

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**SECCIÓN DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN  
LIOFILIZADOR DE PLATOS CONDUCTORES  
A ESCALA PILOTO PARA DESHIDRATAR  
ALIMENTOS”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**AUTOR: LEYNARD NATIVIDAD MARÍN**

Callao, 2013  
PERÚ



## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO

### MIEMBROS DEL JURADO:

- |                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| • MG. PABLO BELIZARIO DÍAZ BRAVO   | PRESIDENTE |
| • DR. OSCAR JUAN RODRÍGUEZ TARANCO | SECRETARIO |
| • MG. ZOILA MARGARITA DÍAZ CÓRDOVA | MIEMBRO    |
| • MG. MARÍA ESTELA TOLEDO PALOMINO | MIEMBRO    |

ASESOR: DR. DAVID VIVANCO PEZANTES

Nº de Libro: 01

Nº de Acta: 005-2013-SPG-FIQ/UNAC

Fecha de Aprobación de tesis: 19 de setiembre de 2013

Resolución de Sustentación de la Sección de Posgrado: N°-017-2013-SP-FIQ

## DEDICATORIA

A mi familia, y a todo aquel que crea que vale la pena realizar investigación, a pesar de los sacrificios que ello conlleve.

A Ph.D. Jennings, Thomas, *In memoriam*, fundador de la International Society of Lyophilization (ISL)



## AGRADECIMIENTOS

*Por la realización del presente trabajo agradezco especialmente a:*

- *Mi familia: mi padre el Ingeniero en Industrias Alimentarias Natividad Arroyo, Wilman; mi madre Bach. Marín Flores, Victoria Clementina; mi hermana mayor: Ingeniero Civil Natividad Marín, Shirley Giovanna; mi hermano menor: Ingeniero Electricista Natividad Marín, Jean Carlos Pierre; por todo el apoyo brindado, tanto directa como indirectamente y su comprensión durante este periodo.*
- *Mi asesor el Dr. Vivanco Pezantes, David; Decano de la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la Universidad Nacional del Callao (UNAC); cuyo apoyo, tiempo, consejos y conocimientos fueron determinantes en la elaboración del presente trabajo.*
- *Dr. Carrasco Venegas, Luis Américo; Docente de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC; por brindarme su punto de vista y tiempo en todo momento durante las consultas realizadas durante el desarrollo.*
- *Dr. Cáceres Paredes, José Ramón; Vicerrector de Investigación de la UNAC; por brindarme la oportunidad de realizar una ayudantía a medio tiempo que me permitiese redactar correctamente este trabajo en el Centro Experimental Tecnológico (CET) de la UNAC.*
- *Ing. Mercado del Pino, Ana Rosario, por la confianza depositada en mi persona durante esta etapa y su ayuda en las nuevas perspectivas trazadas; así como sus sugerencias en el uso de los conceptos de agua de monocapa en este trabajo.*
- *Ph.D. Ibarz, Albert y Ph.D. Barbosa, Gustavo por aclarar las consultas realizadas de acuerdo a un error de tipeo relacionado a las correlaciones para determinar el tiempo de liofilización ubicado en su libro "Operations in Food Engineering".*
- *Ph.D. Pisano, Roberto, docente de la Universidad de Turín-Italia, por compartir conmigo numerosos trabajos de investigación relacionados al análisis avanzado de liofilizadores inteligentes y metodologías de cálculo para la simulación in situ como know-how adicional a este trabajo.*
- *Ph.D. Carter, Brady, científico investigador de Análisis de Humedad de la empresa Decagon Devices, Inc, por su aclaración conceptual referente a actividad de agua y monocapa dada por vía electrónica.*
- *Ph.D. Estévez, Antonio, docente de la Universidad de Mayagüez-Puerto Rico, quien durante el Congreso Nacional de Ingeniería Química realizado en la UNT-2009, me proporcionó el contacto con el Grupo de Investigadores de la International Society of Lyophilisation (ISL).*
- *Ing Sanguinetti, Ernesto, Gerente de la División de Ingeniería de Cold Import S.A. por algunas de sus ideas y sugerencias compartidas.*
- *Mg. Hatta, Beatriz, Jefa del Instituto de Desarrollo Agroindustrial (INDDA) por permitirme ingresar y observar el Liofilizador a escala piloto que esta Institución posee.*
- *Sección de Post-grado de la UNAC y a su plana docente.*

- *Mis compañeros partícipes de la maestría con quienes compartí dos años de mi vida reforzando conceptos; en especial a mi grupo de trabajo.*
- *Técnico en Análisis Químico Castillo Pinedo, Lady Shelley, por su apoyo dado en la realización del trabajo experimental de liofilización en el año 2010 sin el cual no hubiese podido obtener el título de Ingeniero Químico y su importante ayuda en la supervisión del CET- UNAC durante los periodos de julio hasta noviembre de 2012.*
- *Zegarra Sánchez, Mayra Esperanza, por su apoyo anímico durante toda la realización de este trabajo de investigación.*
- *La nueva generación de Tesis de pre-grado del CET-UNAC por motivarme indirectamente por el esfuerzo que realizan día a día, en especial a Bach. Masgo, Geraldine; Bach. Riveros, David; Bach. León, Diana; Bach. Sifuentes, Elvia; Bach. Flores, Javier; Bach. Roca, Aldo; estudiantes Vietti, Fredy y Endo, Martín; y Sr. encargado Paulino, Walter.*
- *Mis amigos y muchos más quienes fueron partícipes en este trabajo indirectamente.*

## ÍNDICE

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	17
1.1. Identificación del problema .....	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.3. Objetivos de la investigación.....	18
1.4. Justificación .....	19
II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Antecedentes del estudio.....	20
2.2. Secado de alimentos.....	22
2.3. Liofilización .....	23
2.3.1. Teoría de congelación de alimentos .....	26
2.3.2. Colapso estructural de alimentos.....	28
2.3.3. Teoría del vacío .....	29
2.3.4. Transmisión de calor.....	30
2.3.5. Temperatura “scorch” en la liofilización .....	30
2.4. Tipos de liofilizadores.....	31
2.4.1. Liofilizadores por contacto o conducción .....	31
2.4.2. Liofilizadores Acelerados.....	32
2.4.3. Liofilizadores por Irradiación .....	32
2.4.4. Compresión Reversible del liofilizado .....	32
2.4.5. Liofilización atmosférica.....	32
2.5. Elementos básicos de un liofilizador .....	33
2.5.1. Cámara de secado .....	33
2.5.2. Bomba de producción de vacío .....	33

2.5.3.	Condensador .....	33
2.5.4.	Sistema Mecánico de Congelación.....	34
2.5.5.	Sistema de Calentamiento.....	34
2.6.	Etapas de la liofilización de alimentos.....	35
2.6.1.	Congelación del alimento en la liofilización.....	35
2.6.2.	Secado primario o sublimación.....	35
2.6.3.	Secado secundario o Desorción .....	36
2.7.	Diseño de liofilizadores .....	37
2.8.	Características de los alimentos liofilizados .....	39
2.9.	Propiedades de los alimentos .....	41
2.9.1.	Densidad de los alimentos.....	41
a)	Densidad Verdadera ( $\rho_T$ ).....	41
b)	Densidad del material (sustancia) ( $\rho_m$ ).....	41
c)	Densidad de la partícula ( $\rho_p$ ) .....	42
d)	Densidad aparente ( $\rho_a$ ).....	42
e)	Densidad geométrica o a granel (“bulk en inglés”) ( $\rho_{bulk}$ ).....	42
2.9.2.	Porosidad de los alimentos.....	43
2.9.3.	Conductividad térmica de los alimentos.....	44
2.9.4.	Calor específico de los alimentos ( <b>C<sub>p</sub></b> ).....	47
2.9.5.	Difusividad térmica de alimentos ( $\alpha$ ).....	49
2.9.6.	Difusividad de la humedad de los alimentos ( <b>D</b> ).....	49
2.9.7.	Entalpía de los alimentos ( <b><math>\Delta H</math></b> ) .....	50
2.9.8.	Permeabilidad de alimentos liofilizados ( $K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}$ ).....	52
2.9.9.	La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) .....	56
2.9.10.	Agua ligada.....	57
2.9.11.	Isoterma de sorción de humedad .....	58
2.10.	Análisis de la congelación de los alimentos.....	59

2.10.1. Velocidad de congelamiento.....	60
a) Ecuación de Nagaoka et al. ....	61
b) Ecuación de Levy.....	61
2.10.2. Cálculo de la Carga de congelamiento .....	62
2.11. Velocidad de secado durante la liofilización .....	63
2.11.1. Velocidad de transferencia de calor.....	64
a) Transferencia de calor a través de la capa congelada.....	64
b) Transferencia de calor a través de la capa seca.....	64
c) Calentamiento por microondas .....	65
2.11.2. Velocidad de transferencia de masa.....	65
2.12. Modelamiento matemático de la liofilización.....	66
2.12.1. Modelo de sublimación unidimensional en estado estacionario de la liofilización.....	67
2.12.2. Análisis en estado no estacionario de la liofilización .....	78
III. VARIABLES E HIPÓTESIS.....	81
3.1. Definición de las variables .....	81
3.2. Operacionalización de las variables.....	82
3.3. Hipótesis general e Hipótesis específicas.....	83
IV. METODOLOGÍA .....	84
4.1. Tipo de Investigación .....	84
4.2. Diseño de la investigación .....	84
4.2.1. Primera etapa .....	84
4.2.2. Segunda etapa .....	84
4.2.3. Tercera etapa .....	84
4.2.4. Cuarta etapa.....	85
4.3. Población y muestra.....	85
4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos .....	85

4.5.	Procedimientos de recolección de datos.....	85
4.6.	Procesamiento estadístico y análisis de datos.....	86
4.7.	Metodología para el desarrollo del primer objetivo.....	86
4.7.1.	Determinación del rango de temperatura de congelación.....	87
4.7.2.	Determinación del rango de presiones de vacío.....	89
4.7.3.	Determinación del rango de temperaturas del condensador de agua sublimada.....	90
4.7.4.	Determinación del rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario de la liofilización.....	91
4.8.	Metodología para el desarrollo del segundo objetivo.....	94
4.8.1.	Diseño del plato de liofilización.....	95
	a) Estimación de las propiedades del alimento necesarias para calcular el espesor del alimento en función del tiempo de liofilización .	96
	b) Determinación del espesor del alimento en el plato del liofilizador en función del tiempo de liofilización .....	101
	c) Determinación del diámetro óptimo del plato de liofilización .....	105
	d) Determinación de la altura de plato de liofilización .....	106
4.8.2.	Determinación de las dimensiones de la cámara de secado ....	106
4.8.3.	Diseño del condensador de agua sublimada.....	113
	a) Determinación de la cantidad de agua a sublimar por alimento...	113
	b) Determinación del tiempo de Liofilización de alimentos.....	114
	c) Determinación de la velocidad de liofilización del alimento.....	114
	d) Determinación de las dimensiones del condensador.....	122
	e) Diseño de los distribuidores del condensador.....	127
4.8.4.	Diseño del sistema de producción de vacío.....	128
	a) Características generales de la Bomba de Vacío .....	128
	b) Análisis del funcionamiento de una Bomba de Vacío .....	130
4.8.5.	Diseño del aislamiento de la cámara .....	131
4.8.6.	Diseño del sistema mecánico de congelación .....	134
4.8.7.	Diseño del sistema de calentamiento .....	149
4.9.	Metodología para el desarrollo del tercer objetivo.....	150
4.9.1.	Metodología de cálculo de las ecuaciones planteadas.....	151

4.9.2.	Estimación de variables necesarias para la simulación.....	151
V.	RESULTADOS.....	160
5.1.	Resultados del desarrollo del primer objetivo .....	160
5.1.1.	Rango de temperatura de congelación de los alimentos durante la liofilización .....	160
5.1.2.	Rango de presiones de vacío durante la liofilización .....	168
5.1.3.	Rango de temperaturas del condensador de agua sublimada durante el ciclo de liofilización.....	169
5.1.4.	Rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario o desorción .....	172
5.2.	Resultados del segundo objetivo .....	176
5.2.1.	Resultados del diseño del sistema de platos de liofilización.....	176
a)	Propiedades del alimento necesarias para calcular el espesor del alimento en función del tiempo de liofilización .....	176
b)	Resultados de la determinación del espesor del alimento en el plato del liofilizador en función del tiempo de liofilización.....	192
c)	Resultados de la determinación del diámetro del plato de liofilización .....	193
d)	Resultados de la determinación de la altura de plato de liofilización	194
5.2.2.	Resultado de la determinación de las dimensiones de la cámara de secado .....	194
5.2.3.	Resultados del diseño del condensador de agua sublimada ....	196
a)	Cantidad de agua a sublimar por alimento.....	196
b)	Resultados de la determinación del tiempo de liofilización de alimentos .....	197
c)	Resultados de la velocidad de liofilización del alimento.....	202
d)	Resultados de la determinación de las dimensiones del condensador .....	214
e)	Resultados del diseño de los distribuidores del condensador.....	218
5.2.4.	Resultados del diseño de aislamiento de la cámara.....	218
5.2.5.	Resultados del diseño del sistema de producción de vacío.....	218
a)	Resultados de las características generales de la Bomba de Vacío	218

b)	Resultados del análisis del funcionamiento de una Bomba de Vacío	222
5.2.6.	Resultados del diseño del sistema mecánico de congelación ..	223
a)	Cinética de congelación de los alimentos .....	223
b)	Carga calórica del producto principal .....	234
c)	Carga térmica adicional del sistema .....	235
d)	Carga térmica total.....	237
e)	Determinación de las condiciones de operación del sistema de congelación y balances de materia y energía.....	238
f)	Flujo másico del refrigerante .....	240
5.2.7.	Diseño del sistema de calentamiento .....	240
5.3.	Resultados del tercer objetivo .....	241
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS .....	251
6.1.	CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS CON LOS RESULTADOS..	251
6.1.1.	Contrastación de la hipótesis general .....	251
6.1.2.	Contrastación de las hipótesis específicas .....	252
a)	Discusión de la primera hipótesis específica .....	252
b)	Discusión de la segunda hipótesis específica .....	252
c)	Discusión de la tercera hipótesis específica .....	253
6.2.	Contrastación de resultados con otros estudios similares .....	253
6.2.1.	Discusión de resultados del primer objetivo específico .....	253
a)	Discusión del rango de temperatura de congelación de los alimentos durante la liofilización .....	253
b)	Discusión del rango de presiones de vacío durante la liofilización	254
c)	Discusión del rango de temperaturas del condensador de agua sublimada durante la liofilización .....	254
d)	Discusión del rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario de la liofilización.....	255
6.2.2.	Discusión de resultados del segundo objetivo específico .....	255
a)	Discusión del diseño del sistema de platos de liofilización .....	255
b)	Discusión de las dimensiones de la cámara de secado .....	255
c)	Discusión del condensador de agua sublimada .....	256
d)	Discusión del aislamiento de la cámara .....	256
e)	Discusión del sistema de producción de vacío .....	256
f)	Discusión del sistema mecánico de congelación .....	256
g)	Discusión del sistema de calentamiento .....	257



6.2.3. Discusión de resultados del tercer objetivo específico .....	257
VII. CONCLUSIONES .....	259
VIII. RECOMENDACIONES .....	260
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	261
ANEXOS:	272
1. Matriz de consistencia	273
2. Composición fraccional proximal de los alimentos	274
3. Correlaciones matemáticas y datos experimentales de las propiedades de los alimentos	286
4. Propiedades del agua	323
5. Información del diseño del sistema de vacío	325
6. Información técnica del refrigerante	329
7. Datos de materiales de construcción del equipo de liofilización accesorios	332
8. Uso del software Aspen Hysys versión 7.2	348
9. Análisis de las ecuaciones que rigen liofilización en estado no estacionario, a partir de las ecuaciones de conservación de materia y energía	350
10. Métodos numéricos aplicados en el resolución de las ecuaciones de transferencia en la liofilización	358
11. Programa en Matlab para la simulación de la liofilización	372

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>	
2.1	Diferencias entre el secado convencional y la liofilización	23
2.2	Ventajas y desventajas de la liofilización	25
2.3	Aplicación de las técnicas de vacío	29
2.4	Puntos importantes según rangos de presión	30
2.5	Características de un liofilizador piloto	39
2.6	Razón de masa de agua incongelable con respecto a los sólidos secos totales de un determinado material	59
2.7	Ecuaciones que rigen la liofilización	69
3.1	Análisis de la operacionalización de la variables del trabajo de investigación	82
4.1	Composición fraccional de ciertos alimentos	87
4.2	Composiciones proximales y temperaturas de colapso para diferentes alimentos	88
4.3	Contenido vitamínico máximos en grupos de alimentos	92
4.4	Temperatura máxima en la superficie de alimentos	92
4.5	Resistencias térmicas de pro vitaminas y vitaminas	93
4.6	Constantes para el cálculo de la tiempo de liofilización	96
4.7	Variables intermedias para determinar el tiempo de liofilización	98
4.8	Constantes de proporcionalidad entre el tiempo y el espesor del alimento	102
4.9	Variables fijadas para el cálculo del tiempo de liofilización	103
4.10	Datos usados directamente para el cálculo del tiempo de liofilización	104
4.11	Variables según metodología ASME para diseño	110
4.12	Análisis de la cinética de la liofilización	121
4.13	Características de diversas bombas de vacío	130
4.14	Constantes globales considerados para cálculo del tiempo de congelación	134
4.15	Variables intermedias para determinar el tiempo de congelación	135
4.16	Desempeño teórico de sistema en cascada con SUVA® 95	141
4.17	Lista de propiedades generales de SUVA® 95	142
4.18	Constantes globales requeridas para la simulación	151
4.19	Variables de entrada según discretización por métodos numéricos	152
4.20	Variables de entrada asumidas para la simulación-condiciones de iniciales de frontera	153
4.21	Variables intermedias estimadas para la simulación (I)	154
4.22	Datos de entrada para la simulación	155
4.23	Variables intermedias estimadas para la simulación (II)	159
5.1	Correlación de la temperatura de colapso en función de la composición proximal en las frutas	166
5.2	Comparación de las temperaturas teóricas y calculadas de las frutas	166

5.3	Temperaturas de colapso ( $T_{Clp}$ ) y de congelación ( $T_{Cgn}$ ) estimadas de los alimentos elegidos	167
5.4	Diferencia de presiones en función de la diferencia de temperaturas entre el condensador y el producto	170
5.5	Diferencias de temperaturas entre el producto final y el plato de calentamiento	172
5.6	Determinación de temperatura máxima del plato de calentamiento	174
5.7	Desviación de la temperatura de transición vítrea y la temperatura del plato de calentamiento	174
5.8	Temperaturas máximas recomendadas durante el secado secundario ( $T_{Ass}$ ) y del plato ( $T_{Pc}$ )	175
5.9	Tamaño de poro de alimentos liofilizados	176
5.10	Análisis de la porosidad experimental y la estimada	178
5.11	Conductividad térmica verdadera de alimentos	180
5.12	Calculo de la permeabilidad $K_{p2}$ de la carne	184
5.13	Comparación de la permeabilidad $K_{p2}$ calculada con la reportada experimentalmente de la carne de res	185
5.14	Análisis de la permeabilidad $K_{p1}$ calculada a partir de la $K_{p2}$ estimada	186
5.15	Permeabilidad de alimentos $K_{p1}$ estimada	187
5.16	Permeabilidad $K_{p1}$ estimada por grupos de alimentos	188
5.17	Variables intermedias calculadas para determinar el tiempo de liofilización	191
5.18	Cálculo de las constantes de proporcionalidad entre el tiempo y el espesor del alimento	193
5.19	Determinación del espesor óptimo del alimento	193
5.20	Contenido de agua removida en la liofilización	196
5.21	Tiempo de liofilización estimado y masa de agua removida total	199
5.22	Variables requeridas en el modelo de Welti et al. (2005)	201
5.23	Corrección de los datos de difusividad efectiva	204
5.24	Cálculo de las constantes de proporcionalidad de las ecuaciones de cinética de liofilización	205
5.25	Esquema de análisis de la cinética de la liofilización para fruta promedio en un plato del liofilizador	208
5.26	Constantes de proporcionalidad que relacionan la velocidad de transferencia de masa y la velocidad de desplazamiento de la interfase de hielo	213
5.27	Cinética de liofilización de datos promedio del grupo N°2	216
5.28	Determinación de los diversos tiempos de succión para diversas velocidades de la bomba	220
5.29	Variables intermedias para determinar la cinética de congelación de los alimentos-primera parte	224
5.30	Variables intermedias para determinar la cinética de congelación de los alimentos- segunda parte	225

5.31	Comparación de capacidades caloríficas de alimentos no congelados de tablas y estimadas	226
5.32	Variables intermedias para determinar la cinética de congelación de los alimentos-tercera parte	227
5.33	Variables intermedias para determinar la cinética de congelación de los alimentos-cuarta parte	231
5.34	Tiempo de congelación a partir de varias correlaciones	232
5.35	Cálculo de la carga calórica principal de los alimentos	234
5.36	Carga térmica total requerido	237
5.37	Estimación del calor específico de la mezcla de aire y vapor de agua en las temperaturas extremas de liofilización	242
5.38	Datos estimados dependientes de la naturaleza del alimento (primera parte)	243
5.39	Datos utilizados y estimados dependientes de la naturaleza del alimento (segunda parte)	244
5.40	Datos utilizados y estimados dependientes de la naturaleza del alimento (tercera parte)	245
5.41	Datos estimados dependientes de la naturaleza del alimento (cuarta parte)	246
5.42	Datos estimados dependientes de la naturaleza del alimento (quinta parte)	247
5.43	Datos estimados dependientes de la naturaleza del alimento (sexta parte)	248
5.44	Datos estimados dependientes de la naturaleza del alimento (séptima parte)	249

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>	
2.1	Diagrama de fases del agua	24
2.2	Tiempo y temperatura de congelamiento	26
2.3	Etapas progresivas del colapso	28
2.4	Estructura porosa de un liofilizado	31
2.5	Esquema general de un liofilizador	34
2.6	Consumo energético en la liofilización	36
2.7	Liofilizador batch a escala piloto	37
2.8	Diseño mecánico de un liofilizador	38
2.9	Cambios de estado y temperatura vítrea	57
2.10	Tipos de transferencia de calor y humedad en la liofilización	66
2.11	Liofilización de una lámina	68
2.12	Transferencia de calor y masa en la liofilización	68
2.13	Cálculo del tiempo de secado primario	70
2.14	Temperatura en las etapas de la liofilización	80
3.1	Variable de la investigación	81
4.1	Esquema proyectado del liofilizador	95
4.2	Disposición de los platos de liofilización	96
4.3	Determinación del diámetro de poro	97
4.4	Sistema de calentamiento y enfriamiento	107
4.5	Distribución de tubería y pines de calentamiento	107
4.6	Distribución de la cámara de liofilización	108
4.7	Representación diagramática de las líneas de soporte	109
4.8	Equipo de liofilización proyectado	123
4.9	Esquema interno del condensador	124
4.10	Vista frontal de la cámara de liofilización	125
4.11	Esquema de las aletas del condensador	127
4.12	Partes de la cámara de secado consideradas para cálculo de pérdidas calor	131
4.13	Sistema de congelación de doble etapa	142
4.14	Diagrama presión vs. Entalpía del ciclo de congelación	143
4.15	Componentes que conforman el refrigerante SUVA ® 95	145
4.16	Modelo termodinámico del refrigerante SUVA ® 95	145
4.17	Algoritmo de resolución de la simulación	152
5.1	Esquema del sistema de congelación en Aspen Hysys	238
5.2	Balance energético de los compresores del sistema de congelación en Aspen Hysys	238
5.3	Condiciones de operación del sistema de congelación estimado con Aspen Hysys	239
5.4	Condiciones de operación del condensador, evaporador y compresores estimado con Aspen Hysys	245

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

		<b>Pág.</b>
4.1	Fuerza potencial del condensador a distintas temperaturas	90
4.2	Temperatura del producto y plato de calentamiento	93
4.3	Representación de la conductividad térmica del poliuretano a distintas temperaturas	133
5.1	Temperaturas de transición vítrea de transición 1 y transición 2 para diversos alimentos	160
5.2	Temperaturas de transición vítrea de la piña para distintos casos de medición (transición 1 y transición 2)	161
5.3	Temperaturas de transición vítrea de la miel para distintos casos de medición (transición 1 y transición 2)	162
5.4	Temperaturas de transición vítrea de la manzana para distintos casos de medición (transición 1 y transición 2)	162
5.5	Temperaturas de transición vítrea del ajo para distintos casos de medición (transición 1 y transición 2)	163
5.6	Temperaturas de transición vítrea de la grosella para distintos casos de medición (transición 1 y transición 2)	163
5.7	Diferencias de temperaturas entre $T_G$ de transición 2 menos la transición 1 de distintos alimentos	165
5.8	Temperaturas de colapso estimadas de las frutas en función de su composición	168
5.9	Presión de la cámara recomendada en función de la temperatura objetivo de congelación	168
5.10	Presión de la cámara en función de la temperatura de congelación objetivo de diversos alimentos	169
5.11	Diferencia de presiones en función de las diferencias de temperatura entre el condensador y el producto	170
5.12	Temperaturas del condensador para varios alimentos	171
5.13	Temperaturas de transición vítrea de los alimentos	173
5.14	Determinación de la temperatura del plato de calentamiento máximo durante la desorción	173
5.15	Porosidad en función de la humedad de la manzana, papa y calamar	177
5.16	Porosidad en función de la humedad	177
5.17	Porosidad de alimentos con bajo contenido humedad	178
5.18	Porosidad estimada en función de la humedad	179
5.19	Conductividad térmica en la carne de res a diversas temperaturas y humedad	179
5.20	Conductividad térmica de la manzana, papa y calamar	180
5.21	Conductividad térmica de diversos alimentos	181
5.22	Comparación de la conductividad térmica de la papa, manzana y res calculada por distintas ecuaciones	181
5.23	Disminución de la conductividad térmica del alimento seco con respecto a la humedad inicial	183

5.24	Relación de la permeabilidad experimental y calculada	186
5.25	Diámetro de plato estimado	194
5.26	Presión externa en función del espesor de una pared de acero 316L para la cabina del liofilizador	195
5.27	Espesor de alimentos contenidos en el plato de liofilización	197
5.28	Tiempo de liofilización estimado con las constantes de proporcionalidad de las diversas ecuaciones usadas	198
5.29	Rangos de tiempos de liofilización promedio	200
5.30	Comparación del tiempo de liofilización con el modelo de Welte et al. (2005)	200
5.31	Difusividad efectiva en función de la humedad en la papa liofilizada a 30° C	202
5.32	Difusividad efectiva como función de la porosidad	202
5.33	Difusividad efectiva de la manzana en función de la humedad	203
5.34	Porcentaje de aumento de la difusividad efectiva en función de la disminución de humedad en base seca	204
5.35	Masa de agua total sublimada y estimada con la constante $B_1$ en cada plato	206
5.36	Masa de agua total sublimada y estimada con la constante $B_3$ en cada plato	206
5.37	Masa de agua total sublimada y estimada con el promedio de $B_1$ y $B_3$ en cada plato	207
5.38	Desplazamiento del frente de hielo ( $z_i$ ) durante la liofilización de la fruta promedio por plato	209
5.39	Velocidad de sublimación del agua durante la liofilización de la fruta promedio por plato	209
5.40	Comportamiento de la humedad durante la liofilización de la fruta promedio por plato	210
5.41	Velocidad de liofilización de la fruta promedio por plato	210
5.42	Agua sublimada durante la liofilización de la fruta promedio por plato	211
5.43	Velocidad de desplazamiento del frente de hielo durante la liofilización de la fruta promedio por plato	211
5.44	Agua sublimada en cada grupo de alimentos durante la liofilización de los cuatro platos del equipo	212
5.45	Área del condensador en función del espesor y densidad de la escarcha de hielo formada	215
5.46	Área del condensador en función del espesor de hielo de baja densidad	216
5.47	Área del condensador en función del espesor de hielo de alta densidad	216
5.48	Área óptima según espesor de hielo en función de las densidades de hielo	216
5.49	Curva de velocidad de succión de la bomba de vacío	219

5.50	Tiempo de succión requerido para diversas presiones alcanzadas	221
5.51	Tiempo necesario para llegar a 4 Pa.en función de distintas velocidades de succión	221
5.52	Cambio de la presión de vacío en el tiempo	222
5.53	Temperatura inicial de congelación en función del contenido de humedad	223
5.54	Capacidades caloríficas de alimentos congelados	228
5.55	Cálculo de entalpías de alimentos	229
5.56	Conductividad térmica de alimentos a temperaturas menores a los 0 °C	229
5.57	Conductividad térmica en serie y paralelo a temperaturas de congelación por grupo de alimentos	230
5.58	Tiempo de congelación estimado adicionando 60 minutos adicionales para el acondicionamiento del equipo	233
5.59	Capacidades caloríficas de alimentos liofilizados congelados	241
5.60	Perfil de temperatura desde la base de la capa congelada hasta la superficie de la capa seca realizado en Matlab	250



## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y la simulación de un equipo de liofilización a escala piloto para deshidratar alimentos, mediante el análisis de las condiciones de operación, entre ellas la temperatura de congelación, que debe estar entre  $-17^{\circ}\text{C}$  y  $-51^{\circ}\text{C}$ , presión de vacío que llegue hasta aproximadamente 4 Pa, temperatura en la cámara de condensación del agua sublimada de  $-60^{\circ}\text{C}$  y temperatura máxima de los platos calefactores alrededor de  $54^{\circ}\text{C}$  dependiendo del alimento.

El diseño del equipo brindó una altura total de 1,80 m. con una cámara cilíndrica de diámetro de 1,30 m., la cual contiene 4 platos circulares de 73cm. de diámetro y 2 cm. de espesor por plato. Adicionalmente, se propuso un sistema de congelación del alimento dentro de la cámara de liofilización, haciendo pasar refrigerante tipo SUVA ® 95 por debajo de este en tuberías aleteadas. El sistema de condensación fue diseñado considerando aletas rectangulares para una adecuada transferencia de calor. El plato contenedor está soportado por un plato radiante que origina el calor por conducción durante la etapa de desorción de la liofilización.

La simulación del equipo fue realizada en Matlab considerando el desarrollo de las ecuaciones generales de conservación de la materia y energía con métodos numérico.

El trabajo realizado requirió el uso minucioso y coherente de las propiedades de los diversos alimentos a temperaturas de congelación y baja humedad para el análisis de la cinética de secado en la liofilización.

## **ABSTRACT**

The goal of this research is the design and simulation of a pilot scale freeze-dryer for food, through the analysis of the operating conditions of the equipment such as the freezing temperature that should be between  $-17^{\circ}\text{C}$  and  $-51^{\circ}\text{C}$ , a vacuum pressure of 4 Pa, a temperature in the condensation chamber of the sublimated water of  $-60^{\circ}\text{C}$  and a maximum temperature of the heating plates around  $54^{\circ}\text{C}$  in order to avoid the damage in the food material.

The design of the pilot scale equipment provided a total height of 1.80 m. with a cylindrical chamber diameter of 1.30 m, four circular plates of 0.73 m diameter each and 2 cm. thick plate. Additionally, it was proposed a cooling system inside the lyophilization chamber using SUVA® 95 as a refrigerant that goes below the plate using some finned pipes. The condensing system was designed considering rectangular fins for an optimum heat transfer. The container plate is supported by a plate which causes the radiant heat by conduction during the desorption step of lyophilization.

The computer simulation of the equipment was performed in Matlab considering the solution of the mass and energy conservation equations with numerical methods.

The research work required a meticulous and coherent use of the properties of various foods in freezing temperatures and low moisture in order to analyze the drying kinetics in freeze-drying.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Identificación del problema**

Aproximadamente el 20% de alimentos en el mundo se pierden por deterioro microbiológico, ocasionado la aparición de enfermedades, gastos de atención médica, deterioro de la calidad de la vida, pérdidas económicas, daño al turismo y causa de muerte; constituyéndose como el problema de salud pública más extendido en el mundo actual. Asimismo, el comercio de ciertos alimentos que se deterioran rápidamente por su alto contenido de agua se ve limitado en una situación económica actual favorecida por tratados de libre comercio.

