 to 36.77
HF4 25°C vs HG4 25°C	-5,100	0,6237	No	ns	-45.57 to 35.37
HF4 25°C vs HS4 25°C	-7,500	0,9173	No	ns	-47.97 to 32.97

HF4 25°C vs HM4 25°C	-12,30	1,504	No	ns	-52.77 to 28.17
HG4 25°C vs HS4 25°C	-2,400	0,2935	No	ns	-42.87 to 38.07
HG4 25°C vs HM4 25°C	-7,200	0,8806	No	ns	-47.67 to 33.27
HS4 25°C vs HM4 25°C	-4,800	0,5871	No	ns	-45.27 to 35.67



Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) tiempos a 30 °C

- (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,4 °Brix; *ff* 167-190 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,5 °Brix; *ff* 177 m<sup>-1</sup>.  
 (B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,3 °Brix; *ff* 172-197 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,6 °Brix; *ff* 160 m<sup>-1</sup>.  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,7 °Brix; *ff* 179-200 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 6,6 °Brix; *ff* 179 m<sup>-1</sup>.  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,8 °Brix; *ff* 172-204 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,2 °Brix; *ff* 195 m<sup>-1</sup>

Parameter					
Table Analyzed	ANOVA TIEMPO 30 °C				
One-way analysis of variance					
P value	0,9600				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,4516				
R squared	0,04493				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	7,636				
P value	0,9375				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	3568	15	237,9		
Residual (within columns)	75850	144	526,7		
Total	79420	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 30°C vs HG1 30°C	-0,8000	0,1102	No	ns	-36.72 to 35.12
HF1 30°C vs HS1 30°C	-5,600	0,7716	No	ns	-41.52 to 30.32
HF1 30°C vs HM1 30°C	-1,700	0,2342	No	ns	-37.62 to 34.22
HF1 30°C vs HF2 30°C	0,6000	0,08267	No	ns	-35.32 to 36.52
HF1 30°C vs HG2 30°C	5,600	0,7716	No	ns	-30.32 to 41.52
HF1 30°C vs HS2 30°C	1,300	0,1791	No	ns	-34.62 to 37.22
HF1 30°C vs HM2 30°C	-2,200	0,3031	No	ns	-38.12 to 33.72
HF1 30°C vs HF3 30°C	6,400	0,8818	No	ns	-29.52 to 42.32
HF1 30°C vs HG3 30°C	5,400	0,7441	No	ns	-30.52 to 41.32
HF1 30°C vs HS3 30°C	5,500	0,7578	No	ns	-30.42 to 41.42
HF1 30°C vs HM3 30°C	7,300	1,006	No	ns	-28.62 to 43.22
HF1 30°C vs HF4 30°C	4,800	0,6614	No	ns	-31.12 to 40.72
HF1 30°C vs HG4 30°C	12,60	1,736	No	ns	-23.32 to 48.52
HF1 30°C vs HS4 30°C	6,000	0,8267	No	ns	-29.92 to 41.92

HF1 30°C vs HM4 30°C	10,20	1,405	No	ns	-25.72 to 46.12
HG1 30°C vs HS1 30°C	-4,800	0,6614	No	ns	-40.72 to 31.12
HG1 30°C vs HM1 30°C	-0,9000	0,1240	No	ns	-36.82 to 35.02
HG1 30°C vs HF2 30°C	1,400	0,1929	No	ns	-34.52 to 37.32
HG1 30°C vs HG2 30°C	6,400	0,8818	No	ns	-29.52 to 42.32
HG1 30°C vs HS2 30°C	2,100	0,2894	No	ns	-33.82 to 38.02
HG1 30°C vs HM2 30°C	-1,400	0,1929	No	ns	-37.32 to 34.52
HG1 30°C vs HF3 30°C	7,200	0,9921	No	ns	-28.72 to 43.12
HG1 30°C vs HG3 30°C	6,200	0,8543	No	ns	-29.72 to 42.12
HG1 30°C vs HS3 30°C	6,300	0,8681	No	ns	-29.62 to 42.22
HG1 30°C vs HM3 30°C	8,100	1,116	No	ns	-27.82 to 44.02
HG1 30°C vs HF4 30°C	5,600	0,7716	No	ns	-30.32 to 41.52
HG1 30°C vs HG4 30°C	13,40	1,846	No	ns	-22.52 to 49.32
HG1 30°C vs HS4 30°C	6,800	0,9370	No	ns	-29.12 to 42.72
HG1 30°C vs HM4 30°C	11,00	1,516	No	ns	-24.92 to 46.92
HS1 30°C vs HM1 30°C	3,900	0,5374	No	ns	-32.02 to 39.82
HS1 30°C vs HF2 30°C	6,200	0,8543	No	ns	-29.72 to 42.12
HS1 30°C vs HG2 30°C	11,20	1,543	No	ns	-24.72 to 47.12
HS1 30°C vs HS2 30°C	6,900	0,9507	No	ns	-29.02 to 42.82
HS1 30°C vs HM2 30°C	3,400	0,4685	No	ns	-32.52 to 39.32
HS1 30°C vs HF3 30°C	12,00	1,653	No	ns	-23.92 to 47.92
HS1 30°C vs HG3 30°C	11,00	1,516	No	ns	-24.92 to 46.92
HS1 30°C vs HS3 30°C	11,10	1,529	No	ns	-24.82 to 47.02
HS1 30°C vs HM3 30°C	12,90	1,777	No	ns	-23.02 to 48.82
HS1 30°C vs HF4 30°C	10,40	1,433	No	ns	-25.52 to 46.32
HS1 30°C vs HG4 30°C	18,20	2,508	No	ns	-17.72 to 54.12
HS1 30°C vs HS4 30°C	11,60	1,598	No	ns	-24.32 to 47.52
HS1 30°C vs HM4 30°C	15,80	2,177	No	ns	-20.12 to 51.72
HM1 30°C vs HF2 30°C	2,300	0,3169	No	ns	-33.62 to 38.22
HM1 30°C vs HG2 30°C	7,300	1,006	No	ns	-28.62 to 43.22
HM1 30°C vs HS2 30°C	3,000	0,4134	No	ns	-32.92 to 38.92
HM1 30°C vs HM2 30°C	-0,5000	0,06889	No	ns	-36.42 to 35.42
HM1 30°C vs HF3 30°C	8,100	1,116	No	ns	-27.82 to 44.02
HM1 30°C vs HG3 30°C	7,100	0,9783	No	ns	-28.82 to 43.02
HM1 30°C vs HS3 30°C	7,200	0,9921	No	ns	-28.72 to 43.12
HM1 30°C vs HM3 30°C	9,000	1,240	No	ns	-26.92 to 44.92
HM1 30°C vs HF4 30°C	6,500	0,8956	No	ns	-29.42 to 42.42
HM1 30°C vs HG4 30°C	14,30	1,970	No	ns	-21.62 to 50.22
HM1 30°C vs HS4 30°C	7,700	1,061	No	ns	-28.22 to 43.62
HM1 30°C vs HM4 30°C	11,90	1,640	No	ns	-24.02 to 47.82
HF2 30°C vs HG2 30°C	5,000	0,6889	No	ns	-30.92 to 40.92
HF2 30°C vs HS2 30°C	0,7000	0,09645	No	ns	-35.22 to 36.62
HF2 30°C vs HM2 30°C	-2,800	0,3858	No	ns	-38.72 to 33.12
HF2 30°C vs HF3 30°C	5,800	0,7992	No	ns	-30.12 to 41.72
HF2 30°C vs HG3 30°C	4,800	0,6614	No	ns	-31.12 to 40.72
HF2 30°C vs HS3 30°C	4,900	0,6752	No	ns	-31.02 to 40.82
HF2 30°C vs HM3 30°C	6,700	0,9232	No	ns	-29.22 to 42.62
HF2 30°C vs HF4 30°C	4,200	0,5787	No	ns	-31.72 to 40.12
HF2 30°C vs HG4 30°C	12,00	1,653	No	ns	-23.92 to 47.92
HF2 30°C vs HS4 30°C	5,400	0,7441	No	ns	-30.52 to 41.32
HF2 30°C vs HM4 30°C	9,600	1,323	No	ns	-26.32 to 45.52

HG2 30°C vs HS2 30°C	-4,300	0,5925	No	ns	-40.22 to 31.62
HG2 30°C vs HM2 30°C	-7,800	1,075	No	ns	-43.72 to 28.12
HG2 30°C vs HF3 30°C	0,8000	0,1102	No	ns	-35.12 to 36.72
HG2 30°C vs HG3 30°C	-0,2000	0,02756	No	ns	-36.12 to 35.72
HG2 30°C vs HS3 30°C	-0,1000	0,01378	No	ns	-36.02 to 35.82
HG2 30°C vs HM3 30°C	1,700	0,2342	No	ns	-34.22 to 37.62
HG2 30°C vs HF4 30°C	-0,8000	0,1102	No	ns	-36.72 to 35.12
HG2 30°C vs HG4 30°C	7,000	0,9645	No	ns	-28.92 to 42.92
HG2 30°C vs HS4 30°C	0,4000	0,05512	No	ns	-35.52 to 36.32
HG2 30°C vs HM4 30°C	4,600	0,6338	No	ns	-31.32 to 40.52
HS2 30°C vs HM2 30°C	-3,500	0,4823	No	ns	-39.42 to 32.42
HS2 30°C vs HF3 30°C	5,100	0,7027	No	ns	-30.82 to 41.02
HS2 30°C vs HG3 30°C	4,100	0,5649	No	ns	-31.82 to 40.02
HS2 30°C vs HS3 30°C	4,200	0,5787	No	ns	-31.72 to 40.12
HS2 30°C vs HM3 30°C	6,000	0,8267	No	ns	-29.92 to 41.92
HS2 30°C vs HF4 30°C	3,500	0,4823	No	ns	-32.42 to 39.42
HS2 30°C vs HG4 30°C	11,30	1,557	No	ns	-24.62 to 47.22
HS2 30°C vs HS4 30°C	4,700	0,6476	No	ns	-31.22 to 40.62
HS2 30°C vs HM4 30°C	8,900	1,226	No	ns	-27.02 to 44.82
HM2 30°C vs HF3 30°C	8,600	1,185	No	ns	-27.32 to 44.52
HM2 30°C vs HG3 30°C	7,600	1,047	No	ns	-28.32 to 43.52
HM2 30°C vs HS3 30°C	7,700	1,061	No	ns	-28.22 to 43.62
HM2 30°C vs HM3 30°C	9,500	1,309	No	ns	-26.42 to 45.42
HM2 30°C vs HF4 30°C	7,000	0,9645	No	ns	-28.92 to 42.92
HM2 30°C vs HG4 30°C	14,80	2,039	No	ns	-21.12 to 50.72
HM2 30°C vs HS4 30°C	8,200	1,130	No	ns	-27.72 to 44.12
HM2 30°C vs HM4 30°C	12,40	1,709	No	ns	-23.52 to 48.32
HF3 30°C vs HG3 30°C	-1,000	0,1378	No	ns	-36.92 to 34.92
HF3 30°C vs HS3 30°C	-0,9000	0,1240	No	ns	-36.82 to 35.02
HF3 30°C vs HM3 30°C	0,9000	0,1240	No	ns	-35.02 to 36.82
HF3 30°C vs HF4 30°C	-1,600	0,2205	No	ns	-37.52 to 34.32
HF3 30°C vs HG4 30°C	6,200	0,8543	No	ns	-29.72 to 42.12
HF3 30°C vs HS4 30°C	-0,4000	0,05512	No	ns	-36.32 to 35.52
HF3 30°C vs HM4 30°C	3,800	0,5236	No	ns	-32.12 to 39.72
HG3 30°C vs HS3 30°C	0,1000	0,01378	No	ns	-35.82 to 36.02
HG3 30°C vs HM3 30°C	1,900	0,2618	No	ns	-34.02 to 37.82
HG3 30°C vs HF4 30°C	-0,6000	0,08267	No	ns	-36.52 to 35.32
HG3 30°C vs HG4 30°C	7,200	0,9921	No	ns	-28.72 to 43.12
HG3 30°C vs HS4 30°C	0,6000	0,08267	No	ns	-35.32 to 36.52
HG3 30°C vs HM4 30°C	4,800	0,6614	No	ns	-31.12 to 40.72
HS3 30°C vs HM3 30°C	1,800	0,2480	No	ns	-34.12 to 37.72
HS3 30°C vs HF4 30°C	-0,7000	0,09645	No	ns	-36.62 to 35.22
HS3 30°C vs HG4 30°C	7,100	0,9783	No	ns	-28.82 to 43.02
HS3 30°C vs HS4 30°C	0,5000	0,06889	No	ns	-35.42 to 36.42
HS3 30°C vs HM4 30°C	4,700	0,6476	No	ns	-31.22 to 40.62
HM3 30°C vs HF4 30°C	-2,500	0,3445	No	ns	-38.42 to 33.42
HM3 30°C vs HG4 30°C	5,300	0,7303	No	ns	-30.62 to 41.22
HM3 30°C vs HS4 30°C	-1,300	0,1791	No	ns	-37.22 to 34.62
HM3 30°C vs HM4 30°C	2,900	0,3996	No	ns	-33.02 to 38.82
HF4 30°C vs HG4 30°C	7,800	1,075	No	ns	-28.12 to 43.72
HF4 30°C vs HS4 30°C	1,200	0,1653	No	ns	-34.72 to 37.12

HF4 30°C vs HM4 30°C	5,400	0,7441	No	ns	-30.52 to 41.32
HG4 30°C vs HS4 30°C	-6,600	0,9094	No	ns	-42.52 to 29.32
HG4 30°C vs HM4 30°C	-2,400	0,3307	No	ns	-38.32 to 33.52
HS4 30°C vs HM4 30°C	4,200	0,5787	No	ns	-31.72 to 40.12

Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) índice de concentración a 20 °C

(A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,5 °Brix; *ff* 167-194 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix; *ff* 171 m<sup>-1</sup>.

(B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,5 °Brix; *ff* 168-200 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,7 °Brix; *ff* 171 m<sup>-1</sup>.

(C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix; *ff* 179-254 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 6,3 °Brix; *ff* 254 m<sup>-1</sup>.

(D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,9 °Brix; *ff* 164-204 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,3 °Brix; *ff* 186 m<sup>-1</sup>.

Parameter					
Table Analyzed	ANOVA INDICE 20°C				
One-way analysis of variance					
P value	1,0000				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,0009105				
R squared	0,00009483				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	4,144				
P value	0,9972				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	0,01100	15	0,0007333		
Residual (within columns)	116,0	144	0,8054		
Total	116,0	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 20°C vs HG1 20°C	-0,02000	0,07047	No	ns	-1.425 to 1.385
HF1 20°C vs HS1 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HM1 20°C	-0,01000	0,03524	No	ns	-1.415 to 1.395
HF1 20°C vs HF1 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HF2 20°C	-0,02000	0,07047	No	ns	-1.425 to 1.385
HF1 20°C vs HF3 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HF4 20°C	-0,01000	0,03524	No	ns	-1.415 to 1.395
HF1 20°C vs HG1 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HG2 20°C	-0,02000	0,07047	No	ns	-1.425 to 1.385
HF1 20°C vs HG3 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HG4 20°C	-0,01000	0,03524	No	ns	-1.415 to 1.395
HF1 20°C vs HS1 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405
HF1 20°C vs HS2 20°C	-0,02000	0,07047	No	ns	-1.425 to 1.385
HF1 20°C vs HS3 20°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.405 to 1.405





HS1 20°C vs HS4 20°C	-0,01000	0,03524	No	ns	-1.415 to 1.395
HS2 20°C vs HS3 20°C	0,02000	0,07047	No	ns	-1.385 to 1.425
HS2 20°C vs HS4 20°C	0,01000	0,03524	No	ns	-1.395 to 1.415
HS3 20°C vs HS4 20°C	-0,01000	0,03524	No	ns	-1.415 to 1.395



Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) índice de concentración a 25 °C

- (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,3 °Brix; *ff* 177-195 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,6 °Brix; *ff* 178 m<sup>-1</sup>.  
 (B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,2 °Brix; *ff* 166-188 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,9 °Brix; *ff* 166 m<sup>-1</sup>.  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,6 °Brix; *ff* 172-194 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 5,8 °Brix; *ff* 194 m<sup>-1</sup>.  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 8,6 °Brix; *ff* 181-226 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,8 °Brix; *ff* 181 m<sup>-1</sup>

Parameter					
Table Analyzed	ANOVAINDICE 25 °C				
One-way analysis of variance					
P value	1,0000				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,002390				
R squared	0,0002489				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	0,7014				
P value	1,0000				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	0,03194	15	0,002129		
Residual (within columns)	128,3	144	0,8907		
Total	128,3	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 25°C vs HG1 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HF1 25°C vs HS1 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HF1 25°C vs HM1 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HF1 25°C vs HF2 25°C	0,03000	0,1005	No	ns	-1.447 to 1.507
HF1 25°C vs HG2 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF1 25°C vs HS2 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HF1 25°C vs HM2 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HF1 25°C vs HF3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HF1 25°C vs HG3 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HF1 25°C vs HS3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HF1 25°C vs HM3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HF1 25°C vs HF4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477

HF1 25°C vs HG4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HF1 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF1 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HG1 25°C vs HS1 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG1 25°C vs HM1 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HG1 25°C vs HF2 25°C	0,03000	0,1005	No	ns	-1.447 to 1.507
HG1 25°C vs HG2 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HG1 25°C vs HS2 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG1 25°C vs HM2 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HG1 25°C vs HF3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG1 25°C vs HG3 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HG1 25°C vs HS3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HG1 25°C vs HM3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HG1 25°C vs HF4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HG1 25°C vs HG4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HG1 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HG1 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HS1 25°C vs HM1 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HS1 25°C vs HF2 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HS1 25°C vs HG2 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HS1 25°C vs HS2 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS1 25°C vs HM2 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HS1 25°C vs HF3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS1 25°C vs HG3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HS1 25°C vs HS3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS1 25°C vs HM3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS1 25°C vs HF4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS1 25°C vs HG4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS1 25°C vs HS4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HS1 25°C vs HM4 25°C	-0,04000	0,1340	No	ns	-1.517 to 1.437
HM1 25°C vs HF2 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HM1 25°C vs HG2 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HM1 25°C vs HS2 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HM1 25°C vs HM2 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HM1 25°C vs HF3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HM1 25°C vs HG3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HM1 25°C vs HS3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM1 25°C vs HM3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM1 25°C vs HF4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM1 25°C vs HG4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM1 25°C vs HS4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HM1 25°C vs HM4 25°C	-0,05000	0,1675	No	ns	-1.527 to 1.427
HF2 25°C vs HG2 25°C	-0,04000	0,1340	No	ns	-1.517 to 1.437
HF2 25°C vs HS2 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HF2 25°C vs HM2 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF2 25°C vs HF3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HF2 25°C vs HG3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF2 25°C vs HS3 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HF2 25°C vs HM3 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HF2 25°C vs HF4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HF2 25°C vs HG4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447

HF2 25°C vs HS4 25°C	-0,04000	0,1340	No	ns	-1.517 to 1.437
HF2 25°C vs HM4 25°C	-0,06000	0,2010	No	ns	-1.537 to 1.417
HG2 25°C vs HS2 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HG2 25°C vs HM2 25°C	0,03000	0,1005	No	ns	-1.447 to 1.507
HG2 25°C vs HF3 25°C	0,02000	0,06701	No	ns	-1.457 to 1.497
HG2 25°C vs HG3 25°C	0,03000	0,1005	No	ns	-1.447 to 1.507
HG2 25°C vs HS3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG2 25°C vs HM3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG2 25°C vs HF4 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG2 25°C vs HG4 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HG2 25°C vs HS4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HG2 25°C vs HM4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HS2 25°C vs HM2 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HS2 25°C vs HF3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS2 25°C vs HG3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HS2 25°C vs HS3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS2 25°C vs HM3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS2 25°C vs HF4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS2 25°C vs HG4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS2 25°C vs HS4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HS2 25°C vs HM4 25°C	-0,04000	0,1340	No	ns	-1.517 to 1.437
HM2 25°C vs HF3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HM2 25°C vs HG3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HM2 25°C vs HS3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM2 25°C vs HM3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM2 25°C vs HF4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM2 25°C vs HG4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HM2 25°C vs HS4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HM2 25°C vs HM4 25°C	-0,05000	0,1675	No	ns	-1.527 to 1.427
HF3 25°C vs HG3 25°C	0,01000	0,03351	No	ns	-1.467 to 1.487
HF3 25°C vs HS3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF3 25°C vs HM3 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF3 25°C vs HF4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF3 25°C vs HG4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF3 25°C vs HS4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HF3 25°C vs HM4 25°C	-0,04000	0,1340	No	ns	-1.517 to 1.437
HG3 25°C vs HS3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HG3 25°C vs HM3 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HG3 25°C vs HF4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HG3 25°C vs HG4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457
HG3 25°C vs HS4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HG3 25°C vs HM4 25°C	-0,05000	0,1675	No	ns	-1.527 to 1.427
HS3 25°C vs HM3 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS3 25°C vs HF4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS3 25°C vs HG4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HS3 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HS3 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HM3 25°C vs HF4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HM3 25°C vs HG4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HM3 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HM3 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447

HF4 25°C vs HG4 25°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.477 to 1.477
HF4 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HF4 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HG4 25°C vs HS4 25°C	-0,01000	0,03351	No	ns	-1.487 to 1.467
HG4 25°C vs HM4 25°C	-0,03000	0,1005	No	ns	-1.507 to 1.447
HS4 25°C vs HM4 25°C	-0,02000	0,06701	No	ns	-1.497 to 1.457

Resultados estadísticos (ANOVA, BARTLETT, TUKEY) índice de concentración a 30 °C

- (A) Etapa 1 *f, g, s*, SMFI 1,4 °Brix; *ff* 167-190 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 1,5 °Brix; *ff* 177 m<sup>-1</sup>.  
 (B) Etapa 2 *f,g,s*, SMFI 3,3 °Brix; *ff* 172-197 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 3,6 °Brix; *ff* 160 m<sup>-1</sup>.  
 (C) Etapa 3 *f, g, s*, SMFI 5,7 °Brix; *ff* 179-200 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 6,6 °Brix; *ff* 179 m<sup>-1</sup>.  
 (D) Etapa 4 *f, g, s*, SMFI 7,8 °Brix; *ff* 172-204 m<sup>-1</sup>; SMFI melocotón (*s*): 8,2 °Brix; *ff* 195 m<sup>-1</sup>

Parameter					
Table Analyzed	ANOVAINDICE 30 °C				
One-way analysis of variance					
P value	1,0000				
P value summary	ns				
Are means signif. different? (P < 0.05)	No				
Number of groups	16				
F	0,001894				
R squared	0,0001972				
Bartlett's test for equal variances					
Bartlett's statistic (corrected)	2,587				
P value	0,9998				
P value summary	ns				
Do the variances differ signif. (P < 0.05)	No				
ANOVA Table	SS	df	MS		
Treatment (between columns)	0,02175	15	0,001450		
Residual (within columns)	110,3	144	0,7658		
Total	110,3	159			
Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
HF1 30°C vs HG1 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF1 30°C vs HS1 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF1 30°C vs HM1 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF1 30°C vs HF2 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF1 30°C vs HG2 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HF1 30°C vs HS2 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF1 30°C vs HM2 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HF1 30°C vs HF3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HF1 30°C vs HG3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HF1 30°C vs HS3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HF1 30°C vs HM3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HF1 30°C vs HF4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390



HF2 30°C vs HS4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HF2 30°C vs HM4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HG2 30°C vs HS2 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HG2 30°C vs HM2 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HG2 30°C vs HF3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HG2 30°C vs HG3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HG2 30°C vs HS3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HG2 30°C vs HM3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HG2 30°C vs HF4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HG2 30°C vs HG4 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HG2 30°C vs HS4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HG2 30°C vs HM4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HS2 30°C vs HM2 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HS2 30°C vs HF3 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HS2 30°C vs HG3 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HS2 30°C vs HS3 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HS2 30°C vs HM3 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HS2 30°C vs HF4 30°C	0,03000	0,1084	No	ns	-1.340 to 1.400
HS2 30°C vs HG4 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HS2 30°C vs HS4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HS2 30°C vs HM4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HM2 30°C vs HF3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HM2 30°C vs HG3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HM2 30°C vs HS3 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HM2 30°C vs HM3 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HM2 30°C vs HF4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HM2 30°C vs HG4 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HM2 30°C vs HS4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HM2 30°C vs HM4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HF3 30°C vs HG3 30°C	-0,03000	0,1084	No	ns	-1.400 to 1.340
HF3 30°C vs HS3 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HF3 30°C vs HM3 30°C	-0,03000	0,1084	No	ns	-1.400 to 1.340
HF3 30°C vs HF4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HF3 30°C vs HG4 30°C	-0,03000	0,1084	No	ns	-1.400 to 1.340
HF3 30°C vs HS4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HF3 30°C vs HM4 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HG3 30°C vs HS3 30°C	0,03000	0,1084	No	ns	-1.340 to 1.400
HG3 30°C vs HM3 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HG3 30°C vs HF4 30°C	0,04000	0,1445	No	ns	-1.330 to 1.410
HG3 30°C vs HG4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HG3 30°C vs HS4 30°C	0,03000	0,1084	No	ns	-1.340 to 1.400
HG3 30°C vs HM4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HS3 30°C vs HM3 30°C	-0,03000	0,1084	No	ns	-1.400 to 1.340
HS3 30°C vs HF4 30°C	0,01000	0,03614	No	ns	-1.360 to 1.380
HS3 30°C vs HG4 30°C	-0,03000	0,1084	No	ns	-1.400 to 1.340
HS3 30°C vs HS4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HS3 30°C vs HM4 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HM3 30°C vs HF4 30°C	0,04000	0,1445	No	ns	-1.330 to 1.410
HM3 30°C vs HG4 30°C	0,0000	0,0000	No	ns	-1.370 to 1.370
HM3 30°C vs HS4 30°C	0,03000	0,1084	No	ns	-1.340 to 1.400
HM3 30°C vs HM4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390

HF4 30°C vs HG4 30°C	-0,04000	0,1445	No	ns	-1.410 to 1.330
HF4 30°C vs HS4 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360
HF4 30°C vs HM4 30°C	-0,02000	0,07227	No	ns	-1.390 to 1.350
HG4 30°C vs HS4 30°C	0,03000	0,1084	No	ns	-1.340 to 1.400
HG4 30°C vs HM4 30°C	0,02000	0,07227	No	ns	-1.350 to 1.390
HS4 30°C vs HM4 30°C	-0,01000	0,03614	No	ns	-1.380 to 1.360



## ANEXO D.

Root Mean Square (R.M.S) de tiempos totales a 20 °C

Valido para  $ff$  entre 164 y 254, ( $m^{-1}$ ), SMFI entre 1.3 y 8.4 °Brix, y temperatura de 20 °C

Tiempo exp. (V <sub>EXP</sub> )      Tiempo Pred. (V <sub>PRED</sub> )					RMS
X	Y	Y-X	(Y-X)/X	((Y-X)/X) <sup>2</sup>	
115,8	130,2	14,35	0,12	0,0154	
139,4	120,2	-19,17	-0,14	0,0189	
154,9	140,0	-14,89	-0,10	0,0092	
112,8	131,9	19,11	0,17	0,0287	
105,7	114,1	8,38	0,08	0,0063	
97,1	108,9	11,82	0,12	0,0148	
112,0	112,2	0,18	0,00	0,0000	
108,6	110,1	1,49	0,01	0,0002	
92,0	80,9	-11,08	-0,12	0,0145	
106,9	107,2	0,30	0,00	0,0000	
80,8	89,7	8,89	0,11	0,0121	
115,9	109,6	-6,30	-0,05	0,0030	
1342,0	1355,1		SUMA((Y-X)/X) <sup>2</sup>	0,0103	<b>10,1</b>

Root Mean Square (R.M.S) de tiempos totales a 25 °C

Valido para  $ff$  entre 172 y 226, ( $m^{-1}$ ), SMFI entre 1.0 y 9.0 °Brix y temperatura de 25 °C.

Tiempo exp. (V <sub>EXP</sub> )      Tiempo Pred. (V <sub>PRED</sub> )					RMS
X	Y	Y-X	Y-X/X	(Y-X/X) <sup>2</sup>	
114,43	109,47	-4,96	-0,04	0,0019	
111,60	115,45	3,85	0,03	0,0012	
106,64	106,25	-0,39	0,00	0,0000	
105,65	110,83	5,18	0,05	0,0024	
101,88	100,87	-1,01	-0,01	0,0001	
103,76	100,84	-2,92	-0,03	0,0008	
96,13	100,38	4,25	0,04	0,0020	
86,82	94,62	7,80	0,09	0,0081	
99,31	92,56	-6,75	-0,07	0,0046	
62,13	64,50	2,37	0,04	0,0015	
73,20	72,48	-0,716	-0,010	0,0001	
78,77	75,31	-3,46	-0,04	0,0019	
1140,32	1143,56		SUMA((Y-X)/X) <sup>2</sup>	0,0020	<b>4,5</b>

Root Mean Square (R.M.S) de tiempos totales a 30 °C

Valido para  $ff$  entre 165 y 204, ( $m^{-1}$ ), SMFI entre 1,1 y 8,5 °Brix y temperatura de 25 °C.

Tiempo exp. (V <sub>EXP</sub> )      Tiempo Pred. (V <sub>PRED</sub> )					RMS
X	Y	Y-X	Y-X/X	(Y-X/X) <sup>2</sup>	
98,32	98,22	-0,10	0,00	0,0000	
94,98	94,74	-0,24	0,00	0,0000	
115,22	107,17	-8,05	-0,07	0,0049	
92,55	94,09	1,54	0,02	0,0003	
76,50	83,56	7,06	0,09	0,0085	
91,26	95,39	4,13	0,05	0,0020	
80,99	84,50	3,51	0,04	0,0019	
86,00	89,60	3,60	0,04	0,0017	
77,88	75,45	-2,43	-0,03	0,0010	
76,30	76,89	0,59	0,01	0,0001	
64,80	66,20	1,403	0,022	0,0005	
82,75	75,85	-6,90	-0,08	0,0070	
1037,55	1041,64		SUMA((Y-X/X) <sup>2</sup> )	0,0023	<b>4,8</b>

Root Mean Square (R.M.S) de indice de concentracion de la 4 etapa del proceso de crioconcentración para soluciones de  $f$ ,  $g$ ,  $s$ , ( $ff = 187 m^{-1}$ , 7,7 °Brix, 30 °C) y para el zumo de melocotón simulado ( $s$ ) ( $ff = 195 m^{-1}$ , 8,2 °Brix, 30 °C)

Tiempo exp. (V <sub>EXP</sub> ) MELOCOTÓN      Tiempo Pred. (V <sub>PRED</sub> ) MEDIA AZUCARES						RMS
X	Y	Y-X	(Y-X)/X	((Y-X)/X) <sup>2</sup>		
13,0	11,9	-1,08	-0,08	0,0070		
19,5	18,3	-1,24	-0,06	0,0040		
25,3	23,8	-1,53	-0,06	0,0037		
30,8	29,9	-0,94	-0,03	0,0009		
36,4	33,9	-2,47	-0,07	0,0046		
41,7	38,9	-2,75	-0,07	0,0044		
47,0	44,1	-2,84	-0,06	0,0037		
52,9	49,6	-3,29	-0,06	0,0039		
60,1	57,9	-2,20	-0,04	0,0013		
74,6	68,9	-5,72	-0,08	0,0059		
401,3	377,2		SUMA((Y-X/X) <sup>2</sup> )	0,0033	<b>5,7</b>	
68,9	74,6	RMS TIEMPOS TOTALES	0,006			<b>7,7</b>

Root Mean Square (R.M.S) de índice de concentración de la 4 etapa del proceso de crioconcentración para soluciones de *f*, *g*, *s*, ( $ff = 187 \text{ m}^{-1}$ , 7,7 °Brix, 30 °C) y para el zumo de melocotón simulado (*s*) ( $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ , 8,2 °Brix, 30 °C)

Tiempo exp. ( $V_{EXP}$ )		Tiempo Pred. ( $V_{PRED}$ )			RMS
X	Y	Y-X	Y-X/X	$(Y-X/X)^2$	
2,9	2,5	-0,43	-0,15	0,0220	<b>17,1</b>
2,1	2,0	-0,05	-0,02	0,0005	
1,6	1,6	0,01	0,01	0,0000	
1,2	1,3	0,06	0,05	0,0021	
1,0	1,1	0,09	0,09	0,0084	
0,7	0,8	0,19	0,29	0,0814	
0,4	0,5	0,13	0,36	0,1324	
0,2	0,2	0,05	0,26	0,0686	
0,1	0,1	0,00	-0,02	0,0002	
0,0	0,0	-0,01	-0,19	0,0349	
10,1	10,1	SUMA((Y-X/X) <sup>2</sup> )		0,0292	

## **ANEXO E. ARTICULOS PUBLICADOS**

# Food Science and Technology International

<http://fst.sagepub.com/>

---

## **Multi-plate freeze concentration: Recovery of solutes occluded in the ice and determination of thawing time**

Rafael Gulfo, Josep M Auleda, Fabián Leonardo Moreno, Yolanda Ruiz, Eduard Hernández and Mercè Raventós  
*Food Science and Technology International* published online 19 June 2013  
DOI: 10.1177/1082013213489127

The online version of this article can be found at:  
<http://fst.sagepub.com/content/early/2013/06/18/1082013213489127>

---

Published by:



<http://www.sagepublications.com>

On behalf of:



[Consejo Superior de Investigaciones Científicas \(Spanish Council for Scientific Research\)](#)

**Additional services and information for *Food Science and Technology International* can be found at:**

**Email Alerts:** <http://fst.sagepub.com/cgi/alerts>

**Subscriptions:** <http://fst.sagepub.com/subscriptions>

**Reprints:** <http://www.sagepub.com/journalsReprints.nav>

**Permissions:** <http://www.sagepub.com/journalsPermissions.nav>

>> [OnlineFirst Version of Record](#) - Jun 19, 2013

[What is This?](#)



# Multi-plate freeze concentration: Recovery of solutes occluded in the ice and determination of thawing time

Rafael Gulfo<sup>1</sup>, Josep M Auleda<sup>1</sup>, Fabián Leonardo Moreno<sup>2</sup>, Yolanda Ruiz<sup>2</sup>, Eduard Hernández<sup>1</sup> and Mercè Raventós<sup>1</sup>

## Abstract

The retention of solutes in the ice formed in a falling-film freeze concentrator (multi-plate freeze-concentrator) was analysed. Solutions of fructose, glucose and sucrose and a simulated juice with initial concentrations of 5, 10, 15 and 20 °Brix were freeze concentrated. The ice produced in the four steps of the process retains solutes at levels of 1.0–8.8 °Brix (expressed as solute mass fraction in the ice). The recovery of these solutes during thawing can increase overall system efficiency. All thawing steps were carried out dividing the sample in 10 fractions at 20 °C. The first thawed fractions showed solute concentrations that were 1.9–3.3 times higher than the mean solute mass fraction in the ice, while the last fractions of ice showed very low levels of retained solutes, less than 0.2 times the mean solute mass fraction in the ice. It was found that fractionated thawing can recover most of the solute content in the ice. The procedure presented in the present study allows the determination of the solute concentration achieved in the various thawing fractions and predicts the thawing time required for a given form factor, melting temperature and initial solute mass fraction in the ice.

## Keywords

Stages of concentration, form factor, concentration index, ice concentration, fractionated thawing

Date received: 11 December 2012; revised: 8 April 2013

## INTRODUCTION

Freeze concentration is a method to separate soluble solids from an aqueous solution by freezing part of the water present in the liquid. This technology is very suitable for the food industry, because it preserves the nutritional quality of the product and retains volatile aromatic compounds.

According to literature (Chen et al., 1998; Flesland, 1995; Miyawaki, 2001; Müller and Sekoulov 1992; Sánchez et al., 2011; Yee et al., 2003), there are various basic methods for ice-crystal formation in solutions: suspension freeze concentration, layer freeze concentration and block freeze concentration (or freeze-thaw concentration). These names originate from the

mechanisms used for the formation of ice crystals in the process:

Freeze concentration processes used industrially are currently all based on suspension freeze concentration. This process uses scraped-surface heat exchangers (SSHE) to generate ice nuclei, recrystallisers to increase the growth of the ice crystals and pressurised wash columns to separate the ice from the concentrated liquid. The concentration reached with this system is between 45 and 55 °Brix (Lee and Leem, 1998; Van Weelden, 1994). To reduce SSHE costs, Habid and Farid (2006) suggest the use of a liquid-solid fluidized bed instead of

<sup>1</sup>Agri-Food Engineering and Biotechnology Department, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain

<sup>2</sup>Agroindustrial Process Engineering, Universidad de La Sabana, Chia, Colombia

### Corresponding author:

Mercè Raventós, Agri-Food Engineering and Biotechnology Department, Technical University of Catalonia (UPC), C/Esteve Terradas, 8, 08860 Castelldefels, Barcelona, Spain.

Email: merce.raventos@upc.edu

an SSHE and Otero et al. (2012) suggest increasing the pressure in nucleation stage.

Block freeze concentration, or freeze-thaw concentration, consists of the freezing of the product that is to be concentrated (liquid foods) and thawing while dividing the obtained liquid in various fractions: the first fractions are found to be concentrated (corresponding to high solute mass fractions in the ice) and the later fractions are found to be diluted (Miyawaki et al., 2012; Moreno et al., 2013; Nakagawa et al., 2009; Yee et al., 2003).

Repeating this process with the more concentrated fractions, one is increasingly concentrating the liquid (Aider et al., 2008). This technique may be of interest for recovery of the solutes retained in the ice in the process of layer freeze concentration.

Layer freeze concentration consists of the formation of a single ice crystal, which grows on a cold surface that is in direct contact with the solution to be concentrated. Two processes of layer freeze concentration have been described: progressive freeze-concentration (PFC), with ice formation on a tubular or cylindrical surface (Miyawaki et al., 1998) and multi-plate freeze-concentration, with ice formation on a rectangular plate.

Various researchers have described possible industrial applications of layer freeze concentration (Flesland, 1995; Rane, 2005) and various studies on pilot scale have been reported (Hernández et al., 2010; Raventós et al., 2007; Sánchez et al., 2010). This technology can reach concentrations of 28–35 °Brix for liquids of interest for the food industry.

The basis of this concentration method is the formation of ice with high purity. Flesland (1995) and Chen et al. (1998) studied the solute inclusion in the ice during freezing and they conclude that it depends on various factors such as mass transfer in the film layer, the temperature at the solid-liquid interface and the freezing point (which depends on the concentration). Bruin and Jongen (2003) indicate that in sugar solutions and in liquid foods with relatively high sub-cooling, the ice crystals grow in the dendritic form, which favours solute retention (Hernández et al., 2009; Raventós et al., 2007; Sánchez et al., 2009). In layer freeze concentration, the most important crystal form is the dendrite (Pardo et al., 2002).

Miyawaki et al. (2012) studied solute recovery in PFC by partial melting of ice. Nevertheless, no studies have been published yet on solute recovery in multi-plate freeze concentrators. Sánchez et al. (2009) suggest that combining film freeze concentration with fractionated thawing can increase the overall yield of the process, because the solutes trapped in the ice can be recovered. The solid matrix and the distribution of solutes in the ice are different for the multi-plate

freeze-concentrator of the present work than for other systems, such as block freeze concentration (freeze-thaw concentration) and progressive freeze concentration.

The aim of the present work was to quantify both the recovery of solutes retained in the ice and the thawing rate, when using fractionated thawing. The procedure described in this study allows to determine the solute concentrations achieved at different thawing fractions and to predict the thawing time and its relation with volume and concentration index.

## MATERIALS AND METHODS

### Sugars and model solution for peach juice

The following sugars were used:

- Fructose (f): D(–) fructose, crystalline white, 99%, (natural sugar from fruit, Diet Rádison Pagesa, Spain).
- Glucose (g): D + Glucose Anhydrous, extra pure, Ph, Eur, USP, BP (GL01251000, synthetic product, Scharlau, Spain).
- Saccharose (s): commercial crystalline white sugar; ( $\alpha$ -D-glucopiranosil  $\beta$ -D-fructofuranòsid; saccharose, cane sugar, Azucarera, Spain).

A model solution for peach juice was prepared, based on the weight percentages (w/w) of basic sugars (f, g and s) obtained from high-performance liquid chromatography (HPLC) analysis of peach juice (Auleda et al., 2011a). This simulated peach juice was prepared at various concentrations.

### Analytical determinations of sugar solutions

**Solute concentration.** The concentration of soluble solids, expressed as °Brix, was measured with an Atago refractometer (model DBX-55; Japan), with an accuracy of  $\pm 0.1$  and measurement range of 0–55 °Brix. Measurements were performed at a temperature of  $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$ .

**Weighing.** The following instruments were used.

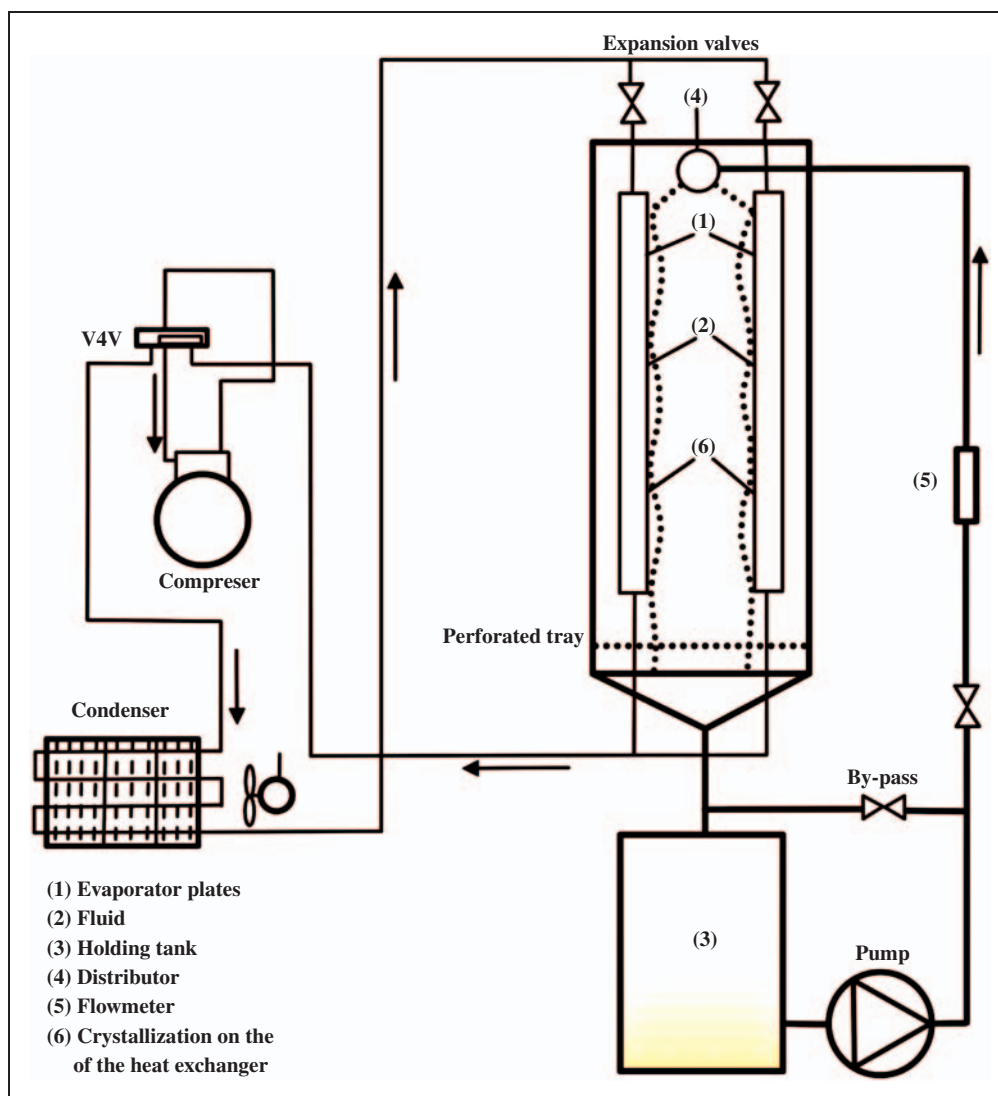
- A digital scale (GRAM: Model APS – 60, with an accuracy of  $\pm 20$  g and a measurement range of 0.2–60 kg) was used for weighing the ice layers obtained in the process of freeze concentration.
- An other digital scale (KERN: Model W 109887, with an accuracy of  $\pm 0.01$  g and a measurement range of 1–1210 g) was used for weighing the samples during the fractionated thawing.

**Experimental equipment for multi-plate freeze concentration**

In this experiment, the equipment (Figure 1) comprises a freezer unit of two evaporator plates (1) laid out vertically, each one formed in turn by two welded plates. Inside, the plates are welded at several points so that the refrigerant R-507 circulates through them following a zigzag path. Each of the two plates measures 800 mm by 600 mm.

On the outside of the plates, the liquid food to be concentrated flows in a descending film (2) after being pumped by the hydraulic system from the holding tank (3) and being distributed by means of a distributor (4) with small-diameter perforations of 2 mm.