Existen diversos métodos de conservación de alimentos como lo son el uso de conservantes, enlatados, elaboración de encurtidos o mermeladas y secado de alimentos; siendo este último el cual ofrece la ventaja de disminuir el peso del alimento permitiendo un transporte al cliente mucho más económico. Entre los tipos de secado de alimentos, la liofilización es la que mejor conserva sus propiedades nutritivas y sensoriales. Sin embargo, las publicaciones referidas al diseño de estos equipos son aún pocas en comparación a los estudios referidos al secado convencional a pesar de que éstos brindan alimentos con menor calidad por las temperaturas más elevadas utilizadas.

La demanda creciente de alimentos de calidad, con nutrientes intactos actualmente a nivel mundial, junto con la necesidad que nuestro país se convierta en un proveedor de éstos hacia otros, que carecen de

nuestras ventajas geográficas y climatológicas hace que la determinación de una adecuada metodología de cálculo para el diseño de un equipo de liofilización sea importante, proporcionando las bases suficientes para su futura construcción, incentivando así el uso más frecuente de este procedimiento de secado.

## **1.2. Formulación del problema**

**Problema principal:** ¿Será posible diseñar un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y simular el proceso?

**Sub problemas:**

- a) ¿Cuáles son las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos?
- b) ¿Cómo se determinan los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos?
- c) ¿Cómo se simula el proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

**Objetivo general:** Diseñar un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y simular el proceso.

**Objetivos específicos:**

- a) Identificar las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para la deshidratación de alimentos.

- b) Determinar los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos.
- c) Simular el proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado.

#### **1.4. Justificación**

Las razones que justifican la investigación propuesta son:

- La liofilización es una operación unitaria que permite deshidratar alimentos teniendo como principal ventaja la obtención de un producto de excelente calidad por las temperaturas bajas que ésta usa; no obstante, los equipos de liofilización son adquiridos de empresas extranjeras que tienen patentadas la tecnología. El diseño realizado, incentivará a otros trabajos similares, que serán mejorados a través del tiempo, para hacer un mayor uso de este procedimiento de deshidratación.
- El estudio propuesto contribuirá con el diseño de liofilizadores para promover proyectos a mayor escala en el sector alimentario, o en otros como el farmacéutico, químico, o microbiológico; haciendo uso del grandioso potencial alimentario que cuenta nuestra región y que aún no es aprovechado al máximo.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio

La liofilización fue utilizada por los Incas quienes liofilizaron productos autóctonos como el “chuño” o papa desecada y el “charqui” o carne deshidratada, congelándolos en la noche y luego secándolos en el día aprovechando las bajas presiones debidos a la gran altura de las montañas peruanas. También fue usado por los Vikingos para secar pescado, el primer uso real en escala industrial fue para liofilizar plasma de sangre durante la segunda guerra mundial y la postguerra (1939), y para liofilizar penicilina (Ceballos, 2009: 29).

Posteriormente, se fueron publicando distintos trabajos de investigación y patentes referidas al diseño de liofilizadores relacionados con el mejoramiento de la operación:

- La invención de un equipo que provee un sistema de liofilización que sustancialmente elimina la necesidad de proveer calor de una fuente de calor externa, comprende en combinación una cámara de secado, bomba de calor, y un intercambiador de calor para ahorrar el uso de agua de enfriamiento (Passey, 1975:1).
- Un procedimiento de liofilización acelerada que comprende una nueva técnica de calentamiento del material a liofilizar por pérdidas dieléctricas y rayos infrarrojos, manteniendo las mismas temperaturas de la superficie exterior y del interior del material (Domingos, 1976: 3).

- El equipo con bomba de vacío para la remoción directa del vapor de agua en vez del uso de condensador con trampa de frío (Cifuni, 1999:1).
- Equipo de liofilización que comprende una cámara de secado, compartimiento de platos, un condensador, platos de enfriamiento y calentamiento simultáneos (Sennhenn et al., 2005: 1).
- Diseño de un Proceso de Liofilización por Medición de Temperatura Manométrica, minimizando el tiempo de operación estimando mediante un algoritmo de cálculo el final de la sublimación por medio de un rápido aislamiento de la cámara de liofilización del condensador y el análisis del aumento de la presión durante este periodo (Tang et al., 2005: 685-686)
- Diseño y construcción de un equipo de liofilización a escala de laboratorio para conservar pequeñas muestras de alimentos sensibles a la temperatura, cepas bacterianas o plasma, disminuyendo su actividad acuosa (Mayer et al., 2006:147).
- Un método y aparato para la optimización de la etapa del secado primario de un ciclo de liofilización de materiales biológicos y farmacéuticos; que comprende las etapas de cálculo del ciclo de secado primario basado en el perfil de temperatura, cámara de presión y la temperatura de la bandeja. Además este aparato cuenta con un computador, un módulo de presión de vacío y la temperatura de las bandejas en comunicación eléctrica con el procesador (Tchessalov et al., 2008:1).
- Determinación del espacio de diseño requerido para la liofilización, usando un modelamiento del secado primario durante el ciclo de

operación, dos liofilizaciones fueron conducidas para verificar la predicción de los modelos con los resultados experimentales. Además el espacio de diseño establecido puede ser usado para entender la influencia de los parámetros críticos de proceso para todas las futuras corridas. (Rao et al., 2011:854).

Asimismo, existen diversos equipos de liofilización ofrecidos en el mercado, entre algunos se pueden mencionar a los de marca LIOTOP-Línea P-con bandejas, usados para alimentos, productos veterinarios, materia prima farmacéutica, cosméticos, etc. (LIOBRAS,2012:página web), los liofilizadores marca MILLROCK TECHNOLOGY para necesidades de producción de pequeña escala (MILLROCK, 2012: página web), los liofilizadores marca GEA Atlas entre los que se tiene los de planta piloto para laboratorio y los de pequeña producción piloto con bandejas de 0,8 y 7 m<sup>2</sup> de área respectivamente (GEA), la marca Lyotheta que cuenta con equipos de bandejas de carga entre 1,62 a 10,8 m<sup>2</sup> (LYOTHETA, 2012: página web), etc.

## **2.2. Secado de alimentos**

El propósito del secado de los alimento es permitir periodos de almacenamiento más largos y reducir los pesos durante el transporte. Es un proceso de remoción de humedad debido a la transferencia de masa y energía simultánea. Los equipos de deshidratación generalmente utilizan transferencia de energía por conducción, convección o radiación desde la



fuente al alimento. El calor es transferido directamente por gas caliente o indirectamente a través de una superficie (Heldman, et al. 2007: 603).

**TABLA N° 2.1  
DIFERENCIAS ENTRE EL SECADO CONVENCIONAL Y LA  
LIOFILIZACIÓN**

<b>SECADO CONVENCIONAL</b>	<b>LIOFILIZACIÓN</b>
Generalmente insatisfactorio en carnes.	Ventajoso en carne cruda y cocinada.
Temperaturas entre 37-93°C.	Temperatura debajo punto congelación.
Presión atmosférica	Presión reducida (27-133 Pa)
Evaporación del agua desde la superficie del alimento.	Sublimación del agua desde el frente de hielo.
Movimiento de soluto, endurecimiento.	Mínimo movimiento de soluto.
Esfuerzos en alimentos sólidos causan daño estructural y encogimiento.	Mínimo cambio estructural o encogimiento.
Rehidratación incompleta y lenta.	Rehidratación rápida y completa.
Partículas secas o porosas por lo general tienen mayor densidad que el alimento original.	Partículas secas y porosas tienen menor densidad que el alimento original.
Olor y sabor frecuentemente anormal.	Olor y sabor usualmente normal.
Color frecuentemente más oscuro.	Color usualmente normal.
Valor nutricional reducido.	Nutrientes enormemente retenidos.
Costo generalmente bajo.	Costo generalmente alto, hasta cuatro veces a lo del secado convencional.

**Fuente:** Fellows (2000:461)

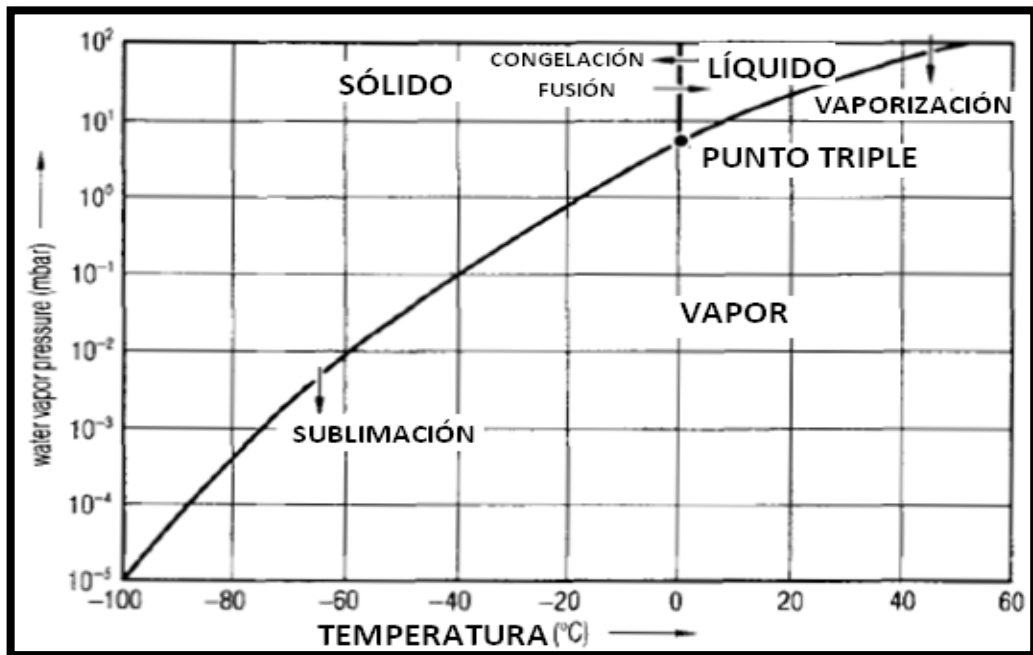
### **2.3. Liofilización**

El nombre “liofilización” fue utilizado por primera vez por Alexander Fleming en el año 1943, quien propuso “liofilización” del griego “liuo” o solvente y “phileo” amigo (Ceballos, 2009:29).

Es conocido como criodeshidratación o secado en estado congelado, el cual destaca frente a otras técnicas de deshidratación por respetar en

grado sumo las propiedades sensoriales y nutritivas del alimento procesado (Callejo, 2002: 202).

**FIGURA N° 2.1**  
**DIAGRAMA DE FASES DEL AGUA**



Fuente: Oetjen (1999:1)

Es un proceso de estabilización, en la cual una cantidad de agua es reducida a valores que no producirán crecimiento microbiano o reacciones químicas; en otras palabras, es un proceso que desacelera el reloj cinético, que es la velocidad en la cual una sustancia va cambiando (Jennings and Duan, citado por Bacaoanu y Pisos, 2011: 2).

La liofilización está basado en que a ciertas condiciones de baja presión de vapor, el agua de un alimento se evapora del hielo sin que éste se derrita (sublimación); el agua congelada se sublima si la temperatura está 0°C o más abajo, en una cámara al vacío con una presión de 4.58 mmHg o menos (Potter, 1978: 304).

La más importante meta de la liofilización es producir una sustancia con buena estabilidad durante el almacenamiento, y la cual no sea modificada después de la reconstitución del agua, por tanto esto depende en gran parte de los pasos después del procesamiento como: el empaquetado y las condiciones de almacenamiento (Oetjen, 1999:1).

El vapor de agua viaja a través de los canales del alimento formado por la sublimación del hielo y es removido. Los alimentos son secado en dos etapas: primero la sublimación hasta aproximadamente 15% de contenido de humedad y luego mediante un secado por evaporación (desorción) del agua incongelable hasta un contenido de humedad del 2%.La desorción es realizada mediante el incremento de la temperatura en el secador cercano a la temperatura de ambiente mientras que se mantiene la presión de vacío (Fellows, 2000:462)

**TABLA N° 2.2  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA LIOFILIZACIÓN**

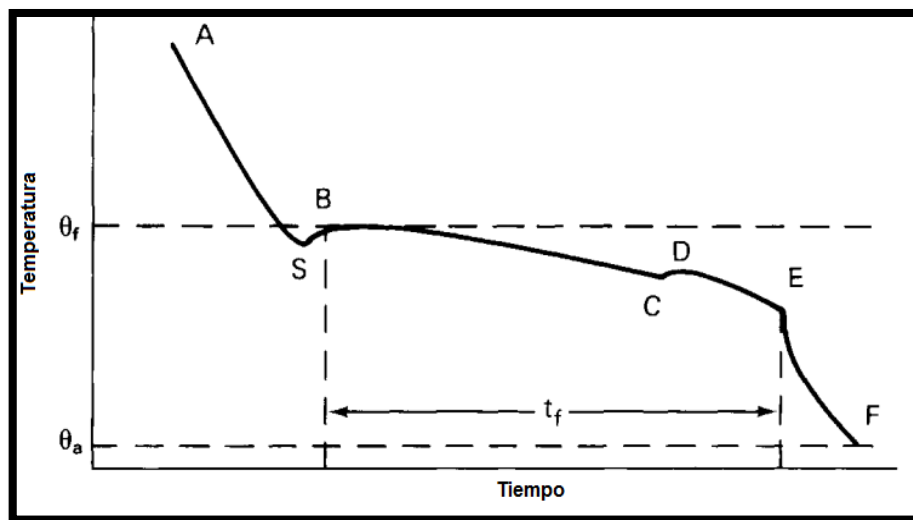
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de un producto de excelente calidad, debido a que reduce las reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático, reduciendo la desnaturalización de proteínas</li> <li>• Los productos liofilizados pueden ser almacenados durante tiempos largos, reteniendo la mayoría de propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales.</li> <li>• La estructura esponjosa del producto liofilizado, permite una rápida rehidratación del mismo debido a su alta porosidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su alto costo, tanto en inversión como energético y una alta duración que son causados por la resistencia a la transferencia de calor y masa con un tiempo lo suficientemente largo para que el contenido de humedad se encuentre por debajo del 5% de humedad para prevenir la degradación durante el almacenamiento.</li> <li>• Requerimientos necesarios de conocimiento del producto a liofilizar.</li> <li>• Aplicación casi exclusiva para alimentos especializados.</li> </ul>

**Fuente:** Barbosa et al., (2000:204)

### 2.3.1. Teoría de congelación de alimentos

Cuando un alimento se congela, parte del agua se transforma en hielo; si la congelación es instantánea se logra que existan muchos puntos del alimento donde empieza la formación de hielo; es decir, existe una gran nucleación, y los cristales de hielo que se forman son de pequeño tamaño, por lo que los tejidos del alimento quedarán poco afectados. Por el contrario, si la congelación es lenta, existe poca nucleación y los pocos cristales de hielo formados irán creciendo con el tiempo. Esto acarrea el que se formen cristales de gran tamaño que puedan afectar la calidad final del producto congelado (Ibarz y Barbosa, 2005: 547).

**FIGURA N° 2.2**  
**TIEMPO Y TEMPERATURA DURANTE CONGELAMIENTO**



**Fuente:** Fellows (2000:439)

**Nota:** AB El alimento es congelado por debajo de su punto de enfriamiento (S: el agua permanece líquida, fenómeno de sobreenfriamiento), SB: temperatura se incrementa rápidamente y se forma cristales de hielo; BC: El calor es removido; CD: uno de los solutos se sobresatura, la temperatura se incrementa hasta la temperatura eutéctica del soluto; DE: La cristalización del agua y solutos continúa; EF: temperatura baja hasta la del congelador.

La temperatura de congelación del agua pura es 0°C, por lo que si se parte de agua a una temperatura superior, inicialmente existe un descenso por debajo de 0°C, es decir, existe un subenfriamiento por lo que posteriormente, y debido al inicio de la formación de hielo, se desprende el calor de fusión, con la que la temperatura alcanza de nuevo los 0°C. En los alimentos este proceso es distinto al del agua pura (Ibarz y Barbosa, 2005: 549).

Si la Temperatura de congelación es la temperatura a la que se inicia la congelación del producto, inicialmente la temperatura desciende por debajo de ella, una vez que se forman los primeros cristales de hielo la temperatura aumenta. Sin embargo, la temperatura no se mantiene, sino que existe un pequeño descenso continuado, debido a que el agua se transforma en hielo, y el agua no congelada se va concentrando en los sólidos solubles que contiene el alimento, llega un momento en que puede empezar la cristalización de alguno de los solutos, y se libera el calor de cristalización, aumentando la temperatura (Ibarz y Barbosa, 2005: 549).

Finalmente, se llegará a una temperatura en la que no es posible congelar más agua, ya que el contenido en sólidos solubles es tan elevado que se necesitarán temperaturas muy bajas, este es el punto final de congelación del producto, y a partir de aquí el producto va disminuyendo su temperatura hasta alcanzar la del medio congelante (Ibarz y Barbosa, 2005: 549).

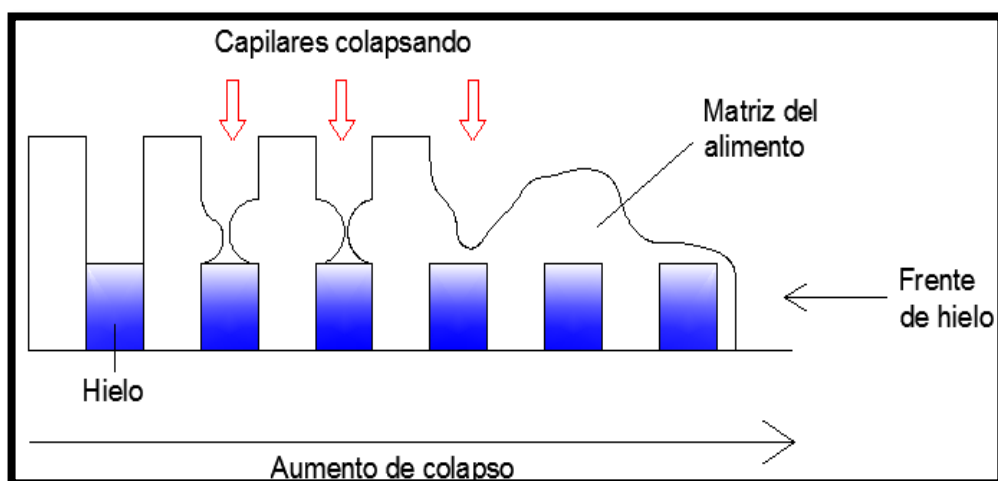
### 2.3.2. Colapso estructural de alimentos

Este fenómeno describe que el alimento congelado durante la sublimación, que no es lo suficientemente rígido, fluirá y se hundirá eventualmente, cerrando los poros dejados por los cristales de hielo causando: dilatación, formación de espuma y una disminución de secado (Goldblith et al., 1975: 730).

El colapso produce una pérdida de estructura y porosidad, disminución significativa en la velocidad de sublimación, incremento en la densidad del producto y contenido de agua residual, cambios en el color y también pérdida de aroma y nutrientes (Ahmed et al., 2012: 635).

Para evitar el colapso durante el congelamiento y el secado primario, la temperatura del producto debe mantenerse debajo de su temperatura de colapso, ésta puede ser alcanzada por el ajuste de la presión de la cámara; el fenómeno de colapso está cercanamente relacionado con el fenómeno de transición vítrea (Ahmed et al., 2012: 635).

**FIGURA N° 2.3**  
**ETAPAS PROGRESIVAS DEL COLAPSO**



Fuente: Barbosa et al., (2000:218)

### 2.3.3. Teoría del vacío

El término vacío es generalmente usado para denotar un volumen o región del espacio en la cual la presión es significativamente menor que 760 torr. En los sistemas de medición tradicional, la presión normal es expresada en milímetros de una columna de mercurio, y 760 milímetros de mercurio es igual a una atmósfera estándar (Hoffman et al 1998:5).

**TABLA N° 2.3**  
**APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE VACÍO**

SITUACIÓN FÍSICA	OBJETIVO	APLICACIÓN
Baja presión	Obtener presión diferencial	Sujeción, transporte neumático, limpiadores, filtrados.
Densidad molecular baja	Remover los constituyentes atmosféricos activos	Lámparas (incandescentes, fluorescentes, tubos de descarga eléctrica), fusión, empacado.
	Remover gas disuelto	Secado, deshidratación, concentración liofilización, impregnación.
	Disminuir la transferencia de energía	Aislamiento térmico, aislamiento eléctrico, microbalance de vacío, simulación de espacio.
Camino libre promedio largo	Evitar colisión	Tubos de electrones, tubos de rayos catódicos, tubos de televisión, tubos de rayos X, espectrofotómetros de masa, separadores de isótopos, microscopios.

**Fuente:** Hoffman et al. (1998: 5)

La densidad molecular, es el número promedio de moléculas por unidad de volumen, y el camino promedio libre, es la distancia promedio que una molécula viaja en un gas a través de dos colisiones sucesivas con otra molécula del gas (Hoffman et al., 1998:5).

**TABLA N° 2.4**  
**PUNTOS IMPORTANTES SEGÙN RANGOS DE PRESIÓN**

TIPO DE VACÍO	CAMINO LIBRE PROMEDIO (cm)	NÚMERO DE MOLÉCULAS POR cm <sup>3</sup>	TIPO DE BOMBA
Fuerte vacío	$10^{-5} - 10^{-1}$	$10^{19} - 10^{15}$	Eyectores de vapor, o bombas de sorción.
Vacío intermedio	$10^{-2} - 10^1$	$10^{16} - 10^{13}$	Eyectores con aceite o bombas de motor con aceite.
Alto vacío	1 cm a largo	$10^{14} - 10^{10}$	Bombas difusivas.
Vacío ultra alto	Más grande que el recipiente de vacío	Menos de $10^{10}$	Bomba de iones

**Fuente:** Hoffman et al. (1998: 18)

#### **2.3.4. Transmisión de calor**

La ecuación básica para el análisis de la conducción de calor está dada por la relación de Fourier, donde ésta es proporcional a la conductividad térmica y el diferencial de temperaturas. La conductividad térmica es una propiedad termofísica del material, la cual es en general, una función de la temperatura y la localización (Bejan, et al., 2003: 164).

Para materiales isotrópicos, es el mismo en todas las direcciones, pero para materiales no isotrópicos como la madera y materiales laminados, es significativamente mucho más grande a lo largo de la lámina que perpendicularmente a ésta (Bejan, et al., 2003: 164).

#### **2.3.5. Temperatura “scorch” en la liofilización**

Es la máxima temperatura permisible en la capa seca, sus valores están basados en las consideraciones de calidad como pardeamiento que marcan la relación desde un producto aceptable a uno inaceptable. Para evitar el “scorching” durante el secado secundario, la temperatura del



producto debe mantenerse por debajo de la temperatura “scorch”. Las temperaturas “scorch” para la mayoría de los alimentos son más altas que 40°C. La mayoría de valores son determinados por prueba y error, siguiendo observaciones visuales (Fellows, 2000: 467)

**FIGURA N° 2.4  
ESTRUCTURA POROSA DE UN LIOFILIZADO**



**Fuente:** Fellows (2000: 467)

## **2.4. Tipos de liofilizadores**

### **2.4.1. Liofilizadores por contacto o conducción**

El alimento va colocado en bandejas compartimentadas que descansan sobre placas calefactoras, en este tipo se produce una liofilización lenta debido a que se produce una transmisión de calor por una sola cara del alimento (Benavente, 1999: 504).

Existe un contacto desigual entre el alimento congelado y la superficie calentada, que reduce enormemente la velocidad de transferencia de calor y está presente una caída de presión a través del alimento el cual resulta en diferencias entre las velocidades de secado en las capas superiores e inferiores. La velocidad del vapor está en el orden de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  y finas partículas del producto pueden ser arrastradas en el vapor y

perderse. Sin embargo, los liofilizadores de contacto tienen mayor capacidad que el de otros tipos (Fellows, 2000: 466).

#### **2.4.2. Liofilizadores Acelerados**

En este tipo de liofilizadores, entre el alimento y las placas calefactoras existe una malla metálica, produciendo que la transferencia de calor sea más rápida y que el vapor del alimento se elimine de la superficie del alimento con mayor facilidad lo que reduce el tiempo de operación (Benavente, 1999: 504).

#### **2.4.3. Liofilizadores por Irradiación**

El alimento es distribuido en bandejas en capas de poco grosor y se calienta por radiación. Es más uniforme que el de conducción ya que las irregularidades de la superficie del alimento influyen aquí menos sobre la velocidad de transferencia calórica (Benavente, 1999: 504).

#### **2.4.4. Compresión Reversible del liofilizado**

Método modificado en el cual el alimento se liofiliza hasta la eliminación del 90% de su contenido en agua y seguidamente se comprime a una presión de  $690 \text{ Kg.cm}^{-2}$ . El contenido de agua residual (que mantiene el alimento elástico durante la compresión) se elimina posteriormente por deshidratación al vacío; este procedimiento se realiza para la elaboración de comidas militares (Benavente, 1999: 504),

#### **2.4.5. Liofilización atmosférica**

El proceso consiste en mezclar en una columna finas partículas de adsorbente fluidizadas y producto congelado; gas seco y frío (aire o

nitrógeno) se utilizan como medio de fluidización mientras que la columna es enfriada. El secado se realiza de forma automática cuando la presión parcial de agua y la temperatura descienden lo suficiente; adicionalmente se considera una etapa final de calentamiento con aire caliente para eliminar el agua ligada en el producto (Barbosa et al., 2000:231).

## **2.5. Elementos básicos de un liofilizador**

### **2.5.1. Cámara de secado**

Está conformada por la pared de la cámara, la puerta de la cámara, las bandejas donde será colocada el producto, entre los principales componentes (Oetjen, 1999: 74)

### **2.5.2. Bomba de producción de vacío**

Debe evacuar el aire desde el aparato antes y durante la liofilización, los niveles de vacío se encuentran en un rango entre 30 a 200 mTorr.(4 a 26,7Pa). La mayoría de los liofilizadores comerciales trabajan a una presión de 100 mTorr.(13,3 Pa) (Ahmed et al., 2012: 635).

### **2.5.3. Condensador**

Es necesario debido a la enorme cantidad de vapor generado durante el secado primario que no puede ser extraído solamente por el sistema de vacío, mantienen las condiciones de liofilización; mientras la bomba de vacío solo remueve los gases no condensables del ambiente, los condensadores pueden ser localizados dentro de la cámara de secado (opción menos costosa, aunque algunos productos secos como jugos y alimentos con alto contenido de azúcares pueden ser reconstituidos

durante el secado secundario), o fuera en el camino antes de la bomba de vacío. Para trabajar correctamente, el hielo formado en el condensador debe tener un máximo de 1 a 1,5cm (Ahmed et al., 2012: 635).

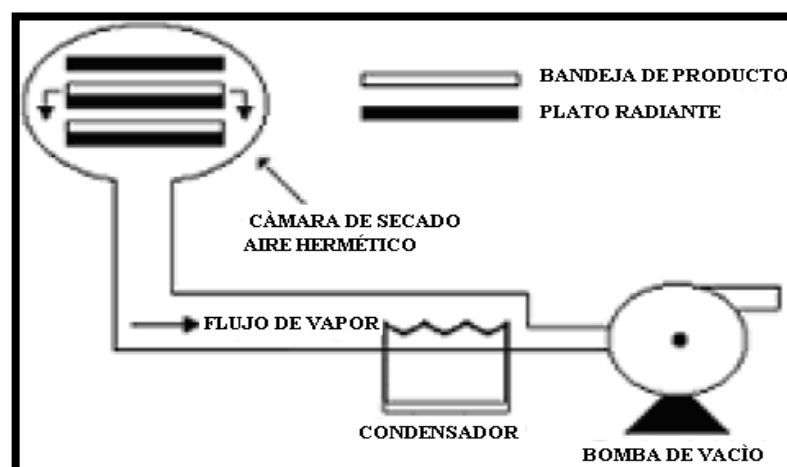
#### 2.5.4. Sistema Mecánico de Congelación

Tiene por finalidad la congelación de la masa entera del producto a una estructura rígida, formándose un eutéctico, que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento, para asegurar de esta manera la sublimación y evaporación; debe evitar una fusión y una inadecuada congelación formando sustancias porosas y gomosas en el producto final (Barbosa y Vega, 2000:207).

#### 2.5.5. Sistema de Calentamiento

Debe permitir un calentamiento hasta 70°C, la transferencia de calor es usualmente desarrollada a través de platos llenos de fluidos, en los cuales pueden ser controlados por fluidos de calentamiento (Ahmed et al. 2012: 635).

**FIGURA N° 2.5**  
**ESQUEMA GENERAL DE UN LIOFILIZADOR**



**Fuente:** Millman et al. (1984: 726)

## **2.6. Etapas de la liofilización de alimentos**

### **2.6.1. Congelación del alimento en la liofilización**

La principal ventaja de esta etapa es que se realiza a baja temperatura, por lo que no hay movimiento de líquidos y solutos, no hay contracción de volumen y prácticamente no hay reacción química o enzimática; con ciertos productos puede ser aconsejable no congelar el alimento de forma demasiado rápida (cristales de hielo pequeños), puesto que un adecuado tamaño de los poros permite el pase del vapor de agua y la rehidratación de manera adecuada (Benavente, 1999: 503).

Para los alimentos, la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada, formándose un eutéctico, que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento (Barbosa et al., 2000: 207).

### **2.6.2. Secado primario o sublimación**

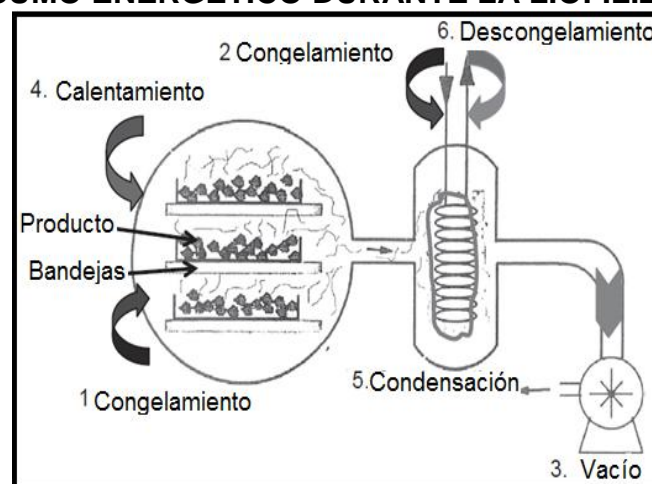
El hielo se sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente debido a la baja presión en la cámara de secado, el vapor de agua generado en la interfase es eliminado a través de los poros. El condensador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto. La fuerza impulsora de la sublimación es la diferencia de presión entre la presión del vapor de agua en la interfase del hielo y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado (Barbosa et al., 2000: 207).

Durante esta etapa, el vacío contribuye a reducir los riesgos de fusión del hielo al ser la presión en la cámara directamente proporcional a la temperatura necesaria para que tenga lugar este fenómeno. Se requiere efectuar un cierto vacío (1 a 4mm de Hg.) en un tiempo relativamente corto entre 5 y 10 minutos. Cada alimento presenta su propio óptimo en cuanto a la presión de operación entre 0,005 y 1,5 mm de Hg (Callejo, 2002: 203).

### 2.6.3. Secado secundario o Desorción

Esta etapa empieza cuando todo el hielo ha sido removido por sublimación y consiste en remover el agua ligada. Desde que la cantidad de agua no congelada se encuentra aproximadamente entre 10% a 35% del contenido total de humedad, su efecto en la velocidad de secado es muy significativo. El agua ligada es removida por desorción la cual toma lugar por calentamiento del producto bajo condiciones de vacío (Bacaoanu et al., 2011: 6).