In order to maintain a flow that ensures adequate fluid contact with the evaporator plates, the hydraulic system contains an electromagnetic flowmeter (5) (ISOIL; Model MS501 of stainless steel for fluids with conductivity over  $5 \mu\text{S/cm}$ , with an accuracy of  $\pm 0.4\%$  and a measurement range of 0.14–3.47 L/s, Cinisello Balsamo-Italy). The freezing system of this equipment has a compressor model TFH4531Z by Unité Hermétique (Tecumseh Europe, La Verpilliere, France), of the piston alternative volumetric type, with single effect, one stage, and with vertical cylinders, since the motor shaft and the crankshaft of the compressor are on the same axis. The model used in this experiment was a hermetic compressor run by a three-phase 230/400 V, 50 Hz. Using the primary refrigerant



**Figure 1.** Schematic layout of freeze concentration unit.



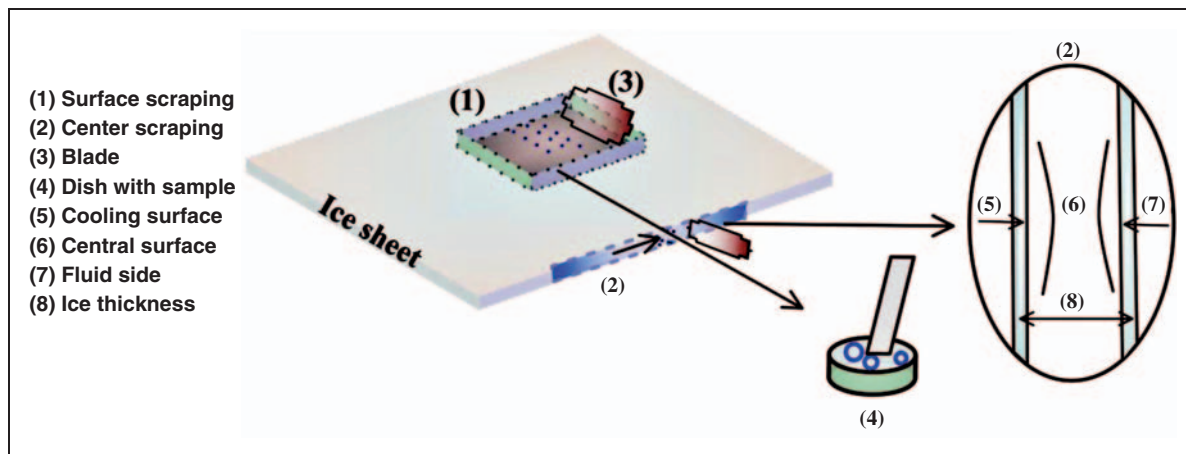


Figure 2. Sample taking of the three zones of the ice layer.

R-507, the caloric power or output of the compressor will depend on the evaporation and condensation temperature of the refrigerant fluid.

The liquid food is chilled and then returns to the holding tank by gravity to be circulated again. An exchange of heat occurs between the refrigerant and the liquid food (the liquid food loses heat to the refrigerant and the refrigerant evaporates). This heat exchange takes place through the walls of a plate heat exchanger and this produces layer crystallization in which the ice forms thin layers on the surface of the heat exchanger (6). The ice sheets obtained by freeze concentration measure 750 mm × 550 mm and have a thickness between 10 and 20 mm, with thickness varying according to the concentration value that is obtained in the specific concentration step (Auleda, et al., 2011b).

### Freeze concentration tests

*Obtaining ice layers from the various stages of the freeze concentration process.* To obtain ice layers at various levels of dissolved solutes, four process stages were performed for solutions of the three basic sugars (f, g, s) and for the model peach juice. Initially for each basic sugar, 40 L of solution was prepared with distilled water at 5 °Brix. Freeze concentration was carried out until the desired ice layer was obtained. This was repeated for solutions at 10, 15 and 20 °Brix.

When the solid concentration in the liquid food reaches a pre-determined level, the pump is stopped and the concentrated liquid food flows out of the system by gravity. Then, the compressor is stopped and the ice layer is removed from the evaporator. The ice layer, so obtained, is characterized by determining its weight, its length, width and thickness and the concentration of solids present (measuring the °Brix after

thawing one fraction) and is then stored in a refrigerated room at -18 °C.

### Analysing the ice obtained from freeze concentration

- a. In order to determine the solute mass fraction in the ice (SMFI), defined as the amount of solutes occluded in the ice (Chen et al., 1998; Flesland, 1995), at the various growth stages of the ice, the layer was divided in three zones:

Zone 1. Surface in contact with evaporator.

Zone 2. Centre of ice layer.

Zone 3. Surface in contact with liquid.

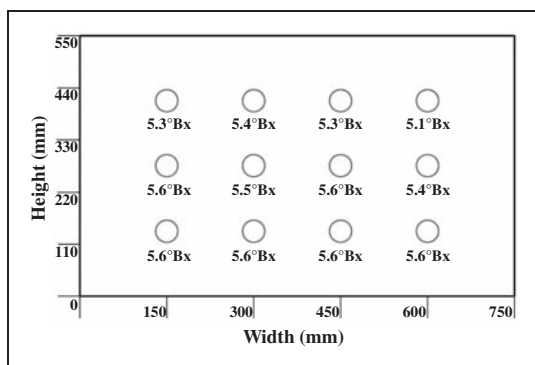
In each of these zones a number of scrapings was carried out, as indicated in Figure 2. The samples were taken in triplicate in an area of 30 mm × 120 mm. Afterward, the weight and width were determined. Finally, the concentration of each sample was measured by refractometry.

- b. In order to verify the similarity between the samples used in the melting studies and the ice sheet obtained from freeze concentration, the uniformity of the SMFI was investigated by analysing samples from various parts of the ice sheet.

Sample extractions were performed uniformly in evenly distributed points, creating a matrix of three rows by four columns. Extracted samples were thawed and their solute concentration (°Brix) was measured. The results are shown in Figure 3.

### Studies of fractionated thawing

*Obtaining samples and thawing.* The samples for the fractionated thawing studies were taken from the ice layers without removing them from the refrigerated



**Figure 3.** Distribution of solid inclusion in the ice layer formed on the cooling surface while freeze-concentrating an 18.2 °Brix sucrose solution.

room. Sample taking was performed by the use of a drill equipped with a ‘nipping tool’ (Esgarret, Spain) with a diameter of 60 mm. The obtained sample is a cylinder with a diameter of 60 mm and a thickness between 10 and 20 mm. Using a calliper slide, four measurements of the thickness were performed and their mean value was used to determine the form factor (*ff*), which is defined as the ratio *area/volume*.

By using a small drill, a hole of 0.5 mm diameter was made in the cylindrical samples, so that they could be hung on a thread within the oven used for thawing. The thawing was carried out in vertical position, similar to the position that the ice layers have in the freeze concentrator, as shown in Figure 4.

The oven used for thawing is cubical and measures 480 mm × 480 mm × 480 mm. It is placed on legs of 415 mm height. The walls are made of metal and are covered with a 3 mm layer of adhesive insulation material (based on isoprene with added resins and synthetic filling materials). The door is made of transparent methacrylate so that the sample can be observed during the test.

Heating of the oven is performed by resistances with power consumption of 40–300 W, regulated by a piezo-electric controller (Pie Electro Dit, model 11 551, 0–300 W), and a PTC/NTC temperature probe (Mundo central, OSAKA, measuring range from –50 to +150 °C). The oven is equipped with a four-channel data logger (Testo 177-T4, with display) for logging the temperature.

The oven is placed inside a refrigerated room of which the temperature is controlled at a value 5 °C below the temperature at which thawing is performed. The thawing is performed at 20 °C.

The dripping of the melting ice is collected by a funnel and is led to a test tube located on a balance which measures the weight. Moreover, the obtained liquid volume is recorded as function of melting time. Measurements are made in 10 fractions of equal weight.

**Relation of similarity: form factor (*ff*).** Melting these ice sheets as one piece in the oven is both physically impossible (the ice sheet does not fit in the oven) and undesirable (there is a need to do various thawing tests with the same ice sheet). Therefore, it is important to have smaller samples that are related to the ice sheets obtained in the freeze concentrator by a rule of geometric similarity, the form factor *ff* defined in equation (1) was used:

$$ff = \frac{S}{V} \tag{1}$$

in which *S* is the surface area (m<sup>2</sup>) and *V* is the volume (m<sup>3</sup>).

Applying equation (1) to the samples obtained with the procedure described in Section ‘Obtaining samples and thawing’, values of *ff* are obtained that range from 166 to 255 m<sup>-1</sup>.

These *ff* are similar to those of an ice plate 750 mm × 550 mm and 8–13 mm thick as they are shown in Table 1.

**Determination of root mean square and variation coefficient.**

- a. The root mean square (RMS) was used to compare the experimental values with the predicted values

$$RMS = 100 \% \sqrt{\frac{\sum \left( \frac{V_{EXP} - V_{PRED}}{V_{PRED}} \right)^2}{N}} \tag{2}$$

where *V<sub>EXP</sub>* and *V<sub>PRED</sub>* are, respectively, experimental values and predicted values, *N* is the number of available experimental points. The RMS was calculated using Excel software (Microsoft).

- b. The variation coefficient was used to analyze the variation of the samples of Figure 3.

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} 100 \tag{3}$$

where, *σ* is the standard deviation and *μ* the mean.

**Concentration index.** To analyze the concentrations achieved in the various fractions of thawing, the concentration index (Yee et al., 2003) is employed, which is defined as follows:

$$Concentration\ index = \frac{fraction\ concentration}{SMFI} \tag{4}$$

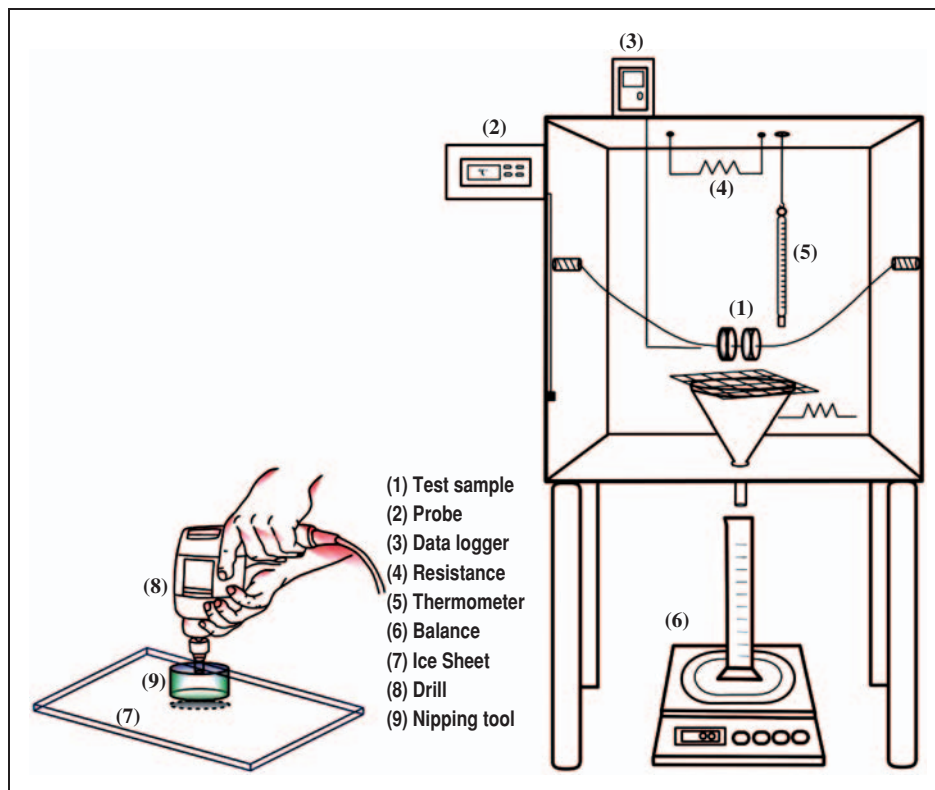


Figure 4. Collecting samples for thawing studies.

Table 1. *ff* of an ice sheet of 750 mm × 550 mm and thickness of 8–13 mm

Thickness (10 <sup>-3</sup> ) m	8	9	10	11	12	13
<i>ff</i> (m <sup>-1</sup> )	256.3	228.5	206.3	188.1	173.0	160.1

where concentration of the fraction is the value of the solute concentration in the thawed fraction expressed in °Brix.

**Rate of thawing.** The ratio between volume and time is defined as the rate of thawing (Yee et al., 2003)

$$v_{des} = \frac{V}{t} = \frac{M}{t\rho} \tag{5}$$

**Percentage of accumulated solutes.** The percentage of accumulated solutes is calculated using equation (6)

$$\% \text{ accumulated solutes} = 100 \times \frac{\text{mass of solute recovered up to the current fraction}}{\text{total mass of solutes}} \tag{6}$$

**Cumulative volume (CV).** The CV is calculated using equation (7)

$$CV (\%) = 100 \times \frac{\text{volume accumulated up to the current fraction}}{\text{volume initial solution}} \tag{7}$$

**Thawing time percentage (%).** Thawing time percentage is obtained from the relationship between the partial time of thawing of the samples with the total time.

The thawing time (%) was calculated using equation(8)

$$\text{Time} (\%) = 100 \times \frac{\text{time accumulate up the current fraction}}{\text{totaltime}} \tag{8}$$

**Density of the ice formed during the process.** The density of carbohydrates as function of temperature is given by equation (9) (Ibarz et al., 2005).

$$\rho_C = 1.5991 \cdot 10^3 - 0.31046 T \tag{9}$$

The density of ice as function of temperature is given by equation (10) (Ibarz et al., 2005)

$$\rho_I = 916.89 - 0.13071 T \tag{10}$$

A temperature value of  $-18^{\circ}\text{C}$  was inserted in equations (9) and (10) obtaining density values of 1604.68 and  $919.24\text{ kg m}^{-3}$ . These densities correspond to 100  $^{\circ}\text{Brix}$  and 0  $^{\circ}\text{Brix}$ , respectively. Finally, assuming a linear relation between density and concentration (in  $^{\circ}\text{Brix}$ ), from the two pairs of data ( $\rho_{CI}$ ,  $^{\circ}\text{Brix}$ ), (1604.68, 100) and (919.24, 0), the linear equation (11) was obtained.

$$\rho_{CI} = 6.84 Bx + 919.24 \quad (11)$$

**Determination of thawing time.** The form factor (equation 1) has been used by Isachenko et al. (1973) to describe results of his studies on heating and cooling of bodies, stating that the transfer of heat from a body depends on the ratio between the surface and volume. Moreover, investigations show that the greater the value of  $ff$ , the greater the heat flow and this is true for any Biot number.

The relation between time and  $ff$  was obtained as follows:

The heat flux absorbed by the ice is given by Newton's law

$$Q = \alpha S \Delta T \quad (12)$$

where

$$\Delta T = T_{\text{amb}} - T_{\text{thawing}}(^{\circ}\text{C}) \quad (13)$$

Assuming that the ice melts at  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{thawing}} = 0$  can be inserted, and thus:

$$\Delta T = T_{\text{amb}} \quad (14)$$

If the ambient temperature is maintained constant during the thawing, it can be assumed that  $\Delta T$  is constant  $\Delta T = k_T$  and that it has the value of the ambient temperature at which thawing is performed, in this case  $20^{\circ}\text{C}$ .

If the gas around the melting ice (air or inert gas), is in the same conditions throughout the process, it can be assumed that during thawing  $\alpha$  is constant  $\alpha = k_{\alpha}$ . It is also assumed that deviations between the main variables for the  $n$  fractions of thawing are small (assumed constant). Equation (12) can then be simplified to:

$$Q = k_{\alpha} k_T S \quad (15)$$

The heat of melting is given by the equation:

$$h = M H_{ice} \quad (16)$$

where  $M$  is mass of ice (kg) and  $H_{ice} = 333\text{ kJ kg}^{-1}$ , and the heat flow is ( $Q = h/t$ ):

$$Q = \frac{M H_{ice}}{t} (\text{W}) \quad (17)$$

Combining (15) and (17) and substituting  $M = V \rho_{CI}$  equation (18) was obtained:

$$k_{\alpha} k_T S = \frac{V \rho_{CI} H_{ice}}{t} \quad (18)$$

Substituting equation (1) in (18), this equation can be rewritten as:

$$t = \frac{\rho_{CI} H_{ice}}{K_{\alpha} K_T f f} \quad (19)$$

## RESULTS AND DISCUSSION

### Characterization of the ice obtained

Samples were taken from the various zones of the ice sheets obtained during freeze concentration, according to the procedure in described in 'Analysing the ice obtained from freeze concentration'. From each of the three zones (surface in contact with the evaporator, central area and surface in contact with the fluid), three samples were taken. The solid concentrations of these samples, measured by a refractometer, are shown in Table 2.

The ice in contact with the evaporator has a higher solute concentration than the SMFI. The high impurity of the ice is due to nucleation at high supercooling. These results were also observed by Scholz (1993). In the same way, the ice in contact with the fluid has a concentration greater than the SMFI, due to constitutional supercooling and the solute occlusion from the concentrated liquid in contact with the ice surface. Sánchez et al. (2011) suggest that the dendrite growth and solute occlusion in the ice are consequences of supercooling in the solid-liquid interface. Laari et al. (1990) presented a study with solutions of lactose and xylose and found that at concentrations higher than 3% w/w, the predominant factor in the growth of the crystals is the transfer of solutes near the ice surface. In the internal zone of the ice, the solute concentration is very similar to the SMFI. This can be attributed to the ice rate growth decreasing. This allows the solute movement to the ice front. Chen et al. (1998) reported that the ice growth rate decreases due to the ice width increasing.

### Uniformity of the SMFI sheets

The solute distribution in the ice sheet of a multi-plate freeze concentrator at  $18.2^{\circ}\text{Brix}$  is shown in Figure 3. The variation coefficient was calculated based on the SMFI values of the samples. A value of 0.47% was obtained. From the values reported by Chen et al. (1999), the variation coefficient was calculated,

**Table 2.** Solute concentration in various zones of an ice sheet with mean thickness of 0.6 mm (°Brix)

	Step 1 (°Bx)	Step 2 (°Bx)	Step 3 (°Bx)	Step 4 (°Bx)
Initial fluid concentration	5.0 ± 0.1	10.0 ± 0.1	15.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1
<b>Sucrose</b>				
Final fluid concentration	7.2 ± 0.1	12.4 ± 0.1	17.2 ± 0.1	22.2 ± 0.1
SMFI	1.0 ± 0.1	3.4 ± 0.1	5.8 ± 0.1	8.6 ± 0.1
Cooling surface side	2.3 (0.153)	7.6 (0.153)	9.3 (0.252)	10 (0.351)
Center	1.2 (0.153)	3.6 (0.200)	5.8 (0.153)	9.5 (0.252)
Fluid side	1.4 (0.058)	3.9 (0.252)	6.7 (0.200)	9.7 (0.351)
<b>Fructose</b>				
Final fluid concentration	6.5 ± 0.1	12.4 ± 0.1	18 ± 0.1	22.8 ± 0.1
SMFI	1.7 ± 0.1	2.4 ± 0.1	4.5 ± 0.1	8.8 ± 0.1
Cooling surface side	2.5 (0.153)	6.4 (0.252)	9.4 (0.252)	13.7 (0.351)
Center	1.4 (0.058)	3.9 (0.153)	6.5 (0.200)	8.8 (0.153)
Fluid side	1.9 (0.153)	4.4 (0.252)	7.5 (0.252)	6.0 (0.300)
<b>Glucose</b>				
Final fluid concentration	6.6 ± 0.1	12.8 ± 0.1	17.9 ± 0.1	23.4 ± 0.1
SMFI	1.2 ± 0.1	3.3 ± 0.1	5.6 ± 0.1	7.7 ± 0.1
Cooling surface side	2.9 (0.058)	6.7 (0.153)	11.9 (0.351)	16.8 (0.451)
Center	1.3 (0.058)	3.6 (0.100)	6.9 (0.200)	8.4 (0.252)
Fluid side	1.4 (0.100)	4.8 (0.351)	7.5 (0.252)	8.7 (0.351)
<b>Peach juice (s)</b>				
Final fluid concentration	6.6 ± 0.1	12.8 ± 0.1	17.9 ± 0.1	24.1 ± 0.1
SMFI	1.3 ± 0.1	3.0 ± 0.1	5.7 ± 0.1	7.8 ± 0.1
Cooling surface side	2.4 (0.100)	6.1 (0.153)	7.7 (0.252)	14.4 (0.351)
Center	1.4 (0.153)	3.9 (0.153)	6.2 (0.252)	8.8 (0.300)
Fluid side	1.6 (0.153)	4.0 (0.252)	7.0 (0.300)	11.1 (0.351)

SMFI: solute mass fraction in ice. Values in parentheses represent standard deviation.

obtaining a value of 0.33%. This value is comparable with the value obtained in the present study. The difference is attributed to difference in size of the ice sheets, 750 × 550 mm used in our study compared to 50 × 300 mm used by Chen et al. (1999).

**Relation between *ff*, °Brix and thawing time**

Equation (19) relates the time of thawing with the *ff*. By substituting the density as given by equation (10) in the above equation and by combining  $H_{ice}$ ,  $K_\alpha$  and  $K_T$  into  $K$ , the above equation becomes:

$$t = \frac{K(6.84 Bx + 918.2)}{ff} \tag{20}$$

Once the conditions of thawing have been chosen ( $T_{amb}$ , SMFI and *ff*), equation (20) enables us to determine the time needed for thawing.

The higher the *ff*, the lower the thawing time (note that high values of *ff* generally correspond with small ice sheet dimensions).

Table 3 summarises the fractionated thawing results for the ice sheets obtained from the four-process stages

of freeze concentration. The table shows mean results for experiments with the three sugars f, g and s. The SMFI and *ff* are shown, and thawing time, accumulated volume and concentration index are reported for each fraction of thawing. Two columns were added to the table with calculated data: the density of ice obtained with equation (11) and  $K$  ( $s \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ ) obtained with equation (21)

$$K = \frac{t \cdot ff}{(6.84 Bx + 918.2)} \tag{21}$$

Figure 5 shows how the constant  $K$ , given in Table 3, depends on the concentration (°Brix) in the various process stages.

It is clear from Figure 5 that  $K$  decreases with increasing concentration, and that this trend is well described by a linear trend. The best linear fit ( $R^2 = 0.81$ ) is given by equation (22).