**FIGURA N° 2.6**  
**CONSUMO ENERGÉTICO DURANTE LA LIOFILIZACIÓN**



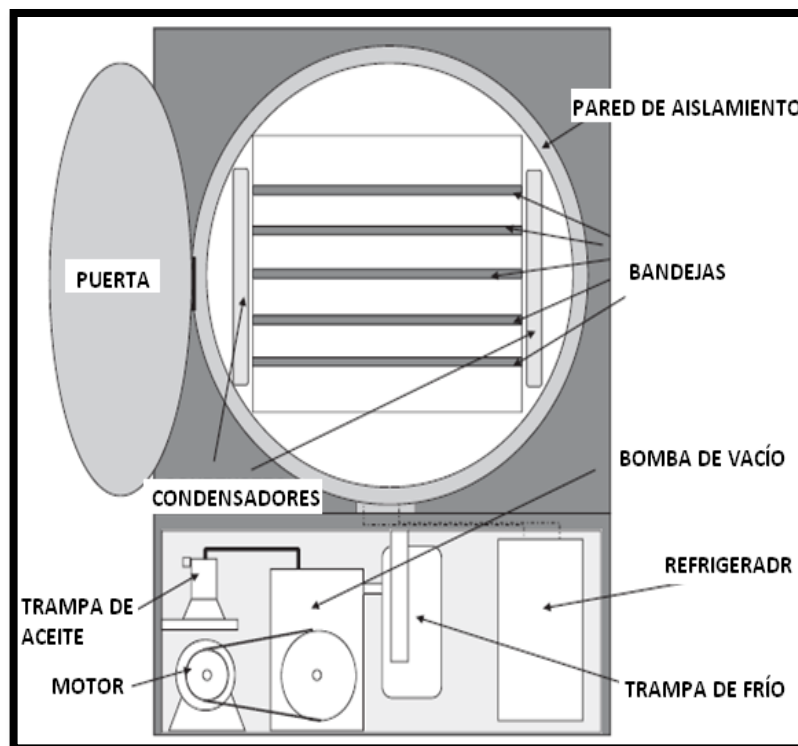
**Fuente:** Erdogdu (2009:416)

En la práctica se mantiene el producto a una temperatura entre 20 °C a 70 °C siempre bajo vacío durante 2 a 6 horas (Benavente, 1999: 503). En estas condiciones de presión y temperaturas puede parecer que se encuentra favorecida la pérdida de volátiles. Sin embargo, la difusividad de estos componentes se reduce notablemente conforme disminuye la humedad del producto (Callejos, 2002: 204).

## 2.7. Diseño de liofilizadores

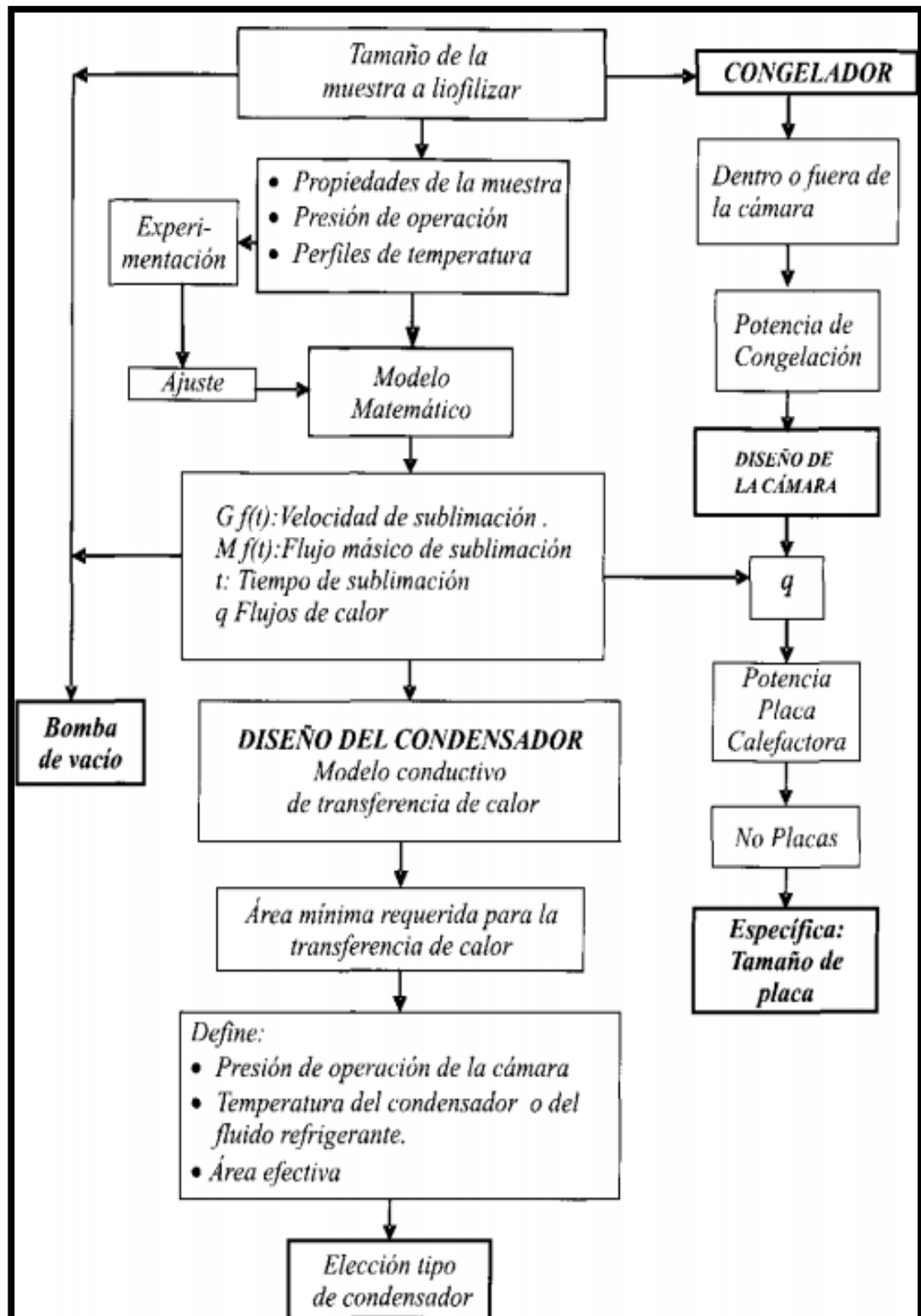
En la liofilización se deben considerar tres variables de diseño importantes: (1) el vacío en el interior de la cámara de secado, (2) el flujo de energía radiante aplicado al alimento, y (3) la temperatura del condensador (Barbosa et al., 2000:206).

**FIGURA N° 2.7**  
**LIOFILIZADOR BATCH A ESCALA PILOTO**



**Fuente:** Ahmed et al. (2012: 635)

**FIGURA N° 2.8**  
**DISEÑO MECÁNICO DE UN LIOFILIZADOR**



Fuente: Orrego (2008: 73)



**TABLA N° 2.5  
CARACTERÍSTICAS DE UN LIOFILIZADOR PILOTO**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DETALLES</b>
Tamaño de la cámara	1-0.5-0.5 m <sup>3</sup>
Superficie de condensación	10-15 kg de hielo en capa de espesor de 1cm.
Temperatura del condensador	Mínimo de -45°C Preferentemente -50°C
Capacidad de refrigeración del compresor a 10°C más elevado que las temperaturas mínimas superiores	Especificación del fabricante
Tipo de válvula entre la cámara y el condensador	Preferentemente no una válvula de mariposa.
Transporte de vapor de Agua desde la cámara de condensación	Vapor de agua de 0,2 y 1,0 mbar.
Sistema de bombeado de vacío	Dos etapas, con gas ballast en un máximo de 10 min > 0.1 mbar.
Tasa de fuga de la cámara y el condensador	< 2.10 <sup>-2</sup> mbar L/s
Bandejas	Un escudo en la parte superior para el producto
Método de descongelamiento del condensador, tiempo del ciclo	Especificación del fabricante.

**Fuente:** Oetjen. (1998: 187-288)

## **2.8. Características de los alimentos liofilizados**

La etapa de congelación provoca la separación de las soluciones acuosas presentes en los alimentos en una mezcla de dos fases, hielo y una solución concentrada de solutos. Como consecuencia de la formación de hielo, se reduce el encogimiento del producto y se consigue una estructura esponjosa que permite una fácil rehidratación. Además, la movilidad de la fase concentrada es baja por lo que no se da ningún cambio estructural durante el secado, lo que contribuye a la estructura esponjosa; otra característica de los alimentos liofilizados es una estructura de densidad global baja que proviene de los espacios huecos

en forma de aguja que previamente estaban ocupados por cristales de hielo (Barbosa, y Vega, 2000: 217).

Los componentes volátiles de los productos liofilizados son retenidos por atrapamiento en la matriz del alimento seco. El concepto de permeabilidad microrregional está basado en el supuesto de que la adsorción de volátiles en la capa seca no es responsable de su retención. Las microrregiones son áreas pequeña en el material seco, donde están localizados los volátiles (Barbosa, y Vega, 2000: 218).

Los productos liofilizados que han sido adecuadamente empaquetados pueden ser almacenados durante tiempos ilimitados, reteniendo la mayoría de propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales de su estado fresco: además, se reducen las pérdidas de calidad debidas a las reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático. El uso de bajas temperaturas también reduce la desnaturalización de proteínas en este tipo de secado (Ibarz y Barbosa, 2005: 613).

Los productos liofilizados pueden volver a su forma y estructura original por adición de agua. La estructura esponjosa del producto liofilizado permite una rápida rehidratación del mismo. Las características del producto rehidratado son análogas a las que poseía el producto fresco. La porosidad de los productos liofilizados permite una rehidratación mucho más completa y rápida que la de alimentos secados con aire (Ibarz y Barbosa, 2005: 613).

## 2.9. Propiedades de los alimentos

### 2.9.1. Densidad de los alimentos

Se define la densidad como la relación entre la masa de una muestra dada y su volumen. Para los zumos de frutas, la densidad se puede expresar en función del índice de refracción. Existen ecuaciones donde se expresa en función de la temperatura y del contenido en sólidos solubles; para zumos clarificada de manzana (Ibarz y Barbosa; 2005:342).

Sahin, et al. (2006: 22) mencionan que la densidad de líquidos puede ser medida usando picnómetros, hidrómetros; también puede ser expresada en diferentes formas. Por ejemplo, para materiales particulados como granos, se puede estar interesado en la densidad de las partículas individuales o en la densidad volumétrica del material que incluye el volumen vacío. Las definiciones más comúnmente usadas son:

#### a) Densidad Verdadera ( $\rho_T$ )

Es la densidad de la sustancia pura o del material compuesto calculado de las densidades de sus componentes considerando la conservación de la masa y el volumen (Sahin, et al., 2006: 22).

$$\rho_T = \sum_{i=1}^n y_i^V \rho_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^m}{\rho_i}} \quad (1)$$

Donde:

$y_i^V$  : Fracción volumétrica del componente i

$y_i^m$  : Fracción másica del componente i

$\rho_i$  : Densidad del componente i ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

n : Número de componentes

#### b) Densidad del material (sustancia) ( $\rho_m$ )

Es la densidad del material medida cuando el material ha sido quebrado en piezas lo suficientemente pequeñas para asegurarse que no queden poros cerrados (Sahin et al., 2006: 22).

**c) Densidad de la partícula ( $\rho_p$ )**

Es la densidad de la partícula que no ha sido estructuralmente modificada. Incluye el volumen de todos los poros cerrados pero no los que tienen conexiones externas. Puede ser calculado dividiendo el peso de la muestra por el volumen determinado por un picnómetro de gas (Sahin et al., 2006: 22).

**d) Densidad aparente ( $\rho_a$ )**

Es la densidad que incluyendo el volumen de todos los poros dentro del material (poros internos). La densidad aparente de geometrías regulares puede ser determinada a partir del volumen calculado usando las dimensiones características y la masa requerida. La densidad aparente de muestras de forma irregular puede ser determinada por métodos de desplazamiento de sólidos o líquidos (Sahin et al., 2006: 22).

**e) Densidad geométrica o a granel (“bulk en inglés”) ( $\rho_{bulk}$ )**

Es la densidad de un material cuando es empaquetado o apretado en un bulto o ruma. Ésta es medida permitiendo que la muestra sea vertida dentro de un contenedor de dimensiones conocidas. Se debe tener especial cuidado desde el método de llenado y que las dimensiones del contenedor pueden afectar la medición. Depende de la densidad del sólido, la geometría, el tamaño, las propiedades superficiales, y el método

de medición. Puede ser calculado dividiendo el peso de la muestra por el volumen del bulto (Sahin et al., 2006: 22).

Orrego (2003:61) agrega que algunos autores no reportan el tipo de densidad que van a medir; otros no distinguen entre densidad a granel y la aparente. Otros más, no lo hacen entre la densidad sustancial y/o la verdadera y/o la de partícula. Por ello es muy importante reportar el tipo de definición utilizada para una medida y verificar de cual densidad se está hablando cuando se usan distintas fuentes de información.

Rahman (2008:454) menciona que la densidad verdadera no es afectada por el método de secado o morfología del material; pero está fuertemente relacionada al contenido de humedad y la temperatura, es decir, este tipo de densidad se incrementa cuando el contenido de agua disminuye, lo cual es esperado desde que el rango de valores de densidades del agua es menor que la de los sólidos.

### **2.9.2. Porosidad de los alimentos**

Es una propiedad física importante que caracteriza la textura y la cualidad de alimentos secos y de humedad intermedia. Los datos de porosidad son requeridos en el modelamiento y en el diseño de varios procesos de transferencia de masa y calor como el secado, el freído, el calentamiento, el congelamiento, y en la extrusión. Es un parámetro importante en la predicción de las propiedades difusionales de las células en los alimentos (Sahin, et al., 2006: 22).

La porosidad ( $\epsilon$ ) es definido como la fracción del volumen del aire o la fracción de vacío en la muestra, y es expresada como:

$$\text{Porosidad} = \frac{\text{Volumen vacío}}{\text{Volumen total}} \quad (2)$$

Los poros dentro de los materiales alimenticios (internos) pueden ser divididos en tres grupos: poros cerrados, que son cerrados desde todos los lados; poros ciegos que tiene un final cerrado, y los abiertos o por donde típicamente acontece el flujo (Sahin, et al., 2006: 22).

### **2.9.3. Conductividad térmica de los alimentos**

La conductividad térmica está relacionada a la velocidad molecular que origina la conducción de calor desde una superficie caliente a una fría (Lienhard, 2000:13). En los materiales alimentarios, es calculada como una función de la humedad, temperatura, densidad, porosidad y presión (Rahman, 2009: 581).

En sólidos porosos como los alimentos, la conductividad térmica depende en su mayoría de la composición pero también pueden afectar muchos factores que afectan el camino del flujo de calor a través del material, como la fracción de espacios vacíos, forma, tamaño y arreglos de espacios vacíos, el fluido contenido en los poros, y la homogeneidad (Sahin, et al., 2006: 22).

Los alimentos secos porosos son muy pobres conductores de calor porque los poros son ocupados por aire. Para materiales porosos, la medición de la conductividad térmica es una aparente, llamada

conductividad térmica efectiva. La conductividad térmica del hielo es cuatro veces más grande que la del agua; durante el congelamiento, la capa más externa está en el estado congelado y el hielo se propaga en dirección al centro reemplazando el agua que no fluye por un mejor conductor. Por encima del punto de congelamiento se incrementa ligeramente con el aumento de la temperatura (Sahin et al., 2006: 22). En el modelo paralelo, se asume que los componentes son localizados paralelamente a la dirección del flujo de calor, y se calcula como sigue:

$$k_{pa} = \sum_i (k_i y_i^V) \quad (3)$$

$$y_i^V = \frac{\frac{y_i^m}{\rho_i}}{\sum_l \left( \frac{y_l^m}{\rho_l} \right)} \quad (4)$$

Donde:

$k_{pa}$  : Conductividad térmica resultante ( $W.m^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$k_i$  : Conductividad térmica del componente i ( $W.m^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$y_i^V$  : Fracción volumétrica de dicho componente.

$y_i^m$  : Fracción másica del componente i

$\rho_i$  : Densidad del componente i ( $kg.m^{-3}$ )

En el modelo perpendicular, se asume que los componentes están localizados en una dirección perpendicular al flujo de calor. La conductividad térmica efectiva puede ser calculada como sigue

$$\frac{1}{k_{se}} = \sum_i \left( \frac{y_i^V}{k_i} \right) \quad (5)$$

Donde:

$k_{se}$  : Conductividad térmica resultante ( $W.m^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$y_i^V$  : Fracción volumétrica de dicho componente.

$k_i$  : Conductividad térmica del componente i ( $W.m^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

Sahin et al. (2006: 116) expresan que muchos de los productos alimentarios son porosos y la conductividad térmica depende fuertemente de la porosidad desde que la conductividad térmica del aire en los poros está en un orden de magnitud más baja que las conductividades de los otros componentes; en general la conductividad térmica de materiales heterogéneos no puede ser predicha con modelos de adición simple. Rahman (1992) citado por Sahin et al. (2006: 116) desarrolló un modelo para la conductividad térmica para la res, la manzana, la papa, la pera, y el calamar durante el secado introduciendo el término de porosidad:

$$k = k_0(1 - \varepsilon) \left[ 1,82 - 1,66 \cdot \exp\left(-0,85 \frac{y_w}{y_{w0}}\right) \right] \quad (6)$$

Donde:

- $k$  : Conductividad térmica efectiva ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $k_0$  : Conductividad térmica inicial ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $\varepsilon$  : Fracción de volumen de aire o porosidad
- $y_w$  : Fracción de masa de agua ( $kg \text{ agua} \cdot kg \text{ alimento}^{-1}$ )
- $y_{w0}$  : Fracción de masa de agua al inicio ( $kg \text{ agua} \cdot kg \text{ alimento}^{-1}$ )

Rahman, Chen y Perera (1997) citados por Sahin, et al. (2006:117) desarrollaron un modelo para determinar la conductividad térmica en función del contenido de humedad, porosidad y la temperatura; en este modelo el contenido de humedad varía entre 14% a 88% en base húmeda, la porosidad entre 0 a 0,56, y la temperatura entre 5 a 100°C.

$$\frac{\varphi}{1 - \varepsilon + \left[ \frac{k_{\text{aire}}}{(k_w)_{\text{ref}}} \right]} = 0,996 \left( \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{0,713} (x_w)^{0,285} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{k - \varepsilon k_{\text{aire}}}{(1 - \varepsilon - x_w)k_s + x_w k_w} \quad (8)$$

Donde:

- $\varepsilon$  : Fracción de volumen de aire o porosidad



- $k_{\text{aire}}$  : Conductividad del aire ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $T$  : Temperatura de trabajo (K)  
 $T_{\text{ref}}$  : Temperatura de referencia la cual es  $0^{\circ}\text{C}$   
 $x_w$  : Fracción de la Humedad del material ( $\text{kg.kg sólido seco}^{-1}$ )  
 $(k_w)_{\text{ref}}$  : Conductividad térmica agua, temperatura referencia ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $k$  : Conductividad térmica del alimento ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $k_s$  : Conductividad térmica de la parte sólida del alimento ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $k_w$  : Conductividad térmica del agua ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $\varphi$  : Factor estructura de Rahman-Chen relacionado a la distribución de fase de los componentes del material alimentario y expresado como una función de la temperatura, contenido de humedad y la porosidad.

Adicionalmente, Maroulis et al. (2003: Apéndice III) calculan la conductividad térmica en alimentos como una función del contenido de humedad y la temperatura.

$$k = \frac{1}{1+x} k_0 \exp \left[ -\frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] + \frac{x}{1+x} k_1 \exp \left[ -\frac{E_1}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (9)$$

Donde:

- $k$  : Conductividad térmica ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $x$  : Contenido de humedad del material ( $\text{kg.kg materia seca}^{-1}$ )  
 $T$  : Temperatura del material (K)  
 $T_r$  : Temperatura de referencia ( $60^{\circ}\text{C}$ )  
 $R$  : Constante ideal de los gases =  $0,0083143 \text{ (kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1})$   
 $k_0$  : Conductividad térmica ( $X=0$ ),  $T = T_r$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $k_1$  : Conductividad térmica ( $X=\infty$ ),  $T = T_r$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $E_0$  : Energía de activación conducción de calor ( $X=0$ ), ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )  
 $E_1$  : Energía de activación para la conducción de calor  $X=\infty$  ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ )

#### 2.9.4. Calor específico de los alimentos ( $C_p$ )

Se define como la energía necesaria para elevar un grado la temperatura de la unidad de masa (Ibarz y Barbosa; 2005:342). Esta depende de la naturaleza del proceso de adición de calor, como a una presión constante o a volumen constante. La dependencia con la presión puede ser asumida como despreciable a menos que sea aplicada

presiones altamente elevadas; adicionalmente el contenido de agua de los alimentos influye grandemente desde que ésta tiene un calor específico más grande que otros constituyentes; por otro lado, el efecto de la temperatura es despreciable en el rango de temperatura no congelable, mientras que existen dramáticos efectos en el rango de temperatura de congelamiento (Sahin et al., 2006: 22).

$$C_p = \sum_i (C_{pi} y_i^m) \quad (10)$$

Donde:

$C_{pi}$  : Calor específico del componente i ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$y_i^m$  : Fracción másica del componente i

El calor específico del alimento antes y después de la congelación puede calcularse a partir de las relaciones respectivamente (Ibarz y Barbosa, 2005: 553)

$$C_{p_{NC}} = C_{p_{anc}} \cdot (0.3 + 0.7y_{a0}) \quad (11)$$

$$C_{p_C} = C_{p_{anc}} \cdot y_a + C_{p_H} \cdot y_H + C_{p_S} \cdot y_S \quad (12)$$

Donde:

$C_{p_{NC}}$  : Calor específico para el alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$C_{p_a}$  : Calor específico del agua no congelada ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$y_{a0}$  : Fracción másica correspondiente a la humedad inicial.

$C_{p_C}$  : Calor específico del alimento congelado ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$C_{p_{anc}}$  : Calor específico del agua no congelada ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$C_{p_H}$  : Calor específico del hielo ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$C_{p_S}$  : Calor específico de los sólidos totales ( $J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )

$y_a$  : Fracción másica del agua no congelada.

$y_H$  : Fracción másica del hielo

$y_S$  : Fracción másica de los sólidos totales

Sin embargo, puede utilizarse la ecuación general de Choi y Okos (ver Tabla N° 3.7A del Anexo N° 3), la cual es la sumatoria del calor

específico de cada componente por su fracción másica (Ibarz et al., 2005:558).

### 2.9.5. Difusividad térmica de alimentos ( $\alpha$ )

Puede calcularse si se conocen su conductividad térmica, densidad y calor específico. Sin embargo, existen expresiones matemáticas que permiten calcular la Difusividad térmica según su contenido en agua (Ibarz y Barbosa; 2005:342).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (13)$$

$$\alpha = \sum_i (\alpha_i y_i^V) \quad (14)$$

Donde:

$\alpha$  : Difusividad térmica del componente i ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$k$  : Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$\rho$  : Densidad ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$C_p$  : Calor específico ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$y_i^V$  : Fracción volumétrica de dicho componente

### 2.9.6. Difusividad de la humedad de los alimentos (D)

La difusión en alimentos sólidos durante el secado, la rehidratación, o el almacenamiento es un proceso complejo que puede involucrar diferentes tipos de difusión. La estructura física del alimento juega un rol muy importante en la difusión del agua y otras pequeñas moléculas; es decir, una estructura porosa, producida por liofilización, significativamente incrementa la difusión de la humedad. Además, la presencia de grasas y la presión la disminuye (Rao, et al. 2005: 374).

Adicionalmente, Maroulis et al. (2003: Apéndice III) brinda un modelo matemático para calcular la difusividad de la humedad en alimentos como

una función del contenido de humedad y la temperatura, y cuyas constantes se encuentran en la Tabla N°3.10A del Anexo 3.

$$D = \frac{1}{1+x} D_0 \exp \left[ -\frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] + \frac{x}{1+x} D_1 \exp \left[ -\frac{E_1}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (15)$$

Donde:

- D :Difusividad de la humedad ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- x :Contenido de humedad del material ( $kg \cdot kg \text{ materia seca}^{-1}$ )
- T :Temperatura del material (K)
- $T_r$  :Temperatura de referencia ( $60^\circ C$ )
- R :Constante ideal de los gases=  $0,0083143 \text{ (kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
- $D_0$  :Difusividad a la humedad ( $x = 0$ ) y temperatura  $T = T_r$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $D_1$  :Difusividad a la humedad ( $x = \infty$ ) y temperatura  $T = T_r$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $E_0$  :Energía de activación para la difusión en material  $x = 0$  ( $kJ \cdot \text{mol}^{-1}$ )
- $E_1$  :Energía de activación para la difusión en material  $x = \infty$  ( $kJ \cdot \text{mol}^{-1}$ )

Sagara (2001: 184) define a la difusividad de Knudsen en términos del radio de poro y velocidad molecular promedio. Adicionalmente, menciona que el radio de poro de varios alimentos liofilizados está en el rango de 10-300  $\mu m$ .

$$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r \quad (16)$$

$$\bar{v} = \left( \frac{8RT}{\pi M_w} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Donde:

- $D_k$  :Difusividad de Knudsen ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\bar{v}$  :Velocidad molecular promedio ( $m \cdot s^{-1}$ )
- r :Radio del poro (m)
- R :Constante de los gases ( $J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- T :Temperatura absoluta (K)
- $M_w$  :Peso molecular del agua ( $kg \cdot \text{mol}^{-1}$ )

### 2.9.7. Entalpía de los alimentos ( $\Delta H$ )

Riedel (1951) citado por Rao et al. (2005:200) encontró que la entalpía de los jugos de frutas era dependiente del contenido de materia seca. La entalpía de los alimentos se muestra en forma de cartas para

alimentos y jugos vegetales como una función de la temperatura y la fracción del contenido de materia seca.

Los modelos para predecir la entalpía de los alimentos congelados, están basados en la aproximación de la disminución de la temperatura inicial de congelamiento (Rao et al., 2005:217).

Ibarz y Barbosa (2005:558) calculan el incremento de entalpía que experimenta el alimento en el proceso de congelación puede evaluarse mediante la ecuación:

$$\Delta H = C_{p_{NC}}(T_i - T_C) + y_H \lambda_A + C_{p_C}(T_C - T) \quad (18)$$

$$\Delta H = C_{p_{NC}}(T_i - T_C) + (y_{a0} - y_{anc})\lambda_A + C_{p_C}(T_C - T) \quad (19)$$

$$y_{manc_0} = \exp \left[ \frac{\lambda_{Am}}{R} \left[ \frac{1}{T_{a0}} - \frac{1}{T_C} \right] \right] \quad (20)$$

$$y_{manc} = \exp \left[ \frac{\lambda_{Am}}{R} \left[ \frac{1}{T_{a0}} - \frac{1}{T} \right] \right] \quad (21)$$

$$y_s + y_{a0} = 1 \quad (22)$$

$$M_s = \frac{18 \cdot y_s \cdot y_{manc_0}}{y_{a0}(1 - y_{manc_0})} \quad (23)$$

$$y_{anc} = \frac{18 \cdot y_s \cdot y_{manc}}{M_s(1 - y_{manc})} \quad (24)$$

$$y_H = y_{a0} - y_{anc} \quad (25)$$

Donde:

- $\Delta H$  :Incremento de entalpía ( $J.kg^{-1}$ )
- $C_{p_{NC}}$  :Calor específico del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ), calculado a partir de la temperatura inicial del alimento
- $T_i$  :Temperatura inicial del alimento (K)
- $T_C$  :Temperatura inicial de congelamiento (K)
- $T$  : Temperatura de congelación final (K)
- $T_{a0}$  : Temperatura de congelación del agua pura (273,15K)
- $y_H$  :Fracción de Hielo a la Temperatura final de congelación
- $y_s$  : Fracción de los solutos ( $kg \text{ soluto}.kg \text{ alimento}^{-1}$ )
- $y_{a0}$  :Fracción del agua antes del congelamiento ( $kg \text{ agua}.kg \text{ alimento}^{-1}$ )
- $y_{anc}$  :Fracción del agua no congelable ( $kg \text{ agua}.kg \text{ alimento}^{-1}$ )
- $y_{manc_0}$  : Fracción molar del agua no congelada al inicio

- $y_{manc}$  : Fracción molar del agua no congelada  
 $M_s$  : Peso molecular del soluto ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )  
 $\lambda_{am}$  : Calor latente de congelación del agua ( $6003 \text{ kJ.kmol}^{-1}$ )  
 $\lambda_a$  : Calor latente de fusión del agua pura ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) =  $333,22 \times 10^3$   
 $C_{pC}$  : Calor específico de alimento calculado a la temperatura final de congelación deseada ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $R$  : Constante de los gases ( $8,314 \text{ kJ.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

En la ecuación anterior se deduce que, el primer sumando del segundo miembro de la igualdad, representa el calor que se debe eliminar del producto para pasar de la temperatura a la que se encontraba inicialmente hasta la temperatura de congelación; el segundo sumando representa el calor desprendido en el cambio de estado de la fracción de agua congelada, y el tercer sumando es el calor eliminado para que el alimento pase de la temperatura de congelación a la final ( $T_f$ ); esta temperatura no tiene que coincidir con la del medio de congelación, sino que puede ser algo superior.

### 2.9.8. Permeabilidad de alimentos liofilizados ( $K_{p1}$ , $K_{p2}$ , $K_{p3}$ )

Schwartzberg (1982) citado por Barbosa et al. (2000: 620) menciona que la densidad de flujo másico durante la transferencia de masa en la liofilización; es proporcional a la permeabilidad ( $K_{p1}$ ) con unidades de  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ , a la diferencia de presiones en la capa seca, e inversamente proporcional al espesor de ésta.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{AK_{p1}(P_h - P_0)}{x} \quad (26)$$

Donde:

- $\frac{dm}{dt}$  : Velocidad con que se transfiere el vapor ( $\text{kg.s}^{-1}$ )  
 $A$  : Área normal de secado ( $\text{m}^2$ )

- $K_{p1}$  : Permeabilidad de la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ )
- $P_h$  : Presión en el frente de hilo o sublimación (Pa)
- $P_0$  : Presión en el condensador (Pa)
- $x$  : Espesor de la capa seca (m)

Oetjen (1998: 66) menciona que  $K_{p1}$  usada para la determinación del tiempo de liofilización, se encuentra en un rango para el tomate entre  $8,22\cdot 10^{-8}$  a  $2,19\cdot 10^{-8}$ , dependiendo del contenido de sólidos. Brennan (1998:97) también cita dicha propiedad en las mismas unidades. Orrego (2008: 65) considera que puede ser calculada mediante la expresión:

$$K_{p1} = \frac{KM_w}{RT} \quad (27)$$

Donde:

- $K_{p1}$  : Permeabilidad del vapor de agua en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ )
- $K$  : Constante
- $M_w$  : Peso molecular del agua ( $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
- $R$  : Constante de las gases ideales =  $8.314472 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $T$  : Temperatura media de la capa seca (K)

Sagara (2001:183), discute la permeabilidad ( $K_{p2}$ ) expresada en  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  de un alimento liofilizado considerando un modelo estructural del tipo capilar y modelo tipo estructural celular.

El primero predice los parámetros estructurales de la capa seca, asumiéndola como un conjunto de tubos capilares con espacios porosos de radio equivalente y un factor de tortuosidad; para lo cual brinda algunas relaciones, entre las cuales se encuentra la ecuación 23 citada por Mellor y Lovett (1964) y su derivada de la teoría de colisión en términos del camino libre promedio en la ecuación 26 (Sagara, 2001:183).