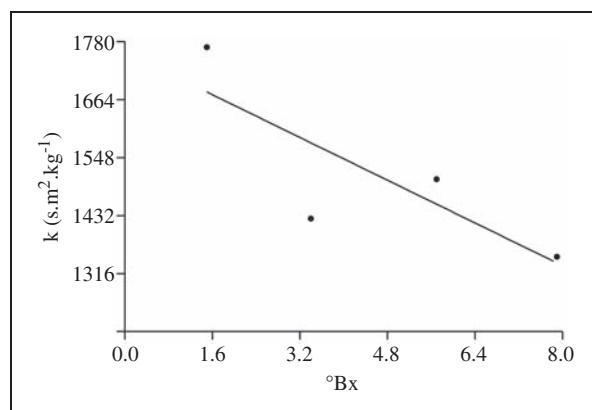
$$K = -53.4Bx + 1759.1(s \cdot m^2 \cdot kg^{-1}) \tag{22}$$



**Table 3.** SMFI, thawing time, accumulated volume, concentration index, ice density, and constant  $K$  for fractionated thawing of samples of ice sheets

Fraction of thawing	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\rho_{CI}$	$K$
SMFI (1.5°Bx), $ff$ 180 m <sup>-1</sup>											929.5	1768.5
Time (min)	37.75	49.10	60.09	69.55	80.05	90.73	101.69	113.42	127.16	154.25		
Cumulative mass (g)	9.3	18.6	27.9	37.3	46.6	55.9	65.4	74.8	84.1	94.8		
Concentration index	2.8	2.1	1.5	1.2	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1		
SMFI (3.4°Bx), $ff$ 189 m <sup>-1</sup>											942.4	1425.9
Time (min)	35.25	44.55	52.47	62.27	69.40	77.76	78.50	94.27	106.41	126.63		
Cumulative mass (g)	8.0	16.3	24.6	32.8	41.2	49.6	58.0	66.3	74.7	83.6		
Concentration index	2.9	2.0	1.6	1.3	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0		
SMFI (5.7°Bx), $ff$ 205 m <sup>-1</sup>											958.1	1504.6
Time (min)	34.37	43.52	51.37	58.83	66.57	74.08	81.94	90.41	100.37	118.73		
Cumulative mass (g)	7.5	15.3	23.0	30.9	38.7	46.6	54.6	62.6	70.7	79.8		
Concentration index	2.9	2.0	1.6	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0		
SMFI (7.9°Bx), $ff$ 183 m <sup>-1</sup>											973.1	1349.5
Time (min)	37.66	47.30	55.54	62.92	70.21	77.60	85.18	92.67	100.70	117.73		
Cumulative mass (g)	7.7	15.5	23.4	31.5	39.6	47.8	56.1	64.4	72.7	83.2		
Concentration index	2.9	2.0	1.6	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0		

SMFI: solute mass fraction in the ice. Values shown are mean values obtained for solutions of f, g and s grouped by the four process stages.



**Figure 5.** Constant  $K$  versus concentration of ice (°Brix).

Combining equations (20) and (22) gives equation (23) ( $t$  in minutes)

$$t = \frac{-6.1 Bx^2 - 613.6 Bx + 26920.1}{ff} \text{ (min)} \quad (23)$$

Equation (23) is obtained with the sugars (f, g and s) and is valid for concentrations of 1–8.5 °Brix and  $ff$  between 160 and 250 m<sup>-1</sup>, at a temperature of 20 °C.

To determine the quality of the fit made, equation (23) was used to determine the thawing time of the ice formed during freeze concentration of solutions of f, g and s and the model peach juice. The calculated values

were then compared with the experimental values and the obtained differences were expressed as RMS. Values obtained for RMS were between 12.2% and 21.8%, much lower than the 25% that Lewicki (2000) considers for acceptance of a fit.

Equation (23) shows that the thawing time decreases proportionally to the square of the concentration and that the thawing time is inversely proportional to  $ff$ .

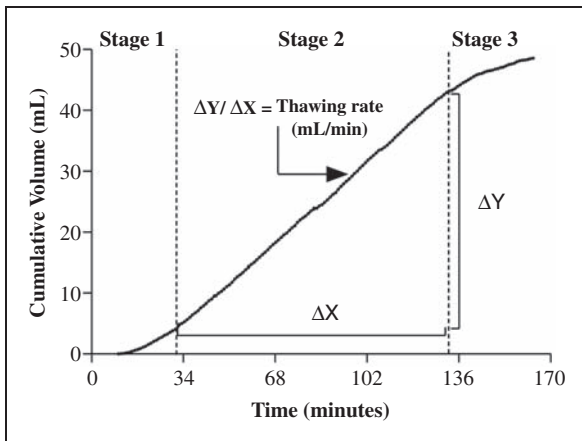
### Thawing rate

If the volume obtained is plotted versus the time of thawing, a graph such as Figure 6 is obtained, with similar characteristics for all thawing studies performed.

Thawing was performed as described in section ‘Obtaining samples and thawing’. It has been observed that when melting  $n$  samples with the same  $ff$ , (no contact between them), the thawing rate is  $n$  times greater than the thawing rate of a single sample and the thawing time of the set of  $n$  samples is the same as that obtained in the thawing of a single sample.

Figure 6 shows three periods of melting with the following thermal characteristics. The average thawing rate for each period is given by equation (5).

**First period:** This is a transitional regime which is characterized by a strong influence of the initial temperature. During this period, the temperature variation in the sample depends on the initial temperature.

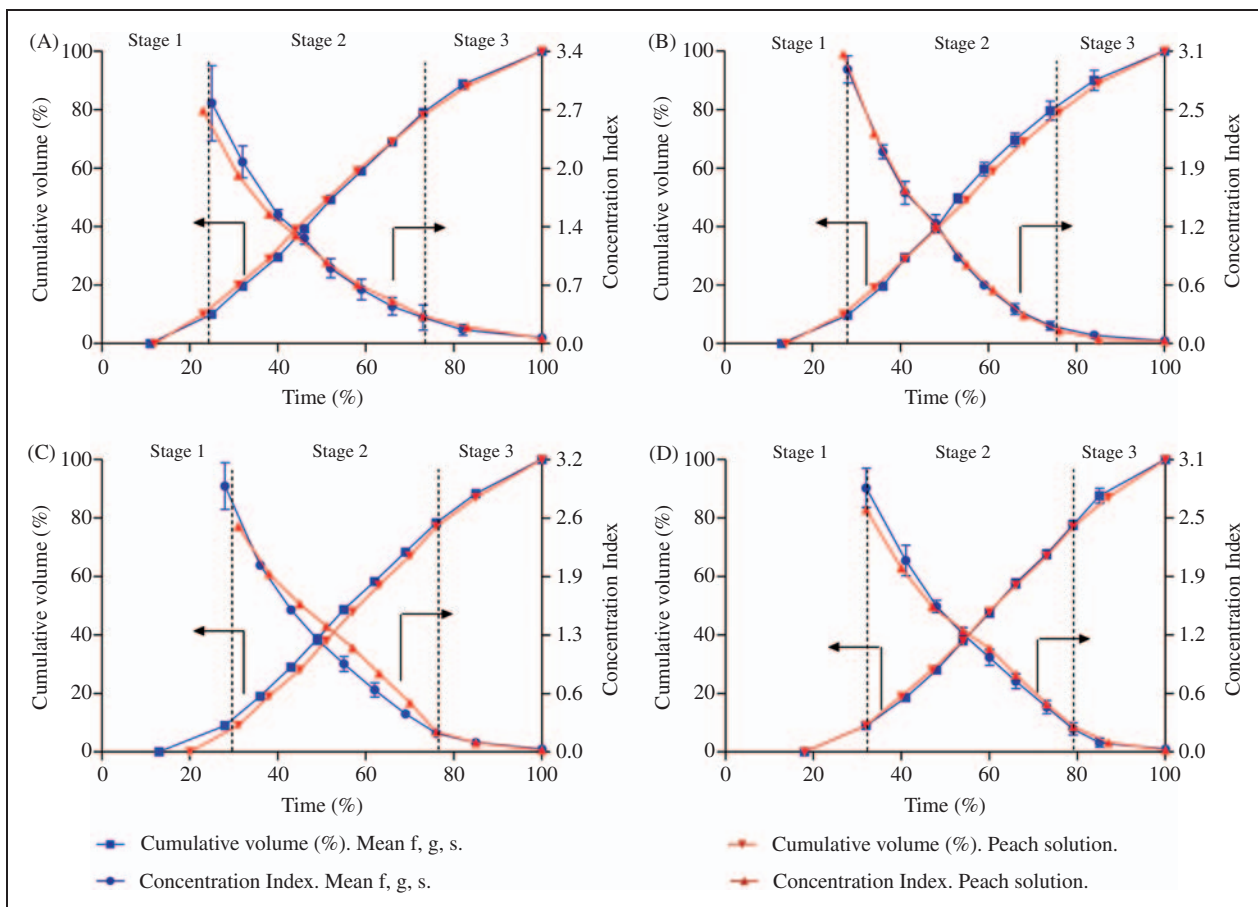


**Figure 6.** Volume obtained in time for thawing of an ice sheet obtained from freeze concentration of a sucrose solution. Thawing performed with  $ff$  of  $167 \text{ m}^{-1}$ , process temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  and solute mass fraction in the ice of  $1.0 \text{ }^\circ\text{Brix}$ .

It is called the irregular cooling period. The rate of thawing is increasing. The average speed (Figure 6) of the first period is  $V_{\text{period1}} = 0.19 \text{ mL/min}$ .

Second period: the system is in a steady state. From a certain moment on, the initial conditions are less important. From this point on, the process is predominantly determined by the heat-transfer related with the external temperature, the physical properties of the body, the shape and the size of the sample. This period is called the period of regular cooling. The thawing rate is constant and reaches its maximum value during this period (Figure 6)  $V_{\text{period2}} = 0.39 \text{ mL/min}$ .

Third period: This regime is similar to a process in which the temperature of all points of the body is the same. The rate of thawing is decreasing. The average speed (Figure 6) of the third period is  $V_{\text{period3}} = 0.18 \text{ mL/min}$ .



**Figure 7.** Cumulative volume and concentration index. (A) SMFI f, g, s:  $1.5 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $167\text{--}193 \text{ m}^{-1}$ ; SMFI peach:  $1.6 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $171 \text{ m}^{-1}$ . (B) SMFI f, g, s:  $3.4 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $168\text{--}200 \text{ m}^{-1}$ ; SMFI peach:  $3.7 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $171 \text{ m}^{-1}$ . (C) SMFI f, g, s:  $5.6 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $179\text{--}254 \text{ m}^{-1}$ ; SMFI peach:  $6.3 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $254 \text{ m}^{-1}$ . (D) SMFI f, g, s:  $7.9 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $165\text{--}206 \text{ m}^{-1}$ ; SMFI peach:  $8.3 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ;  $ff$   $188 \text{ m}^{-1}$ .

The three periods are similar to the ones defined by Isachenko et al. (1973) and also have similarities with the periods of heat transfer defined by Yee et al. (2003).

Figure 7 represent thawing processes performed at 20° C for ice from four stages of freeze-concentration defined by the values of the average SMFI of sugars (f, g and s).

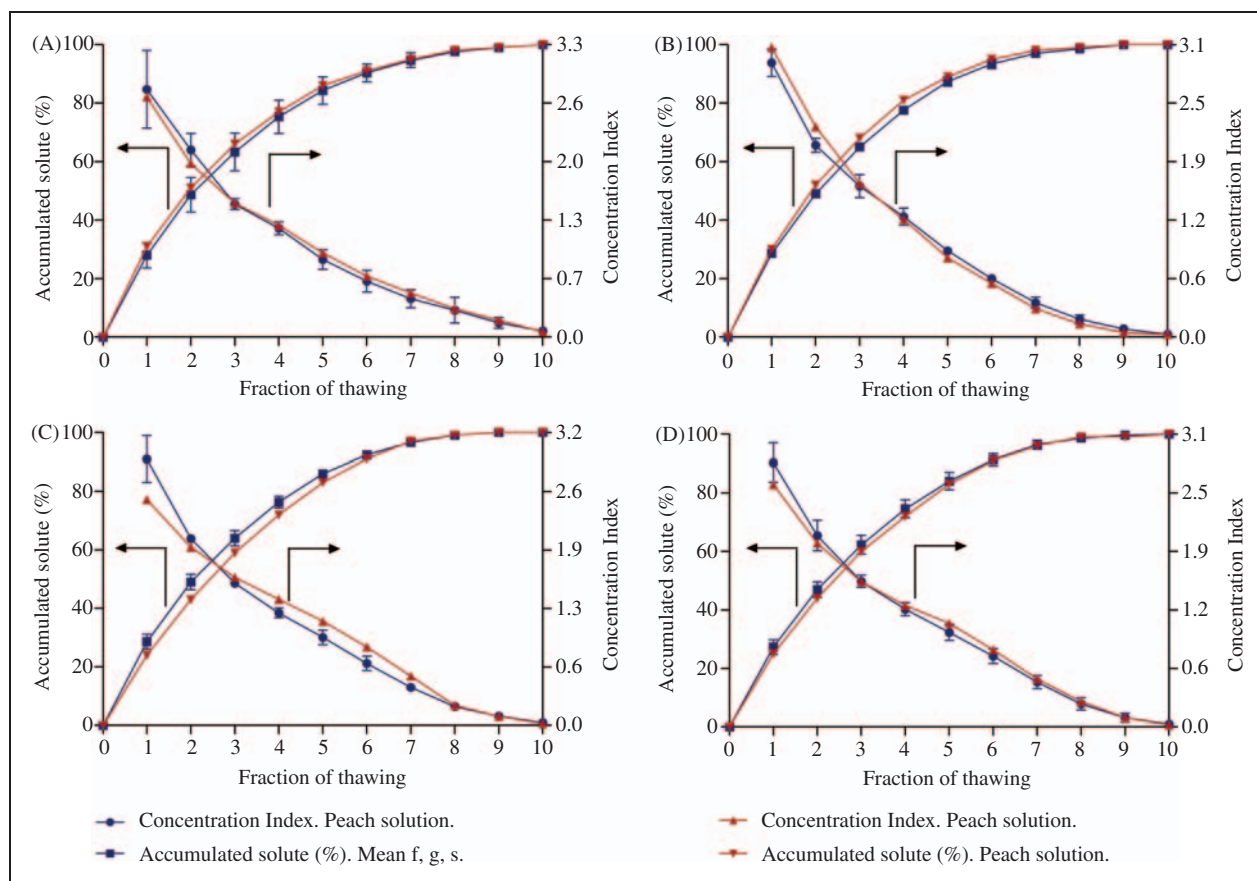
These figures show the three periods and the points where the thawing rate changes from one regime to the other; the CV (%) of f, g and s and the model peach juice (s) as a function of time (%); and the concentration index of f, g and s and the model peach juice (s) as a function of time (%).

In Figure 7, the following is observed for thawing period 2: Thawing period 2 is situated between about 30% and 75% of the thawing time. Period 2 is the period that prevails for the longest time and also shows the highest thawing rate.

Up to 50% of the thawing time, the concentration index is greater than 1, indicating that the melted fraction is more concentrated than the concentration SMFI.

The values obtained with the average time and CV of (f, g and s) are very similar to the values obtained for the model peach juice. RMS was calculated for the four stages of freeze concentration comparing the averages found for the basic sugar solutions with the value found for the simulated peach juice (s). This resulted in the following values for the respective stages: 3.8, 3.6, 16.7 and 1.0.

There is also a good similarity between the values obtained with the average time and concentration index of (f, g and s), and those of the model peach juice. The RMS was calculated for the four stages of freeze concentration comparing the averages found for the basic sugar solutions with the value found for the



**Figure 8.** Fractionated thawing of ice formed after layer freeze concentration. (A) Stage 1 f, g, s 1.5 °Brix; ff 167–193 m<sup>-1</sup>; SMFI peach: 1.6 °Brix; ff 171 m<sup>-1</sup>. (B) Stage 2 f, g, s 3.4 °Brix; ff 168–200 m<sup>-1</sup>; SMFI peach: 3.7 °Brix; ff 171 m<sup>-1</sup>. (C) Stage 3 f, g, s 5.6 °Brix; ff 179–254 m<sup>-1</sup>; SMFI peach: 6.3 °Brix; ff 254 m<sup>-1</sup>. (D) Stage 4 f, g, s 7.9 °Brix; ff 165–206 m<sup>-1</sup>; SMFI peach: 8.3 °Brix; ff 188 m<sup>-1</sup>.



simulated peach juice (s). This resulted in the following values for the respective stages: 10.3, 18.1, 18.7 and 12.5.

The *RMS* obtained varies between 1 and 16.7%, for the studies on Time (%) versus CV (%) and between 10.3 and 18.7% for the studies on Time (%) – Concentration index.

The graph of Figure 7 be used to estimate the thawing time for thawing processes that have the same process temperature, and for values of SMFI and *ff* that are within the range of values used in our studies. The use of these graphs and of equation (23) is illustrated by example 1 (see Appendix).

It is noted that for a higher concentration of solutes in the ice thawing rate is greater. These data are consistent with those obtained by Yee et al. (2003).

### Recovery of the solute by fractionated thawing

Figure 8 show the results of the fractionated thawing of samples of the ice sheets obtained from the four stages of freeze concentration. In each graph, the concentration index and the percentage solute accumulated are shown for each thawing fraction. Results shown are mean values for sugar solutions of f, g and s with *ff* between  $167\text{ m}^{-1}$  and  $193\text{ m}^{-1}$  and values for the simulated peach juice (s) with *ff* =  $171\text{ m}^{-1}$ , all obtained at  $20^\circ\text{C}$ .

The observed concentration indexes show a clear trend: the highest values are found in the first steps of thawing (2.3–3.2 for the first fraction), whereas the lowest values are found in the last steps (about 0.1 for the last fraction).

After five thawing fractions the amount of accumulated solute is above 80%. Up to the fifth fraction, the concentration index is above 1, so that the amount of solute in the melt is above the SMFI and therefore recovery makes sense. These results are in agreement with the distribution of solutes in the ice shown earlier, because in the first steps of thawing the melting takes place at the external surfaces, which showed higher solute concentration (the zones in contact with the evaporator and in contact with the concentrated solution).

The behaviour observed for the concentration index during the progressive fractions of thawing are similar to that reported by Yee et al. (2003) and by Miyawaki et al. (2012) considering the recovery of solutes.

The behaviour observed between steps of thawing (concentration indexes) is similar to natural phenomena of the ice thawing process in a frozen river, where the initial fraction of melting solutions were high concentrated in impurity and the last fraction melting solutions were low concentrated (Leung and Carmichael,

1984). In the same way, Nakagawa et al. (2009) reported a similar concentration profile of melt over time from freezing solution in thawing assays of dye solutions.

The use of graph 8 is illustrated by example 2 (see Appendix).

## CONCLUSIONS

The ice sheets obtained in a falling-film freeze concentrator show stratification for the concentration of dissolved solids. The lowest concentrations are found in the central zone of the ice sheet, where the observed concentrations of dissolved solids are similar to the mean SMFI. The zones in contact with the heat exchanger surface and the concentrated liquid show higher concentrations than the mean SMFI.

It was shown experimentally that the samples taken from the ice sheets are representative of the initial SMFI for the respective freeze-concentration stages. Once the temperature of thawing has been chosen ( $20^\circ\text{C}$  in this study), the thawing rate and the total thawing time are totally determined by the form factor (*ff*) and the initial solute concentration of the sample.

The time needed for thawing decreases linearly with the solute concentration and is inversely proportional with the form factor.

In the thawing process, three periods are observed: a first period of irregular thawing (up to about 30 mass% of the ice to be thawed) with increasing thawing rate, a second period with thawing at constant rate (from 30 to 75 mass% of the ice to be thawed) and a final period with decreasing thawing rate.

At a thawing temperature of  $20^\circ\text{C}$  and for form factors between  $166\text{ m}^{-1}$  and  $254\text{ m}^{-1}$ , it is possible to recover up to 60–70% of the solutes retained in 40% of the thawing volume and the current study predicts the thawing time that is needed to reach these values.

The concentration index is greater in the first thawing fractions. After the fifth thawing fraction, the concentration index is below 1, so that the recovery of solutes is of less interest after the fifth fraction.

The procedure developed in the current study could be applied in all concentration processes that are based on freezing and thawing. This should be the subject of further research.

## FUNDING

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## REFERENCES

- Aider M and Halleux D. (2008). Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology. *Food Science and Technology* 41: 1768–1775.
- Auleda JM, Raventós M and Hernández E. (2011a). Calculation method for designing a multi-plate freeze-concentrator for concentration of fruit juices. *Journal of Food Engineering* 107: 27–35.
- Auleda JM, Raventós M, Sánchez J and Hernández E. (2011b). Estimation of the freezing point of concentrated fruit juices for application in freeze concentration. *Journal of Food Engineering* 105: 289–294.
- Bruin S and Jongen ThRG. (2003). Food processing engineering: the last 25 years and challenges ahead. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2(2): 42–81.
- Burton JA, Prim R and Slichter WP. (1953). The distribution of solute in crystals grown from the melt. *The Journal of Chemical Physics* 21(1): 1987–1996.
- Chen P, Chen XD and Free KW. (1998). Solute inclusion in ice formed from sucrose solutions on a sub-cooled surface. An experimental study. *Journal of Food Engineering* 38: 1–13.
- Chen P, Chen XD and Free KW. (1999). An experimental study on the spatial uniformity of solute inclusion in ice formed from falling film flows on a sub-cooled surface. *Journal of Food Engineering* 39: 101–105.
- Flesland O. (1995). Freeze concentration by layer crystallization. *Drying Technology* 13: 1713–1739.
- Habid B and Farid M. (2006). Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid-solid fluidized bed heat exchanger. *Chemical Engineering and Processing* 45: 698–710.
- Hernández E, Raventós M, Auleda JM and Ibarz A. (2009). Concentration of apple and pear juices in a multi-plate freeze concentrator. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10: 348–355.
- Hernández E, Raventós M, Auleda JM and Ibarz A. (2010). Freeze concentration of must in a pilot plant falling film cryoconcentrator. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 11: 130–136.
- Ibarz A and Barbosa CG. (2005). *Operaciones Unitarias En La Ingeniería de Alimentos*. Madrid: Ediciones Mundiprensa, pp. 343–347.
- Isachenko V, Osipova V and Sukomel A. (1973). *Transmisión del Calor*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, pp. 134–144.
- Laari A, Louhi M, Shirai Y, Matsuno R and Palosaari S. (1990). Kinetics of freeze concentration in sugar solutions. In: *11th Symposium on Industrial Crystallization* (ed A Mersmann), Garmisch-Partenkirchen, Federal Republic of Germany, 18–20 September, 1990, pp. 34–41.
- Lee YCh and Leem SW. (1998). Quality changes during storage in Korean cloudy pear juice concentrate by different methods. *Food Science and Biotechnology* 7(2): 127–130.
- Leung WKS and Carmichael GR. (1984). Solute redistribution during normal freezing. *Water, Air, and Soil Pollution* 21: 141–150.
- Lewicki PP. (2000). Raoult's law based food water sorption isotherm. *Journal of Food Engineering* 43(1): 31–40.
- Miyawaki O. (2001). Progressive freeze-concentration: a new method for high-quality concentration of liquid food. *Food Engineering Progress* 5(3): 190–194.
- Miyawaki O, Kato S and Watabe K. (2012). Yield improvement in progressive freeze-concentration by partial melting of ice. *Journal of Food Engineering* 108: 377–382.
- Miyawaki O, Liu L and Nakamura K. (1998). Effective partition constant of solute between ice and liquid phases in progressive freeze-concentration. *Journal of Food Science* 63(5): 756–758.
- Moreno FL, Robles CM, Sarmiento Z, Ruiz Y and Pardo JM. (2013). Effect of separation and thawing mode on block freeze-concentration of coffee brews. *Food and Bioproducts Processing*. Epub ahead of print 18 February 2013. DOI:10.1016/j.fbp.2013.02.007.
- Müller M and Sekoulov I. (1992). Waste water reuse by freeze concentration with a falling film reactor. *Water Science and Technology* 26(7–8): 1475–1482.
- Nakagawa K, Maebashi S and Maeda K. (2009). Concentration of aqueous dye solution by freezing and thawing. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 87: 779–787.
- Otero L, Sanz P, Guignon B and Sanz PD. (2012). Pressure-shift nucleation: a potential tool for freeze concentration of fluid foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 13: 86–99.
- Pardo JM, Suess F and Niranjana K. (2002). An investigation into the relationship between freezing rate and mean ice crystal size for coffee extracts. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 80: 176–182.
- Rane MV and Jabade SK. (2005). Freeze concentration of sugarcane juice in a jaggery making process. *Applied Thermal Engineering* 25: 2122–2137.
- Raventós M, Hernández E, Auleda JM and Ibarz A. (2007). Concentration of aqueous sugar solutions in a multi-plate cryoconcentrator. *Journal of Food Engineering* 79: 577–585.
- Sánchez J, Hernández E, Auleda JM and Raventos M. (2011). Review: freeze concentration technology applied to dairy products. *Food Science and Technology International* 17(1): 5–13.
- Sánchez J, Ruiz Y, Hernández E, Auleda JM and Raventos M. (2009). Review. Freeze concentrations in the fruit juices industry. *Food Science and Technology International* 15(4): 303–315.
- Sánchez J, Ruiz Y, Hernández E, Auleda JM and Raventos M. (2010). Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 11: 644–651.
- Scholz R. (1993). *Die schichtkristallisation als thermisches trennverfahren*. PhD Thesis, Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 3 Nr. 347, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Van Weelden G. (1994). Freeze concentration: the alternative for single strength juices. *Fruit Processing* 4(5): 140–143.
- Yee PL, Wakisaka M, Shirai Y and Hassan MA. (2003). Effects of single food components on freeze concentration by freezing and thawing technique. *Japan Journal of Food Engineering* 4: 77–82.

**APPENDIX**

**Example 1**

An ice sheet from a concentration process of peach juice was obtained, with SMFI of 8.1 °Brix, and  $f_f$  of  $186\text{ m}^{-1}$ . The estimation of the duration of thawing stage is required.

Substituting the given values of SMFI and  $f_f$  into equation (23), an estimated thawing time of 115.9 min is obtained.

Figure 7D shows that a melting volume of 20% is reached after 42% of the thawing time (50.4 min) and at this point the concentration index is 2.0, which multiplied by the value of SMFI of peach juice thawing

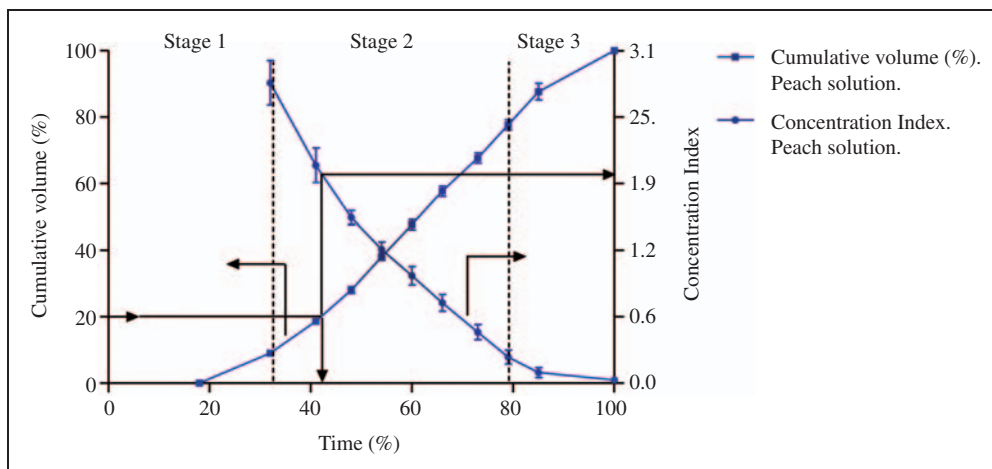
renders a concentration in the melted fraction of  $(2.0 \times 8.1)$  16.2 °Brix.

The procedure followed in this example is illustrated in Figure 9.

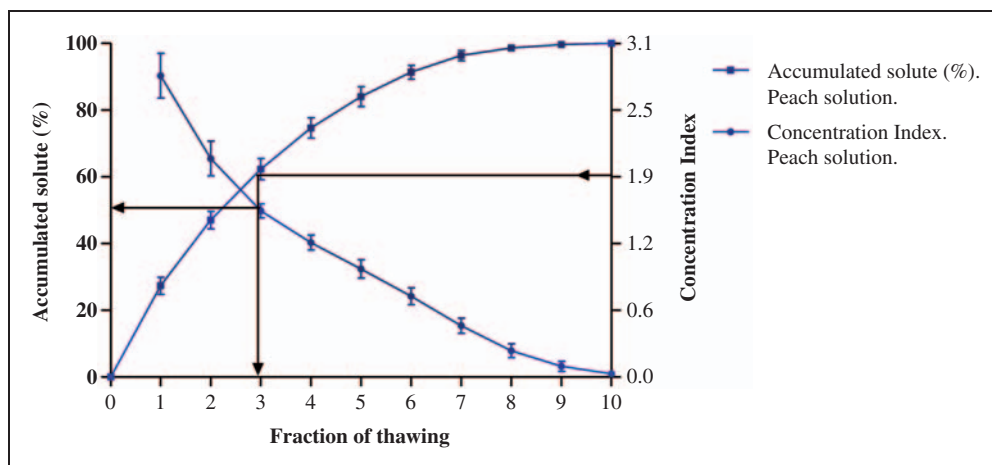
**Example 2**

Using the data of example 1.

It can be read from Figure 8D that a concentration index of 2.0 is reached at the third thawing fraction (the point where 24% of the ice sheet has been melted) and 53% of the accumulated solute is recovered. The procedure followed in this example is illustrated in Figure 10.



**Figure 9.** Cumulative volume, time (%) and concentration index. SMFI 7.9 °Brix, with  $f_f$  between  $165\text{ m}^{-1}$  and  $206\text{ m}^{-1}$ .



**Figure 10.** Concentration index, cumulate solute and fraction of thawing. °Brix, with  $f_f$  between  $165\text{ m}^{-1}$  and  $206\text{ m}^{-1}$ .

**Nomenclature**

Symbol	Description
$f$	Fructose
$ff$	form factor ( $m^{-1}$ )
$G$	Glucose
$H$	heat of melting (kJ)
peach (s)	simulated peach juice
$s$	saccharose
$T$	time (s)
$v_{des}$	thawing rate (mL/s)
$^{\circ}\text{Bx}$	concentration ( $^{\circ}\text{Brix}$ )
CV	cumulative volume
FFFC	the falling-film freeze concentration
$H_{ice}$	latent heat of fusion of the ice ( $333 \text{ kJ kg}^{-1}$ )
$K$	coefficient of thawing ( $s \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$ )
$K_T$	temperature constant ( $20^{\circ}\text{C}$ )
$K_{\alpha}$	constant of heat transfer coefficient ( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )

$Q$	heat flux (W)
$M$	mass (kg)
PFC	progressive freeze-concentration
RMS	root mean square
$S$	surface area ( $\text{m}^2$ )
SMFI	solute mass fraction in the ice ( $^{\circ}\text{Brix}$ )
$T$	temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{amb}$	ambient temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{thawing}$	thawing temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V$	volume ( $\text{m}^3$ )

**Greek symbols**

$\alpha$	heat transfer coefficient ( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$\rho$	density ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_C$	density for carbohydrates ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_I$	density of ice ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{CI}$	density of ice in the process ( $\text{kg/m}^3$ )
$\Delta T$	temperature increase ( $^{\circ}\text{C}$ )

## Your Submission

**Dietrich Knorr**

per a: eduard.hernandez, eduard.hernandezupc

25/06/2014 14:59

Ms. Ref. No.: IFSET-D-13-00581R3

Title: CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR: TIME AND CONCENTRATION  
Innovative Food Science and Emerging Technologies

Dear Eduard,

I am pleased to inform you that your paper "CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR: TIME AND CONCENTRATION" has been accepted for publication in Innovative Food Science and Emerging Technologies.

Below are comments from the editor and reviewers.

When your paper is published on ScienceDirect, you want to make sure it gets the attention it deserves. To help you get your message across, Elsevier has developed a new, free service called AudioSlides: brief, webcast-style presentations that are shown (publicly available) next to your published article. This format gives you the opportunity to explain your research in your own words and attract interest. You will receive an invitation email to create an AudioSlides presentation shortly. For more information and examples, please visit <http://www.elsevier.com/audioslides>.

[Thank you for submitting your work to Innovative Food Science and Emerging Technologies.](#)

[Yours sincerely,](#)

[Dietrich Knorr](#)

[Editor](#)

[Innovative Food Science and Emerging Technologies](#)

[Comments from the editors and reviewers:](#)

\*\*\*\*\*

[For further assistance, please visit our customer support site at http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.](#)

Manuscript Number: IFSET-D-13-00581R2

Title: CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR: TIME AND CONCENTRATION

Article Type: Research Article

Keywords: Thawing temperature, thawing time, form factor, concentration index, solute mass fraction in the ice, fractionated thawing

Corresponding Author: Prof. Eduard Hernández, Ph.D

Corresponding Author's Institution: Technical University of Catalonia

First Author: Rafael Gulfo, Msc

Order of Authors: Rafael Gulfo, Msc; J.M. Auleda, PhD; Mercè Raventós, PhD; Eduard Hernández, Ph.D

Abstract: Fractionated thawing was studied as a method to recover solutes incorporated in the ice obtained in a cryoconcentrator. Thawing times and solute concentration in the ice were determined at several thawing temperatures.

Ice sheets used for the thawing studies were obtained by cryoconcentrated solutions of sugars and simulated juice at initial concentrations of 5 to 20 °Brix. The ice sheets produced contained levels of solutes between 1.0 and 9.0 °Brix.

Fractionated thawing were performed at temperatures of 20 to 30 °C while maintaining geometrical similarity for the test samples. By fractionated thawing more than 60 % of the solutes retained in the ice were recovered in 34 %, of the total thawing time.

The procedure presented allows the determination of the solute concentration achieved in the various thawing fractions and predicts the thawing time required for a given form factor, melting temperature and the solute mass fraction in the ice

May, 2014

Dear Sir:

We attached a file containing the new revision of the manuscript entitled **“CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR: TIME AND CONCENTRATION”** submitted by Gulfo R., Auleda, J.M., Raventós, M. Hernández, E. to **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. All the authors have read and approved the manuscript.

Thank you very much for your consideration.

Sincerely,

Dr. Eduard Hernández

Agri-Food Engineering and Biotechnology Department,  
Technical University of Catalonia (UPC)  
C/ Esteve Terradas, 8  
08860 Castelldefels , BARCELONA (Spain)  
Phone: 34) 93 552 10 77  
[eduard.hernandez@upc.edu](mailto:eduard.hernandez@upc.edu)

1     **CALCULATION PROCESS FOR THE RECOVERY OF SOLUTES RETAINED IN THE**  
2             **ICE IN A MULTI-PLATE FREEZE CONCENTRATOR:**  
3             **TIME AND CONCENTRATION**

4  
5             Gulfo, R., Auleda, J.M., Raventós, M., and Hernández,\* E.  
6             Agri-Food Engineering and Biotechnology Department, Technical University of  
7             Catalonia (UPC) C/ Esteve Terradas, 8. 08860 Castelldefels (Barcelona).

8             \*Corresponding Author: tel. (+34) 93 552 10 00, e-mail: eduard.hernandez@upc.edu

9     **Abstract.**

10  
11     Fractionated thawing was studied as a method to recover solutes incorporated in the ice obtained  
12     in a cryoconcentrator. Thawing times and solute concentration in the ice were determined at  
13     several thawing temperatures.

14     Ice sheets used for the thawing studies were obtained by cryoconcentrated solutions of sugars and  
15     simulated juice at initial concentrations of 5 to 20 °Brix. The ice sheets produced contained  
16     levels of solutes between 1.0 and 9.0 °Brix.

17     Fractionated thawing were performed at temperatures of 20 to 30 °C while maintaining  
18     geometrical similarity for the test samples. By fractionated thawing more than 60 % of the  
19     solute retained in the ice were recovered in 34 %, of the total thawing time.

20     The procedure presented allows the determination of the solute concentration achieved in the  
21     various thawing fractions and predicts the thawing time required for a given form factor, melting  
22     temperature and the solute mass fraction in the ice.

23     **Key words:** Thawing temperature, thawing time, form factor, concentration index, solute mass  
24     fraction in the ice, fractionated thawing.

**Nomenclature**

Symbol	Description
<i>a</i>	length of ice layer (m)
<i>b</i>	width of ice layer (m)
<i>b<sub>ni</sub></i>	variable to correct the non-ideal behaviour
<i>b<sub>2</sub></i>	time constant (s <sup>-1</sup> )
<i>e</i>	thickness of Ice layers (m)
<i>f</i>	fructose
<i>ff</i>	Form factor (m <sup>-1</sup> )
<i>g</i>	glucose
<i>k</i>	heat conductivity (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
<i>p</i>	weight sample (kg)
Peach (s)	simulated peach juice
<i>r</i>	coefficient in the linear correlation of Pearson
<i>s</i>	saccharose
<i>t<sub>ct</sub></i>	time (minutes)
<i>v<sub>des</sub></i>	thawing rate (mL/s)
<i>AI</i>	Accumulated index
<i>AT</i>	Accumulated time (minutes)
°Bx	Concentration (°Brix)
CI	Concentration index
<i>C<sub>e1</sub></i>	Specific heat for carbohydrates (kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
<i>C<sub>e2</sub></i>	Specific heat for ice (kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
FPD	Freezing point depression (°C)
HPLC	High-performance Liquid Chromatography
<i>K</i>	Coefficient of thawing (s·m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )



$K_c$	Freezing point depression for water ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg/mol}$ )
IL	Ice layers
M	Mass (kg)
$M_s$	Molecular weights (g/mol)
PS	Process Stage of freeze concentration
PFC	Progressive Freeze-Concentration
R	Radius (m)
RMS	Root Mean Square (%)
SSHE	Scraped-Surface Heat Exchangers
S	Surface area ( $\text{m}^2$ )
SMFI	Solute Mass Fraction in the Ice ( $^{\circ}\text{Brix}$ )
TS	Test Sample
TT	Thawing Time (min)
$T$	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{CI}$	Temperature of the ice with retained solutes ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{amb}$	Ambient temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ats}$	Average temperature of the sample ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ref}$	Cold store temperature ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
$T_{thawing}$	Thawing temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V$	Volume ( $\text{m}^3$ )
$X_c$	Mass fraction of solute (kg/kg)
$X_{ice}$	Mass fraction of ice (kg/kg)
$X_t$	Total mass fraction (kg/kg)
Greek symbols	
$\alpha$	Individual heat transfer coefficient for heat transfer by convection (film coefficient) ( $\text{Wm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\beta$	Inverse of the time constant ( $\text{s}^{-1}$ )
$\rho_c$	Density of carbohydrates as function of temperature ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{ice}$	Density of ice as function of temperature ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{CI}$	Density of ice ( $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{-18}$	Density of ice ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )
$\theta_{1-2}$	Dimensionless number

25

26

## 27 1.-INTRODUCTION

28 Freeze concentration is a method to separate soluble solids from an aqueous solution. It is based  
 29 on the gradual lowering of the temperature of the solution until partial or total freezing is  
 30 obtained. The advantage of this process as emerging technology for food processing is that it  
 31 preserves the sensorial and nutritional quality of the food product. The low operational  
 32 temperatures prevent degradation and denaturation reactions that can occur for concentration  
 33 processes at elevated temperature, such as evaporation (Hartel, & Chung, 1992).

34 According to literature (Müller, & Sekoulov, 1992; Flesland, 1995; Chen, Chen, & Free, 1998;  
 35 Chen, Chen, & Free, 1999; Chen, & Chen, 2000; Miyawaki, 2001; Gunathilake, Shimmura, &  
 36 Miyawaki, 2013; Yee, Wakisaka, Shirai, & Hassan, 2003; Hernández, Raventós, Auleda, &  
 37 Ibarz, 2009; Sánchez, Ruiz, Hernández, Auleda, & Raventos, 2010), there are various basic  
 38 methods for freeze concentration in solutions: suspension freeze concentration, layer freeze  
 39 concentration, and block freeze concentration (or freeze-thaw concentration). These names  
 40 originate from the mechanisms used for the formation of the ice crystals in the process.

41 Freeze concentration processes used industrially are currently all based on suspension freeze  
 42 concentration. This process uses scraped-surface heat exchangers (SSHE) to generate ice nuclei,  
 43 recrystalisers to increase the growth of the ice crystals and pressurised wash columns to separate  
 44 the ice from the concentrated liquid. The concentration reached with this system is between 45

45 and 55 °Brix (Van Weelden, 1994; Lee & Lee, 1998). To reduce SSHE costs Otero, Sanz,  
46 Guignon, & Sanz (2012) suggest increasing the pressure at the nucleation stage.

47 Block freeze concentration, or freeze-thaw concentration, consists of the freezing of the product  
48 that is to be concentrated (liquid foods) and thawing while dividing the obtained liquid in various  
49 fractions: the first fractions are found to be concentrated (corresponding to high solute mass  
50 fractions in the ice) and the later fractions are found to be diluted (Yee et al., 2003; Nakagawa,  
51 Maebashi, & Maeda, 2009; Miyawaki, Kato, & Watabe, 2012; Boaventura, Murakami,  
52 Prudêncio, Maraschin, Murakami, Amante, & Amboni, 2013; Moreno, Raventós, Hernández, &  
53 Ruiz, 2014).

54 Layer freeze concentration is based on a large ice mass is formed and grown on the cooling  
55 surface. Two processes of layer freeze concentration have been described: progressive freeze-  
56 concentration (PFC), with ice formation on a tubular or cylindrical surface (Miyawaki et al.,  
57 2012) and multi-plate freeze-concentration, with ice formation on a rectangular plate, normally in  
58 the form of a falling-film freeze concentrator, where the liquid to be concentrated flows down in  
59 a layer over the heat-exchanger plates.

60  
61 A characteristic of the falling-film freeze concentration process is the limitation in the maximum  
62 obtainable concentration, which is about 40 % (w/w). This is principally due to the increase in  
63 viscosity of the liquid, the freezing-point depression, and the incorporation of solutes in the ice  
64 crystals. (Flesland 1995; Chen et al., 1998; Miyawaki, 2001; Raventós, Hernández, Auleda, &  
65 Ibarz, 2007; Sánchez, Hernández, Auleda, & Raventos, 2011).

66 At decreasing temperatures, the liquid reduces its flow velocity over the plate surface, which  
67 results in increased solute retention in the ice, and reduced process efficiency. (Raventós,  
68 Hernández, Auleda, & Ibarz, 2007; Flesland 1995).

69 Scholz (1993) described the process of solute inclusion in a growing ice layer as a sequence of  
70 three individual phases: nucleation, the growth rate of the ice layer, and the final concentration  
71 obtained in the process. The retention of solutes in the ice sheet limits the applicability of freeze  
72 concentration falling film. This system seeks to recover these solutes and increase the overall  
73 efficiency of the process. A possible way to recover the solutes incorporated in the ice layer is  
74 fractionated thawing. Fractionated thawing is a complimentary technique which can be used in  
75 the process of falling-film freeze concentration. It consists of slowly heating the ice-layer  
76 obtained from the freeze concentrator and collecting the liquid that is formed in various fractions.  
77 A number of publications (Yee et al., Hassan, 2003; Miyawaki et al., 2012) indicate that highly  
78 concentrated solutions can be obtained based on fractionated thawing.

79 The aim of the current paper is to study fractionated thawing as a method to recover the solutes  
80 incorporated in the ice layer formed in a falling-film freeze concentrator.

81 Thawing times are determined at various temperatures and solute concentrations. Moreover, a  
82 calculation algorithm is developed that predicts the concentration index and the time needed to  
83 obtain a certain mass fraction of thawing for solutions of fructose, glucose and saccharose at  
84 temperatures of 20, 25 and 30 °C.

85 This type of study is not only of academic interest, but has also technological importance,  
86 because it enables the calculation of the recovery of solutes retained in the ice obtained from fruit  
87 juices. Process parameters that are obtained include the thawing time, the concentration and  
88 amount of ice obtained in each of the thawing fractions of the process.

89 Based on these calculations, one can study the solute recovery in the various fractions, so that an  
90 optimal process can be designed.

91

## 92 **2. MATERIALS AND METHODS**

### 93 **2.1 Sugars and model solution for peach juice and orange juice.**

- 94 • Fructose (*f*): D(-) fructose, crystalline white, 99 %, (natural sugar from fruit,  
95 DietRádissonPagesa, Spain).

- 96 • Glucose (*g*): D+Glucose Anhydrous, extra pure, Ph, Eur, USP, BP (GL01251000,  
97 synthetic product, Scharlau, Spain).  
98 • Saccharose (*s*): commercial crystalline white sugar; (α-D-glucopiranosil β-D-  
99 fructofuranosid; saccharose, cane sugar, Azucarera, Spain).

100  
101 Model solutions for peach juice were prepared, based on the weight percentages (w/w) of basic  
102 sugars (*f*, *g*, and *s*) obtained from HPLC analysis of peach juice Auleda, et al (2011 a), composed  
103 of (w/w): glucose 18.8 %; fructose 25.5 %; saccharose 55.7 %.

104 The weight percentages (w/w) of basic sugars (*f*, *g*, and *s*) obtained from HPLC analysis of  
105 orange juice Auleda, et al (2011 a), was used to develop the process of calculation, composed of  
106 (w/w): glucose 32.6 %; fructose 32.0 %; saccharose 35.5 %.

107

## 108 **2.2 Analytical determination of sugar solutions**

### 109 **2.2.1 Solute concentration**

110 The concentration of soluble solids, expressed as °Brix, was measured with an Atago  
111 refractometer (model DBX-55; Japan), with an accuracy of ± 0.1 and measurement range of 0 to  
112 55 °Brix. Measurements were performed at a temperature of 20 ± 1.5 °C.

113

### 114 **2.2.2 Weighing**

115 The following instruments were used.

116 A digital scale (GRAM: Model APS – 60, with an accuracy of ± 20 g and a measurement range  
117 of 0.2 to 60 kg) was used for weighing the ice layers obtained in the process of freeze  
118 concentration.

119 Another digital scale (KERN: Model W 109887, with an accuracy of ± 0.01 g and a measurement  
120 range of 1 to 1210 g) was used for weighing the samples during fractionated thawing.

121

### 122 **2.3 Experimental equipment for freeze concentration**

123 The equipment used for these studies comprises a freezer unit of two evaporator plates (1) laid  
124 out vertically, each one formed in turn by two welded plates (**Fig. 1**). Inside, the plates are  
125 welded at several points so that the refrigerant (R-507) circulates through them following a  
126 zigzag path. Each of the two plates measures 800 mm by 600 mm.