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = - \frac{K_{p2} M_w}{RT} \text{grad}P = \frac{K_{p2} M_w}{RT} \frac{\Delta P}{x} \quad (28)^1$$

$$K_{p2} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_k \Omega \quad (29)$$

$$\Omega = \frac{3\pi r}{64\lambda} + \frac{\pi}{4} \frac{2r/\lambda}{(1 + 2r/\lambda)} + \frac{1}{1 + 2r/\lambda} \quad (30)$$

$$\lambda = \frac{k_{\text{Boltz}} T}{\sqrt{2}\pi(d_m)^2 P} \quad (31)$$

$$K_{p2} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_k \left\{ \left[ \frac{3}{32k'} \frac{2r}{\lambda} + \delta_1 \right] \cdot (1 - e^{-2r/\lambda}) + e^{-2r/\lambda} \right\} \quad (32)$$

Donde:

$\frac{dm}{dt}$	:Velocidad con que se transfiere el vapor (kg.s <sup>-1</sup> )
A	:Área normal de secado (m <sup>2</sup> )
$K_{p2}$	:Permeabilidad (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$M_w$	:Peso molecular del agua=18kg.kmol <sup>-1</sup>
R	:Constante de las gases ideales=8.314472 J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
T	:Temperatura (K)
gradP	:Gradiente de presiones (Pa.m <sup>-1</sup> )
$\varepsilon$	:Porosidad
$\tau$	:Tortuosidad
$D_k$	:Difusividad de Knudsen (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$\Omega$	:Total de contribuciones por separado del flujo de Poiseulle, flujo de resbalo, y flujo de Knudsen
r	:Radio de poro equivalente (m)
$\lambda$	:Camino libre promedio de las moléculas del gas (m)
$k_{\text{Boltz}}$	:Constante de Boltzmann=1,3806504x10 <sup>-23</sup> J.K <sup>-1</sup>
$d_m$	:Diámetro de una molécula de agua= 4,6x10 <sup>-10</sup> m
P	:Presión (Pa)
x	:Espesor de la capa seca (m)
$k'$	:Constante estructural
$\delta_1$	:Factor de fricción del poro

Sagara (2001:183) agrega que, el segundo modelo estructural celular, es adecuado para manzanas en rodajas, puesto que usando el primer modelo se obtienen valores 10 veces más grandes que los medidos. El

<sup>1</sup> Sagara (2001) expresa  $\frac{1}{A} \frac{dm}{dt}$  como flujo másico de vapor de agua  $\dot{m}$ (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>); las unidades del término *gradP* no es especificada en la revista; sin embargo, una deducción dimensional demuestra que se encuentra en Pa.m<sup>-1</sup>



modelo estructural celular asume a una célula de geometría cilíndrica, considerando una resistencia ( $R_n$ ); para la manzana fue calculado un valor de promedio  $R_n$  de 71,4. A continuación se presenta la ecuación que describe el segundo modelo mencionado:

$$K_{p2} = \left( \frac{\varepsilon}{\tau} D_k \Omega \right) / R_n \quad (33)$$

Donde:

- $K_{p2}$  : Permeabilidad ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\varepsilon$  : Porosidad
- $\tau$  : Tortuosidad
- $D_k$  : Difusividad de Knudsen ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\Omega$  : Total de contribuciones por separado de los tipos de flujo.
- $R_n$  : Resistencia contra el flujo de vapor de agua

Athanasios, Liapis y Bruttini citados por Mujumdar (2006: 306) correlacionan la permeabilidad ( $K_{p3}$ ) expresada en  $m^2$  de la capa seca porosa con la velocidad convectiva del gas mediante la ecuación de Darcy; la cual es necesaria para calcular el flujo total del gas.

$$\frac{dm}{dt} = A V_p (C_w + C_{in}) \quad (34)^2$$

$$V_p = \left( \frac{K_{p3}}{\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \quad (35)$$

Donde:

- $\frac{dm}{dt}$  : Velocidad con que se transfiere el vapor ( $kg \cdot s^{-1}$ )
- $A$  : Área normal de secado ( $m^2$ )
- $V_p$  : Velocidad convectiva del gas (vapor de agua e inerte) ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $C_w$  : Concentración del vapor de agua en la capa seca ( $kg \cdot m^{-3}$ )
- $C_{in}$  : Concentración del gas inerte (aire) ( $kg \cdot m^{-3}$ )
- $K_{p3}$  : Permeabilidad de la capa seca porosa ( $m^2$ )

<sup>2</sup> Los autores presentan a la relación  $\frac{1}{A} \frac{dm}{dt}$  como flux másico total en la capa seca  $N_t$  ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), siendo ésta la suma del flux másico del vapor de agua y el flux másico del gas inerte.

$\mu$  :Viscosidad del gas (Pa.s)  
 $\frac{\partial P}{\partial x}$  :Cambio de la presión con respecto al espesor recorrido (Pa.m<sup>-1</sup>)

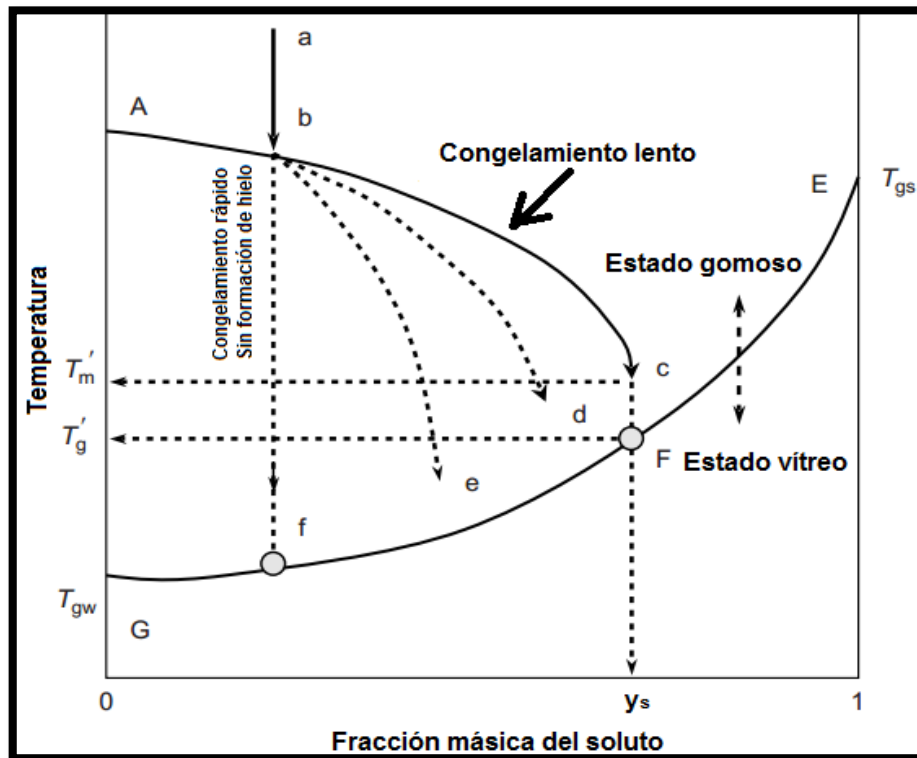
### **2.9.9. La temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>)**

Cuando se congela una solución, el hielo se cristaliza por debajo de la temperatura de congelamiento, obteniéndose en una concentración del material sobrante. Con mayores reducciones en la temperatura más hielo cristaliza y el material se concentra altamente hasta que forma una sustancia vítrea, por tanto, ésta es la temperatura de máxima concentración por congelación, donde la viscosidad es tal que es imposible formar más hielo. Aunque a veces la mayoría de temperaturas de colapso durante la liofilización están vinculadas a esta temperatura, los valores reportados a veces son más altos que la temperatura de transición vítrea (Ahmed, et al., 2012: 635).

Rahman (2008:249) explica que la disminución de la temperatura en una matriz alimentaria (solución) puede conducir al paso de un sistema vítreo con formación de hielo disminuyendo hasta una temperatura de transición vítrea (T<sub>g1</sub>) o un sistema vítreo sin formación de hielo (T<sub>g2</sub>), como se visualiza en la siguiente figura. Durante el secado de un alimento, se considera que la temperatura de transición vítrea (T<sub>g3</sub>) es definida como aquella en la cual un sistema amorfo cambia desde un estado cristalino a un estado gomoso, que es función del contenido de agua, peso molecular y la naturaleza de los componentes de la materia

seca (por ejemplo azúcares) n una sustancia determinada (Ahmed, et al., 2012: 635).

**FIGURA N° 2.9  
CAMBIOS DE ESTADO Y TEMPERATURA VÍTEA**



**Fuente:** Rahman (2008: 249).

**Nota:**  $T_g$ : Temperatura de transición vítrea, F-E: División entre el estado gomoso y el vítreo; G-F: División entre estados \* y estado vítreo;  $T_m$ : Temperatura de fusión;  $T_{gw}$ : Temperatura de transición vítrea del agua;  $T_{gs}$ : Temperatura de transición vítrea del sólido; a, b, c, d, e, f posibles recorridos según la velocidad de congelamiento.

### 2.9.10. Agua ligada

Muchos resultados experimentales muestran que algunas moléculas de agua tiene diferentes propiedades cinéticas y termodinámicas del agua ordinaria (por ejemplo, ellos exhiben la presión de vapor, movilidad baja, punto de congelamiento altamente reducido, etc.) (Heldman, 2007:609).

Esta definición es una operacional que dependen de los estudios de propiedades físicas y las técnicas usadas; los contenidos de agua ligada pueden ser distinto para los alimentos si un criterio diferente es usado para su identificación. En estos días es reconocido ampliamente que el agua ligada es un término cuestionable que ha causado más confusión que entendimiento; puesto que se puede observar que el agua no congelable de los alimentos, en general, corresponde a un contenido de humedad de equilibrio en actividades de agua en un rango entre 0,8 a 0,9. Por tanto, el agua no está fuertemente ligada al material alimentario y está disponible para reacciones químicas y crecimiento microbiano (Heldman, 2007:609).

#### **2.9.11. Isoterma de sorción de humedad**

Es la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio a una temperatura específica. Cada producto tiene su propia y única isoterma de sorción de humedad, debido a las diferentes interacciones (coligativas, capilares y efectos de superficie) entre el agua y los componentes sólidos a diferentes contenidos de humedad (Fontana, 2013: 53).

Para la mayoría de alimentos secos por debajo del valor de la monocapa (a partir de las isotermas de BET o GAB) la velocidad de pérdidas de calidad es despreciable. El contenido de humedad de la monocapa corresponde para valores de actividad de agua entre 0,2 y 0,4 (Fontana, 2013: 61).

## 2.10. Análisis de la congelación de los alimentos

Rahman (2008:193) cita que en el caso de los alimentos congelados, el contenido total de agua en alimentos congelados ( $y_{a0}$ ) se compone de tres fracciones: agua congelable ( $y_{ac}$ ), agua ligada incongelable ( $y_{anc}$ ), y agua congelada (hielo) ( $y_h$ ). El agua incongelable ( $y_{anc}$ ) está definido como el agua que no puede ser transformado a hielo aún a bajas temperatura (por ejemplo  $-40^{\circ}\text{C}$  o menores). A cualquier temperatura debajo del punto de congelamiento, el contenido de hielo se incrementa con la disminución de agua sin congelar.

$$y_{a0} = y_{ac} + y_{anc} + y_H \quad (36)$$

Da-Wen (2006: 107) cita que el total de agua líquida del material durante el congelamiento es la suma del agua congelable y la incongelable.

$$y_a = y_{ac} + y_{anc} \quad (37)$$

La fracción de agua incongelable ( $y_{anc}$ ) es usualmente medida y expresada en términos de la razón de kg de agua incongelable con respecto a los kg de sólidos secos totales, B:

$$y_{anc} = B y_{s0} (1 - y_{a0}) \quad (38)$$

**TABLA N° 2.6**  
**RANGOS DE MASA DE AGUA INCONGELABLE CON RESPECTO A**  
**LOS SÓLIDOS SECOS TOTALES DE UN DETERMINADO MATERIAL**

<b>MATERIALES ALIMENTARIOS</b>	<b>RANGO B</b>
Carne, pescado	0,14-0,32
Huevo	0,11
Jugo de Naranja	0,00
Vegetales	0,18-0,25

**Fuente:** Citado por Da-Wen (2006: 107)

### 2.10.1. Velocidad de congelamiento

Adicionalmente, Da-Wen (2006:132) indica que las limitaciones de la ecuación de Plank son las siguientes:

- 1) Desprecia el tiempo requerido para remover el calor sensible por encima del punto de congelamiento inicial.
- 2) No considera la remoción gradual del calor latente sobre un rango de temperaturas durante el proceso de congelamiento.
- 3) Asume que el producto está completamente en fase líquida.

Muchas modificaciones fueron dadas entre las que se encuentran las que siguen; para lo cual se definen las siguientes relaciones para geometrías laminares.

$$P_1 = 0,5072 + 0,2018(Pk) + (Ste) \left[ 0,3224(Pk) + \frac{0,0105}{Bi} + 0,0681 \right] \quad (39)$$

$$R_1 = 0,1684 + (Ste)[0,0135 + 0,274(Pk)] \quad (40)$$

$$Bi = \frac{h_c L}{k_c} \quad (41)$$

$$Ste = \frac{C_{pC}(T_c - T_\infty)}{\lambda_A} \quad (42)$$

$$Pk = \frac{C_{pNC}(T_i - T_c)}{\Delta H} \quad (43)$$

Donde:

- $P_1$  : Constante adimensional
- $Pk$  : Constante de Plank
- $Bi$  : Constante de Biot
- $R_1$  : Constante adimensional
- $h_c$  : Coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
- $L$  : Espesor del alimento (m)
- $k_c$  : Conductividad térmica del alimento congelados ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- $Ste$  : Constante de Estefan
- $C_{pC}$  : Calor específico del alimento ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $T_\infty$  : Temperatura del medio de congelamiento (K)

- $C_{p_{NC}}$  : Calor específico del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
 $\Delta H$  : Carga de congelamiento o cambio de entalpía ( $J.kg^{-1}$ )  
 $\lambda_A$  : Calor latente de congelamiento ( $J.kg^{-1}$ )=  $333,22 \times 10^3$   
 $T_c$  : Temperatura inicial de congelamiento (K)  
 $T_i$  : Temperatura del alimento al inicio de la congelación (K)

**a) Ecuación de Nagaoka et al.**

$$t_F = \frac{\Delta H' \times \rho_c}{T_c - T_\infty} \left( \frac{P_1 \cdot L}{h_c} + \frac{R_1 \cdot L^2}{k_c} \right) \quad (44)$$

$$\Delta H' = (1 + 0,008T_i) \left[ C_{p_{NC}} (T_i - T_c) + \lambda_A + C_{p_c} (T_c - T) \right] \quad (45)^3$$

Donde:

- $t_F$  : Tiempo de congelación del alimento (s)  
 $\rho_c$  : Densidad del alimento congelado ( $kg.m^{-3}$ )  
 $\Delta H'$  : Definición de entalpía para modificar la ecuación de Plank ( $J.kg^{-1}$ )  
 $\Delta H$  : Carga de congelamiento o cambio de entalpía ( $J.kg^{-1}$ )  
 $\lambda_A$  : Calor latente de congelamiento ( $J.kg^{-1}$ )=  $333,22 \times 10^3$   
 $T_c$  : Temperatura inicial de congelamiento (K)  
 $T_\infty$  : Temperatura del medio de congelamiento (K)  
 $T_i$  : Temperatura del alimento al inicio de la congelación (K)  
 $T$  : Temperatura al final del congelamiento (K)  
 $L$  : Espesor del alimento (m)  
 $C_{p_{NC}}$  : Calor específico del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
 $C_{p_c}$  : Calor específico de alimento a la temperatura final de congelación deseada ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
 $h_c$  : Coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )  
 $k_c$  : Conductividad térmica del alimento congelados ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )  
 $P_1$  : Constante adimensional  
 $R_1$  : Constante adimensional

**b) Ecuación de Levy**

$$t_F = \frac{\Delta H'' \rho_c}{T_c - T_\infty} \left( \frac{P_2 \cdot L}{h_c} + \frac{R_2 \cdot L^2}{k_c} \right) \quad (46)$$

$$\Delta H'' = (1 + 0,008(T_i - T_c)) \left[ C_{p_{NC}} (T_i - T_c) + \lambda_A + C_{p_c} (T_c - T) \right] \quad (47)$$

Donde:

- $t_F$  : Tiempo de congelación del alimento (s)  
 $\rho_c$  : Densidad del alimento congelado ( $kg.m^{-3}$ )

<sup>3</sup> Barbosa et al. (2005: 557) cita que  $(1 + 0,008T_i)$  es en realidad  $(1 + 0,008(T_i - T_c))$ , considerando también la fracción de hielo que multiplica a  $\lambda_A$

- $\Delta H''$  : Variación de la entalpía por unidad de masa del alimento entre la Definición de entalpía para modificar la ecuación de Plank ( $J.kg^{-1}$ )
- $\lambda_A$  : Calor latente de congelamiento ( $J.kg^{-1}$ )=  $333,22 \times 10^3$
- $T_c$  : Temperatura inicial de congelamiento (K)
- $T_\infty$  : Temperatura del medio de congelamiento (K)
- $T_i$  : Temperatura del alimento al inicio de la congelación (K)
- $T$  : Temperatura al final del congelamiento (K)
- $L$  : Espesor del alimento (m)
- $C_{pNC}$  : Calor específico del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pC}$  : Calor específico de alimento a la temperatura final de congelación deseada ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $h_c$  : Coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
- $k_c$  : Conductividad térmica del alimento congelados ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- $P_1$  : Constante adimensional
- $R_1$  : Constante adimensional

## 2.10.2. Cálculo de la Carga de congelamiento

Da-Wen (2006: 128) cita que la carga de congelamiento o cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) para reducir la temperatura del producto ( $T_i$ ) desde un nivel por encima del punto de congelamiento ( $T_c$ ) hasta alguna temperatura final deseada ( $T$ ) está dada por:

$$\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_{NC} + \Delta H_L + \Delta H_{AC} \quad (48)$$

$$\Delta H_s = m_s C_{ps} (T_i - T_c) + \int_{T_c}^T m_s C_{ps} dT \quad (49)$$

$$\Delta H_{NC} = m_{NC} C_{pNC} (T_i - T_c) + m_{NC} C_{pNC}' (T_c - T) \quad (50)$$

$$\Delta H_L = m_H \lambda_A \quad (51)$$

$$\Delta H_H = m_H C_{pH} (T_c - T) \text{ o } \int_{T_c}^T m_H C_{pH} dT \quad (52)$$

Donde:

- $\Delta H$  : Carga de congelamiento ó cambio de entalpía ( $J.kg^{-1}$ )
- $\Delta H_s$  : Calor sensible removido del producto sólido ( $J.kg^{-1}$ )
- $\Delta H_{NC}$  : Calor sensible removido del agua no congelada ( $J.kg^{-1}$ )
- $\Delta H_L$  : Calor entálpico debido al calor latente ( $J.kg^{-1}$ )
- $\Delta H_{AC}$  : Calor sensible removido del agua congelada ( $J.kg^{-1}$ )
- $\lambda_A$  : Calor latente de congelamiento ( $J.kg^{-1}$ )=  $333,22 \times 10^3$
- $m_s$  : Masa de sólidos (kg)
- $m_u$  : Masa de agua no congelada (kg)



- $m_H$  : Masa de hielo o agua no congelada (kg)
- $C_{ps}$  : Calor específico de sólidos ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pNC}$  : Calor específico de agua no congelada ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pNC}'$  : Calor específico de agua no congelada debajo de  $T_F$  ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pH}$  : Calor específico del hielo ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $T_i$  : Temperatura inicial (K)
- $T_c$  : Temperatura inicial de congelamiento (K)
- $T$  : Temperatura final deseada (K)

Sin embargo, dichas expresiones de una forma más compacta fueron analizadas en las relaciones N° 19 y 20 previamente, considerándose estas últimas citadas para los cálculos.

### **2.11. Velocidad de secado durante la liofilización**

Al principio la velocidad de secado es alta porque la resistencia al transporte de calor desde la bandeja al material es pequeña, o bien porque es pequeña la resistencia al flujo de materia desde el producto al condensador. Sin embargo, conforme avanza el proceso, una capa seca, porosa y de elevada resistencia se forma alrededor del material. La capa seca ofrece más resistencia al flujo de calor que la capa congelada, pero a baja presión la resistencia a la transferencia materia disminuye (Ibarz, Barbosa, Garza, y Gimeno, 2000: 117).

Las resistencias a las transferencias de calor y materia son funciones de la presión, un incremento de la presión puede mejorar la transmisión de calor a expensas de un aumento de la resistencia a la transferencia de materia. Por lo tanto, la presión de la cámara es la variable que hay que controlar mejor en un proceso de liofilización; la temperatura de las bandejas afecta a la velocidad de transmisión de calor hacia la superficie

del material donde se produce el secado y, por tanto, a la energía que llega a la interfase entre las capas seca y congelada; la temperatura del condensador es otra variable de control (Ibarz, Barbosa, Garza, y Gimeno, 2000: 119).

### **2.11.1. Velocidad de transferencia de calor**

#### **a) Transferencia de calor a través de la capa congelada**

La velocidad de transferencia de calor depende del espesor y conductividad térmica de la capa de hielo. Como el secado procede, el espesor del hielo es reducido y la velocidad de transferencia de masa se incrementa. La superficie de calentamiento está limitada para evitar la fusión del hielo (Fellows, 2000: 462).

#### **b) Transferencia de calor a través de la capa seca**

La velocidad de transferencia de calor del frente de sublimación depende del espesor y el área del alimento, la conductividad térmica de la capa seca y la diferencia de temperatura entre la superficie del alimento y el frente de hielo (Fellows, 2000: 462).

La capa seca del alimento tiene una conductividad térmica (similar a los materiales de aislamiento) y por tanto ofrece una alta resistencia a la transferencia de calor. Mientras que el secado procede, esta capa se va haciendo más gruesa y la resistencia se incrementa (Fellows, 2000: 462).

Como en otras operaciones unitarias, una reducción del tamaño del espesor del alimento y el incremento en el diferencial de la temperatura incrementa la velocidad de transferencia de calor. Sin embargo, en la

liofilización, la temperatura de la superficie está limitada hasta 40-65°C, para evitar la desnaturalización de las proteínas y cambios químicos que podría reducir la calidad del alimento (Fellows, 2000: 462).

**c) Calentamiento por microondas**

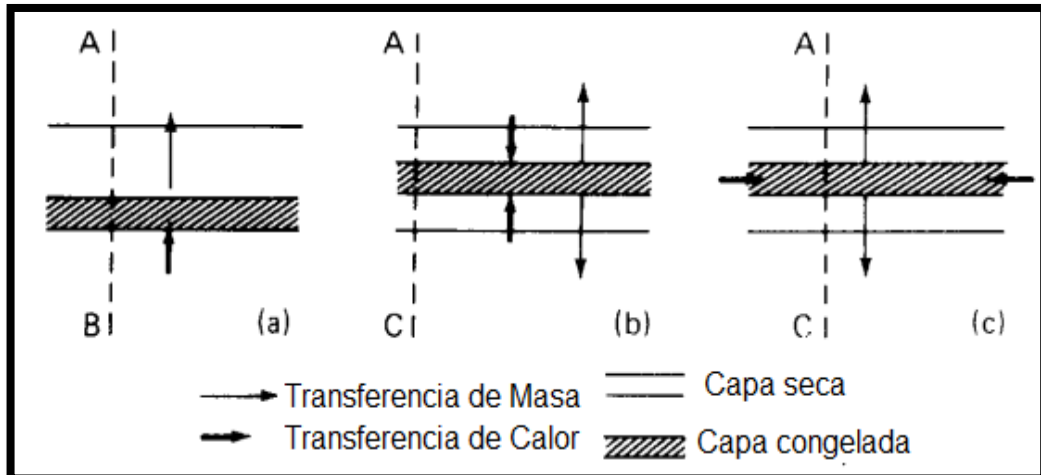
El calor es generado en el frente de hielo, y la velocidad de transferencia de calor no es influenciado por la conductividad térmica o el hielo o el alimento seco, o el espesor de la capa seca. Sin embargo, este calentamiento es menos fácilmente controlado y hay un riesgo de sobrecalentamiento y fusión del hielo (Fellows, 2000: 462).

**2.11.2. Velocidad de transferencia de masa**

Fellows (2000: 463) indica que cuando el calor alcanza el frente de sublimación, incrementa la temperatura y el vapor de agua del hielo. El vapor entonces se mueve a través de alimento seco a una región de presión de vapor baja en la cámara de secado. Un gramo de hielo forma 2 m<sup>3</sup> de vapor de agua a 67 Pa. y, en un liofilizador comercial, es por tanto necesario remover bastantes cientos de metros cúbicos de vapor por segundo a través de los poros en el alimento seco.

Los factores que contrale el gradiente de vapor de agua son: La presión en la cámara de secado, La temperatura del condensador, los cuales deben ser lo más bajo económicamente posible, La temperatura del hielo en el frente de sublimación, la cual debe ser lo más alta posible sin fusión (Fellows, 2000: 463).

**FIGURA N° 2.10**  
**TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y HUMEDAD DURANTE LA LIOFILIZACIÓN**



**Fuente:** Fellows (2000: 463)

**Nota:** (a) Transferencia de calor a través de una capa congelada; (b) Transferencia de calor desde superficies calientes o calentadores radiante a través de la capa seca; (c) Calor que se generó en el hielo a través de microondas.

### 2.12. Modelamiento matemático de la liofilización

Barbosa y Vega (2000: 208) distinguen al modelo de estado estacionario y no estacionario de la liofilización.

Orrego (2008:54) explica que se han realizado numerosos intentos para describir matemáticamente el proceso de liofilización, comenzando con el movimiento en la interfase; otros modelos estuvieron basados en el suministro de calor por la capa seca y la capa congelada de producto. En los años 80 se presentaron modelos para varias condiciones, utilizando procesos iterativos de tanteo y error en el que se supuso la temperatura de la interfase basado en un modelo no estacionario. Posteriormente se examinó la influencia de la congelación en la subsecuente sublimación

caracterizando la distribución de los coeficientes locales de difusividad másica de la muestra según la velocidad de congelación.

### **2.12.1. Modelo de sublimación unidimensional en estado estacionario de la liofilización**

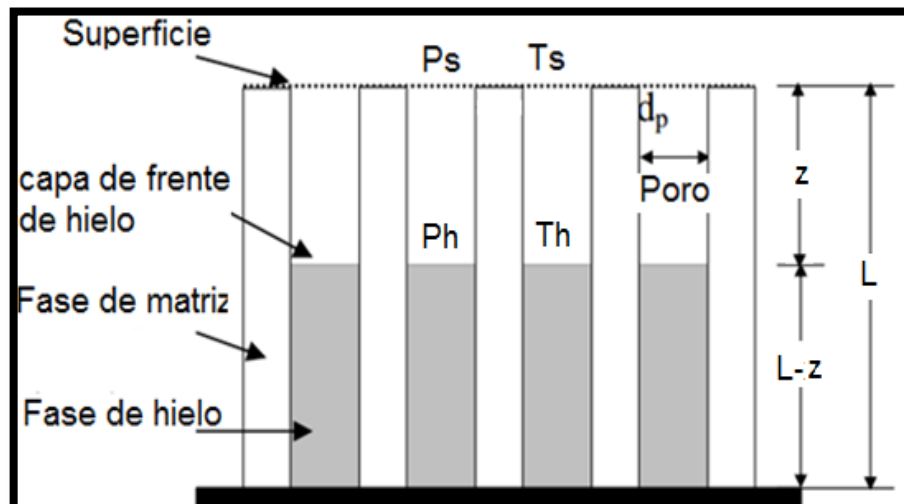
Orrego (2008:63) cita que en general, los diversos modelos para describir un estado transitorio el proceso de liofilización para geometrías simples hacen las siguientes suposiciones:

- El flujo de calor y masa son unidimensionales y normales a la interfase.
- La sublimación ocurre en la interfase paralela de la superficie.
- El espesor de la interfase es infinitesimal.
- A través de la capa seca fluye solamente el gas sublimado.
- En la interfase de sublimación, el vapor de agua está en equilibrio con el hielo.
- El medio poroso y el gas encerrado en él están en equilibrio térmico.
- La región congelada es homogénea, de propiedades físicas uniformes y contiene una insignificante proporción de gases disueltos.
- El recipiente que contiene la muestra ofrece una mínima resistencia a la transferencia de calor.
- Las resistencias de transferencia de masa y calor externas a la muestra son insignificantes.
- El volumen inicial y final de la muestra son idénticos.

Ozilgen (1998:314) menciona dos mecanismos de fenómenos de transferencia de calor y masa, el primero calcula el tiempo de liofilización de una lámina de tamaño infinito cuando ambos fenómenos ocurren a través de la capa seca; mientras que el segundo considera una transferencia de calor a través de la capa congelada y transferencia de

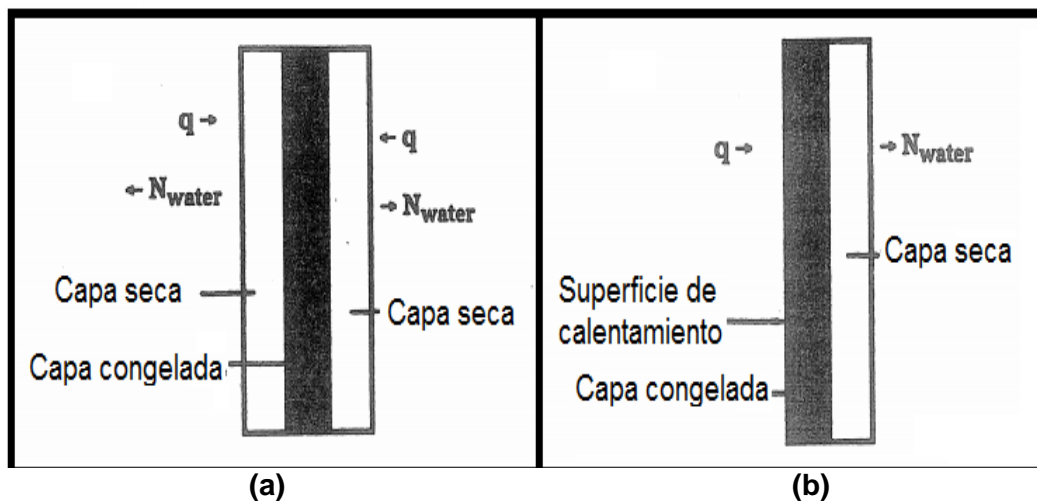
masa a través de la capa seca. Para cada caso, se observa que el calor latente de sublimación es suministrado por el aire o por la bandeja desde la base del alimento, respectivamente.

**FIGURA N° 2.11**  
**LIOFILIZACIÓN DE UNA LÁMINA**



Fuente: Adaptado de Welti, et al. (2005: 7)

**FIGURA N° 2.12**  
**TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN LA LIOFILIZACIÓN DE UNA LÁMINA DE ALIMENTO**



Fuente: Ozilgen (1998:317)

**Nota:** (a) Transferencia de calor y masa a través de la capa seca, (b) Transferencia de calor a través de la capa congelada y transferencia de masa a través de la capa seca

**TABLA N° 2.7**  
**ECUACIONES QUE RIGEN LA LIOFILIZACIÓN**

TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR A TRAVÉS DE LA CAPA SECA (AMBAS CARAS)		TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA CAPA CONGELADA Y TRANSFERENCIA DE MASA A TRAVÉS DE LA CAPA SECA	
$q = \frac{Ak_s}{z}(T_s - T_h)$	(53)	$q = \frac{Ak_c}{L-z}(T_b - T_h)$	(59)
$q = \frac{AK_{p1}\Delta H_s}{z}(P_h - P_s)$	(54)		
$\frac{dm}{dt} = \frac{AK_p}{z}(P_h - P_s)$	(55)	$P_h = P_s + \frac{k_s}{K_{p1}\Delta H_s} \left( \frac{z}{L-z} \right) (T_s - T_h)$	(60)
$\frac{dm}{dt} = A\rho_s(x_0 - x_t) \frac{dz}{dt}$	(56)		
$t = \frac{(L/2)^2 \rho_s(x_0 - x_t)}{2K_{p1}(P_h - P_s)}$	(57)	$t = \frac{\rho_s(x_0 - x_f)}{K_{p1}} \int_0^L \frac{z}{P_h(z) - P_s} dz$	(61)
$t = \frac{(L/2)^2 \rho_s \Delta H_s (x_0 - x_t)}{2k_s(T_s - T_h)}$	(58)		

**Fuente:** Adaptado de lo citado por Ozilgen (1998:317-318)

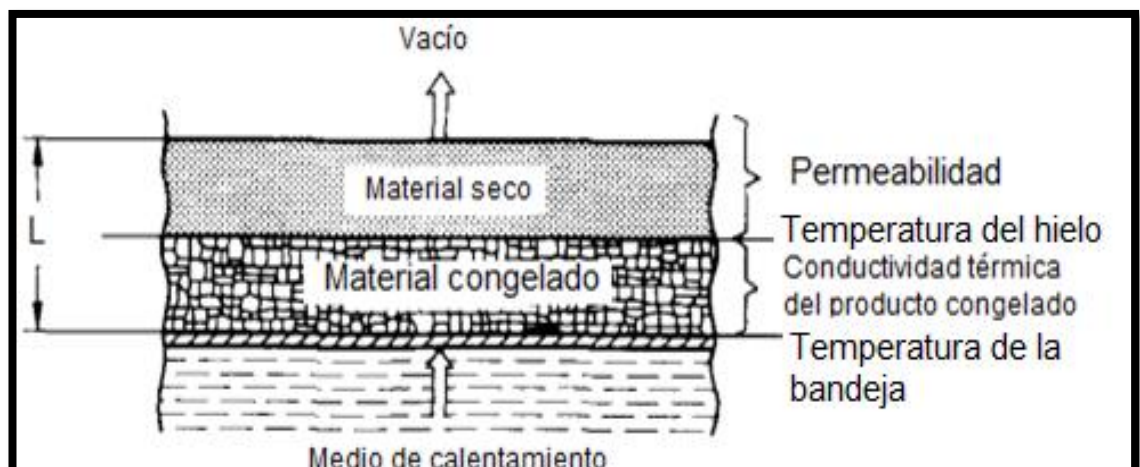
**Nota:** q: Flujo de calor (W); A: Área transversal del alimento (m<sup>2</sup>); k<sub>s</sub>: Conductividad térmica de la capa seca (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>); T<sub>s</sub>: Temperatura en la superficie de la lámina (°C); T<sub>h</sub>: Temperatura de sublimación (°C); z: Espesor de la capa seca (m); L: Espesor total de la capa del alimento (m); K<sub>p1</sub>: Permeabilidad de la fracción seca del alimento (kg.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>); ΔH<sub>s</sub>: Calor latente de sublimación (J.kg<sup>-1</sup>)=2,95×10<sup>6</sup>; P<sub>h</sub>: Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa); P<sub>s</sub>: Presión parcial del agua en la superficie (Pa);  $\frac{dm}{dt}$ : Velocidad con que se transfiere el vapor (kg.s<sup>-1</sup>); ρ<sub>s</sub>: Densidad del alimento seco (kg.m<sup>-3</sup>); x<sub>0</sub>: Contenido de humedad inicial (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>); x<sub>f</sub>: Contenido de humedad final (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>); x<sub>t</sub>: Contenido de humedad en el tiempo t (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>);  $\frac{dz}{dt}$ : Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca (m.s<sup>-1</sup>); T<sub>b</sub>: Temperatura en la base del plato (°C); P<sub>h</sub>(z): En función de la posición del frente de sublimación (Pa)

Oetjen (1999: 64) ha usado un modelo desarrollado por Steinbach por varios años y muchos experimentos en un amplio campo de aplicación; dicho modelo supone un plato infinito expandido con un producto de esparcido de espesor “L”. En esta ecuación las siguientes simplificaciones son realizadas:

- La capa no tiene fin, la energía es solo transmitida desde la bandeja a un lado de la capa.
- El vapor es solo transportado desde el frente de hielo a través de la capa seca porosa.
- La capa congelada no es porosa.
- El transporte de calor en la capa ya seca es despreciable.