127 On the outside of the plates, the liquid food to be concentrated flows in a descending film (2)  
128 after being pumped by the hydraulic system from the holding tank (3) and being distributed by  
129 means of a distributor (4) with small-diameter perforations of 2 mm. In order to measure a flow,  
130 the hydraulic system contains an electromagnetic flowmeter (5) (ISOIL; Model MS501 of  
131 stainless steel for fluids with conductivity over 5 μS/cm, with an accuracy of ±0.4% and a  
132 measurement range of 0.14–3.47 L/s, Cinisello Balsamo-Italy). The freezing system of this  
133 equipment contains a compressor model TFH4531Z by Unité Hermétique (Tecumseh Europe, La  
134 Verpilliere, France), type: alternative volumetric piston, with single effect, one stage, and with  
135 vertical cylinders, since the motor shaft and the crankshaft of the compressor are on the same  
136 axis. The model used in this experiment was a hermetic compressor run at three-phase 230/400  
137 V, 50 Hz. Using the primary refrigerant R-507, the caloric power or output of the compressor  
138 depends on the evaporation and condensation temperature of the refrigerant fluid.

139 The liquid food is chilled and then returns to the holding tank by gravity to be circulated again.

140 An exchange of heat occurs between the refrigerant and the liquid food (the liquid food loses  
141 heat to the refrigerant and the refrigerant evaporates). This heat exchange takes place through the  
142 walls of a plate heat exchanger and this produces layer crystallization as the ice forms thin layers  
143 on the surface of the heat exchanger (6). The ice sheets obtained in this way measure 750 mm ×  
144 550 mm and have a thickness between 10 and 20 mm, with thickness varying according to the  
145 concentration value that is obtained in the current concentration step Auleda, Raventós, &  
146 Hernández, (2011b).

147  
148 **Figure 1.** Schematic layout of the freeze concentration unit.  
149

#### 150 **2.4. Obtaining ice layers from the various stages of the freeze concentration process**

151 The freeze concentration experiments needed to obtain the ice layers to be analysed, were  
152 performed with 40 L of solutions of the three basic sugars (*f*, *g* and *s*) in distilled water, and for  
153 40 L of the model peach juice.

154 To obtain ice layers at various levels of dissolved solutes, four Process Stage of freeze  
155 concentration (PS) were simulated: for each of the basic sugars and for the model peach juice,  
156 freeze concentration was carried out at initial concentrations of 5, 10, 15 and 20 °Brix

157 When the solid concentration in the liquid food reached a predetermined level (2.5 °Brix above  
158 the initial level), the pump was stopped and the concentrated liquid food flowed out of the system  
159 by gravity. Then, the compressor was stopped and the ice layer was removed from the  
160 evaporator. The ice layer, so obtained, was characterized by determining its weight, length,  
161 width, and thickness, and the concentration of solids present (measuring the °Brix after thawing a  
162 small sample of the ice sheet) and was then stored in a refrigerated room at -18 °C. According to  
163 the results obtained in the work published by Hagiwara, Mao, Suzuki & Takai, R., (2005) and  
164 considering the storing conditions (-18°C, between 5 and 10 h), the amount of recrystallization is  
165 very low for the ice used in the experiment and it does not have any influence over the process.  
166

#### 167 **2.5 Studies of fractionated thawing**

168 The ice layers (IL) obtained from the freeze concentration experiments were measured about 750  
169 mm × 550 mm (length x width) and had a thickness between 10 and 20 mm. Due to their large  
170 size, there was a need to take small test samples from the IL.  
171

##### 172 **2.5.1 Thawing studies on small test samples (TS)**

173 The samples for the fractionated thawing studies were taken from the IL without removing them  
174 from the refrigerated room. Sample taking was performed by the use of a drill equipped with a  
175 “nipping tool” (Esgarret, Spain) with a diameter of 60 mm. The obtained sample is a cylinder  
176 with a diameter of 60 mm and a thickness between 10 a 20 mm. Using a calliper slide, 4  
177 measurements of the thickness were performed and their mean value was used to determine the  
178 form factor (*ff*), which is defined as the ratio *area/volume*.

179 By using a small drill a hole of 0.5 mm diameter was made in the cylindrical samples, so that  
180 they could be hung on a thread within the oven used for thawing. The thawing was carried out in  
181 vertical position, similar to the position that the ice layers have in the freeze concentrator, as  
182 shown in Fig. 2.  
183

184 **Fig 2.** Collecting test samples (TS) for thawing studies.  
185

186 The oven used for thawing the TS is cubical and measures 480 mm x 480 mm x 480 mm. It is  
187 placed on legs of 415 mm height. The walls are made of metal and are covered with a 3 mm layer  
188 of adhesive insulation material (based on isoprene with added resins and synthetic filling  
189 materials). The door is made of transparent methacrylate so that the sample can be observed  
190 during the test.

191 Heating of the oven is performed by resistances with power consumption of 40 to 300 W,  
192 regulated by a piezoelectric controller (Pie Electro Dit, model 11 551, 0 to 300 W), and a  
193 PTC/NTC temperature probe (Mundo central, OSAKA, measuring range from -50 to +150 °C).

194 The oven is equipped with a 4-channel data logger (Testo 177-T4, with display) for logging the  
195 temperature. Both the heating resistances and the data logger use the standard power supply  
196 230V AC.

197 For thawing studies at 20 °C, the oven is placed inside a refrigerated room of which the

198 temperature is controlled at 15 °C, which is 5 °C below the temperature at which thawing is  
 199 performed. For the thawing studies at 25 °C and 30 °C the oven was placed at ambient  
 200 temperature, without the use of the refrigerated room.

201 The dripping of the melting ice is collected by a funnel and is led to a test tube located on a  
 202 balance which measures the weight. Moreover, the obtained liquid volume is recorded as  
 203 function of thawing time (TT). Measurements are made in 10 fractions of equal weight.

204 In this way, fractionated thawing studies were performed on the TS obtained from freeze  
 205 concentration experiments at four concentrations, for each of the basic sugars and for the model  
 206 peach juice.

207  
 208 **2.5.2. Thawing studies on the ice layers (IL)**

209 Once the freeze concentration experiment is completed, the IL are stored in a refrigerated room at  
 210 -18 °C, during some hours (between 60 and 240 minutes). During this time the IL are measured.  
 211 Following this short storage, the thawing studies are carried out at ambient temperature (20 ±1.5  
 212 °C), see Fig. 3.

213  
 214 **Fig. 3.** Thawing studies on large ice sheets.

215  
 216 **2.6 Relation of similarity. Form factor (*ff*)**

217 To verify if the IL and the TS show a similar behaviour during the thawing process, and to  
 218 validate that thawing studies made on the TS are representative for the IL, the studies were  
 219 compared taking into account their geometric similarity, given by the form factor *ff*, equation (1)  
 220 (Gulfo, Auleda, Moreno, Ruiz, Hernandez, & Raventos, 2013) at a temperature of 20 °C. Results  
 221 are compared, analysed, and validated using statistical tests (Section 3).

222  
 223 
$$ff = \frac{S}{V} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1)$$

224  
 225 Where *S* is the surface area (m<sup>2</sup>) and *V* is the volume (m<sup>3</sup>).

226 The *ff* for the IL with dimensions (length x width x thickness) *a* x *b* x *e*, is then given by equation  
 227 (2)

228  
 229 
$$ff = \frac{2(a.b) + 2e(a + b)}{a.b.e} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2)$$

230  
 231 The *ff* of the TS is calculated by equation (3)

232  
 233 
$$ff = \frac{2(R + e)}{R.e} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3)$$

234  
 235 **2.7 Ratios and parameters used to describe the results**

236 **2.7.1 Concentration index (CI)**

237 To analyse the concentrations achieved in the various fractions of thawing the concentration  
 238 index (Yee et al., 2003) is employed, which is defined as equation (4):

239  
 240 
$$CI = \frac{\text{fraction concentration}}{SMFI} \quad (4)$$

241  
 242 Where:

243 Fraction concentration is the value of the solute concentration in the thawed fraction

244 expressed in °Brix.

245

### 246 **2.7.2 Accumulated index (AI)**

247 The accumulated index is the sum of the concentration index n fractions divided by n.

248

$$249 \quad AI = \frac{\sum_{i=1}^n CI_i}{n} \quad (5)$$

250

### 251 **2.7.3 Accumulated time (AT)**

252 The accumulated time is the sum of the thawing times needed for the first n fractions of  
253 fractionated thawing.

254

$$255 \quad AT = \sum_{i=1}^n t_i \quad (\text{minutes}) \quad (6)$$

256

## 257 **2.8 Statistical analysis**

258 The accuracy of predictions is verified by calculating the root mean square error (RMS) given by  
259 the equation (7):

260

$$261 \quad RMS = 100\% \sqrt{\frac{\sum \left( \frac{V_E - V_P}{V_P} \right)^2}{N}} \quad (7)$$

262

263 Where  $V_E$  and  $V_P$  are, respectively, experimental values and model predictions,  $N$  is the number  
264 of available experimental points.

265

266 To obtain a measure of the correlation between experimental values and model predictions the  
267 Pearson correlation coefficient ( $r$ ) is used:

268

$$269 \quad r = \frac{\sum (V_E - \bar{V}_E) (V_P - \bar{V}_P)}{\sqrt{\sum (V_E - \bar{V}_E)^2 \sum (V_P - \bar{V}_P)^2}} \quad (8)$$

270

271  $\bar{V}_E$  and  $\bar{V}_P$  are the values obtained from experiments and from numerical prediction,  
272 respectively.

273

274 It was verified that the population of experimental results showed a normal distribution, by the  
275 use of Henry's line.

276 The statistical significance of the difference between experimental results and model predictions  
277 was tested by using analysis of variance (ANOVA), performing the Bartlett and Tukey tests.  
278 These calculations were performed using Excel software (Microsoft).

279

## 280 **2.9 Correction of thawing time for the test samples (TS)**

281 The test samples TS were obtained at -18 °C (see procedure described in sections 2.5.1 and  
282 2.5.2). However, the fractionated thawing tests were carried out at significantly higher  
283 temperatures. It is therefore necessary to determine the time that is needed to increase the  
284 temperature of the TS from its initial value (-18 °C) to the temperature at which thawing starts,

285 and subtract this “heating time” from the experimentally obtained “thawing time”.  
 286 This correction of the thawing time was performed based on a heat-transfer calculation for  
 287 concentrated systems, described by Yunus Çengel (2007) for stationary heat transfer.

288

289 The physical properties of ice, needed for these calculations, were obtained from correlations  
 290 given in Table 1.

291

292 **Table 1.** Correlations for estimating physical properties of ice

293

294 According to Yunus Çengel (2007), the currently employed analysis for concentrated systems  
 295 can be used if the Biot number  $Bi < 0.1$ .

296 Analysing the thawing process described in sections 2.5.1 and 2.5.2, it was found that for this  
 297 system the Biot numbers are below 0.1.

298 The freezing points at different concentrations expressed in °Bx are shown in Fig. 4.

299

300 **Fig. 4.** Freeze point depression for fructose, glucose and saccharose.

301

302 The FPD of solutions of sugars  $f$ ,  $g$  and  $s$  is given in Figure 4. The FPD of juices can be  
 303 estimated using the procedure described by Auleda, Raventós, Sánchez, & Hernández (2011a).  
 304 All thawing times (TT) mentioned in the tables in the remainder of this paper are corrected to the  
 305 temperature of the freeze concentrator, according to the procedure set out above.

306

### 307 **2.10 Mean values of the thawing times TT**

308 To obtain the global thawing time, equation (9) is used by Gulfo et al. (2013):

309

$$310 \quad t = \frac{\rho_{CI} K}{ff} \quad (\text{minutes}) \quad (9)$$

311 Where,  $\rho_{CI}$  is density of ice (-4.0 °C) ( $\text{kg/m}^3$ ),  $K$  is coefficient of thawing ( $\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and  $ff$  is  
 312 form factor ( $\text{m}^{-1}$ )

313

### 314 **2.11 Density of the ice formed during the process**

315 The density of ice as function of temperature is given by equations (10) and (11)

316

317 - The density of ice is given by equation (10) (Ibarz et al., 2005):

$$318 \quad \rho_{ice} = 916.89 - 0.13071T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (10)$$

319

320 - The density of carbohydrates is given by Equation (11), (Ibarz, & Barbosa, 2005):

$$321 \quad \rho_c = 1599.1 - 0.31046T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (11)$$

322

323 The arithmetic mean between the temperature of the heat-exchanger plate and the  
 324 temperature of the surface of the ice layer that touches the concentrated liquid (which  
 325 corresponds to FPD for concentrations of 5, 10, 15 y 20 °Brix) is -4.0 °C ( $T_{ats}$ , Table 1). This  
 326 value was inserted in equation (10) and equation (11), obtaining density values of 1597.85  
 327 and 916.36  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . These densities correspond to 100 °Brix and 0 °Brix respectively. Finally,  
 328 assuming a linear relation between density and concentration (°Brix), from the two pairs of  
 329 data ( $\rho_{CI}$ , °Brix), (1597.85, 100) and (916.36, 0) the linear equation (12) was obtained.

330

$$331 \quad \rho_{CI} = 6.83 Bx + 917.41 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (12)$$

332

## 333 **3. RESULTS**

334 **3.1 Thawing time (TT) and concentration index (CI)**

335 Tables 2, 3 and 4 show the results of the fractionated thawing process of the TS for each  
336 concentration (or process stage). These tables show for each  $ff$  and SMFI, the TT and CI for each  
337 thawing fraction and the total thawing times, at temperatures of 20, 25 and 30 °C.

338

339 **Table 2.** Thawing time and concentration index of test sample, at 20 °C

340 **Table 3.** Thawing time and concentration index of test sample, at 25 °C

341 **Table 4.** Thawing time and concentration index of test sample, at 30 °C

342

343 In order to verify if the means and the variances of the samples are similar, ANOVA analysis  
344 and the Bartlett test were carried out at a significance level of 95 %. These statistical tests  
345 were performed for the repetitive experiments of each PS at the same thawing temperature  
346 and for the experiments carried out at different thawing temperatures. The obtained results  
347 prove the equality of the means and their variances. Therefore, as far as the parameters TT  
348 and CI are considered, the behaviour of the solutions  $f$ ,  $g$ ,  $s$  at the temperatures tested can be  
349 considered as identical.

350 Table 5 shows the results obtained for the thawing of the IL corresponding to the fourth  
351 process stage (PS 4) (highest concentration) with solutions of  $f$ ,  $g$ , and  $s$ .

352

353 **Table 5** Thawing time and concentration index of the large ice sheets at 20 °C

354

355 These results were compared with the ones obtained for the TS in the fourth process stage (Table  
356 2) using ANOVA and the “Post test” by Bartlett and Tukey at a significance level of 95 %. These  
357 analyses showed that the IL and the TS show a similar behaviour during the thawing process, as  
358 far as TT and CI are concerned. This thus shows that the results for the IL are comparable with  
359 those of the TS.

360

361 **3.2 Calculation for the thawing time TT**

362 In order to obtain equations to calculate the thawing time as a function of concentration and form  
363 factor, the experimental values of Tables 1 to 4 need to be inserted in equation (9), thus obtaining  
364 a value for  $K$ .

365

366 **Obtaining values for  $K$**

367 Substituting in equation (9) the density  $\rho_{CI}$  (Equation (12)), the  $ff$  and the total thawing time,  
368 applicable for the various data of Tables 2, 3 and 4, the values of  $K$  are obtained, which are  
369 shown in Table 6.

370

371 **Table 6.** Mean values solutions of  $f$ ,  $g$  and  $s$ , for the four process stages.

372

373 Plotting the values of  $K$  versus the SMFI (°Brix), at the three thawing temperatures (20, 25 and  
374 30 °C) straight lines are obtained as given in Figure 5.

375

376 **Fig. 5.**  $K$  versus SMFI (°Brix) for the four process stages at temperatures of 20, 25 and 30 °C.

377

378 Substituting in equation (9) the linear relation  $K = f$  (°Brix) (from Fig. 5) and the values for  $\rho_{CI}$   
379 equations are obtained for the thawing time at temperatures of 20, 25 y 30 °C (Gulfo et al., 2013).  
380 Following equations (13), (14) and (15) are then obtained for the total thawing time:

381

$$t_{20^{\circ}C} = \frac{-6.55Bx^2 - 699.10Bx + 24320.54}{ff} \quad (\text{minutes}) \quad r = 0.77 \quad (13)$$



382  
383  
384

Valid for  $ff$  between 164 and 254, ( $m^{-1}$ ), SMFI between 1.3 and 8.4 °Bx and 20 °C

$$t_{25^{\circ}C} = \frac{-6.71Bx^2 - 741.16Bx + 21447.52}{ff} \quad (\text{minutes}) \quad r = 0.96 \quad (14)$$

385  
386  
387

Valid for  $ff$  between 172 and 226, ( $m^{-1}$ ), SMFI between 1.0 and 9.0 °Bx and 25 °C

$$t_{30^{\circ}C} = \frac{-5.61Bx^2 - 614.14Bx + 18686.11}{ff} \quad (\text{minutes}) \quad r = 0.94 \quad (15)$$

388  
389  
390

Valid for  $ff$  between 165 and 204  $m^{-1}$ , SMFI between 1.1 and 8.5 °Bx and 30 °C

#### 391 4. DISCUSSION

392  
393  
394  
395  
396

Equations (13), (14) and (15) show that TT decreases with the the concentration (°Brix) and is inversely proportional to  $ff$  (Gulfo et al., 2013). It can be calculated that a change of 10 % in  $ff$  induces a change of 10 % in thawing time, whereas a change of 10 % in the concentration (°Brix) only induces a change of 2 % in thawing time. In other words, the thawing time is more sensitive to variations in  $ff$  than to variations in concentration (°Brix).

397  
398  
399  
400  
401  
402

Using equations (13), (14) and (15), and the experimental values of  $ff$  and concentration (°Brix) given in Tables 2, 3 and 4 the total thawing times was calculated for each process stage. These were compared with the experimentally determined thawing times using the root mean square error (RMS). Following results were obtained: RMS = 10.1 % at 20 °C; 4.5 % at 25 °C and 4.8 % at 30 °C, where values below 25 % are considered to indicate a good model fit (Lewicki, 2000). These values follow the same trend as the correlation coefficients ( $r$ ) of the equations.

403  
404

It is observed that an increase in thawing temperature of 5 °C, in the interval between 20 and 30 °C, reduces the mean total thawing time with 10 to 15 minutes.

405  
406  
407  
408

Earlier, we showed that an increase in thawing temperature did not result in a significant variation of CI, which indicates that process times can be reduced by increased temperatures, without reduction of the CI.

#### 409 4.1 Determination of: Thawing time, concentration index and accumulated index

410

Based on the data of Tables 2, 3, and 4, allows find the following information:

411

TT for one thawing fraction.

412

CI for a certain fraction.

413

AI accumulated index.

414

415

In the present section, it is shown how the calculation was derived for the fourth PS (highest concentration). First, for each thawing fraction, the data of Tables 2, 3, and 4 were gathered for all three sugars, and mean values for accumulated time, concentration index and accumulated index were calculated. These mean values were plotted versus the thawing fraction number, as shown in Fig. 6.

417  
418  
419

420

**Fig. 6.** Mean values over three sugars ( $f$ ,  $g$ ,  $s$ ) for accumulated time, concentration index and accumulated index versus the thawing fraction number.

421

422

423

A.  $ff = 164$  to  $204 m^{-1}$ , SMFI = 7.3 to 8.4 °Brix, 20 °C.

424

B.  $ff = 189$  to  $226 m^{-1}$ , SMFI = 8.6 to 9.0 °Brix, 25 °C.

425

C.  $ff = 172$  to  $204 m^{-1}$ , SMFI = 6.9 to 8.5 °Brix, 30 °C.

426

427 These graphs display directly the TT, the CI and the AI, but also indirectly the thawing speed  
428 (mL/min). It is seen that increasing thawing temperatures cause reduced thawing times, which  
429 means that the thawing speed increases. Similarly, the graph shows three periods of melting with  
430 the following thermal characteristics (Yee et al., 2003; Gulfo et al., 2013):

431 First period (0 to 1): This is a transitional regime which is characterized by a strong influence of  
432 the initial temperature. The rate of thawing is increasing.

433 Second period (1 to 9): the system is in a steady state. This period is called, period of regular  
434 cooling. The thawing rate is constant and reaches its maximum value during this period, for this  
435 reason the RMS of 25 °C and 30 °C are reduced with respect to the 20 °C, this trend also is  
436 supported by the correlation coefficient  $r$  equations (13), (14), and (15).

437 Third period (9 to 10): This regime is similar to a process in which the temperature of all points  
438 of the body is the same.

#### 440 **4.2 Comparison of results of simulated peach juice with those of the basic sugars**

441 Fractionated thawing experiments were carried out with the simulated peach juice (see section  
442 2.4), in the same way as described for the solutions of basic sugars. Results are given in Table 7  
443 that shows the CI and TT for each thawing fraction.

444  
445

446 **Table 7.** Thawing time and concentration index for simulated peach juice (s) with  
447  $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ , SMFI = 8.2 °Brix, and thawing temperature of 30 °C.

448  
449 If the values of Table 7 are inserted in Fig. 6C, the results for peach juice can be easily compared  
450 with the results of the basic sugars (see Fig. 7).

451  
452 **Fig. 7.** Mean accumulated values of thawing time and concentration index for PS 4 for solutions  
453  $f$ ,  $g$  and  $s$  ( $ff = 187 \text{ m}^{-1}$ , 7.7 °Brix, 30 °C) and for simulated peach juice ( $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ , 8.2 °Brix,  
454 30 °C).

455  
456 Fig. 7 indicates that the fractionated thawing of simulated peach juice shows a behaviour that is  
457 very similar to the mean behaviour of the three basic sugars. To verify the similarity between the  
458 results obtained for the simulated peach juice and the mean of the three sugars, the RMS were  
459 calculated (Equation (7)), based on the differences between the mean values for  $f$ ,  $g$ , and  $s$  on one  
460 hand and the simulated peach juice on the other hand. The RMS obtained were 6.7 %, for the  
461 accumulated time and 15.6 % for the concentration index. Both values are much lower than the  
462 25 % considered the maximum for acceptance of a fit. The fact that the behaviour of the  
463 simulated peach juice is described relatively well by the average behaviour of the three basic  
464 sugars, is probably caused by the composition of the juice (18.80 %, glucose, 25.50 % fructose,  
465 55.70 % saccharose), which is relatively close to an equal distribution between the three sugars  
466 (33.33 % for each of the sugars). This criterion is valid for the experimental conditions of the  
467 data depicted in Fig. 6, and for these conditions, the calculation method explained above provides  
468 an approximation of the TT and the SMFI during fractional thawing of sugar solutions.

#### 469 470 **4.3. Application of the calculation algorithm for orange juice.**

471 Based on the analyses presented, a calculation algorithm was developed that is presented in Fig.  
472 8.

473  
474 **Fig. 8.** Algorithm for the calculation of one stage of a freeze concentration process.

475  
476 In the process, a quantity of 300 kg of orange juice will be freeze concentrated. The orange juice  
477 is pasteurised and has an initial concentration of 11.5 °Brix. The process will be based on one

478 process stage and solute recovery by fractionated thawing.

479 **Freeze concentration process stage:**

480 This process stage is calculated by the method presented by Auleda et al (2011b). The known  
481 parameters are:

482

Description	Value	Unit
Sugar composition:		
Fructose	32.0	%
Glucose	32.6	%
Saccharose	35.5	%
FPD increase during stage	0.5	°C
Heat flux through the plate	500	W/m <sup>2</sup>
Linear velocity of juice on the plate	0.5	m/s
Ice layer thickness	1.0 10 <sup>-2</sup>	m

483

Calculation results:

Description	Value	Unit
Initial freezing point	-1.15	°C
Final freezing point	-1.64	°C
Coolant inlet temperature	-8.1	°C
Mean rate of pure ice formation	1.58·10 <sup>-6</sup>	m/s
Duration of processing stage	6105	s
Amount of ice formed	9.42	kg/m <sup>2</sup>
Mass flow per plate length	1.58	kg·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup>
Required surface area after correction (increased by 10 %)	17.16	m <sup>2</sup>
Concentration at the end of the stage	15.57	°Bx
Amount of concentrated juice	153.04	kg
Amount of ice obtained	146.95	kg
Concentration of solutes in the ice (SMFI)	7.26	°Bx

484

485 **Fractionated thawing process stage**

486 The results obtained from the calculation define the main characteristics of the freeze  
487 concentration and fractionated thawing process.

488 -The amount of ice to the initial concentration of the juice and thawing times

489 -Thawing times and concentration.

490 The calculation of section 4.1 and 4.2 will be used to calculate the size of the thawing fractions  
491 and the process time.

492 First, equation (12) is used to determine the density of the obtained ice sheet. This is 967.00  
493 kg/m<sup>3</sup>, which, for a plate surface of 1m x 1m, corresponds to a thickness of 0.098 m and a form  
494 factor of 204.1 m<sup>-1</sup>.

495 For the calculation of the fractionated thawing process the graph of Fig. 6A is used, obtained  
496 with the averages of *f*, *g* and *s* (*ff* between 164 and 204 m<sup>-1</sup>, SMFI between 7.3 and 8.4 °Brix, 20  
497 °C).

498

499 **Fig. 9.** Application of the calculation process for orange juice

500

501 First thawing fraction:

502 As the aim is to obtain a first fraction with a concentration equal to that of the original juice (11.5  
503 °Brix), the necessary AI is equal to:

504

505 
$$CI = \frac{^{\circ}Brix}{^{\circ}Brix_{ICE}} = \frac{11.5}{7.26} = 1.58$$

506  
507 Where, CI coincides approximately with AI  
508

509 
$$AI = \frac{\sum_{i=1}^6 CI_i}{n} = \frac{2.80 + 2.07 + 1.57 + 1.23 + 1.00 + 0.77}{6} = 1.52$$

510 In the AI-axis of Fig. 9 a horizontal line is drawn for AI = 1.52. This horizontal line touches the  
511 line that indicates the number of fractions at fraction 6. It is thus seen that 6/10<sup>th</sup> of the ice needs  
512 to be thawed in the first fraction. As the total amount of ice is 146.95 kg, the amount of ice that  
513 needs to be thawed in the first fraction is:

514  
515 
$$q_{6f} = 0.6 \times 146.95 = 88.17 \text{ kg}$$
  
516

517 In a similar way, it can be seen in Fig. 9 that the TT equals 60.3 minutes.

518 Second thawing fraction:

519 From Fig. 9 the CI values are obtained for thawing steps 7 to 10 and using equation (5), the AI  
520 can be calculated:  
521

522 
$$AI = \frac{\sum_{i=7}^{10} CI_i}{n} = \frac{0.43 + 0.30 + 0.16 + 0.07}{4} = 0.24$$

523  
524 The amount of ice to be thawed is:

525  
526 
$$q_{4f} = 0.4 \times 146.96 = 58.78 \text{ kg}$$
  
527

528 The SMFI is then:  $0.2 \times 7.26 = 1.45$  °Bx

529 Fig. 9 shows the total time (101.2 minutes). Subtracting the time of the first fraction (60.3  
530 minutes) it gets the time of second fraction 34.9 minutes.

531 Although this is a specific example, with the procedure described one could calculate the SMFI  
532 (°Bx) and TT (min) for any thawing fraction.

533  
534

### 535 **Estimation of the energy necessary for thawing**

536 The heat needed for thawing is given by the equation (16):

537  
538 
$$Q_T = (Q_{ice} + Q_{fusion})\gamma \tag{16}$$
  
539

540 Where:

541  $Q_{ice}$ : the energy needed to increase the temperature of the ice sheet from the mean freeze-  
542 concentrator temperature to the melting temperature.

543  $Q_{fusion}$ : the energy needed to melt the ice at melting temperature

544  $\gamma$ : is a coefficient that accounts for heat losses, which has values of 1.05 or slightly higher.

545 In summary, the main parameters of the freeze concentration process can be calculated by  
546 solving the equation presented by Chen et al., (2000) using the procedure developed by Auleda et  
547 al (2011b), and the main parameters of the thawing process for recovery of solutes can be  
548 calculated by the procedure presented in the current paper. This, together with the energy  
549 calculations (equation (16)) allows the estimation of the main variables of a falling-film freeze

550 concentration system and thus compare its economic viability with that of other concentration  
551 processes for juices.

552

## 553 **5. CONCLUSIONS**

554 At constant temperature, the thawing times and the concentration indices for solutions of the  
555 basic sugars, fructose, glucose and saccharose, at equal solute mass fraction in the ice and equal  
556 *form factor* are identical, independent of the type of the sugar (significance level 95 %).

557 The thawing time decreases with the concentration (in °Bx) and is inversely proportional to the  
558 *form factor*, being more sensitive to variation in the form factor than to variation in the  
559 concentration.

560 At thawing temperatures of 20, 25 and 30 °C, at significance level of 95 %, no differences were  
561 observed between the experimentally obtained concentration indices. Thus, the increase of  
562 thawing temperatures enables a reduction in thawing time, without changing the concentration  
563 indices.

564 A calculation algorithm was presented that relates the thawing fraction to concentration and time,  
565 valid for any ice sheet obtained from freeze concentration of juice in the system and conditions  
566 described in this paper. The presented calculation model, also provides estimations of the energy  
567 used for thawing, the water generated (water with low levels of solutes), and consequently the  
568 costs of the fractionated thawing process.

569

570

## 571 **REFERENCES**

572

573 Auleda, JM., Raventós, M., Sánchez, J., & Hernández E (2011a) Estimation of the freezing point  
574 of concentrated fruit juices for application in freeze concentration. *Journal of Food*  
575 *Engineering* 105: 289-294.

576 Auleda, JM., Raventós, M., & Hernández E (2011b) Calculation method for designing a multi-  
577 platefreeze-concentrator for concentration of fruit juices. *Journal of Food Engineering* 107:  
578 27-35.

579 Boaventura, B.C.B., Murakami, A.N.N., Prudêncio, E.S., Maraschin, M., Murakami,  
580 F.S., Amante, E.R., & Amboni, R.D.M.C. (2013). Enhancement of bioactive compounds  
581 content and antioxidant activity of aqueous extract of mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.)  
582 through freeze concentration technology. *Food Research International*. 53 (2), pp 686-692

583 Chen, P., Chen, XD., & Free, KW., (1998) Solute inclusion in ice formed from sucrose  
584 solutions on a sub-cooled surface. An experimental study. *Journal of Food Engineering*  
585 38: 1-13.

586 Chen, P., Chen, XD., & Free, KW., (1999). An experimental study on the spatial uniformity of  
587 solute inclusion in ice formed from falling film flows on a sub-cooled surface. *Journal of*  
588 *Food Engineering* 39: 101-105.

589 Chen, P., & Chen, XD., (2000). A generalized correlation of solute inclusion in ice formed from  
590 aqueous solutions and food liquids on sub-cooled surface. *The Canadian Journal of*  
591 *Chemical Engineering* 78: 312-319.

592 Choi, Y., & Okos, MR., (1986). Effect of temperature and composition on the thermal properties  
593 of foods. In: Le Maguer, M., Jelen, P. (Eds.). *Food Engineering and Process Applications,*  
594 *Transport Phenomena*, vol. 1, Elsevier, London, pp. 93-101.

595 Flesland, O., (1995). Freeze concentration by layer crystallization. *Drying Technol.* 13:1713-  
596 1739.

597 Gulfo, R., Auleda, JM., Moreno, F., Ruiz, Y., Hernandez, E., & Raventos, M., Multi-plate Freeze  
598 Concentration. Recovery of Solutes Occluded in the Ice and Determination of Thawing Time.  
599 *Food Science and Technology International*. Published online 19 June 2013. DOI:  
600 10.1177/1082013213489127

601 Gunathilake, M., Shimmura, K., Miyawaki, O., (2013). Analysis of solute distribution in ice  
602 formed in progressive freeze-concentration. *Food Science and Technology Research*. 19 (3),  
603 pp. 369-374

604 Hagiwara, T., Mao, J., Suzuki, T., & Takai, R., (2005). Ice Recrystallization in Sucrose solutions  
605 stored in a Temperature Range of -21 °C to -50 °C, *Food Sci. Technol. Res.*, 11 (4), 407-411

606 Hartel, R. W., & Chung, M.S., (1992). Contact Nucleation of Ice in Fluid Dairy Products.  
607 *Journal of Food Engineering* 18: 281-296.

608 Hernández, E., Raventós, M., Auleda, JM., & Ibarz, A., (2009). Concentration of apple and pear  
609 juices in a multi-plate freeze concentrator. *Innovative Food Science and Emerging*  
610 *Technologies* 10: 348–355.

611 Ibarz, A., & Barbosa, CG., (2005). Operaciones unitarias en la ingeniera de alimentos. *Ediciones*  
612 *Mundi-Prensa, Madrid*.

613 Lee, YCh, & Lee, SW., (1998). Quality changes during storage in korean cloudy pear juice  
614 concentrate by different methods. *Food Science and Biotechnology* .Vol 7, nº 2, 127-130.

615 Lewicki PP. (2000). Raoult's law based food water sorption isotherm. *Journal of Food*  
616 *Engineering*, 43(1): 31–40.

617 Miyawaki, O., (2001). Progressive freeze-concentration: a new method for high-quality  
618 concentration of liquid food. *Food Engineering Progress* Vol 5, nº 3. pp 190-194.

619 Miyawaki, O., Kato, S., & Watabe K. (2012). Yield improvement in progressive freeze-  
620 concentration by partial melting of ice. *Journal of Food Engineering* 108 377–382.

621 F.L. Moreno, M. Raventós, E. Hernández, & Y. Ruiz (2014) Block freeze-concentration of  
622 coffee extract: Effect of freezing and thawing stages on solute recovery and bioactive  
623 compounds. *Journal of Food Engineering* 120, 158-166.

624 Müller, M., & Sekoulov, I., (1992). Waste water reuse by freeze concentration with a falling film  
625 reactor. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 26, nº 7-8, pp. 1475-1482.

626 Nakagawa, K., Maebashi, S., & Maeda, K., (2009). Concentration of aqueous dye solution by  
627 freezing and thawing. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 87: 779-787.

628 Otero, L., Sanz, P., Guignon, B., & Sanz, PD., (2012). Pressure-shift nucleation: A potential  
629 tool for freeze concentration of fluid foods. *Innovative Food Science and Emerging*  
630 *Technologies* 13: 86–99.

631 Raventós, M., Hernández, E., Auleda, JM., & Ibarz, A., (2007) Concentration of aqueous sugar  
632 solutions in a multi-plate cryoconcentrator. *Journal of Food Engineering*. 79: p. 577-585.

633 Sánchez, J., Ruiz, Y., Hernández, E., Auleda, JM., & Raventos, M., (2010). Progressive  
634 freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science*  
635 *and Emerging Technologies* pp. 644–651.

636 Sánchez, J., Hernández, E., Auleda, JM., & Raventos, M., (2011). Review: Freeze concentration  
637 Technology Applied to Dairy Products. *Food Science and Technology Internacional* 17(1): 5-  
638 13.

639 Scholz, R., (1993) Die Schichtkristallisation als thermisches Trennverfahren. *Ph.D.Thesis,*  
640 *Fortschritt-Berichte*. VDI Reihe 3 Nr. 347, VDI-Verlag, Düsseldorf.

641 Van Weelden (1994) Freeze concentration: the alternative for single strength juices, *Fruit*  
642 *Processing* 4(5) 140-143 *Niro Process Technology, The Netherlands*.

643 Yee, PL., Wakisaka, M., Shirai, Y., & Hassan, MA., (2003). Effects of Single food componets  
644 on freeze concentración by freezing and thawing technique. *Japan Journal of Food*  
645 *Engineering*, 4: 77-82.

646 Yunus A, Çengel. (2007). Heat and mass transfer. A practical approach. *McGraw-Hill México*.

647  
648  
649  
650  
651

## INDUSTRIAL RELEVANCE

The freeze concentration is a technology that allows eliminating water from the liquid foods at temperatures below the water's freezing point, what allows obtaining products of better quality. Fractionated thawing was studied as a method to recover solutes incorporated in the ice, improving the global efficiency of a freeze concentration process by optimal recovery of the solutes retained in the ice. Also provides estimations of the energy used for thawing. This work continues the research in falling film freeze concentration technology which we have submitted and published in this journal. This work contributes to increase the global process efficiency.

### **Highlights**

- By fractionated thawing, more than 60 % of the solutes retained in the ice were recovered in 34 %, of the total thawing time
- The thawing time decreases with the concentration and is inversely proportional to the form factor.
- It's possible to simulate the thawing process of the operating parameters and so improve the global efficiency of a freeze concentration process



Figure 1

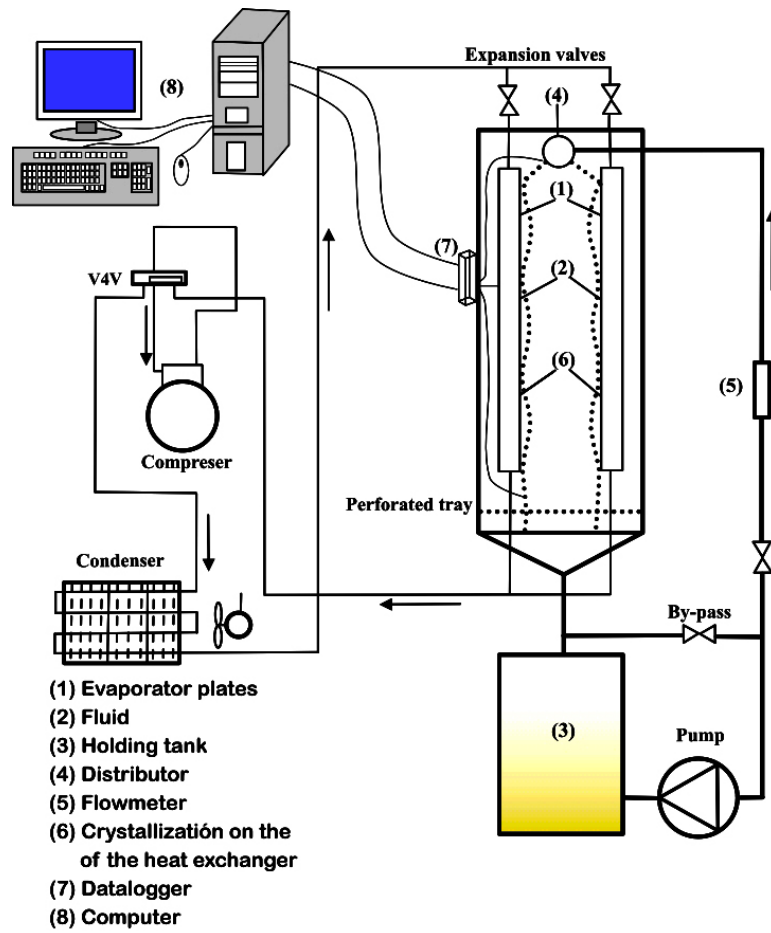


Figure 1. Schematic layout of the freeze concentration unit.

Figure 2

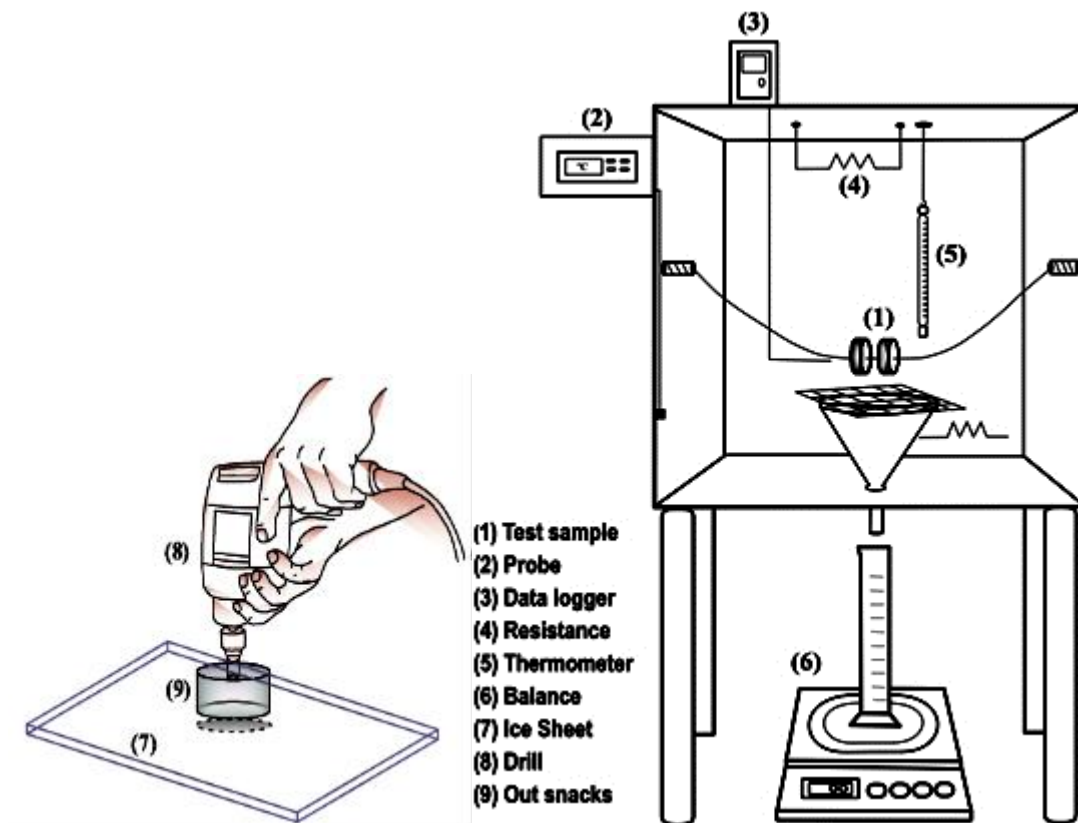


Figure 2. Collecting test samples for thawing studies.

Figure 3

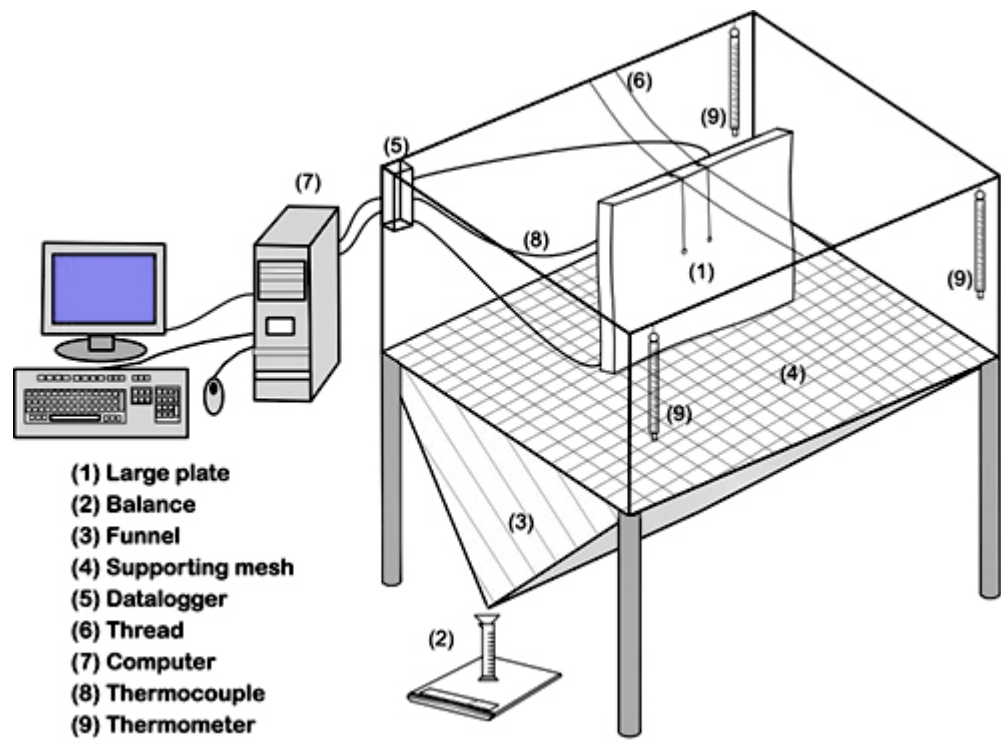


Figure 3. Thawing studies on large ice sheets.

Figure 4

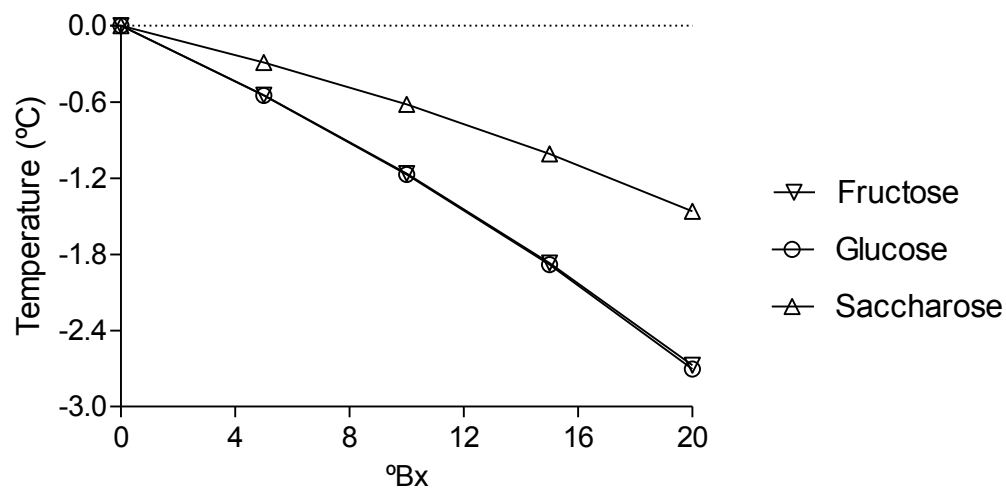


Figure 4. Freeze point depression for fructose, glucose and saccharose.