Sin embargo, el análisis dimensional en el desarrollo de la ecuación, y la corroboración del cálculo de un ejemplo brindado por el autor, muestra incongruencias en las unidades usadas, por lo cual no se está considerando en esta investigación.

**FIGURA N° 2.13**  
**CÁLCULO DEL TIEMPO DE SECADO PRIMARIO**



Fuente: Oetjen (1999:64)

Barbosa y Vega (2000:208) indican también que la presión parcial de vapor en la superficie del producto puede considerarse igual a la presión parcial de vapor de agua en la superficie del condensador. Asimismo, se relaciona la temperatura de la superficie, y la del frente de sublimación con la de la placa de calentamiento mediante el flujo de calor radiante, la ecuación general del flujo de calor conductivo en la capa seca y la



expresión del tiempo de liofilización; considerando como factor de forma o visión a la unidad en la relación de transferencia de calor por radiación. Según estos autores la velocidad de secado se expresa como la densidad molar de flujo de vapor de agua, que depende de las condiciones de operación, propiedades del alimento y del cambio de posición de la interfase de sublimación.

$$\frac{dm}{dt} = A\rho_c \left( \frac{x_0 - x_t}{1 + x_0} \right) \frac{dz}{dt} \quad (62)^4$$

$$T_p^4 = T_0^4 + \frac{k_s(T_s - T_h)}{\left( \frac{2k_s(T_s - T_h)(1 + x_0)}{\rho_c \Delta H_s(x_0 - x_t)} t + z^2 \right)^{0,5}} \quad (63)$$

$$N_A = \frac{D_{eff}(P_h - P_s)}{RT_m z} \quad (64)$$

Donde:

- $\frac{dm}{dt}$  :Velocidad con que se transfiere el vapor (kg.s<sup>-1</sup>)
- A :Área transversal del alimento (m<sup>2</sup>)
- $\rho_c$  :Densidad del alimento congelado (kg.m<sup>-3</sup>)
- $x_0$  :Contenido de humedad inicial (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>)
- $x_t$  :Contenido de humedad en el tiempo t (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>)
- $\frac{dz}{dt}$  :Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca (m.s<sup>-1</sup>)
- L :Espesor total de la capa del alimento (m)
- $\Delta H_s$  :Calor latente de sublimación (J.kg<sup>-1</sup>)=2,95×10<sup>6</sup>
- $T_s$  :Temperatura en la superficie de la lámina (°C ó K)
- $T_h$  :Temperatura de sublimación (°C ó K)
- $k_s$  :Conductividad térmica de la capa seca (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)
- $P_h$  :Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)
- $P_s$  :Presión parcial del agua en la superficie (Pa)
- $K_p$  :Permeabilidad de la fracción seca del alimento (kg.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>)
- $T_p$  :Temperatura de la placa radiante (K)
- z :Espesor de la capa seca (m)

<sup>4</sup>Barbosa y Vega (2000: 212) presentan la ecuación 21 en términos de Gs; para mantener el formato de las demás ecuaciones se debe tener presente que Gs=(dm/dt)x(1/A)

- $N_A$  :Densidad molar de flujo de vapor de agua ( $\text{kmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )  
 $D_{\text{eff}}$  :Difusividad interna del vapor de agua= Difusividad efectiva media del vapor de agua en la capa seca ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )  
 $R$  :Constante universal de los gases ideal ( $\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $T_m$  :Temperatura media en la capa seca (K)  
 $M_a$  : Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )  
 $x_0$  :Contenido de humedad inicial ( $\text{kg agua.kg s\u00f3lido seco}^{-1}$ )  
 $\rho_s$  :Densidad del s\u00f3lido seco ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
 $z$  :Desplazamiento en el eje de secado (m)

Fellows (2000:464) menciona que el contenido de humedad cae desde un nivel alto en la zona congelada hasta un nivel m\u00e1s bajo en la capa seca, lo cual depende del vapor presente en la cabina. Asimismo, brinda una relaci\u00f3n para determinar la presi\u00f3n en el frente de hielo muy similar a la ecuaci\u00f3n N\u00b060 dada por Ozilgen (1998); y una segunda para calcular el tiempo de liofilizaci\u00f3n equivalente a la expresi\u00f3n N\u00b0 58, con la aclaraci\u00f3n que la densidad de la capa seca es la correspondiente a una densidad del tipo a granel ( $\rho_{\text{bulk}}$ ).

$$P_h = P_s + \frac{k_s}{K_{p1}\Delta H_s}(T_s - T_h) \quad (65)$$

Donde:

- $P_h$  :Presi\u00f3n parcial del agua en el frente de sublimaci\u00f3n (Pa)  
 $P_s$  :Presi\u00f3n parcial del agua en la superficie (Pa)  
 $k_s$  :Conductividad t\u00e9rmica de la capa seca ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )  
 $K_{p1}$  :Permeabilidad de la capa seca ( $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )  
 $\Delta H_s$  :Calor latente de sublimaci\u00f3n ( $\text{J.kg}^{-1}$ )= $2,95 \times 10^6$   
 $T_s$  :Temperatura en la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_h$  :Temperatura en el frente de sublimaci\u00f3n ( $^{\circ}\text{C}$ )

Ibarz, Barbosa, Garza y Gimeno (2000:119) calculan el tiempo de liofilizaci\u00f3n usando el modelo URIF (Uniformly Retreating Ice Front) cuyo esquema es equivalente al de transferencia de masa y calor a trav\u00e9s de la

capa seca mostrado por Ozilgen (1998), siendo todas las expresiones citadas iguales a las dadas por Barbosa y Vega (2000).

Callejo (2002:205), expresa que la transferencia de vapor a través del sólido seco se puede expresar de tres casos:

- Primer caso: De acuerdo con la ley de Darcy, como un transporte de cantidad de movimiento.
- Segundo caso: Difusión molecular interna dada por la Ley de Fick.
- Tercer caso: Velocidad de transferencia de vapor, atendiendo a la variación del contenido de humedad de la capa seca conforme progresa el secado.

Ibarz y Barbosa (2005: 616) expone lo mismo que Barbosa y Vega (2000). Sin embargo, dichos autores aclaran<sup>5</sup> durante la determinación del tiempo de secado que existen dos casos, el primero con transferencia de calor por una sola cara (equivalente al segundo caso mostrado por Ozilgen) y por ambas caras del alimento (equivalente al primer caso mostrado por Ozilgen); para cada uno de estos se considera el espesor total y el semiespesor respectivamente durante el cálculo.

Si el alimento es secado por una sola cara:

$$t = \frac{\rho_c(x_0 - x_t)}{2K_p(1 + x_0)(P_h - P_s)} L^2 \quad (66)$$

$$t = \frac{\rho_c \Delta H_s(x_0 - x_t)}{2(1 + x_0)k_s(T_s - T_h)} L^2 \quad (67)$$

Si el alimento es secado por ambas caras:

$$t = \frac{\rho_c(x_0 - x_t)}{2K_p(1 + x_0)(P_h - P_s)} (L/2)^2 = \frac{\rho_c(x_0 - x_t)}{8K_p(1 + x_0)(P_h - P_s)} L^2 \quad (68)$$

---

<sup>5</sup>Dicha aclaración se realizó mediante la gentil respuesta vía electrónica del Dr. Ibarz (aibarz@tecal.udl.cat) el 14 de Enero del 2013, por encontrarse un error en la ecuación 18.96 de su libro del año 2005, y que será corregido en las próximas ediciones.

$$t = \frac{\rho_c \Delta H_s (x_0 - x_t)}{2(1 + x_0)k_s(T_s - T_h)} (L/2)^2 = \frac{\rho_c \Delta H_s (x_0 - x_t)}{8(1 + x_0)k_s(T_s - T_h)} L^2 \quad (69)$$

Donde:

- $\rho_c$  :Densidad del alimento congelado ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
- $x_0$  :Contenido de humedad inicial ( $\text{kg agua.kg s\u00f3lido seco}^{-1}$ )
- $x_t$  :Contenido de humedad en el tiempo t ( $\text{kg agua.kg s\u00f3lido seco}^{-1}$ )
- L :Espesor total de la capa del alimento (m)
- $\Delta H_s$  :Calor latente de sublimaci\u00f3n ( $\text{J.kg}^{-1}$ )= $2,95 \times 10^6$
- $T_s$  :Temperatura en la superficie de la l\u00e1mina ( $^{\circ}\text{C}$  \u00f3 K)
- $T_h$  :Temperatura de sublimaci\u00f3n ( $^{\circ}\text{C}$  \u00f3 K)
- $k_s$  :Conductividad t\u00e9rmica de la capa seca ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
- $P_h$  :Presi\u00f3n parcial del agua en el frente de sublimaci\u00f3n (Pa)
- $P_s$  :Presi\u00f3n parcial del agua en la superficie (Pa)
- $K_p$  :Permeabilidad de la fracci\u00f3n seca del alimento ( $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )

Welti, et al. (2005:8) cita que, si el vapor fluye principalmente por difusi\u00f3n de Knudsen, las colisiones con la pared seca son numerosas comparadas con las colisiones entre las mol\u00e9culas de agua. El coeficiente de Knudsen est\u00e1 relacionado con el di\u00e1metro de poro y la temperatura. A continuaci\u00f3n se presentan algunas relaciones:

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = \varepsilon D_k \frac{M_a}{RT} \frac{P_h - P_s}{z} \quad (70)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = \varepsilon \rho_h \frac{dz}{dt} \quad (71)$$

$$D_k = \frac{2}{3} d_p \left( \frac{2RT}{\pi M_a} \right)^{0,5} \quad (72)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \rho_h \frac{RT_h}{M_a (P_h - P_s)} \quad (73)$$

$$\beta = \varepsilon \frac{M_a^2 \Delta H_s^2 P_h}{R^2 T_h^3 k_h} \quad (74)$$

$$t = \frac{\alpha L^2}{D_k} (1 + \beta D_k) \quad (75)$$

Donde:

- $\frac{1}{A} \frac{dm}{dt}$  : Velocidad de sublimaci\u00f3n del hielo ( $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ )
- $\varepsilon$  : Fracci\u00f3n volum\u00e9trica del hielo

- $D_k$  : Coeficiente de difusión de Knudsen del vapor de agua ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )  
 $M_a$  : Peso molecular del agua ( $kg \cdot mol^{-1}$ )  
 $P_h$  : Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)  
 $P_s$  : Presión parcial del agua en la superficie (Pa)  
 $x$  : Espesor de la capa seca (m)  
 $\rho_h$  : Densidad del hielo ( $kg \cdot m^{-3}$ )  
 $\frac{dz}{dt}$  : Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $d_p$  : Diámetro de poro (m)  
 $R$  : Constante universal de los gases ( $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )= $8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$   
 $T$  : Temperatura del alimento (K).  
 $k_h$  : Conductividad del hielo  
 $\alpha$  : Primera constante para el cálculo del tiempo de liofilización  
 $\beta$  : Segunda constante para el cálculo del tiempo de liofilización

Brennan (2006: 97) menciona que una vez que la sublimación empieza, la capa seca se formará en la superficie superior del alimento. Al mismo tiempo, la velocidad a la cual el vapor de agua se mueve a través de la capa seca y la con la cual el calor atraviesa la capa seca y/o la capa congelada determina la velocidad de secado. Si la pieza del sólido es liofilizada solo desde la superficie superior, y si el calor es suministrado solo por encima, a través de ésta, se llegará a un estado de equilibrio entre la transferencia de calor y masa. Asimismo, brinda también las ecuaciones N° 55 y 56, mencionadas anteriormente añadiendo la siguiente:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Ak_s(T_s - T_h)}{\Delta H_s z} \quad (76)$$

Donde:

- $\frac{dm}{dt}$  : Velocidad con que se transfiere el vapor ( $kg \cdot s^{-1}$ )  
 $A$  : Área normal de secado ( $m^2$ )  
 $k_s$  : Conductividad térmica de la capa seca ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )  
 $T_s$  : Temperatura en superficie superior de la capa seca ( $^{\circ}C$ )

- $T_h$  :Temperatura del frente de hielo (°C)  
 $\Delta H_s$  :Calor latente de sublimación (kJ.Kg<sup>-1</sup>)= 2791.2  
 $z$  :Espesor de la capa seca (m)

Orrego (2008:64) cita un modelo para la liofilización simétrica<sup>6</sup> y también uno para la liofilización por una sola cara con calefacción por capas seca y congelada a la vez.

Para el primer caso, la conducción de calor puede ser a través de la capa seca por ambas caras o por una sola. Asimismo, presenta la relación N° 55 citada por Ozilgen (1998) y las relaciones deducidas por Ibarz y Barbosa (2005); adiciona una expresión deducida de la ecuación N° 56 en función de las densidades del alimento con ayuda de un balance de sólidos secos iniciales y finales. En este modelo se relaciona las temperaturas de la superficie del alimento, frente de sublimación y placa superior que transfiere calor por radiación (Orrego, 2008:68).

$$\frac{dm}{dt} = A(\rho_c - \rho_s) \frac{dz}{dt} \quad (77)$$

Si se calienta por un lado:

$$t = \frac{(\rho_c - \rho_s)}{2K_{p1}(P_h - P_s)} L^2 \quad (78)$$

Si se calienta por ambos lados:

$$t = \frac{(\rho_c - \rho_s)}{2K_{p1}(P_h - P_s)} (L/2)^2 = \frac{(\rho_c - \rho_s)}{8K_{p1}(P_h - P_s)} L^2 \quad (79)$$

Relación de temperaturas:

$$\epsilon \sigma T_s^4 + \frac{k_s}{z} T_s - \epsilon \sigma T_p^4 - \frac{k_s}{z} T_h = 0 \quad (80)$$

Donde:

$$\frac{dm}{dt} : \text{Velocidad con que se transfiere el vapor (kg.s}^{-1}\text{)}$$

<sup>6</sup>Orrego (2008:64) cita al primer modelo como “**Modelamiento para liofilización simétrica y por una sola cara**”. Sin embargo, dentro de la explicación hace referencia a los esquemas por ambas caras y por una sola cara; por lo que se omitió el término “**por una sola cara**” para evitar confusión.

$\rho_c$	:Densidad del alimento congelado ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_s$	:Densidad del alimento seco ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\frac{dz}{dt}$	:Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca ( $\text{m.s}^{-1}$ )
$L$	:Espesor del alimento (m)
$D_{\text{eff}}$	:Difusividad interna del vapor de agua= Difusividad efectiva media del vapor de agua en la capa seca ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$M_a$	:Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )
$R$	:Constante universal de los gases ideal ( $\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$T_m$	:Temperatura media en la capa seca (K)
$t$	:Tiempo de liofilización (s)
$K_p$	:Permeabilidad de la fracción seca del alimento ( $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )
$x_0$	:Contenido de humedad inicial ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ )
$x_t$	:Contenido de humedad en el tiempo $t$ ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ )
$T_h$	:Temperatura de sublimación ( $^{\circ}\text{C}$ o K)
$T_s$	:Temperatura en la superficie de la lámina ( $^{\circ}\text{C}$ ó K)
$P_h$	:Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)
$P_s$	:Presión parcial del agua en la superficie (Pa)
$\Delta H_s$	:Calor latente de sublimación ( $\text{J.kg}^{-1}$ )= $2,95 \times 10^6$
$\epsilon$	:Emisividad
$\sigma$	:Constante de Stefan-Boltzmann= $5,67 \times 10^{-8}$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )
$k_s$	:Conductividad térmica de la capa seca ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$z$	:Espesor de la capa seca del alimento (m)
$T_p$	:Temperatura del plato superior radiante (K)

El segundo caso, considera el aporte energético del plato calefactor inferior, a través del mecanismo de conducción por la capa congelada. La temperatura en la base del plato es una función de la conductividad térmica desde el plato inferior a través de una película en el fondo de la bandeja entre ésta y el alimento. Asimismo, se brinda una expresión implícita para calcular el tiempo de liofilización (Orrego, 2008:68).

$$\frac{\left[ \frac{k_s(T_s - T_h)}{z} + \frac{k_c(T_L - T_h)}{L - z} \right]}{\Delta H_s} = (\rho_c - \rho_s) \frac{dz}{dt} \quad (81)$$

Donde:

$T_L$  :Temperatura del alimento en su base ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k_f$	: Conductividad térmica del espesor de película en el fondo de la bandeja ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$T_{pinf}$	: Temperatura del plato inferior ( $^{\circ}C$ )
$L$	: Espesor del alimento (m)
$z$	: Espesor de la capa seca del alimento (m)
$k_s$	: Conductividad térmica de la capa seca ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$k_c$	: Conductividad térmica del alimento congelado ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$T_h$	: Temperatura del frente de hielo ( $^{\circ}C$ )
$T_s$	: Temperatura en la superficie de la lámina ( $^{\circ}C$ )
$\Delta H_s$	: Calor latente de sublimación ( $J.kg^{-1}$ )= $2,95 \times 10^6$
$\rho_c$	: Densidad del alimento congelado ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_s$	: Densidad del alimento seco ( $kg.m^{-3}$ )
$\frac{dz}{dt}$	: Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca ( $m.s^{-1}$ )

Millman, Liapis y Marchello (1984: 732) mencionan que los valores de la presión de vapor en la interfase pueden calcularse como sigue:

$$P_h = 133.32 \exp\left(23.9936 - \frac{2.19\Delta H_s}{T_h}\right) \quad (82)$$

Donde:

$T_h$	: Temperatura absoluta en la interface de sublimación (K)
$P_h$	: Presión absoluta del vapor de agua en la interfase (Pa)
$\Delta H_s$	: Calor latente de sublimación ( $kJ.Kg^{-1}$ )

### 2.12.2. Análisis en estado no estacionario de la liofilización

Liapis y Marchello (1984) citados por Barbosa y Vega (2000: 216) han discutido el modelo de sorción-sublimación que describe la liofilización, basado en balances de materia y calor en las regiones seca y helada. Liapis y Bruttini citados por Turner et al. (1997:481), realizaron las siguientes suposiciones para el modelo:

- Existe solo un flujo de calor y masa normal a las superficies de la interfase.
- La sublimación ocurre paralela a la interfase y a una distancia X desde la superficie de la muestra.



- El espesor de la interfase es tomado como infinitesimal.
- Una mezcla binaria de vapor de agua e inerte fluye a través de la capa seca.
- En la interfase, la concentración del vapor de agua está en equilibrio con el hielo.
- En la región porosa, la matriz sólida y el gas están en equilibrio térmico.
- La región congelada es considerada como homogénea en conductividad térmica, densidad, calor específico y contiene despreciable cantidad de gases disueltos.

Las ecuaciones del perfil de temperatura en la capa seca (I) y en la capa congelada (II), se brindan a continuación:

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial T_I}{\partial x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right] \quad (83)$$

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} \quad (84)$$

Donde:

- t : Tiempo (s)
- x : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $T_I$  : Temperatura de la capa seca (K)
- $T_{II}$  : Temperatura en la capa congelada (II)
- $\alpha_{Ie}$  : Difusividad térmica efectiva de la capa seca ( $m^2.s^{-1}$ )
- $\alpha_{II}$  : Difusividad térmica de la capa congelada ( $m^2.s^{-1}$ )
- $\rho_{Ie}$  : Densidad efectiva de la capa seca ( $kg.m^{-3}$ )
- $C_{ple}$  : Capacidad calórica efectiva de la capa seca ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pg}$  : Capacidad calórica del gas ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $N_t$  : Flux másico total en la capa seca =  $N_{in}$  (inerte) +  $N_w$  (agua) ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
- $H_v$  : Calor latente de vaporización ( $J.kg^{-1}$ )
- $\frac{\partial C_{bw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo ( $kg.m^{-3}.s^{-1}$ )

De manera similar, Liapis y Bruttini citados por Turner et al. (1997: 481), brindan las ecuaciones que describen la concentración del agua y del inerte en la capa seca:

$$\varepsilon_p \frac{\partial C_w}{\partial t} + \frac{\partial(V_p C_w)}{\partial x} + \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} = \varepsilon_p \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{win,e} \frac{\partial C_w}{\partial x} \right] \quad (85)$$

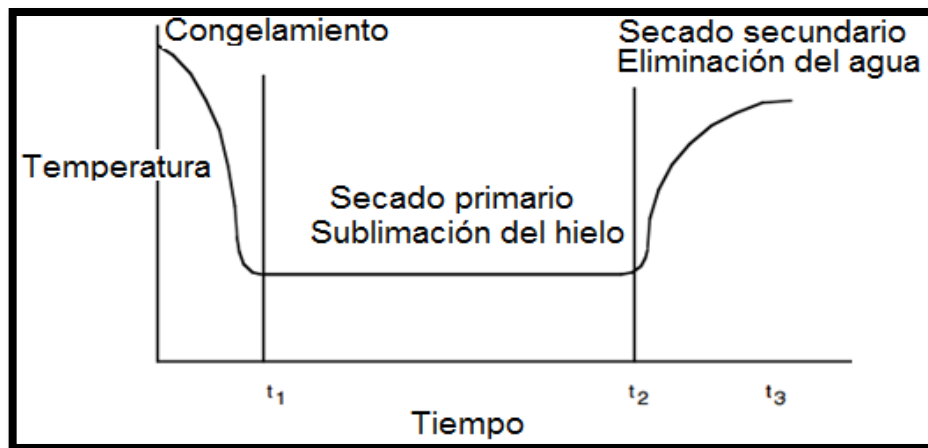
$$\varepsilon_p \frac{\partial C_{in}}{\partial t} + \frac{\partial(V_p C_{in})}{\partial x} = \varepsilon_p \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{inw,e} \frac{\partial C_{in}}{\partial x} \right] \quad (86)$$

Donde:

- t : Tiempo (s)
- x : Distancia recorrida en el eje x (m)
- C<sub>in</sub> : Concentración de la especie por unidad de tiempo (Kg.m<sup>-3</sup>)
- C<sub>w</sub> : Concentración de la especie por unidad de tiempo (Kg.m<sup>-3</sup>)
- D<sub>ifWin</sub> : Difusividad del agua en el medio inerte (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- D<sub>ifinW</sub> : Difusividad del inerte en el vapor de agua (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- ε<sub>p</sub> : Porosidad del medio
- V<sub>p</sub> : Velocidad convectiva en la dirección (m.s<sup>-1</sup>)
- $\frac{\partial C_{bw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo (kg.m<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>)

La temperatura de congelación durante la liofilización es más baja que para el agua pura; la siguiente fase es la sublimación del hielo o secado primario en la que se suministra calor latentesin cambio de temperatura, finalmente se realiza un secado secundario, que comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto manteniendo la temperatura por debajo de los 30 a 50°C, lo que evita el colapso del material (Barbosa y Vega, 2000:207).

**FIGURA N° 2.14**  
**TEMPERATURA EN LAS ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN**



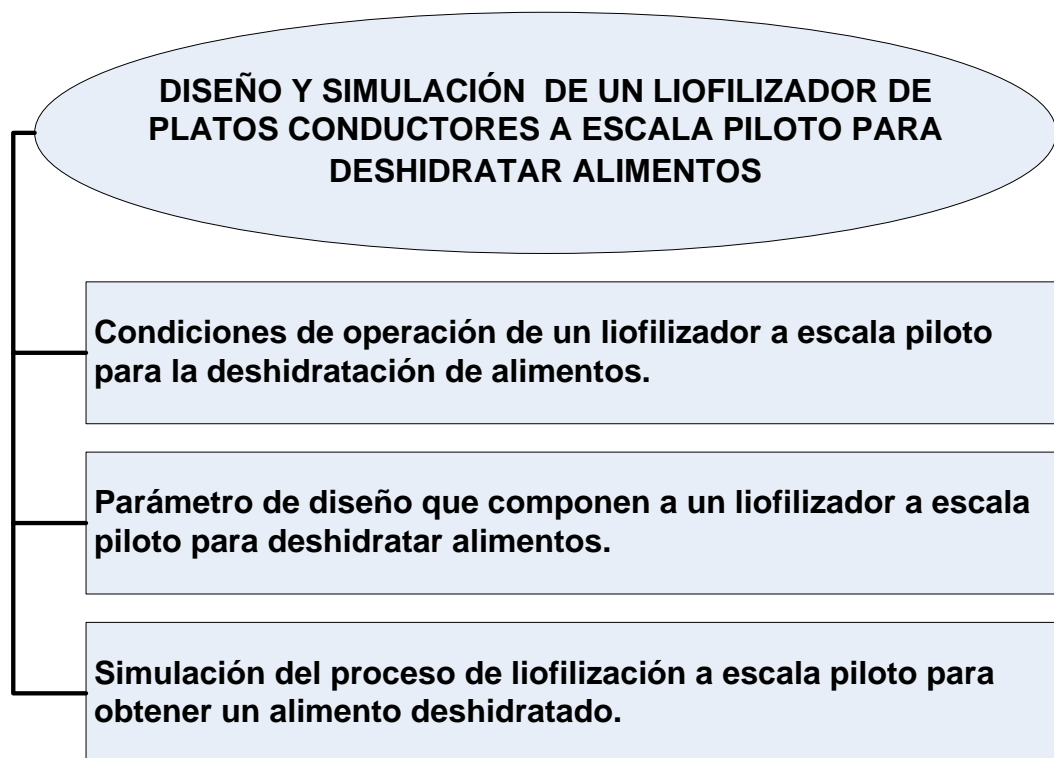
**Fuente:** Barbosa y Vega (2000: 206)

### III. VARIABLES E HIPÓTESIS

#### 3.1. Definición de las variables

- Por su naturaleza, las variables identificadas son del tipo cuantitativas (Y, X1, X2, X3).
- Por su dependencia, la variable Y es dependiente, y las variables X1, X2 y X3 son independientes.
- Es decir:  $Y=f(X1, X2, X3)$ . La figura muestra la relación entre las variables

**FIGURA N° 3.1  
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN**



### 3.2. Operacionalización de las variables

**TABLA N° 3.1**  
**ANÁLISIS DE LA OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLES DEL**  
**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y: Diseño de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y la simulación del proceso.	Procedimiento de cálculo para diseñar un liofilizador a escala piloto y el análisis del producto deshidratado que se obtendría realizando una simulación.	Comparación de las características principales con otros liofilizadores del mercado y artículos científicos.	Relacionando las variables independientes X1, X2 y X3.
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X1: Condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Temperatura de congelación.</li> <li>✓ Temperatura del condensador.</li> <li>✓ Presión de vacío</li> <li>Temperatura de desorción</li> </ul>	Análisis y comparación con datos reportados en artículos científicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Entrevistas.</li> <li>✓ Revisión</li> <li>✓ Bibliográfica</li> </ul>
X2: Parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad del condensador.</li> <li>✓ Capacidad de la bomba de vacío</li> <li>✓ Capacidad de los platos de calentamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cálculos relacionados de dimensionamiento.</li> <li>✓ Comparación con artículos científicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revisión de Bibliografía.</li> <li>Cálculo numérico.</li> <li>✓ Simulación de variables</li> </ul>
X3: Simulación del proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Comportamiento de la cantidad de agua que se va sublimando.</li> <li>✓ Comportamiento de la temperatura en el alimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cálculo de los perfiles de temperatura y concentración de agua.</li> <li>✓ Comparación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revisión de Bibliografía.</li> <li>Simulación de variables.</li> <li>✓ Uso de un programa.</li> </ul>

### **3.3. Hipótesis general e Hipótesis específicas**

#### **Hipótesis general**

El diseño de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y la simulación del proceso se realizan definiendo previamente el intervalo de la cantidad de materia prima, la disposición general del equipo, las condiciones de operación, así como el uso de principios de transferencia de calor y masa.

#### **Hipótesis específicas**

- a) Las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para la deshidratación de alimentos están en función de la presión y la temperatura de trabajo.
- b) Los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos pueden ser calculados mediante la potencia del equipo de frío y el vacío necesario para causar la sublimación.
- c) La simulación del proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado debe dar como resultado un producto que cumpla con las especificaciones de calidad del mercado.

## **IV. METODOLOGÍA**

### **4.1. Tipo de Investigación**

De acuerdo a la naturaleza de los problemas y objetivos formulados en el trabajo, el presente estudio ha reunido las características suficientes para ser calificado como una investigación descriptiva y cuasi-experimental, puesto que se ha propuesto una recopilación de numerosas investigaciones para diseñar, simular y analizar el equipo de liofilización.

### **4.2. Diseño de la investigación**

Se recolectó una vasta información referida a la solución de los problemas de investigación, definiendo condiciones generales del equipo, cálculo de las variables de diseño, en base a principios de fenómenos de transporte, y el análisis de los resultados obtenidos con trabajos similares o información requerida.

#### **4.2.1. Primera etapa**

Se revisó las teorías vinculadas a las variables de la liofilización de alimentos en diversos estudios publicados; y recolección de la data de las propiedades de alimentos necesarias.

#### **4.2.2. Segunda etapa**

Se han establecido los parámetros de operación del liofilizador a escala piloto, mediante la información brindada por diversos autores, sacados de publicaciones indexadas de preferencia.

#### **4.2.3. Tercera etapa**

Se ha establecido las capacidades de los componentes del liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos, como la potencia del equipo de frío, la capacidad de la bomba de vacío a usar entre otros.

#### **4.2.4. Cuarta etapa**

La simulación del proceso de liofilización a escala piloto se obtuvo mediante la recolección de las propiedades de diversos alimentos, relaciones de operaciones unitarias y el cálculo de las ecuaciones de transferencia usando un programa de simulación.

#### **4.3. Población y muestra**

La presente investigación fue de carácter cuasi-experimental, por lo que no se ha realizado una extracción de una muestra determinada a partir de una población, sino se realizó un estudio basado sobre la información de diversos artículos, que serían evaluados posteriormente.

#### **4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos**

La técnica para la recolección de datos consistió en la búsqueda exhaustiva y profunda de fuentes bibliográficas primarias y secundarias indexadas de preferencia. Los instrumentos fueron conformados por las diversas bibliotecas y páginas web consultadas, usando dispositivos de almacenamiento electrónico como memorias portátiles, bitácoras, folders o fichas para ordenar la información en físico.

#### **4.5. Procedimientos de recolección de datos**

Se tuvo en cuenta el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, para finalmente alcanzar el objetivo general.

- La recolección de datos para el desarrollo del primer objetivo fue realizado mediante una búsqueda de informaciones provenientes de: libros, revistas indexadas, y simposios ubicados en bibliotecas o web.
- La recolección de datos para el segundo objetivo fue obtenido mediante el cálculo del dimensionamiento y características principales del equipo, basado en relaciones bibliográficas encontradas.

- La recolección de datos para el desarrollo del tercer objetivo se hizo mediante el análisis, creación de un programa de cálculo para la evaluación del proceso de la liofilización.