Figure 5

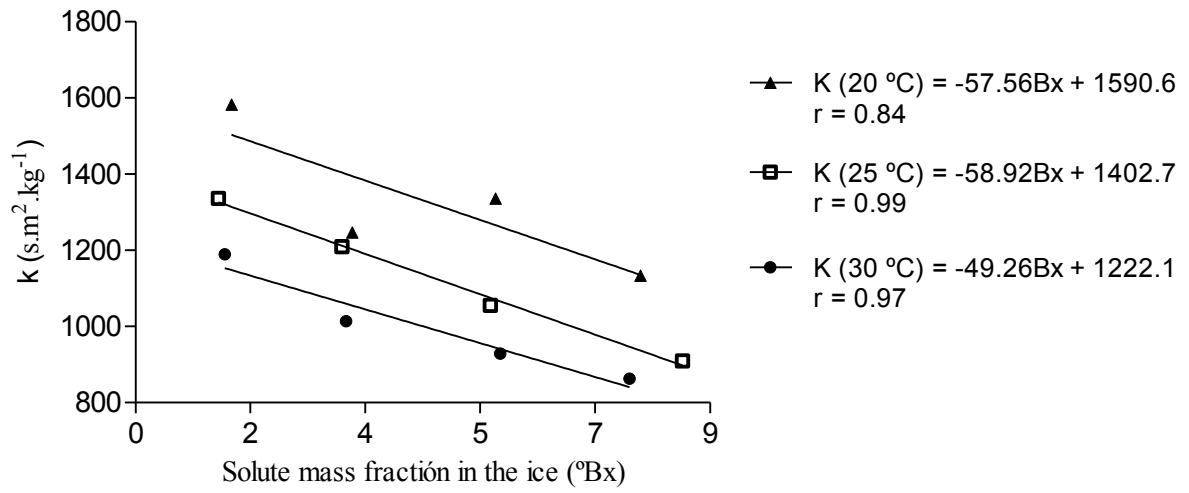


Figure 5.  $K$  versus SMFI (°Brix) for the four process stages at temperatures of 20, 25 and 30 °C.

Figure 6

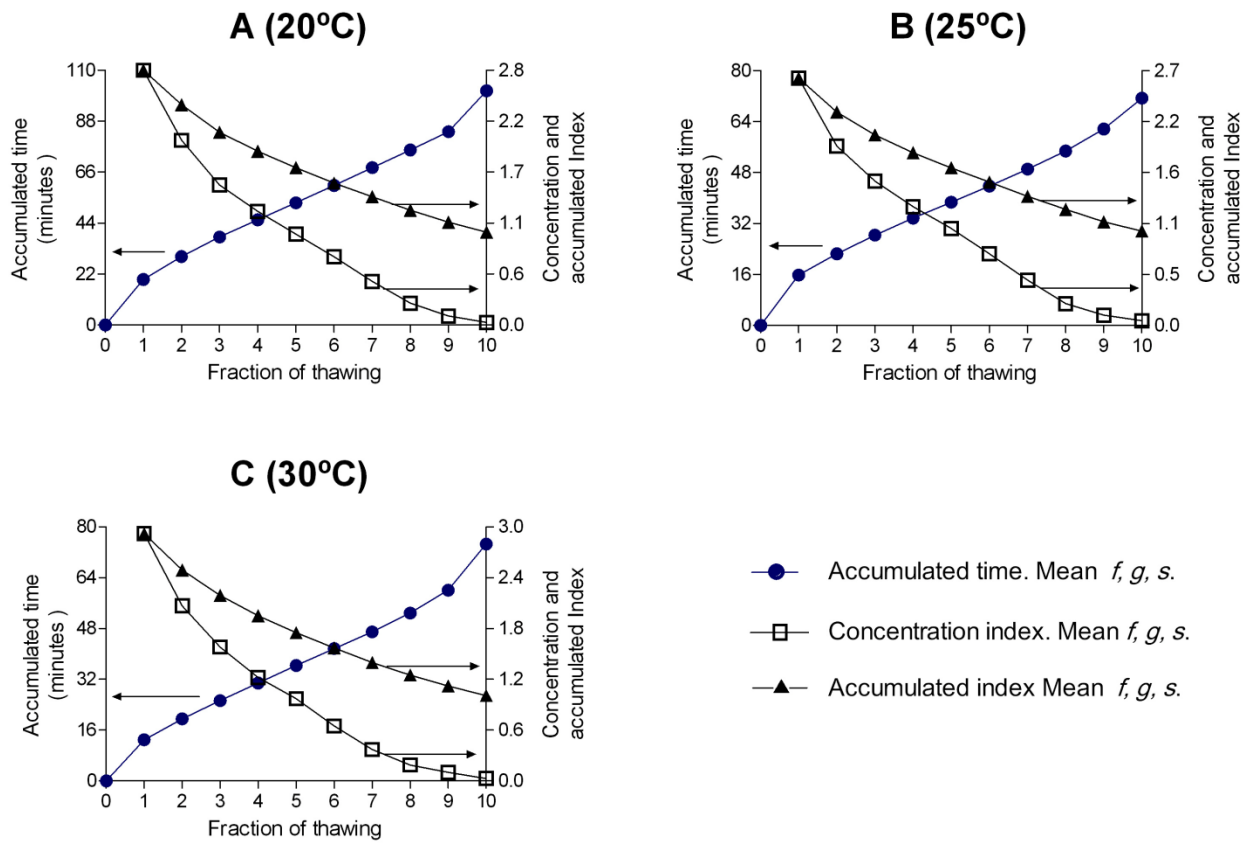
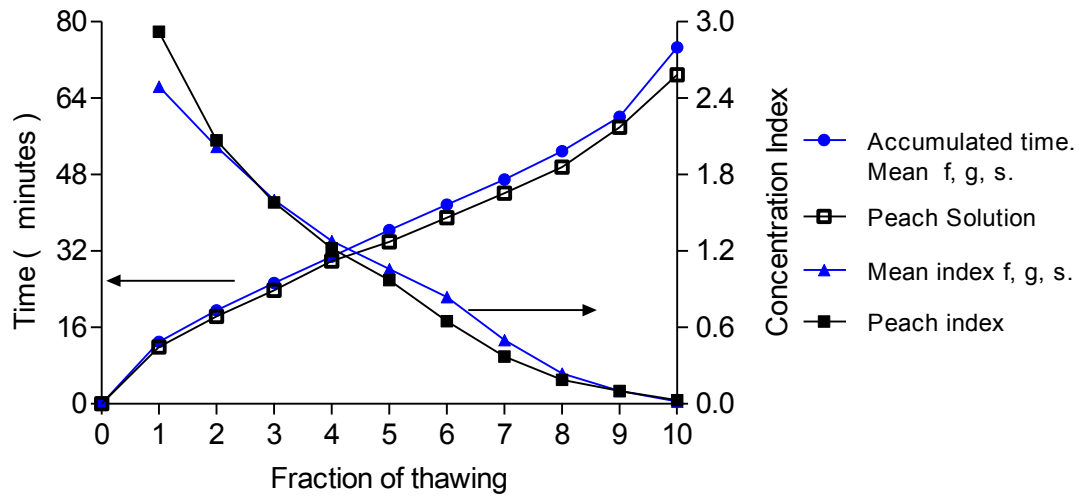


Figure 6. . Mean values over three sugars (*f, g, s*) for accumulated time, concentration index and accumulated index versus the thawing fraction number.

Figure 7



**Figure 7.** Mean accumulated values of thawing time and concentration index for PS 4 for solutions *f*, *g* and *s* ( $ff = 188 \text{ m}^{-1}$ ,  $7.7^\circ\text{Brix}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ) and for simulated peach juice ( $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ ,  $8.2^\circ\text{Brix}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ).

Figure 8



Figure 8. Algorithm for the calculation of one stage of a freeze concentration process.



Figure 9

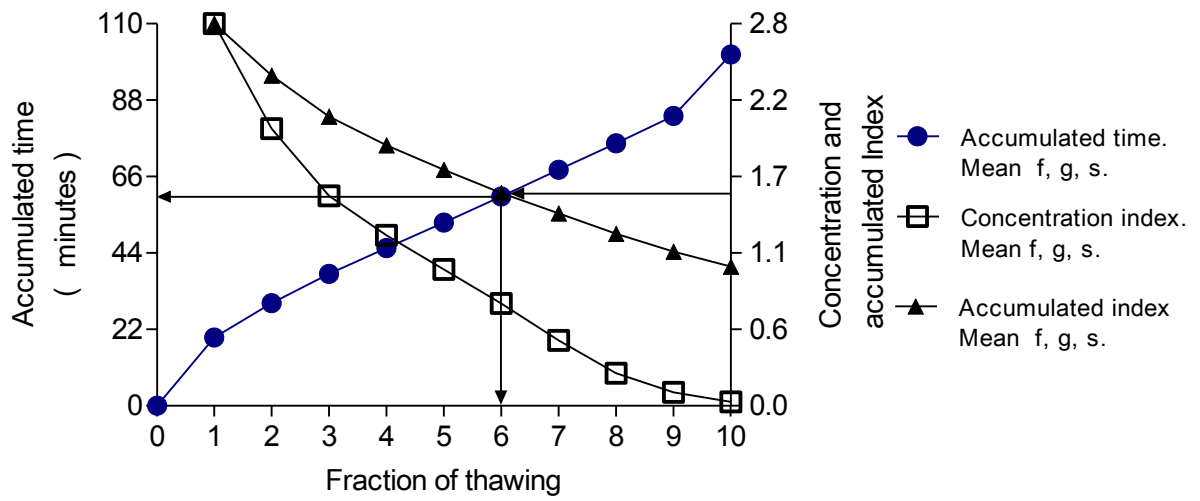


Figure 9. Application of the calculation process

FIGURE CAPTIONS

**Fig. 1.** Schematic layout of the freeze concentration unit.

**Fig. 2.** Collecting test samples for thawing studies

**Fig. 3.** Thawing studies on large ice sheets

**Fig. 4.** Freeze point depression for fructose, glucose and saccharose

**Fig.5.**  $K$  versus SMFI ( $^{\circ}$ Brix) for the four process stages at temperatures of 20, 25 and 30  $^{\circ}$ C

**Fig. 6.** Mean values over three sugars ( $f$ ,  $g$ ,  $s$ ) for accumulated time, concentration index and accumulated index versus the thawing number

**Fig. 7.** Mean accumulated values of thawing time and concentration index for PS 4 for solutions  $f$ ,  $g$  and  $s$  ( $ff = 188 \text{ m}^{-1}$ , 7.7  $^{\circ}$ Brix, 30  $^{\circ}$ C) and for simulated peach juice ( $ff = 195 \text{ m}^{-1}$ , 8.2  $^{\circ}$ Brix, 30  $^{\circ}$ C).

**Fig. 8.** Algorithm for the calculation of one stage of a freeze concentration process.

**Fig. 9.** Application of the calculation process for orange juice

Table 1. Correlations for estimating physical properties of ice

PHYSICAL PROPERTY	CORRELATION	REF.
Specific heat for carbohydrates	$C_{e1} = 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3}T_a - 5.9399 \cdot 10^{-6}T_a$	Ibarz et al (2005)
Specific heat for ice	$C_{e2} = 2.0623 + 6.076910 \cdot 10^{-3}T_a$	Ibarz et al (2005)
Mass fraction of ice	$X_{ice} = \frac{(1 - Bx) \cdot p}{100}$	
Mass fraction of solute	$X_c = \frac{Bx \cdot p}{100}$	
Total mass fraction	$X_T = X_{ice} + X_c$	
Density of ice (-18 °C)	$\rho_{-18^\circ C} = 6.85Bx + 919.2$	Gulfo et al, 2013
Freezing point depression	$FPD = \frac{K_c X_c}{(1 - X_c - b_{nl} X_c) \cdot M_S}$	Auleda et al (2011a)
Dimensionless number (1)	$\theta_1 = \frac{FPD - T_{amb}}{T_{ref} - T_{amb}}$	Yunus Çengel (2007)
Time constant	$b_2 = \frac{-\ln \theta_1}{t}$	Yunus Çengel (2007)
Average temperature of the sample	$T_{ats} = -(-FPD + 1.995)$	Auleda et al (2011a)
Dimensionless number (2)	$\theta_2 = \frac{T_{ats} - T_{amb}}{T_{ref} - T_{amb}}$	Yunus Çengel (2007)
Corrector time	$t_2 = \frac{-\ln \theta_2}{b_2}$	Yunus Çengel (2007)
Corrected time	$t_{ct} = t_2 - t_1$	
Average temperature of the sample (-18 °C)	$T_a = \frac{T_{ref}}{2}$	
Heat transfer coefficient	$\alpha = 1000 \cdot b_2 \cdot \rho_{-18^\circ C} \cdot \frac{X_T}{ff}$	
Heat conduction coefficient	$k = (2.2196 - 6.248910 \cdot 10^{-3} \cdot T_a) + 1.01551^{-4} \cdot T_a^2$	
Biot number	$Biot = \frac{\alpha}{k \cdot ff}$	

**Table 2.** Thawing time and concentration index of test sample, at 20 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	$\bar{n}^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	177	1.8	f	t <sup>d</sup>	19.6	29.7	38.8	44.9	54.0	62.2	70.6	80.7	92.8	115.8
				CI <sup>e</sup>	2.9	2.3	1.6	1.2	0.8	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1
	194	1.4	g	t	24.0	34.5	45.8	55.0	64.5	74.6	85.6	97.8	112.1	139.4
				CI	3.2	2.1	1.5	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.1	0.1
	167	1.3	s	t	23.9	37.1	49.7	61.7	73.8	86.8	98.8	110.9	124.9	154.9
				CI	2.3	1.9	1.5	1.3	1.0	0.8	0.5	0.5	0.2	0.1
10	168	3.0	f	t	20.4	28.7	36.1	43.2	50.5	57.7	66.0	75.3	85.5	112.8
				CI	3.0	2.1	1.7	1.3	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
	190	3.7	g	t	19.6	28.8	37.3	45.5	53.1	60.2	68.3	78.9	91.3	105.7
				CI	2.7	2.0	1.6	1.4	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0
	200	3.5	s	t	20.7	29.0	34.4	40.4	45.5	52.5	59.5	68.6	81.1	97.1
				CI	3.0	2.0	1.5	1.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
15	180	5.6	f	t	22.3	31.3	37.9	44.1	52.2	59.7	67.8	76.3	86.9	112.0
				CI	2.9	2.1	1.6	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	179	6.2	g	t	21.5	31.9	41.2	50.3	58.6	66.9	75.2	84.3	94.4	108.6
				CI	2.6	2.0	1.6	1.3	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0
	254	5.1	s	t	16.7	24.7	31.8	38.8	45.8	52.9	59.9	67.9	77.0	92.0
				CI	3.2	2.1	1.6	1.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
20	176	7.3	f	t	19.4	30.6	39.8	47.8	55.9	63.4	71.5	79.9	89.3	106.9
				CI	3.0	2.1	1.6	1.2	0.9	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	204	8.0	g	t	20.1	28.4	35.5	41.7	47.8	53.8	59.8	65.2	70.4	80.8
				CI	2.7	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.3	0.1	0.1
	164	8.4	s	t	19.5	29.6	38.6	46.6	54.6	63.7	72.7	81.7	90.8	115.9
				CI	2.7	2.2	1.6	1.3	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0

<sup>a</sup> Process Stage of freeze concentration; <sup>b</sup> form factor <sup>c</sup> Solute mass fraction in the ice; <sup>d</sup> time (minutes)

<sup>e</sup> concentration index.

**Table 3.** Thawing time and concentration index of test sample, at 25 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	$\beta$ <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	185	1.6	f	t <sup>d</sup>	15.7	25.0	33.5	41.9	50.1	58.5	67.8	77.3	90.4	114.4
				CI <sup>e</sup>	2.8	2.0	1.6	1.2	0.9	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1
	177	1.3	g	t	18.1	27.3	34.9	42.4	50.6	59.1	67.5	77.1	89.2	111.6
				CI	2.9	2.0	1.4	1.2	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1
	195	1.0	s	t	12.2	20.5	28.6	37.0	44.3	53.0	62.4	73.0	84.6	106.6
				CI	3.1	2.0	1.4	1.0	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1
10	173	3.0	f	t	15.4	24.5	32.5	39.9	47.3	55.4	64.9	74.1	85.6	105.7
				CI	3.0	2.2	1.5	1.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
	188	3.3	g	t	18.9	27.4	35.6	43.0	50.3	57.6	64.8	73.0	82.5	101.9
				CI	3.2	2.0	1.5	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	187	3.4	s	t	15.8	24.3	32.5	40.7	48.3	55.8	63.8	73.1	83.5	103.8
				CI	2.8	2.1	1.7	1.3	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
15	172	5.4	f	t	16.8	25.9	33.4	40.7	50.8	54.3	61.4	69.5	79.1	96.1
				CI	2.9	2.1	1.6	1.2	1.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
	175	6.2	g	t	16.1	23.4	29.7	35.8	41.9	48.2	54.7	62.0	70.3	86.8
				CI	2.7	2.0	1.6	1.3	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	189	5.1	s	t	14.1	22.1	29.2	36.2	43.2	50.2	57.2	65.3	76.3	99.3
				CI	3.1	2.2	1.6	1.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
20	226	8.6	f	t	13.6	20.1	25.6	30.8	35.3	39.7	44.7	50.1	55.6	62.1
				CI	2.8	1.9	1.5	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1
	207	8.1	g	t	15.1	22.4	28.7	34.3	39.6	45.9	50.9	56.5	62.7	73.2
				CI	2.7	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.3	0.1	0.1
	189	9.0	s	t	18.9	24.9	31.0	36.0	41.1	45.7	51.7	57.7	66.8	78.8
				CI	2.4	1.9	1.6	1.4	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0

<sup>a</sup> Process Stage of freeze concentration; <sup>b</sup>form factor <sup>c</sup>Solute mass fraction in the ice; <sup>d</sup>time (minutes)

<sup>e</sup>concentration index.

**Table 4.** Thawing time and concentration index of test sample, at 30 °C

PS <sup>a</sup> (°Bx)	$\#^b$ (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	179	1.8	f	t <sup>d</sup>	13.1	21.2	27.7	34.7	41.9	48.5	55.8	64.1	75.2	98.3
				CI <sup>e</sup>	2.5	2.0	1.6	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1
	190	1.1	g	t	14.0	21.3	27.8	34.4	41.8	50.0	59.1	67.4	77.9	95.0
				CI	2.7	2.0	1.5	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.1
	167	1.3	s	t	14.0	22.2	29.6	37.0	45.0	53.3	62.4	72.7	85.1	115.2
				CI	2.4	1.7	1.5	1.3	1.0	0.9	0.6	0.5	0.2	0.1
10	180	2.8	f	t	13.8	21.2	27.7	34.7	41.1	48.2	55.7	64.0	73.5	92.6
				CI	3.0	2.1	1.6	1.2	0.8	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0
	197	3.5	g	t	15.4	22.6	28.1	33.3	38.4	43.7	49.2	55.4	62.5	76.5
				CI	2.8	2.1	1.6	1.3	0.9	0.6	0.5	0.2	0.1	0.0
	172	3.6	s	t	13.7	21.2	27.8	34.1	40.5	47.7	55.0	62.5	72.2	91.3
				CI	2.5	1.9	1.6	1.3	1.0	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1
15	179	5.5	f	t	13.6	20.8	26.2	31.3	36.4	41.6	47.0	53.6	63.8	81.0
				CI	2.8	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1
	165	6.1	g	t	12.8	19.2	25.4	31.0	37.0	43.2	49.6	56.9	65.5	86.0
				CI	2.8	2.2	1.6	1.3	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	200	5.6	s	t	12.7	20.0	26.1	32.2	38.4	44.4	50.7	57.3	65.8	77.9
				CI	3.0	2.1	1.6	1.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
20	185	6.9	f	t	14.6	21.7	27.8	33.8	39.9	45.3	50.6	56.7	64.0	76.3
				CI	3.2	2.0	1.5	1.2	1.0	0.6	0.3	0.2	0.1	0.0
	204	7.9	g	t	12.3	18.3	23.4	28.0	32.4	36.6	41.0	45.5	51.5	64.8
				CI	2.9	1.9	1.5	1.2	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1
	172	8.5	s	t	12.1	18.6	24.7	30.7	37.0	43.2	49.4	56.5	64.7	82.8
				CI	2.7	2.3	1.7	1.3	1.0	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0

<sup>a</sup> Process Stage of freeze concentration; <sup>b</sup> form factor <sup>c</sup> Solute mass fraction in the ice; <sup>d</sup> time (minutes)

<sup>e</sup> concentration index.

**Table 5.** Thawing time and concentration index of the large ice sheets at 20 °C

PS <sup>a</sup>	4 (°Bx)	ff <sup>b</sup> (m <sup>-1</sup> )	SMFI <sup>c</sup>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	164	6.8	f	t <sup>d</sup>	20.6	31.1	39.5	46.0	53.5	60.5	66.8	74.1	82.6	108.0
				CI <sup>e</sup>	3.1	2.3	1.8	1.3	0.8	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0
	178	6.8	g	t	17.3	25.8	34.2	39.9	46.9	53.3	60.5	67.7	74.1	96.5
				CI	3.2	2.4	1.7	1.3	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0
	185	7.7	s	t	18.9	28.3	36.5	43.8	50.3	56.5	63.6	70.9	79.2	103.2
				CI	3.1	2.2	1.8	1.3	0.9	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0

<sup>a</sup> Process Stage of freeze concentration; <sup>b</sup>form factor <sup>c</sup>Solute mass fraction in the ice; <sup>d</sup>time (minutes)

<sup>e</sup>concentration index.

**Table 6.** Mean values solutions of  $f$ ,  $g$  and  $s$ , for the four process stages.

	1	2	3	4
20°C				
$f^a$ (m <sup>-1</sup> )	179.0	186.0	204.0	181.0
SMF <sup>b</sup> (°Brix)	1.5	3.4	5.6	7.9
Total time (minutes)	136.7	105.2	104.2	101.2
K (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1582.9	1247.4	1336.4	1133.5
25°C				
$f$ (m <sup>-1</sup> )	186.0	183.0	179.0	207.0
SMFI <sup>1</sup> (°Brix)	1.3	3.2	5.6	8.6
Total time (minutes)	110.9	103.8	94.1	71.4
K (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1336.0	1209.9	1055.7	909.7
30°C				
$f$ (m <sup>-1</sup> )	179.0	183.0	181.0	187.0
SMFI <sup>1</sup> (°Brix)	1.4	3.3	5.7	7.8
Total time (minutes)	102.8	86.8	81.6	74.6
K (s m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	1189.3	1013.6	928.6	862.8

<sup>a</sup>Form factor, <sup>b</sup>Solute mass fraction in the ice.



**Table 7.** Fraction of thawing simulated peach (s) and concentration index for  $ff$  195, SMFI 8.21°Brix and temperature of 30 °C.

Descriptions	Peach $ff^a$ 195, SMFI <sup>b</sup> 8,21	
Fraction of thawing	Time (min)	CI <sup>c</sup>
1	11.90	2.49
2	6.40	2.02
3	5.45	1.60
4	6.15	1.28
5	4.02	1.06
6	5.02	0.84
7	5.18	0.50
8	5.47	0.24
9	8.29	0.10
10	11.02	0.02

<sup>a</sup> Form factor; <sup>b</sup> Solute mass fraction in the ice; <sup>c</sup> Concentration Index.