#### **4.6. Procesamiento estadístico y análisis de datos**

El análisis de datos fue realizado mediante la comparación de las características generales con los diversos equipos comercializados actualmente en el mercado nacional, internacional y las corridas experimentales de diversos autores.

#### **4.7. Metodología para el desarrollo del primer objetivo**

Previo al desarrollo del primer objetivo, se realizó una elección de los alimentos a liofilizar, se realizó tomando en cuenta los datos de la Tabla Peruana de Composición de Alimentos del Ministerio de Salud del Perú (Cabezas, 2009: 11), considerando los siguientes grupos: (1) Cereales; (2) Verduras, hortalizas; (3) Frutas; (4) Pescados y mariscos; (5) Carnes; (6) Leches y derivados; (7) Productos azucarados; (8) Leguminosas; (9) Tubérculos, raíces (véase las Tablas N° 2.A1, 2.B1, 2.C1, 2.D1, 2.E1, 2.F1, 2.G1, 2.H1, 2.I1 del Anexo N°2).

Se utilizaron para los cálculos de preferencia 3 alimentos por cada grupo (uno con el menor contenido de humedad, otro con el mayor contenido de humedad y un pseudoalimento con la composición promedio del grupo); no se consideraron para los análisis aquellos previamente procesados como concentrados, salados, mermeladas entre otros. Sin embargo, dependiendo de la disponibilidad de datos, fueron considerados otros adicionales para brindar más sustento a los análisis.



**TABLA N° 4.1**  
**COMPOSICIÓN FRACCIONAL DE CIERTOS ALIMENTOS**

<b>Grupo</b>	<b>ALIMENTOS</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>ca</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>	<b>y<sub>f</sub></b>
<b>1</b>	Maíz, grano fresco	0,663	0,033	0,008	0,274	0,008	0,015
<b>2</b>	Verdura promedio	0,866	0,021	0,005	0,075	0,019	0,013
	Ají amarillo molido	0,579	0,018	0,016	0,088	0,260	0,038
	Lechuga americana	0,959	0,006	0,001	0,024	0,003	0,007
<b>3</b>	Fruta promedio	0,773	0,011	0,022	0,169	0,007	0,018
	Tamarindo	0,305	0,027	0,006	0,607	0,026	0,029
	Agua de Coco	0,955	0,007	0,001	0,031	0,006	0,000
<b>4</b>	Pescado promedio	0,762	0,202	0,022	0,000	0,014	0,000
	Machas	0,710	0,237	0,013	0,027	0,013	0,000
	Pota	0,915	0,018	0,012	0,035	0,019	0,000
<b>5</b>	Carne promedio	0,748	0,172	0,064	0,005	0,011	0,000
	Carne de pato	0,544	0,160	0,286	0,000	0,010	0,000
	Criadillas de res	0,869	0,098	0,018	0,004	0,011	0,000
<b>6</b>	Leche promedio	0,879	0,004	0,036	0,071	0,009	0,879
	Queso mantecoso	0,448	0,037	0,401	0,044	0,070	0,000
	Leche fresca	0,930	0,004	0,010	0,049	0,007	0,000
<b>7</b>	Chancaca	0,158	0,000	0,000	0,839	0,003	0,000
	Miel de abeja	0,141	0,000	0,000	0,855	0,003	0,001
	Miel de caña	0,262	0,003	0,002	0,717	0,012	0,004
<b>8</b>	Leguminosa prom.	0,668	0,081	0,024	0,190	0,012	0,024
	Frijol tarhui o chocho	0,446	0,167	0,169	0,167	0,015	0,037
	Frijol shimpe fresco	0,841	0,036	0,001	0,089	0,011	0,022
<b>9</b>	Papa promedio	0,702	0,020	0,003	0,217	0,011	0,047
	Ashipa	0,548	0,014	0,003	0,423	0,003	0,009
	Arracacha o racacha	0,960	0,009	0,004	0,000	0,013	0,014

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** y= Composición proximal en fracción, Subíndices: a=agua; p= proteínas; g=grasas; ca=carbohidratos; ce=cenizas; f=fibra

#### **4.7.1. Determinación del rango de temperatura de congelación**

Se tuvo en cuenta que la temperatura de congelación ( $T_c$ ) debe ser la necesaria para que la matriz del alimento tenga la firmeza suficiente, y se evite el fenómeno de colapso estructural durante la sublimación (Goldblith et al., 1975: 730). Mujumdar (2006: 259) cita que la temperatura de

colapso depende de la naturaleza del producto y está relacionada con la formación eutéctica o vítrea en los alimentos.

**TABLA N° 4.2**  
**COMPOSICIONES PROXIMALES Y TEMPERATURAS DE COLAPSO**  
**PARA DIFERENTES ALIMENTOS**

<b>G</b>	<b>Alimentos</b>	<b>ya</b>	<b>yp</b>	<b>yg</b>	<b>yca</b>	<b>yce</b>	<b>yf</b>	<b>T<sub>clp</sub></b>	<b>R.</b>
2	Tomate	0,935	0,008	0,002	0,043	0,005	0,008	-41,0	c
3	Naranja	0,881	0,006	0,002	0,101	0,006	0,004	-43,0	c
3	Limón	0,893	0,005	0,002	0,097	0,003	0,000	-36,5	a,b
3	Manzana	0,840	0,003	0,001	0,145	0,003	0,008	-41,5	a,b,c
3	Piña	0,890	0,004	0,001	0,178	0,005	0,004	-37,0	d
3	Uva	0,809	0,004	0,001	0,178	0,005	0,004	-46,0	b
3	Toronja	0,895	0,006	0,004	0,088	0,004	0,003	-30,5	b
3	Fresa	0,879	0,007	0,008	0,088	0,005	0,014	-15,0	c
3	Plátano	0,740	0,010	0,000	0,230	0,010	0,000	-35,0	d
3	Durazno	0,810	0,010	0,000	0,170	0,000	0,010	-36,0	d
5	Res	0,760	0,213	0,016	0,000	0,011	0,000	-16,0	c
5	Pollo	0,748	0,212	0,031	0,000	0,010	0,000	-20,0	c
6	Queso	0,653	0,021	0,239	0,039	0,049	0,000	-24,0	c
9	Papa	0,692	0,020	0,003	0,220	0,012	0,055	-12,0	c

**Fuente:** (a) Rahman (2009:376); (b) Natividad (2011:16); (c) Ahmed, et al.(2012: 631); (d) Fellows (2000:441); las composiciones son citadas por Cabezas (2009) en la Tabla Peruana de Composición de Alimentos; Ref.:Referencia.

**Nota:** G: Grupo de alimentos al que pertenece; y: Composición fraccional; Subíndices: a= agua; p=proteínas; g=grasas; ca=carbohidratos; ce=cenizas; f=fibra; T<sub>clp</sub>: Temperatura de colapso (°C); R=Referencia.

Las temperaturas de colapso de los alimentos (T<sub>clp</sub>) son brindados por: Rahman (2009:359); Fennema, et al. (1975) Barbosa, et al. (2000) citados por Natividad (2011:16); y Ahmed, et al. (2012: 631). Asimismo, la mayoría de investigadores opinan que ésta se encuentra aproximadamente 20°C por encima de la temperatura de transición vítrea (Rahman, 2008:372). Las temperaturas de transición vítrea de algunos alimentos son citadas en Rahman (2009:276-279), Bai et al. (2001:94), y

Brakes, et al. (1999:4) y Fellows (2000:441) (véase las Tablas N° 3.1A, 3.1B, 3.1C y 3.1D del Anexo N° 3).

Se estimó los rangos de la temperatura de colapso en función de la temperatura de transición vítrea, mediante visualización gráfica y análisis de los datos de diversos autores. Asimismo, se propuso la temperatura de colapso de las frutas en función de sus composiciones proximales:

$$T_{clp} = a_0 + a_1 Y_{agua} + a_2 Y_{proteína} + a_3 Y_{grasa} + a_4 Y_{Carb.} + a_5 Y_{Ceniza} + a_6 X_{fibra} \quad (87)$$

Donde:

$T_{clp}$  : Temperatura de colapso (°C).  
 $Y$  : Fracción en masa de los distintos componentes proximales del alimento

Finalmente, se determinó la temperatura de congelación según lo citado por Ahmed, et al., (2012: 634), quien menciona que ésta debe ser de 5°C menor que la temperatura de colapso.

#### 4.7.2. Determinación del rango de presiones de vacío

El criterio general estuvo basado en lo expresado por Tang and Pikal (2004) citado por Ahmed, et al., (2012: 634) quienes propusieron una ecuación empírica para determinar la presión óptima de la cámara:

$$P_{cámara} = 0.29 \times 10^{(0.019T_c)} \quad (88)$$

Donde:

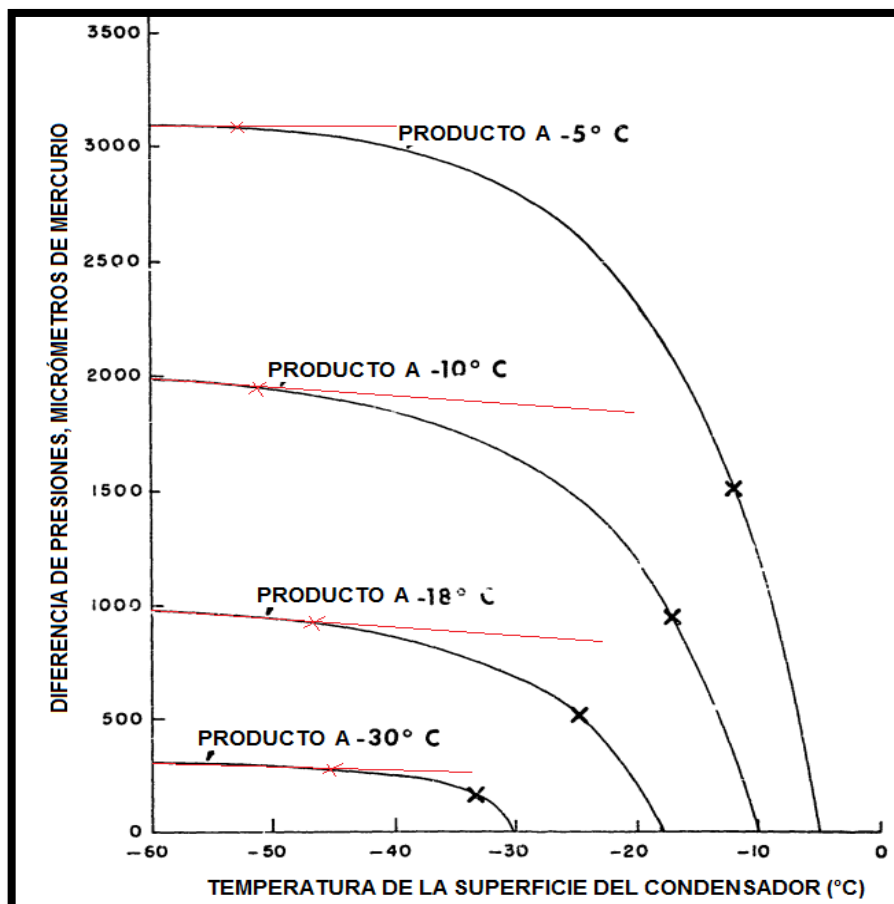
$P_{cámara}$  : Presión de la cámara (Torr)  
 $T_c$  : Temperatura de congelación objetivo del producto (°C)

Se obtuvo un rango de operación de presión en la cámara considerando el valor mínimo y el máximo para los alimentos evaluados.

### 4.7.3. Determinación del rango de temperaturas del condensador de agua sublimada

Se utilizó el Diagrama de Fases del agua, donde el paso del estado vapor del agua sublimada procedente del alimento al estado sólido (hielo) es producido por una disminución de temperatura, para cierta presión del medio; obteniéndose una correlación de tercer grado de la temperatura de congelación de vapor de agua (temperatura teórica) en función de la presión de vapor, con los datos brindados por la bibliografía. La temperatura real de trabajo del condensador, fue estimada mediante el análisis del Gráfico N°4.1 brindado.

**GRÁFICO N° 4.1**  
**DIFERENCIA DE PRESIONES A DISTINTAS TEMPERATURAS**



Fuente: Cartier et al. (1961:11)

Las líneas tangentes y los puntos marcados en el Gráfico anterior, determinaron la diferencia de temperatura recomendable mínima entre el alimento y el condensador en distintos casos. La extracción de los valores numéricos del gráfico fue realizada con el programa PlotDigitizer para cada curva mostrada. La temperatura de trabajo del condensador sugerida, es la menor del rango de temperaturas de condensador para los diversos casos.

#### **4.7.4. Determinación del rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario de la liofilización**

La liofilización destaca frente a las demás técnicas de secado por respetar las propiedades sensoriales y nutritivas del alimento (Callejo, 2002: 202). Adicionalmente, Liapis y Bruttini citados por Mujumdar (2006:300), citan que la temperatura máxima que el producto puede tolerar sin sufrir ningún efecto de deterioro como: pérdida de bioactividad, cambio de color, posibilidad de ocurrencia de reacciones químicas y bioquímicas de degradación y deformación estructural de la capa seca, es denotada como la temperatura “scorch”  $T_{scor}$ .

Ahmed et al. (2012:635) expresa que la  $T_{scor}$  no debe exceder a la temperatura de transición vítrea del alimento deshidratado a un contenido de humedad determinada. Las temperaturas de transición vítrea son reportadas por Rahman (2009:276-279) (véase las Tablas N° 2.1E del Anexo N° 2) siendo los valores máximos los indicados en la tabla anterior por grupo de alimentos. Además, se consideró la resistencia de las

vitaminas al procesamiento térmico para determinar un rango de temperaturas según el grupo de alimentos.

**TABLA N° 4.3**  
**CONTENIDO VITAMÍNICO MÁXIMOS EN GRUPOS DE ALIMENTOS**

G	VALORES MÁXIMOS						
	b-car	Ret.	A(ug)	B1 (mg)	B2 (mg)	B3 (mg)	C (mg)
1	<b>352,00</b>	16,00	1,00	1,00	0,75	8,75	4,80
2	*	<b>879,00</b>	<b>841,00</b>	0,36	0,95	2,87	136,00
3	*	<b>706,00</b>	121,00	4,28	1,52	24,00	2780,00
4	0,00	<b>606,00</b>	90,00	0,20	0,82	12,80	29,30
5	0,00	<b>14000,00</b>	<b>7391,00</b>	0,98	3,00	17,75	43,20
6	*	80,00	<b>420,00</b>	0,00	1,00	0,00	5,00
7	*	*	0,00	0,02	0,11	0,29	5,10
8	*	29,00	38,0	0,84	0,60	3,43	28,50
9	*	39,00	<b>709,00</b>	0,20	0,35	2,84	77,50

**Fuente:** Adaptado de Cabezas (2009)

**Nota:** b-carot:beta caroteno ( $\mu\text{g}$ ), Ret.=retinol ( $\mu\text{g}$ ), \*=No se reporta valores

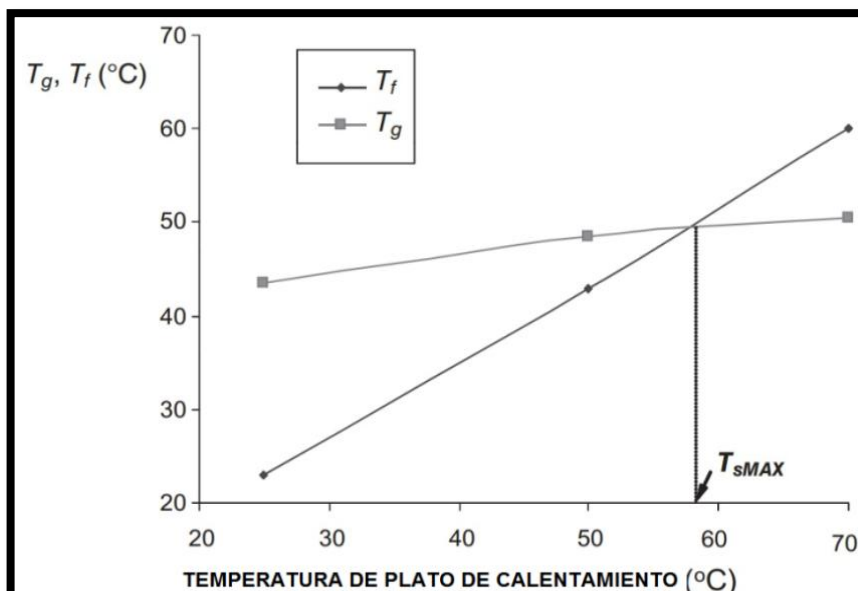
La temperatura del producto fue relacionada con la temperatura real del plato de calentamiento según la metodología que Raharitsifa (2003) citada por (Ahmed, et al., 2012: 635), como se muestra en el gráfico.

**TABLA N° 4.4**  
**TEMPERATURA MÁXIMA EN LA SUPERFICIE DE ALIMENTOS**

Grupo	ALIMENTO	T <sub>scor</sub> (°C)	Referencia
3	Rodajas de fresa	70	a,b
	Jugo de naranja	49	a,b
	Jugo de guava	43	a,b
4	Langostinos	52	a
	Langostinos	79	a
	Carne de salmón	79	a
	Salmón	80	b
5	Res, congelado rápido	60	a,b
	Res, congelado lento	60	a,b
	Cubitos de pollo	60	a,b

**Fuente:** a) Goldblith et al. citados por Mujumdar (2006:300); b) Karel et al. (1975) citados por Ahmed et al. (2012)

**GRÁFICO N° 4.2**  
**TEMPERATURA DEL PRODUCTO Y PLATO DE CALENTAMIENTO**



**Fuente:** Raharitsifa (2003) citado por (Ahmed et al., 2012: 635)

**Nota:**  $T_f$ : Temperatura final del producto,  $T_g$ : Temperatura de transición vítrea.

**TABLA N° 4.5**  
**RESITENCIAS TÉRMCAS DE PRO VITAMINAS Y VITAMINAS**

Vitamina	CONDICIONES	
BETA CAROTENO	La retención del b-caroteno en un secado con aire caliente de zanahoria a 50°C, 60°C, 70°C y 80°C, brinda una retención porcentual de 79, 76, 74 y 71.	(a)
A	La Vitamina A (todo trans-retinol y 13-cis-retinol) muestra estabilidad en atmósferas de nitrógeno y ambientes fríos sin luz y es especialmente sensible a la oxidación por aire en presencia de luz.	(b)
B1	Destruído a altas temperaturas.	(c)
B2	Los procesos de calentamiento difícilmente la afectan; es más termoestable que la tiamina (B1). La degradación térmica en leche de soya siguieron una cinética de primer orden y las velocidades fueron $7,05 \times 10^{-4}$ , $4,226 \times 10^{-3}$ , y $2,12 \times 10^{-2}$ /minuto a 90°C, 120°C y 140°C.	(d)
B3	Es la más estable de las vitaminas, estable al calor y la luz.	(e)
C	Después de 40 minutos el % de retención de ácido ascórbico en la rosa mosqueta (Rose Hip) con tratamiento térmico a 70°C, 80°C, 90°C y 95°C fue de 77%, 80%, 62%, y 57%	(f)
	Para jugos de lima, uva, naranja y limón, se aprecia una disminución apreciable del 3.23%, 4.81%, 5.72% y 10.02% cuando se trabaja a 40°C.	(g)

**Fuente:** Adaptado de (a): Goula, et al. (2010: 760); (b): Baéz et al. (2012:235); (c) Morris et al. (2004) citado por Sinha et al. (2011:116); (d): Citado por Choe et al. (2005:29); (e): Morris et al. (2004) citado por Sinha

et al. (2011:116); (f): Karhan et al. (2003: 314); (g): Njoku, et al. (2011: 1169)

#### **4.8. Metodología para el desarrollo del segundo objetivo**

Previamente al desarrollo del segundo, se realizaron las siguientes consideraciones:

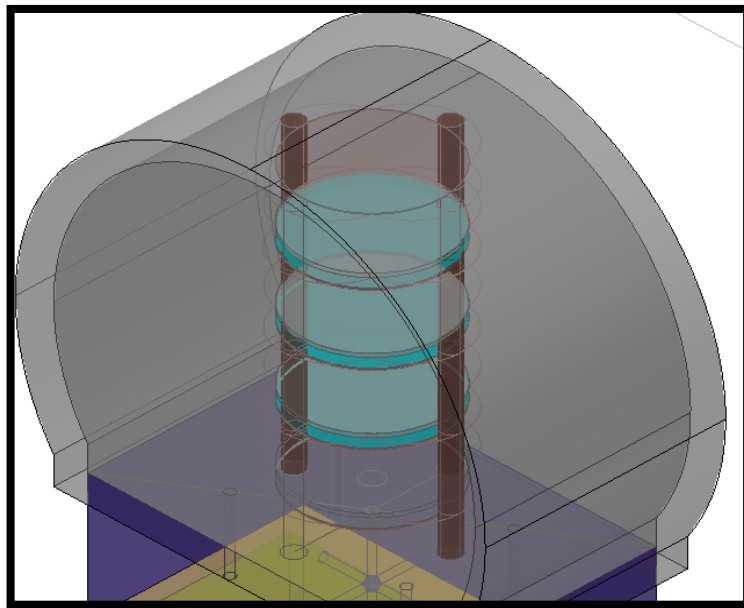
- La carga de alimento a liofilizar a escala piloto en ciclo batch de 20 kg de producto congelado (Mujumdar (2006: 264) cita entre 2 y 20 kg.).
- Se utilizaron los resultados del primer objetivo desarrollado.
- Las propiedades de los alimentos fueron consideradas para cada grupo.
- Se supone que el alimento a liofilizar se encuentra licuado y distribuido uniformemente en toda la superficie del plato, y que en el caso de las carnes y pescados ocupan la totalidad del espacio.
- Las partes generales estarán en tres zonas o cámaras: (1) Cámara de Secado, que contiene a los platos circulares con las muestras a liofilizar considerando 4 platos (Wilhelm, 1999: 101); (2) Cámara de condensación de agua sublimada, en la cual circula el refrigerante a temperaturas bajas para convertir el agua sublimada que sale de la cámara de secado en hielo. La conexión de vacío se encuentra conectada a la parte inferior de la cámara de condensación; (3) Cámara de accesorios, donde se ubica los compresores del sistema de congelación, el intercambiador de calor, y la bomba de vacío.
- El diseño del equipo será basado en un liofilizador de compartimiento cilíndrico horizontal, que contendrá a la vez a la cámara de secado que contiene las bandejas y el condensador en la parte inferior.
- El congelamiento del alimento se realiza dentro de la cámara de secado, para el cual en la parte inferior se tiene un sistema de congelación en forma de serpentín.
- Debido a que durante el secado primario (sublimación) y secado secundario se aplica calor, es necesario la presencia de un plato de calentamiento con resistencias eléctricas, las cuales tienen contacto con la base del plato mediante proyecciones metálicas de un material altamente conductor, que atraviesan el sistema de congelamiento sin chocar con los serpentines que se encuentran debajo de éste.
- El acero inoxidable tipo 304 o 316 es idealmente adecuado para la construcción de recipientes de vacío debido a sus características de manipuleo, excelente resistencia a la corrosión y su rentabilidad total. La única diferencia práctica entre ambos tipos de acero es el contenido de carbono, el cual es como máximo 0.08% para el 304 y máximo 0,030%



para el de 316, los demás elementos son esencialmente los mismos. Asimismo, un bajo contenido de carbono permite amoldar la estructura con mayor facilidad (British Stainless Steel Association).

- Las tuberías de los refrigerantes fueron consideradas de cobre según lo citado por Wang (2001:11.12) usados en la mayor cantidad de refrigerantes, a excepción del amoníaco.
- El sistema aislante de la cámara de secado y de condensación del agua sublimada en escarcha fue conformada por planchas de poliuretano en la parte externa, que es más común estos tipos de sistemas comerciales.
- El material conductor térmico fue de cobre pulido para las extensiones conductoras de calor (emisividad=0.01) y de cobre negro oxidado para los platos conductores (emisividad=0,88) para aprovechar radiación.

**FIGURA N° 4.1**  
**ESQUEMA PROYECTADO DEL LIOFILIZADOR**

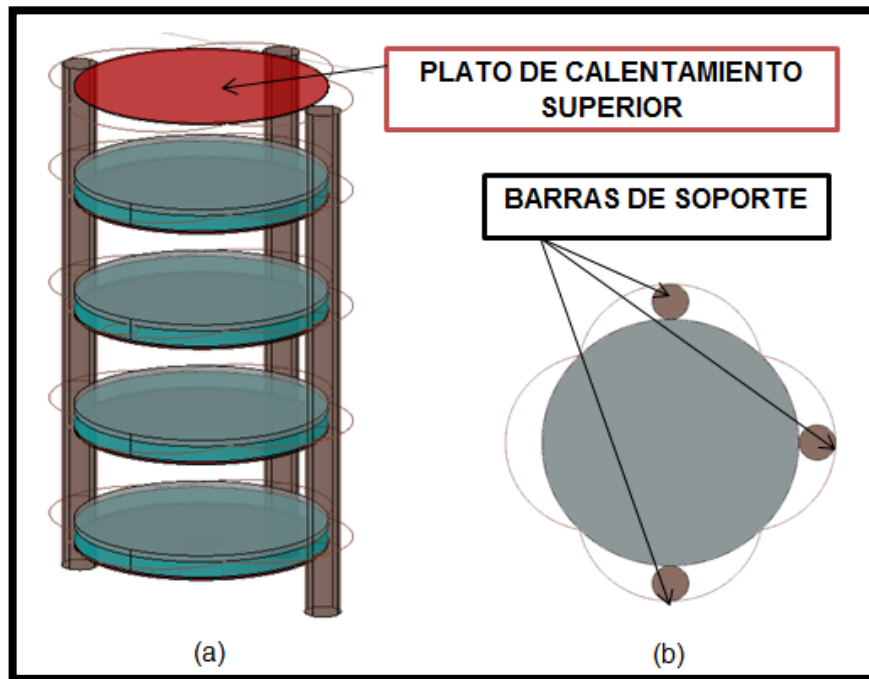


#### **4.8.1. Diseño del plato de liofilización**

Se determinó las dimensiones del plato en función de la elección y cálculo del diámetro más adecuado respectivamente, teniendo en cuenta el tiempo de operación para la liofilización de diversos alimentos, utilizando diversos modelos estacionarios. El conjunto de platos fue

distribuido verticalmente y uniformemente en la cámara cilíndrica, incluyendo los soportes u otros dispositivos anexados.

**FIGURA N° 4.2**  
**DISPOSICIÓN DE LOS PLATOS DE LIOFILIZACIÓN**



**Nota:** (a) Vista de Perfil, (b) Vista superior del Sistema

**a) Estimación de las propiedades del alimento necesarias para calcular el espesor del alimento en función del tiempo de liofilización**

Previamente son clasificadas las variables a utilizar:

**TABLA N° 4.6**

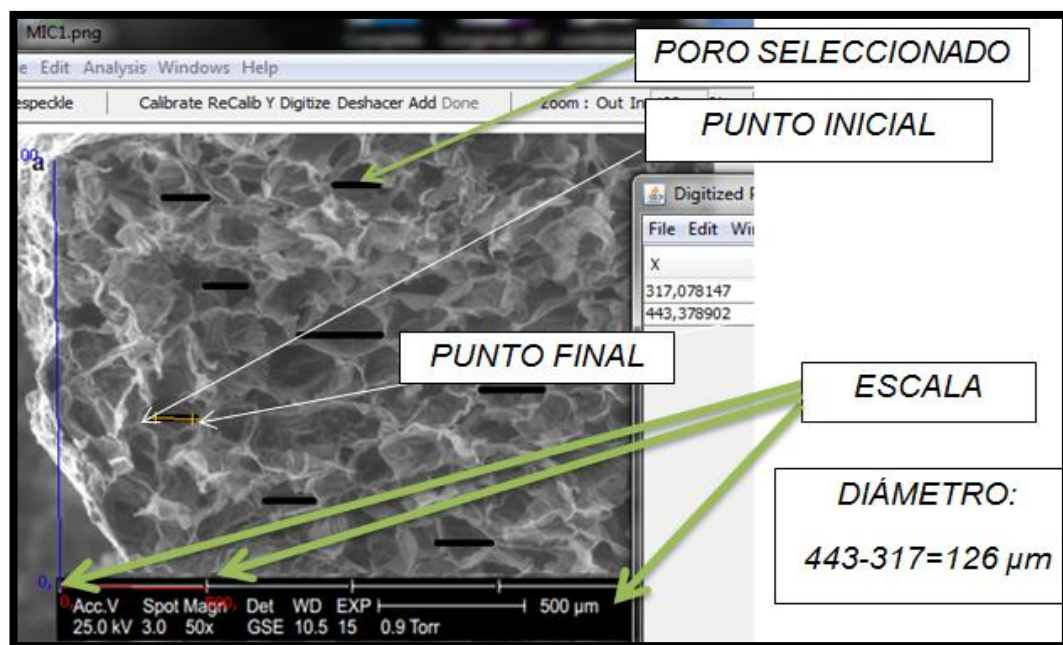
**CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO DE LIOFILIZACIÓN**

CTES.	VALOR PROMEDIO	VALORES
$\Delta H_s$	$2,89 \times 10^6 \text{ (J.kg}^{-1}\text{)}$	$2,95 \times 10^6$ (a); $2,95 \times 10^6$ (b); $2,95 \times 10^6$ (c); $2,79 \times 10^6$ (d); $2,83 \times 10^6$ (e).
$M_a$	$18,0153 \times 10^{-3} \text{ (kg.mol}^{-1}\text{)}$	-
R	$8,314 \text{ (J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	-
	$461,89 \text{ (J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	-

**Nota:** Ecuaciones N°67, 78 y 94; (a): Ozilgen (1998:318); (b): Barbosa y Vega (2000:208); (c) Fellows (2000:464); (d): Brennan (2006:97); (e): Khwanruthai (2007: 22)

El tamaño de poro de alimentos liofilizados fue estimado mediante las microfotografías e información mencionada (véase Tabla N° 3.5A y Figuras N° 3.5A, 3.5B, 3.5C, 3.5D, 3.5E, 3.5F, 3.5G del Anexo N°3) con el programa PlotDigitizer utilizado el promedio del diámetro de 8 poros ubicados aleatoriamente en las microfotografías y el indicador de escala ubicado en su parte inferior.

**FIGURA 4.3**  
**DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE PORO**



Las porosidades para diversos contenidos de humedad como la papa y la manzana liofilizados procedieron de la Tabla N° 3.4B, mientras que para el calamar fue estimada con la relación (a) de la Tabla N°3.4A del Anexo N°3. Adicionalmente, se estableció un modelo para predecir la porosidad en función del contenido de humedad en base seca de los alimentos sin considerar usando los datos de la Tabla N° 3.4C del Anexo N°3 hasta el valor de  $0,10 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{sólido seco}}$ , considerando que en la

Tabla N° 4.9 la humedad máxima final considerada fue de 0,174 kg<sub>agua</sub> /

kg<sub>sólido seco</sub> ·

**TABLA N° 4.7**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE**  
**LIOFILIZACIÓN**

VARIABLE	MÉTODO	VARIABLE INICIAL
$x_0$	$x_0 = \frac{y_0}{1 - y_0}$ (89)	
	Humedad ( $y_0$ ) de las Tablas N°2.A1 a 2.11 del Anexo N°2.	
$P_h$	Ecuación 75	$T_h = T_{cgn}$ (Resultados del Objetivo N°1).
$\rho_c$	Valores directos:	Datos de las Tablas N° 3.7C, 3.7G, 3.7J del Anexo N°3.
	Ecuación 2 Correlación Tabla 3.7A	Temperatura de congelación promedio $T_h$
$k_s$	Valores directos	Tablas N°3.8B, 3.8C, 3.8F, 3.8G, 3.8H, 3.8I, 3.8J, 3.8K, 3.8L, del Anexo N° 3
	Ecuación 3, 4, 5, 6 y 9	Datos de humedad final $x_f$ de la Tabla N°4.9. Datos de la Tabla N° 3.8A (Anx.3) Datos de Porosidad Tablas N° 3.4A, 3.4B y 3.4C del Anexo N°3.
$K_{p1}$	Valores directos	Tablas 3.7A del Anexo 3.6 $K_{p2}$ (Tablas del Anexo 3.6B, 3.6C)
	Ecuaciones N°26 y 27	$K_{p2}$
	$M_a = 18,0153 \times 10^{-3}$	Unidades (kg.mol <sup>-1</sup> )
	$R=8,314; 461,89$	Unidades(J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ), (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )

**Nota:** Ecuaciones usadas: 67, 78 y 94;  $x_0$ : Contenido de humedad inicial (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>);  $P_h$ : Presión de vapor absoluta en la interfase (Pa);  $k_s$ : Conductividad térmica de la capa seca (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $\rho_c$ : Densidad del alimento congelado (kg.m<sup>-3</sup>);  $K_{p1}$ : Permeabilidad de la capa seca (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>);  $M_a$ : Peso molecular del agua; R: Constante ideal de los gases

El cálculo de la conductividad térmica de un alimento liofilizado está en función de la conductividad inicial del producto sin deshidratar, la humedad final considerada como la correspondiente de la monocapa, la porosidad y la temperatura; esta información brindada por diversas correlaciones resultaba bastante útil debido a la limitada cantidad de data encontrada de conductividades de alimentos secos.

- La conductividad térmica de la carne de res fue calculada en función del contenido de humedad a distintas temperaturas, usando la correlación (b) de la Tabla N° 3.8B (véase Anexo N° 3).
- La conductividad inicial de la manzana, papa y pulpo fue determinada con las ecuaciones N° 4, 6 y 9 que están en función de sus contenidos de humedad inicial (ver Tabla N° 2A del Anexo N°2), temperaturas de congelación, y la porosidad estimada. Asimismo, las conductividades por componente del alimento se dan en la Tabla N° 3.8A del Anexo N°3.
- La conductividad térmica del maíz, naranja, leche, tomate, pera, papa, manzana y carne de res, fue calculada utilizando la ecuación N° 10 para diversos contenidos de humedad, considerando valores de la monocapa.
- Se compararon los valores experimentales reportados para las conductividades de la papa (véase la Tabla N°3.8K del Anexo N°3), manzana (véase Tabla N° 3.8L del Anexo N° 3) y res (véase Tabla N° 3.8K y 3.8L del Anexo N° 3) con las de diversas ecuaciones antes de ser consideradas en el conjunto de datos usados.

Debido a la falta de datos de conductividad de alimentos con bajo contenido de humedad se determinó un porcentaje de disminución promedio con respecto a la conductividad del alimento en su contenido de humedad inicial para la manzana, papa, calamar, maíz, tomate, naranja, pera, carne de res, leche. Los datos utilizados como conductividad térmica para alimentos liofilizados por cada grupo, fueron elegidos a partir de los datos experimentales de alimentos reportados en el caso de los grupos 3, 4, 5 y 9; mientras que para el caso del grupo 1, 2, 7, y 8 que no cuentan información alguna fueron estimados con el porcentaje de disminución promedio de la conductividad térmica.

La permeabilidad fue calculada mediante las constantes para la carne de res reportadas por Sagara (2001:186) en la Tabla N° 3.6C del Anexo N° 3, utilizando las relaciones N° 16, 17, 28, 29, 30,31 y 32; y evaluadas a distintas temperaturas desde la de congelación hasta la de secado secundario, para establecer una relación entre los datos experimentales y los estimados según la teoría. Se estimó un factor de corrección para este caso específico de la carne de res dividiendo el promedio de los valores estimados y el valor brindado experimentalmente por el autor.

Debido a que el concepto de permeabilidad, requerida para los próximos cálculos es brindado de tres maneras distintas, se encontró una correlación previamente entre ellas, empezando el análisis desde la ecuación de transferencia de vapor de agua como densidad de flujo másico ( $\frac{1}{A} \frac{dm}{dt}$ ) expresado en  $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  durante el fenómeno de sublimación, para poder utilizar una mayor cantidad de datos brindados en el Anexo N°3.7. Utilizando las expresiones 28, 34 y 35 se tiene:

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = \frac{K_{p1}}{x} = \frac{K_{p2} M_w \Delta P}{RT x} = \left( \frac{K_{p3}}{\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial x} (C_{pw} + C_{pin}) \quad (90)$$

$$K_{p1} = K_{p2} \frac{M_w}{RT} \quad (91)$$

$$K_{p3} = K_{p1} \frac{\mu}{(C_{pw} + C_{pin})} \quad (92)$$

$$K_{p3} = K_{p2} \frac{M_w \mu}{RT(C_{pw} + C_{pin})} \quad (93)$$

Donde:

$\frac{dm}{dt}$  : Velocidad con que se transfiere el vapor ( $\text{kg.s}^{-1}$ )

A : Área normal de secado ( $\text{m}^2$ )

x : Espesor de la capa seca (m)

$\Delta P$  : Diferencia de presiones en el capa de hielo y la superficie del

condensador (Pa)

$M_w$  : Peso molecular del agua=18kg.kmol<sup>-1</sup>

$R$  : Constante de las gases ideales=8.314472 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$T$  : Temperatura (K)

$C_{pw}$  : Concentración del vapor de agua en la capa seca (kg.m<sup>-3</sup>)

$C_{pin}$  : Concentración del gas inerte (aire) (kg.m<sup>-3</sup>)

$\mu$  : Viscosidad del gas (Pa.s)

$K_{p1}$  : Permeabilidad de la capa seca (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>)

$K_{p2}$  : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$K_{p3}$  : Permeabilidad de la capa seca porosa (m<sup>2</sup>)

Se realizó la conversión de la permeabilidad  $K_{p2}$  en la  $K_{p1}$  mediante la ecuación 90 para el caso de la manzana y la res; se estimó un segundo factor de corrección dividiendo la permeabilidad  $K_{p1}$  experimental y la  $K_{p1}$  estimada, el cual fue considerado para los demás casos debido a que no se tienen muchos datos experimentales de permeabilidad.

Adicionalmente, se realizó la estimación de ésta mediante el método numérico de Mellor y Lovett (1964) citado por Sagara (2001: 184), y corregidos mediante los factores procedentes de la comparación con datos reales medidos, haciendo variar el radio de poro y la porosidad dependiendo del alimento liofilizado, y usando como constantes las brindadas en la Tabla N° 3.6C del Anexo N° 3.

## **b) Determinación del espesor del alimento en el plato del liofilizador en función del tiempo de liofilización**

Se analizó la transferencia de calor a través de la capa congelada y transferencia de masa a través de la capa seca por una sola cara, considerando despreciable la transferencia de calor por radiación del plato superior. Se utilizaron las relaciones N° 61, 67 y 78; dadas por Ozilgen

(1998:318), Ibarz (2005:616) y Orrego (2008:64), respectivamente. La integración de la primera expresión fue considerada la presión de hielo solo como una función de la temperatura de absoluta en la interfase de sublimación como se indica en la relación 85.

$$t = \frac{\rho_s(x_o - x_f)L^2}{2K_{p1}(P_h - P_s)} \quad (94)$$

Donde:

- t : Tiempo de liofilización (s)
- $\rho_s$  : Densidad del alimento seco ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
- $x_o$  : Contenido de humedad inicial ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ )
- $x_f$  : Contenido de humedad final ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ )
- $K_{p1}$  : Permeabilidad de la fracción seca del alimento ( $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )
- $P_h$  : Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)
- $P_s$  : Presión parcial del agua en la superficie (Pa)
- L : Espesor total de la capa del alimento (m)

Habiendo analizado la data de entrada, se determina las constantes de proporcionalidad entre el tiempo de liofilización por grupos de alimentos con respecto al espesor de la capa del alimento haciendo uso de las ecuaciones 64, 70 y 81.

**TABLA N° 4.8**  
**CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD ENTRE EL TIEMPO Y EL**  
**ESPESOR DEL ALIMENTO**

ECUACIONES DE PROCEDENCIA		ECUACIONES
(67)	$t_1 = A_1L^2$	$A_1 = \frac{\rho_c \Delta H_s (x_o - x_f)}{2(1 + x_o)k_s(T_s - T_h)}$ (95)
(78)	$t_2 = A_2L^2$	$A_2 = \frac{(\rho_c - \rho_s)}{2K_{p1}(P_h - P_s)}$ (96)
(94)	$t_3 = A_3L^2$	$A_3 = \frac{\rho_s(x_o - x_f)}{2K_{p1}(P_h - P_s)}$ (97)

**Nota:**  $x_o$ : Contenido de humedad inicial ( $\text{kg agua.kg alimento}^{-1}$ );  $x_f$ : Contenido de humedad final ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ );  $\rho_s$ : Densidad del alimento seco ( $\text{kg.m}^{-3}$ )



**TABLA N° 4.9**  
**VARIABLES FIJADAS PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO DE**  
**LIOFILIZACIÓN**

Grupo	RANGO	$y_0$ <sup>(a)</sup>	$T_h$ <sup>(b)</sup>	$P_s$ <sup>(c)</sup>	$T_s$ <sup>(d)</sup>
1: Cereales	Mínimo	0,07	-20,0	1,1	50
	Máximo	0,66	-20,0	1,1	40
	Promedio	0,14	-20,0	1,1	40
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,30	-46,0	1,1	40
	Máximo	0,96	-17,0	1,1	40
	Promedio	0,85	-31,5	1,1	40
3: Frutas	Mínimo	0,40	-51,0	1,1	40
	Máximo	0,96	-17,0	1,1	40
	Promedio	0,79	-34,0	1,1	40
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,70	-45,0	1,1	50
	Máximo	0,92	-11,3	1,1	50
	Promedio	0,78	-28,2	1,1	50
5: Carnes	Mínimo	0,54	-45,0	1,1	50
	Máximo	0,87	-10,0	1,1	50
	Promedio	0,75	-27,5	1,1	50
6: Leches y derivados	Mínimo	0,45	-32,0	1,1	50
	Máximo	0,93	-29,0	1,1	50
	Promedio	0,80	-30,5	1,1	50
7: Productos azucarados	Mínimo	0,14	-45,8	1,1	50
	Máximo	0,26	-36,7	1,1	50
	Promedio	0,19	-41,3	1,1	50
8: Leguminosas	Mínimo	0,10	-30,0	1,1	50
	Máximo	0,84	-30,0	1,1	50
	Promedio	0,27	-30,0	1,1	50
9: Tubérculos	Mínimo	0,55	-17,0	1,1	50
	Máximo	0,96	-17,0	1,1	50
	Promedio	0,72	-17,0	1,1	50

**Nota:**(a) $y_0$  Humedad inicial (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>) (véase Anexo N°2),  
(b)  $T_h$ : Temperatura del frente de hielo o sublimación (K) basado en los resultados obtenidos del objetivo 1(c)  $P_s$ : Presión parcial de agua en la superficie (Pa) según lo comentado en el apartado 5.1.3; (d) Temperatura en la superficie de la lámina (°C), se considera la máxima temperatura que puede calentarse el alimento correspondiente a la temperatura de desorción las cuales se encuentran en el rango mencionado por Sagara (2001:187) entre 0 a 70°C y para temperatura de congelación entre -20 °C y -10°C de la manzana, res y soluciones de café.

**TABLA N° 4.10**  
**DATOS USADOS DIRECTAMENTE PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO**  
**DE LIOFILIZACIÓN**

Grupo	RANGO	$x_f^{(a)}$	$\rho_s^{(b)}$
1: Cereales	Mínimo	0,060	449,00
	Máximo	0,094	785,00
	Promedio	0,073	557,40
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,032	224,00 (**)
	Máximo	0,094	975,50 (**)
	Promedio	0,058	653,67 (**)
3: Frutas	Mínimo	0,018	755,50 (**)
	Máximo	0,174	1057,00 (**)
	Promedio	0,068	856,00 (**)
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,035	212,49
	Máximo	0,122	751,10
	Promedio	0,073	481,80
5: Carnes	Mínimo	0,030	640,00 (**)
	Máximo	0,092	1080,00 (**)
	Promedio	0,058	860,00 (**)
6: Leches y derivados	Mínimo	0,021	563,00
	Máximo	0,076	610,00
	Promedio	0,042	586,50
7: Productos azucarados	Mínimo	0,042 (*)	628,32 (***)
	Máximo	0,042 (*)	628,32 (***)
	Promedio	0,042 (*)	628,32 (***)
8: Leguminosas	Mínimo	0,055	628,32 (***)
	Máximo	0,060	628,32 (***)
	Promedio	0,058	628,32 (***)
9: Tubérculos	Mínimo	0,021	93,00 (**)
	Máximo	0,130	660,00 (**)
	Promedio	0,067	344,00 (**)

**Nota:** (a)  $x_f$ : Contenido de humedad final ( $\text{kg agua.kg sólido seco}^{-1}$ ) de los datos de humedad en la monocapa  $X_m$  del Anexo 3.3A; (b)  $\rho_s$ : Densidad del alimento seco ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) (véase Tabla N° 3.5I, 3.8E, 3.8I del Anexo N°3);  $K_{p1}$ : Permeabilidad de la capa seca ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ); (\*) Por falta de data se considera  $y_f=0,04 \text{ kg agua.kg alimento}^{-1}$  de acuerdo a Ficha técnica Omniagro para alimentos liofilizados; (\*\*) Se considera para los Grupos 2, 3, 5 y 9 los valores promedio de la Tabla N°3.7I por no contarse con data, (\*\*\*) Se considera promedio de los demás valores por no contar con data.;  $\rho_c$ : Densidad del alimento congelado ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $P_h$ : Presión de vapor absoluta en la interfase (Pa);  $k_s$ : Conductividad

térmica de la capa seca ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ );  $K_{p1}$ : Permeabilidad de la capa seca ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ );  $T_h$ : Temperatura del frente de hielo o sublimación;  $P_s$ : Presión parcial de agua en la superficie (Pa); (d)  $T_s$ : Temperatura en la superficie (K).

Realizado el cálculo del tiempo de liofilización para diversos espesores, se determinó gráficamente el espesor máximo, en el cual empieza la subida acelerada del tiempo. El espesor más adecuado se dedujo de todos los cálculos realizados para cada grupo de alimentos, obteniéndose el intersección de la recta que pasa por los tres primeros puntos de la curva del tiempo de liofilización vs espesor del alimento y una segunda que pasa por sus tres últimos, evaluando el espesor desde 0,002 m hasta 0,02m cada 0,002m.

### c) Determinación del diámetro óptimo del plato de liofilización

El diámetro del plato se relacionó con el espesor de la muestra en el plato, su densidad y la carga por plato ( $20/4 = 5kg$ ) para cada grupo de alimentos, según la siguiente relación:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot W_p}{\rho_c \cdot \pi \cdot L}} \quad (98)$$

Donde:

$D_p$  : Diámetro del plato de liofilización (m)

$W_p$  : Peso de alimento por plato= 5 kg.

$\rho_c$  : Densidad del alimento congelado ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\pi$  : 3.1416

$L$  : Espesor del alimento (m)

El diámetro óptimo para cada alimento, fue considerado como el promedio de todos los valores encontrados, debido a que la data usada está dada por rangos.

#### d) Determinación de la altura de plato de liofilización

Se eligió el máximo espesor calculado considerando una altura real de plato real como 50% adicional, es decir, multiplicando el espesor máximo por el factor de 1,5.

#### 4.8.2. Determinación de las dimensiones de la cámara de secado

El diámetro total del plato de liofilización es 14 veces el diámetro de las tuberías del refrigerante según los esquemas presentados a continuación, estimados con ayuda de la Tabla N° 7.1A.

$$D_p = 14 \cdot d_T \quad (99)$$

$$d_t < d_T \quad (100)$$

Donde:

$D_p$  : Diámetro del plato de liofilización (m)

$d_T$  : Diámetro de la tubería del refrigerante (m)

$d_t$  : Diámetro del pin de calentamiento (m)

A partir de los esquemas mostrados a continuación en esta sección, se deducen las siguientes relaciones para el dimensionamiento:

$$sp2 = e1 + L_{pines} + e2 \quad (101)$$

$$L_{pines} \geq d_T \quad (102)$$

Donde:

$sp2$  : Espaciamiento total entre la base del plato conductor y de calentamiento (m)

$e1$  : Espesor de la placa de calentamiento superior (m)

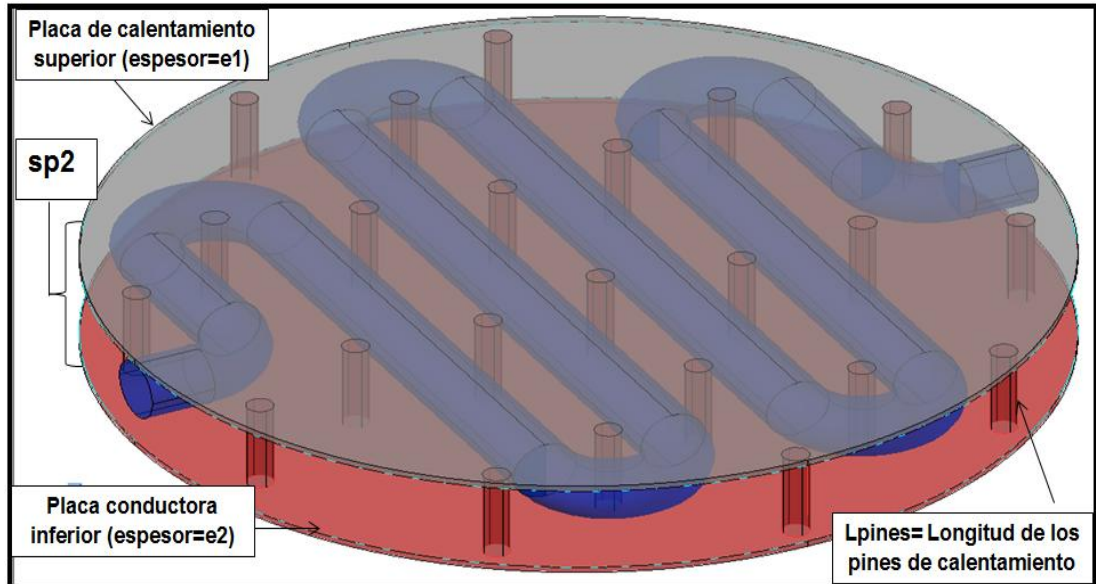
$L_{pines}$  : Longitud de los pines (m)

$e2$  : Espesor de la placa conductora inferior (m)

$d_T$  : Diámetro de la tubería de refrigerante (m)

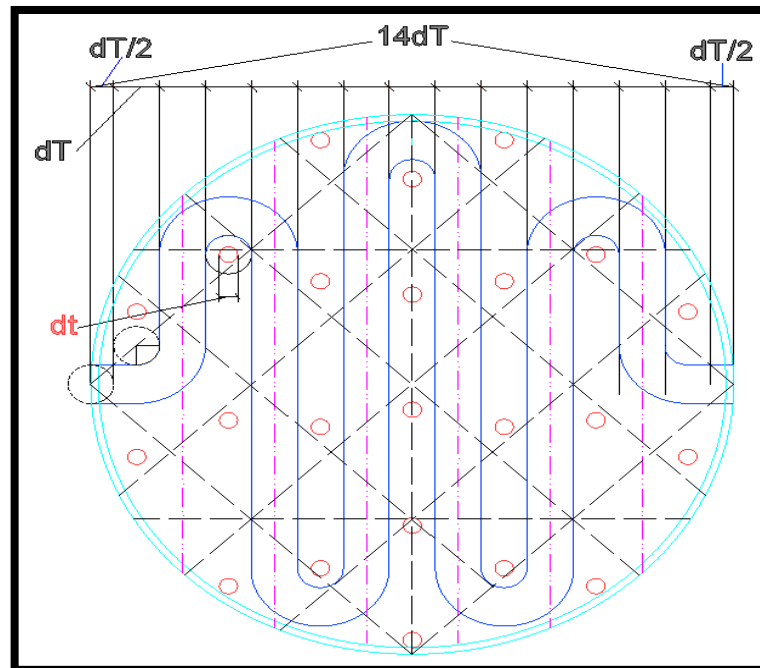
La distancia entre la base de la placa de calentamiento inferior y el borde superior del plato de liofilización ( $sp1$ ) es considerada como la necesaria para introducir la mano del operador junto con el plato (10 cm.).

**FIGURA N° 4.4**  
**SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO**



**Nota:** La tubería continua de forma curvilínea representa el conducto por donde circula el refrigerante; mientras que las extensiones cilíndricas unidas por una base circular en común, representan los conductores eléctricos y la resistencia generadora de calor respectivamente; sp2: es la separación entre las placas conductoras inferior y superior.

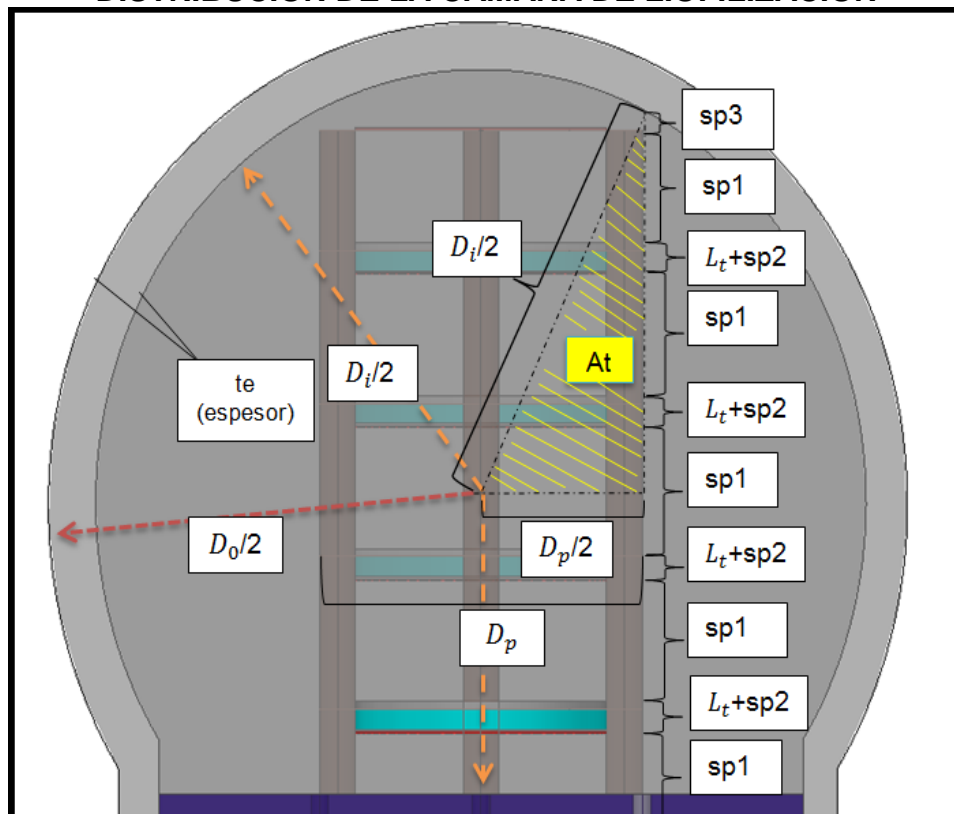
**FIGURA N° 4.5**  
**DISTRIBUCIÓN DE TUBERÍA Y PINES DE CALENTAMINETO**



**Nota:**  $d_T$ : Diámetro de tubería del refrigerante,  $d_t$ : Diámetro de los pines de calentamiento.

Se considera una distancia de seguridad entre el borde interno del equipo y el plato de calentamiento superior (sp3) igual a sp1, es decir, 10 cm. La relación entre las diversas longitudes utilizando el teorema de Pitágoras en el área At resaltada en la Figura anterior, permitió determinar el diámetro interno de la cámara cilíndrica necesaria del liofilizador.

**FIGURA N° 4.6**  
**DISTRIBUCIÓN DE LA CAMARA DE LIOFILIZACIÓN**



**Nota:**  $D_i$ : Diámetro interno de la cámara de liofilización;  $D_0$ : Diámetro externo del equipo de liofilización;  $D_p$ : Diámetro del plato de liofilización;  $te$ =espesor de la cámara de liofilización;  $L_t$ : es el espesor del plato de liofilización;  $sp1$ : Separación entre el borde superior del plato de liofilización y la placa conductora superior;  $sp2$ : Separación entre el borde superior del plato conductor superior ubicado en la base del plato de liofilización y el borde inferior del plato conductor inferior;  $sp3$ : espacio entre borde superior del plato calefactor superior y la pared interna del equipo;  $At$ : Área del triángulo formado por las diversas divisiones dentro del equipo.

$$\frac{D_i}{2} = \sqrt{\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 + \left(sp3 + sp1 + (L_t + sp2) + sp1 + (L_t + sp2) + \frac{sp1}{2}\right)^2} \quad (103)$$

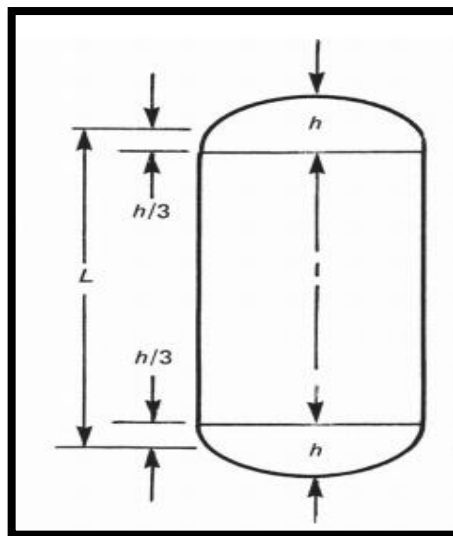
$$D_i = 2 \sqrt{\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 + (sp3 + 2,5 \cdot sp1 + 2 \cdot sp2 + 2 \cdot L_t)^2} \quad (104)$$

Donde:

- $D_i$  : Diámetro interno de la cámara de liofilización (m)
- $D_p$  : Diámetro del plato de liofilización (m)
- $sp1$  : Separación entre el borde superior del plato de liofilización y la placa conductora superior (m)
- $sp2$  : Separación entre el borde superior del plato conductor superior ubicado en la base del plato de liofilización y el borde inferior del plato conductor inferior (m)
- $sp3$  : Espacio entre borde superior del placa calefactora superior y la pared interna del equipo (m)
- $L_t$  : Altura del plato de liofilización (m)

La determinación del espesor de la pared del equipo, se estimó con ASME (2010:21) de la parte (a) UG-28, brinda el procedimiento para el diseño de cabinas sometidas a una presión externa dada para tres tipos distintos de conformaciones, de las cuales la mostrada en la siguiente figura es la considerada para este trabajo.

**FIGURA N° 4.7**  
**REPRESENTACIÓN DIAGRAMÁTICA DE LAS LÍNEAS DE SOPORTE**



**Fuente:** (ASME: Sección VIII-División 1: 22)

ASME (2010:21) cita que con respecto a la cabina cilíndrica, la determinación del espesor mínimo requerido debe ser realizada por el siguiente procedimiento. Previamente, se definen las siguientes variables en la siguiente Tabla mostrada.

**TABLA N° 4.11  
VARIABLES SEGÚN METODOLOGÍA ASME PARA DISEÑO**

VARIABLE	DESCRIPCION
A	: Factor determinado de Gráfico 7,2A del Anexo N°7 y usado para entrar en el Gráfico de material aplicable en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D. Para el caso de cilindros que tenga una relación de valores de $D_0/t$ menos que 10, observar la sección el Caso 2 posteriormente explicado.
B	: Factor determinado de la Carta de material aplicable en la Tabla de Subparte 3 de la Sección II, Parte D de ASME (ver Gráfico N° 7.3A del Anexo N°7 para Acero Tipo 316 considerado) para una temperatura máxima de metal de diseño. Las temperaturas de diseño para recipiente no deben exceder la máxima temperatura en los Gráficos de presión externa.
$D_0$	: Diámetro exterior de la cubierta cilíndrica.
E	: Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño. Para el diseño de la presión externa de acuerdo con esta Sección, el módulo de elasticidad a usarse debe ser tomado a partir del Gráfico de materiales aplicables en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D del ASME (ver Gráfico N° 7.3A del Anexo N°7 para Acero Tipo 316 considerado). La interpolación puede ser realizada entre las línea para temperaturas intermedias.
L	: Longitud total de diseño in. (mm) de una sección del recipiente entre las líneas de soporte
P	: Presión de diseño externa. Es recomendado que el margen adecuado es brindado cuando se establece el presión externa de trabajo máxima permitida para permitir variaciones de presión durante el servicio (ASME Nota in UG-28(f) 2010: 24)
$P_a$	: Valor calculado de máxima presión de trabajo externa aplicable para asumir el valor de t.
$R_0$	: Radio externo de la carcasa esférica.
t	: Espesor mínimo requerido de la cabina cilíndrica, pulgadas (mm)
$t_s$	: Espesor nominal de carcasa cilíndrica, pulgadas (mm).

**Fuente:** ASME Sección VIII- División 1-UG-28 (2010:21)

*Para el caso de cilindros con valores de  $D_0/t \geq 10$ :*



- **Paso 1.** Se asumió un valor para  $t$  y se determinó las razones de  $L/D_0$  y  $D_0/t$ .
- **Paso 2.** Ingresar en el Gráfico N° 7.2A en el valor de  $L/D_0$  determinado en el paso 1. Para valores  $L/D_0$  mayores que 50, se ingresó en el gráfico en un valor de  $L/D_0 = 50$ . Para valores de  $L/D_0$  menores que 0,05 se ingresó en el gráfico en un valor de  $L/D_0 = 0,05$ .
- **Paso 3.** Se movió horizontalmente a la línea para el valor de  $D_0/t$  determinado en Paso 1. La interpolación puede ser realizada para valores intermedios de  $D_0/t$ ; la extrapolación no está permitida. Desde este punto de intersección mover verticalmente hacia abajo para determinar el valor del factor A.
- **Paso 4.** Se usó el valor de "A" calculado en el Paso 3, se ingresó al Gráfico N° 7.3A. Se movió verticalmente a una intersección hasta una intersección la línea de material/temperatura para la temperatura de diseño. La interpolación puede ser usada entre las líneas para temperaturas intermedias. Si los valores tabulados en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D son usados, la interpolación lineal o algún otro método de interpolación puede ser usado para determinar el valor de B que se ubica encuentra entre dos valores tabulares adyacentes para una temperatura específica. Como la interpolación puede ser usada para determinar el valor de B a una temperatura intermedia que se ubica entre dos conjuntos de valores tabulares, después de la primera estimación de los valores de B para cada conjunto de valores tabulados. En los casos donde los valores de A caen en la derecha del final de la línea de material/temperatura. , se asumió una intersección con la proyección horizontal del final más superior de la línea de material/temperatura. Si los valores tabulados son usados, el último (máximo) valor tabulado es usado. Para valores de A que can a la izquierda de la línea de material/temperatura ver el Paso 7.
- **Paso 5.** Desde la intersección obtenida en el Paso 4, mover horizontalmente a la derecha y leer el valor del factor B.

- **Paso 6.** Usando este valor de B, calcular los valores de presión de trabajo máxima permisible  $P_a$  usando la siguiente fórmula:

$$P_a = \frac{4B}{3(D_0/t)} \quad (105)$$

- **Paso 7.** Para valores de A cayendo a la izquierda de la línea material/temperatura aplicable, el valor de  $P_a$  puede ser calculada usando la siguiente fórmula:

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_0/t)} \quad (106)$$

- **Paso 8.** Se comparó el valor calculado de  $P_a$  obtenido en los Pasos 6 o 7 con P. Si  $P_a$  es más pequeño que P, se seleccionó un valor más grande para t y se repitió el procedimiento de diseño hasta un valor de  $P_a$  que sea obtenido sea igual o más grande que P (se vio la Tabla N° 7.9A del Anexo N° 7 para una aplicación del procedimiento indicado previamente).

ASME Sección VIII, División 1 indica en el apartado UG-23 (2010: 17) que el valor máximo del esfuerzo permitido en un material determinado es brindado en la Subparte 1 de la Sección II, Parte D del ASME. Asimismo, se consideró una forja de hierro 316 L, para los casos de espesor mayor y menor a 5 pulgadas (ver filas N° 19 al 24 de la Tabla N° 7.10A del Anexo N° 7).

ASME Sección VIII, División 1 indica en el apartado UHT-23 (2010: 235) indica que la Tabla 1A de la Sección II, Parte D brinda los valores de máximo esfuerzo permitido a una temperatura determinada. Los valores pueden ser interpolados a partir de temperaturas intermedias. Para recipientes diseños para operar a una temperatura menor a los -29°C, los valores de esfuerzo permitidos a usar en el diseño no deben exceder el rango de temperatura entre -29°C y 38°C.

### 4.8.3. Diseño del condensador de agua sublimada

Previamente se tuvo en cuenta los siguientes puntos:

- Se evaluó el requerimiento de agua que debe ser capaz de condensar en forma de escarcha de hielo.
- La velocidad de sublimación de agua del alimento fue calculada considerando las relaciones de liofilización en estado estacionario. El diseño del equipo se realizó con las condiciones de operación encontradas en el objetivo número uno, siendo crucial determinar el área de transferencia necesaria para este dispositivo, la cual debe ser distribuida uniformemente considerando una base lo suficientemente amplia para soportar a los platos
- La separación del condensador con la cámara de secado debe poseer un material aislante térmico para evitar efectos de distribución de temperatura desigual en cada uno de los platos de muestra. Para la evacuación del agua sublimada, se consideró tuberías en forma de ramales para procurar un contacto uniforme en toda la superficie.
- Powell, 1976 citado Heldman (2007:685) por expresa que el condensador de vapor es usualmente igual al área de los estantes.

#### a) Determinación de la cantidad de agua a sublimar por alimento

Se utilizó los datos humedad inicial mostrados en la Tabla N° 4.9 considerando la cantidad máxima de 20 kg de alimento inicial.

$$y_f = \frac{x_f}{1 + x_f} \quad (107)$$

$$m_{\text{sólido seco}} = m_0(1 - y_0) \quad (108)$$

$$m_{\text{agua } 0} = m_0 \cdot y_0 \quad (109)$$

$$m_{\text{agua } f} = \frac{y_f \cdot m_{\text{sólido seco}}}{1 - y_f} \quad (110)$$

$$m_{\text{agua } s} = m_{\text{agua } 0} - m_{\text{agua } f} \quad (111)$$

Donde:

- $x_f$  : Humedad final del alimento (kg agua.kg de sólido seco<sup>-1</sup>)  
 $y_0$  : Humedad en base húmeda (kg agua.kg de muestra<sup>-1</sup>)

- $y_f$  : Humedad en base húmeda (kg agua.kg de muestra<sup>-1</sup>)  
 $m_0$  : Masa inicial de la muestra (kg)= 20 kg.  
 $m_{\text{sólido seco}}$  : Masa del sólido seco presente en el alimento a liofilizar (kg)  
 $m_{\text{agua } 0}$  : Masa de agua contenida inicialmente en la muestra (kg)  
 $m_{\text{agua } f}$  : Masa de agua final contenida en la muestra liofilizada (kg)  
 $m_{\text{agua } s}$  : Masa de agua sublimada durante la liofilización (kg)

### b) Determinación del tiempo de Liofilización de alimentos

En este análisis no se consideró la etapa de secado secundario del alimento, utilizando las ecuaciones 95, 96 y 97; con las constantes de proporcionalidad calculadas para distintos casos. Adicionalmente, se evaluó la ecuación N° 75 independiente del espesor del alimento. Asimismo, se calculó el volumen y el espesor del alimento en el plato.

$$V = \frac{m_{\text{agua}}}{\rho_c} \quad (112)$$

$$L = \frac{V}{\pi D^2 / 4} = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (113)$$

Donde:

- $V$  : Volumen de la muestra en el plato de liofilización (m<sup>3</sup>)  
 $m_{\text{agua}}$  : Peso del agua a liofilizar (kg)  
 $\rho_c$  : Densidad del alimento congelado (kg.m<sup>-3</sup>)  
 $L$  : Espesor de alimento en el plato de liofilización (m)  
 $D$  : Diámetro del plato de liofilización (m)  
 $\pi$  : 3,1416

Mediante el espesor calculado se determinó el tiempo de liofilización con cada una de las expresiones citadas.

### c) Determinación de la velocidad de liofilización del alimento

Se efectuó el análisis previo de la Difusividad Efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) en un alimento seco y el uso de las ecuaciones brindadas en el marco teórico, relacionando la densidad de flujo molar y masa de aire.

$$N_A = \frac{1}{AM_a} \frac{dm}{dt} \quad (114)$$

Donde:

$N_A$  :Densidad molar de flujo de vapor de agua ( $\text{kmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$A$  :Área transversal del alimento ( $\text{m}^2$ )

$M_a$  : Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )

$\frac{dm}{dt}$  :Velocidad con que se transfiere el vapor ( $\text{kg.s}^{-1}$ )

Igualando la expresión N° 114y la expresión (64) y despejando las relaciones N° 70 y 71, se obtiene:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{D_{\text{eff}} AM_a (P_h - P_s)}{RT_m z} \quad (115)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\varepsilon D_k AM_a (P_h - P_s)}{RT_m z} \quad (116)$$

$$\frac{dm}{dt} = \varepsilon \rho_h A \frac{dz}{dt} \quad (117)$$

Donde:

$\frac{dm}{dt}$  :Velocidad con que se transfiere el vapor ( $\text{kg.s}^{-1}$ )

$D_{\text{eff}}$  :Difusividad interna del vapor de agua= Difusividad efectiva media del vapor de agua en la capa seca ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

$A$  :Área transversal del alimento ( $\text{m}^2$ )

$M_a$  : Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )

$P_h$  :Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)

$P_s$  :Presión parcial del agua en la superficie (Pa)

$R$  :Constante universal de los gases ideal ( $\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

$T_m$  :Temperatura media en la capa seca (K)

$M_a$  : Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )

$z$  :Desplazamiento en el eje de secado (m)

$\varepsilon$  :Fracción volumétrica del hielo

$D_k$  :Coeficiente de difusión de Knudsen del vapor de agua ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

$\rho_h$  : Densidad del hielo

$\frac{dz}{dt}$  : Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca ( $\text{m.s}^{-1}$ )

Se igualaron las similares en forma, deduciendo las constantes de proporcionalidad  $B_1$ ,  $B_2$  y  $B_3$  como  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ .

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Ak_s(T_s - T_h)}{\Delta H_s} \left(\frac{1}{z}\right) = \frac{D_{\text{eff}} AM_a (P_h - P_s)}{RT_m} \left(\frac{1}{z}\right) = \frac{\varepsilon D_k AM_a (P_h - P_s)}{RT_m} \left(\frac{1}{z}\right) \quad (118)$$

$$B_1 = \frac{Ak_s(T_s - T_h)}{\Delta H_s} \quad (119)$$

$$B_2 = \frac{D_{eff}AM_a(P_h - P_s)}{RT_m} \quad (120)$$

$$B_3 = \frac{\varepsilon D_k AM_a(P_h - P_s)}{RT_m} \quad (121)$$

$$\frac{dm}{dt} = A\rho_c \left( \frac{x_0 - x_t}{1 + x_0} \right) \left( \frac{dz}{dt} \right) = A(\rho_c - \rho_s) \left( \frac{dz}{dt} \right) = \varepsilon\rho_h A \left( \frac{dz}{dt} \right) \quad (122)$$

$$C_1 = A\rho_c \left( \frac{x_0 - x_t}{1 + x_0} \right) \quad (123)$$

$$C_2 = A(\rho_c - \rho_s) \quad (124)$$

$$C_3 = \varepsilon\rho_h A \quad (125)$$

Donde:

- $\frac{dm}{dt}$  :Velocidad con que se transfiere el vapor (kg.s<sup>-1</sup>)
- $D_{eff}$  :Difusividad interna del vapor de agua= Difusividad efectiva media del vapor de agua en la capa seca (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $A$  :Área transversal del alimento (m<sup>2</sup>)
- $M_a$  : Peso molecular del agua (kg.kmol<sup>-1</sup>)
- $P_h$  :Presión parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)
- $P_s$  :Presión parcial del agua en la superficie (Pa)
- $R$  :Constante universal de los gases ideal (J.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)
- $T_m$  :Temperatura media en la capa seca (K)
- $M_a$  : Peso molecular del agua (kg.kmol<sup>-1</sup>)
- $z$  :Desplazamiento en el eje de secado (m)
- $\varepsilon$  :Fracción volumétrica del hielo
- $D_k$  :Coeficiente de difusión de Knudsen del vapor de agua (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $\rho_h$  : Densidad del hielo
- $\frac{dz}{dt}$  : Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca (m.s<sup>-1</sup>)
- $\rho_c$  :Densidad del alimento congelado (kg.m<sup>-3</sup>)
- $\rho_s$  :Densidad del alimento seco (kg.m<sup>-3</sup>)
- $x_0$  :Contenido de humedad inicial (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>)
- $x_t$  :Contenido de humedad en el tiempo t (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>)
- $z$  :Desplazamiento en el eje de secado (m)
- $\varepsilon$  :Fracción volumétrica del hielo
- $\rho_h$  : Densidad del hielo
- $\frac{dz}{dt}$  : Desplazamiento de la interfase con respecto al tiempo=velocidad de cambio de espesor de la capa seca (m.s<sup>-1</sup>)
- $B_i$  : Constante de Proporcionalidad, para i: 1,2,3 (m.kg.s<sup>-1</sup>)
- $C_i$  : Constante de Proporcionalidad, para i: 1,2,3 (kg.m<sup>-1</sup>)

Se obtuvo la Difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) de las Tablas N° 3.10C y 3.10F del Anexo N°3, a excepción de los datos correspondientes para la cebolla, pera, pez espada y papa, puesto que sus respectivas humedades se encontraban muy por encima del rango para considerarse como alimentos deshidratados. Los valores de Difusividad fueron corregidos tomando en cuenta su comportamiento frente a la humedad, según los comportamientos deducidos de la ecuación N° 15 y los datos de la Tabla N° 3.10A, 3.10D y 3.10E; encontrando el porcentaje de cambio de la Difusividad Efectiva para cada porcentaje de cambio de la humedad.

Debido a que se tiene la temperatura del frente de hielo y la superficie, se consideró un promedio para el cálculo de la temperatura media ( $T_m$ ) del alimento.

El cálculo de la cinética de secado de la liofilización, se realizó tomando como puntos de partida los valores de los tiempos de liofilizaciones promedio estimadas en el apartado 5.2.3.C; las cantidades de agua sublimada, los espesores totales de los alimentos y las demás variables establecidas previamente.

El espesor del alimento en el plato de liofilización se dividió en 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100% del recorrido total; para cada posición de  $z$  se calculó la velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada  $\frac{dm}{dt}$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) para cada intervalo, considerándola

como un cociente de cambios  $\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}$  y utilizando las constantes  $B_1$ ,  $B_2$  y  $B_3$ .

Tomando como referencia la relación entre el tiempo de liofilización y el espesor del alimento deshidratado, se calculó nuevamente la constante de proporcionalidad:

$$A_N = \frac{t}{z^2} \quad (126)$$

Donde:

- $A_N$  : Constante de proporcionalidad entre tiempo y espesor deshidratado ( $s.m^{-2}$ )
- $t$  : Tiempo total de liofilización (s)
- $z$  : Espesor total del alimento liofilizado (m)

Para cada desplazamiento de  $z$  como espesor deshidratado establecido, se calculó el tiempo de liofilización para llegar a dicho estado utilizando la constante  $A_n$  en cada caso.

$$t_i = A_n z_i^2 \quad (127)$$

Donde:

- $A_n$  : Constante de proporcionalidad entre tiempo y espesor deshidratado ( $s.m^{-2}$ )
- $t_i$  : Tiempo de liofilización para cada desplazamiento (s)
- $z_i$  : Desplazamiento del frente de hielo cada cierto tiempo (m)

Los tiempos parciales previamente calculados, fueron utilizados para establecer los intervalos de evaluación de la cinética de liofilización

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (128)$$

Donde:

- $\Delta t_i$  : Intervalos de tiempo de liofilización
- $t_i$  : Tiempo de liofilización para cada desplazamiento (s)
- $t_{i-1}$  : Tiempo de liofilización para cada desplazamiento previo (s)



Se estimó la cantidad de agua sublimada para cada intervalo de tiempo, multiplicando los intervalos de tiempo estimados ( $\Delta t_i$ ) y la velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada ( $\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}$ ), debiendo ser la suma para todos los intervalos de tiempo igual a la cantidad de agua sublimada por plato.

$$\Delta m_{ie} = \Delta t_i \left( \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \right) \quad (129)$$

Donde:

- $\Delta m_{ie}$  : Cantidad de agua sublimada estimada para cada intervalo de tiempo (kg)
- $\Delta t_i$  : Intervalo de tiempo evaluado (s)
- $\left( \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \right)$  : Velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Se procedió a normalizar las masas de agua sublimada para cada intervalo, mediante el siguiente factor de corrección:

$$f_c = \frac{m_{at}}{m_{ae}} \quad (130)$$

$$\Delta m_{ic} = \Delta m_{ie} \times f_c \quad (131)$$

Donde:

- $f_c$  : Factor de corrección de la cantidad de agua sublimada
- $m_{at}$  : Masa de agua sublimada total por plato (kg)
- $m_{ae}$  : Masa de agua sublimada total estimada por plato (kg)
- $\Delta m_{ic}$  : Cantidad de agua sublimada por intervalo de tiempo corregida (kg)
- $\Delta m_{ie}$  : Cantidad de agua sublimada por intervalo de tiempo estimada (kg)

La velocidad de transferencia de masa fue calculada nuevamente con lo datos corregidos.

$$\left( \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \right)_c = \frac{\Delta m_{ic}}{\Delta t_i} \quad (132)$$

Donde:

- $\left(\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}\right)_c$  : Velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada corregida ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $\Delta m_{ic}$  : Cantidad de agua sublimada por intervalo de tiempo corregida (kg)  
 $\Delta t_i$  : Intervalo de tiempo evaluado (s)

La velocidad de desplazamiento del frente de hielo para cada intervalo de tiempo fue calculada.

$$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (133)$$

Donde:

- $\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$  : Velocidad de desplazamiento del frente de hielo para cada intervalo de tiempo  
 $z_i$  : Ubicación de la interfase del frente de hielo (m)  
 $z_{i-1}$  : Ubicación previa de la interfase del frente de hielo (m)  
 $t_i$  : Tiempo de liofilización (s)  
 $t_{i-1}$  : Tiempo previo de liofilización (s)

Se determinó el cociente de proporcionalidad usando velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada corregida  $\left(\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}\right)_c$  y la velocidad de desplazamiento del frente de hielo para cada intervalo de tiempo  $\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$ .

$$C_N = \frac{\left(\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}\right)_c}{\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i} \quad (134)$$

Donde:

- $C_N$  : Constante de proporcionalidad de las velocidad de transferencia de masa y de desplazamiento del frente de hielo  
 $\left(\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i}\right)_c$  : Velocidad de transferencia de vapor de agua sublimada corregida ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$  : Velocidad de desplazamiento del frente de hielo para cada intervalo de tiempo

**TABLA N° 4.12**  
**ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE LA LIOFILIZACIÓN**

$t_i$	$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$	$\bar{t}_i = \frac{(t_i + t_{i-1})}{2}$	$z_i$	$\Delta z_i$	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_i$	$\Delta m_i$	$m_i$	$x_i$	$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$	$R_{v_i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}$
$t_0$			$z_0 = 0$					$m_0$	$x_0$		
	$\Delta t_1$	$\bar{t}_1$		$\Delta z_1$	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_1$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_1$	$\Delta m_1$			$\Delta x_1$	$R_{v_1}$
$t_1$			$z_1 = 5\% \cdot z_T$					$m_1$	$x_1$		
	$\Delta t_2$	$\bar{t}_2$		$\Delta z_2$	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_2$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_2$	$\Delta m_2$			$\Delta x_2$	$R_{v_2}$
$t_2$			$z_2 = 10\% \cdot z_T$					$m_2$	$x_2$		
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$t_9$			$z_9 = 80\% \cdot z_T$					$m_9$	$x_9$		
	$\Delta t_{10}$	$\bar{t}_{10}$		$\Delta z_{10}$	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_{10}$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_{10}$	$\Delta m_{10}$			$\Delta x_{10}$	$R_{v_{10}}$
$t_{10}$			$z_{10} = 90\% \cdot z_T$					$m_{10}$	$x_{10}$		
	$\Delta t_{11}$	$\bar{t}_{11}$		$\Delta z_{11}$	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_{11}$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_{11}$	$\Delta m_{11}$			$\Delta x_{11}$	$R_{v_{11}}$
$t_{11}$			$z_{11} = 100\% \cdot z_T$					$m_{11}$	$x_{11}$		

**Donde:**  $t_i$ : Tiempo de liofilización (segundos u horas),  $\Delta t_i$ : Variación del tiempo de liofilización (segundos u horas);  $\bar{t}_i$ : Tiempo promedio por intervalos (segundos u horas);  $z_i$ : Desplazamiento de interfase de secado (m);  $\Delta z_i$ : Intervalos de desplazamiento de la interfase (m);  $\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$ : Velocidad de desplazamiento de la interfase ( $m \cdot s^{-1}$ );  $\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_i$ : Velocidad de sublimación de agua ( $kg \cdot s^{-1}$ );  $m_i$ : masa de agua sublimada (kg);  $x_i$ : Humedad del alimento ( $kg_{\text{agua}} \cdot kg_{\text{sólido seco}}^{-1}$ );  $\Delta x_i$ : Cambio de humedad en el alimento ( $kg_{\text{agua}} \cdot kg_{\text{sólido seco}}^{-1}$ );  $R_{v_i}$ : Velocidad de secado por liofilización ( $kg \text{ agua} \cdot kg \text{ sólido}^{-1} \cdot \text{minutos}^{-1}$ ); i: Valores que van desde 0 ó 1 hasta 11.

La constante de proporcionalidad ( $C_N$ ) obtenida fue comparada con las calculados con las ecuaciones N° 123, 124 y 125; y habiendo establecido todas las variables cinéticas, se calculó la velocidad de secado global.

$$R_{v_i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} \quad (135)$$

Donde:

- $R_{v_i}$  : Velocidad de secado (kg agua.kg sólido<sup>-1</sup>.minutos<sup>-1</sup>)
- $\Delta x_i$  : Variación de la humedad (kg agua.kg sólido seco<sup>-1</sup>)
- $\Delta t_i$  : Variación del tiempo durante la liofilización (s)

#### d) Determinación de las dimensiones del condensador

El cálculo de las dimensiones del condensador estuvo en función del área requerida, el cual es calculado a partir de: espesor adecuado de la escarcha de hielo que se formará, cantidad de agua sublimada, densidad de la escarcha de hielo formada; mediante las siguientes relaciones, considerando formación de hielo uniformemente

$$V_h = \frac{m_h}{\rho_h} \quad (136)$$

$$A_h = \frac{V_h}{e_h} = \frac{m_h}{\rho_h \times e_h} \quad (137)$$

Donde:

- $V_h$  : Volumen de escarcha de hielo (m<sup>3</sup>)
- $m_h$  : Masa de escarcha de hielo = masa de agua sublimada (kg)
- $\rho_h$  : Densidad de la escarcha de hielo (kg/m<sup>3</sup>)
- $A_h$  : Área de escarcha de hielo (m<sup>2</sup>)
- $e_h$  : Espesor de la escarcha de hielo producida (m)

La masa de escarcha de hielo fue estimada a partir de la cinética de liofilización más crítica o de mayor cantidad de agua estimada en el apartado anterior.

La densidad de hielo fue calculada según la correlación brindada en la Tabla N°3.8A del Anexo 3.8, considerando el rango mínimo de  $-40^{\circ}\text{C}$ , y según los valores reportados en la Tabla N°4.1A del Anexo 4.1.

Debido a que no se cuenta con valores de espesor ni densidad exactos para la formación de la escarcha de hielo, se realizó una estimación gráfica de las condiciones óptimas; primero analizando el comportamiento del área en función de los diversos espesores de hielo formado para cada serie de densidades y luego el análisis de las áreas óptimas para los espesores en función de las densidades, para considerar datos lógicos, se tuvo en cuenta que la altura total ( $H_{\text{total}}$ ) del equipo incluyendo la cámara principal y la base hueca que contendrá las tuberías que conectan a las bombas de vacío no debe ser mayor de 1,80 m. para facilitar el uso del personal.

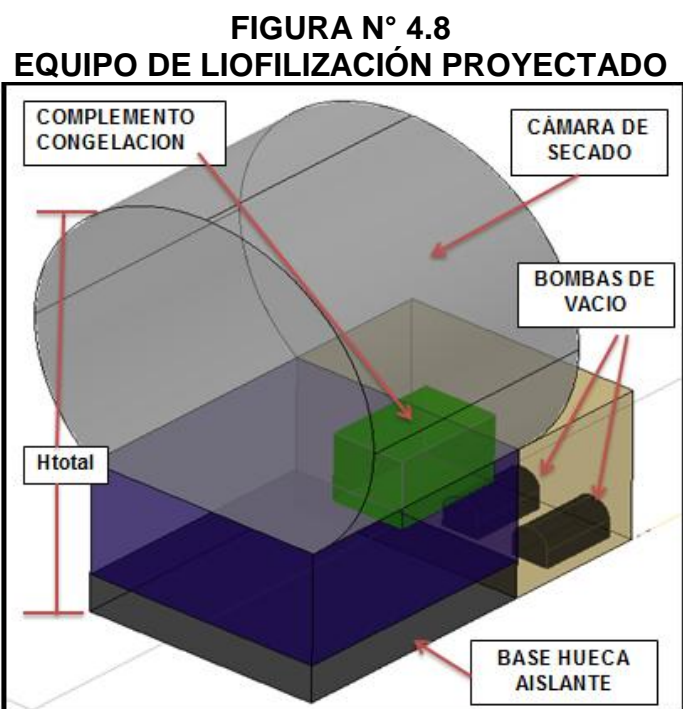
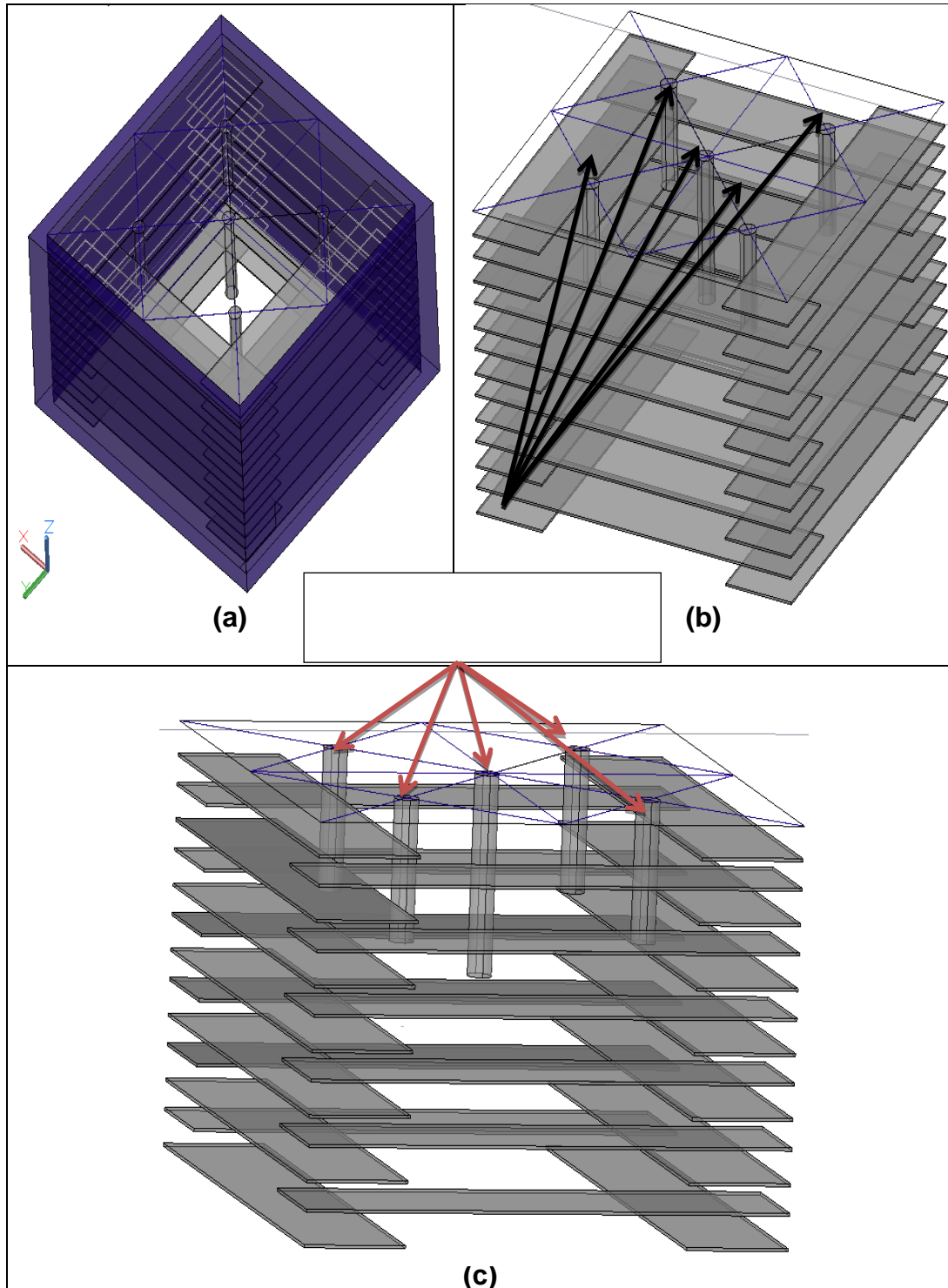


FIGURA N° 4.9  
ESQUEMA INTERNO DEL CONDENSADOR

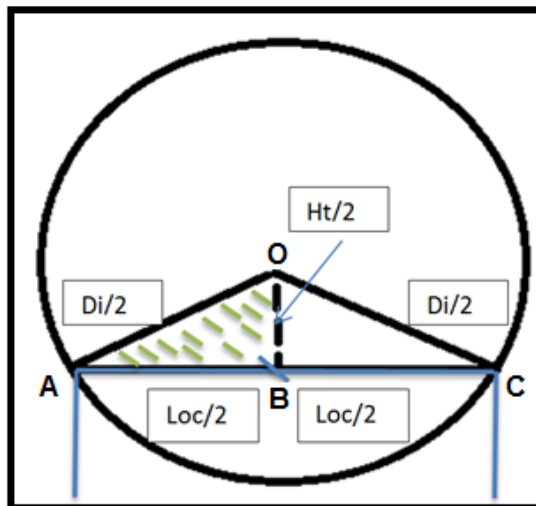


**Nota:** (a): Vista Isométrica de la cámara de condensación con los aletas de condensación; (b) Vista isométrica de las aletas y los distribuidores; (c) Vista de las aletas y los distribuidores.

El uso de aletas para aumentar el área de transferencia fue considerado debido a que el diámetro de la cabina principal requerido llegó a ser demasiado grande en comparación de la altura de una persona promedio. La conexión entre el condensador y la cámara de secado principal fue establecida en la base del estante de los platos de liofilización. Asimismo, la altura del estante de los platos (Ht) es igual a la suma de 5sp1, 4 sp2, sp3 y 4Lt según la Figura N°4.6 de la sección 4.8.2.

Mediante el uso de conceptos de geometría elemental se puede determinar las dimensiones de la plataforma base del soporte de platos para proyectarla hasta la base formando el recinto de condensación

**FIGURA N° 4.10  
VISTA FRONTAL DE LA CÁMARA DE LIOFILIZACIÓN**



**Nota:** Di: Diámetro interno de la cámara cilíndrica; Ht= altura total del contenedor de los platos de liofilización; Loc=Largo de la base del condensador

$$Loc = 2 \times \sqrt{\left(\frac{D_i}{2}\right)^2 - \left(\frac{Ht}{2}\right)^2} \quad (136)$$

Donde:

- $Loc$  : Largo de la base de la cámara de condensación (m)  
 $D_i$  : Diámetro interno de la cámara de secado (m)  
 $Ht$  : Altura del soporte contenedor de platos de liofilización (m)

ASHRAE (2009:4.4) explica que la transferencia de calor de una superficie puede ser incrementada mediante el uso de aletas o superficies extendidas para incrementar el área de transferencia de calor disponible. La eficiencia de una aleta está dada como la razón de la transferencia de calor actual a la aleta con respecto a la transferencia de calor si es que toda el área de la aleta estuviese a la temperatura de la base. La eficiencia de la superficie de la aleta incluye ambas el área de la aleta y el área primaria o inicial. El equipo propuesto está conformado por aletas rectangulares espaciadas en sus cuatro lados, para optimizar el área requerida según el cálculo realizado

$$\phi = \frac{\tanh(mH_{ac})}{mH_{ac}} \quad (137)$$

$$\phi_s = \frac{A_p + \phi A_s}{A} \quad (138)$$

Donde:

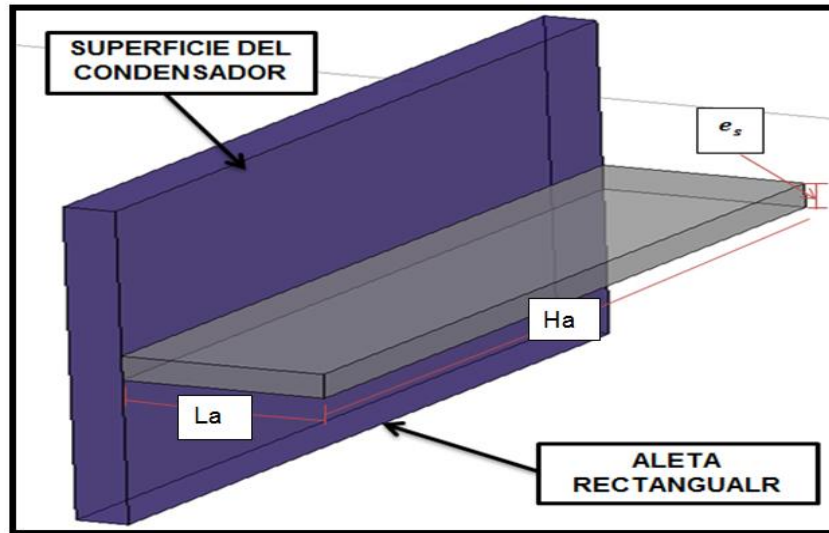
- $\phi$  : Eficiencia de la aleta  
 $m$  :  $\sqrt{hP/kA_c}$   
 $k$  : Conductividad térmica del material ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )  
 $h$  : Coeficiente de convección ( $W^2 \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )  
 $P$  : Perímetro de la aleta (m)  
 $A_c$  : Área de la sección transversal de la aleta ( $m^2$ )  
 $H_{ac}$  : Longitud corregida (m) =  $H_a + A_c/P$   
 $A_c/P$  : mitad del espesor de es  
 $\phi_s$  : Eficiencia de la superficie  
 $A_p$  : Área inicial sin aletas ( $m^2$ )



$A_s$  : Área de las aletas ( $m^2$ )

$A$  : Área total=  $A_p + A_s$

**FIGURA N° 4.11**  
**ESQUEMA DE LAS ALETAS DEL CONDENSADOR**



Adicionalmente, se tuvo como restricción en la relación en el factor de forma que la longitud transversal de la aleta ( $H$ ) debe ser por lo menos mayor a la quinta parte del espesor de la pared (ASHRAE, 2009: 4.5). A partir del esquema anterior se deduce:

$$P = 2H_a + 2e_s \quad (139)$$

$$A_c = H_a \cdot e_s \quad (140)$$

$$A_s = 2 \cdot L_a \cdot H_a + 2 \cdot L_a \cdot e_s + H_a \cdot e_s \quad (141)$$

Donde:

$P$  : Perímetro de la aleta (m)

$A_c$  : Área de la sección transversal de la aleta ( $m^2$ )

$A_s$  : Área de las aletas ( $m^2$ )

#### **e) Diseño de los distribuidores del condensador**

Se consideró la relación del único agujero distribuidor en la base ( $d_L$ ) del diámetro del plato del equipo liofilizador de laboratorio ( $D_{pL}$ ), los

cuales eran de 3 cm y 18 cm respectivamente, de un equipo de marca Liotop, de la empresa Liobras. Asimismo, de acuerdo al esquema presentado en la Figura N° 4.9, se ha considerado 5 salidas con una misma cantidad de flujo, por lo que el diámetro de distribuidor calculado ( $d_p$ ) fue dividido en 5 partes iguales  $d_{pi}$ .

$$\frac{d_p}{D_p} = \frac{d_L}{D_{pL}} \quad (142)$$

$$d_p = D_p \frac{d_L}{D_{pL}} \quad (143)$$

$$d_{pi} = \frac{d_p}{5} \quad (144)$$

Donde:

- $d_p$  : Diámetro de la tubería de distribución del equipo de liofilización a escala piloto inicial (cm)
- $d_L$  : Diámetro de la tubería de distribución del equipo de liofilización de laboratorio (cm)
- $D_p$  : Diámetro del plato de liofilización a escala piloto (cm)
- $D_{pL}$  : Diámetro del plato de liofilización del equipo de laboratorio (cm)
- $d_{pi}$  : Diámetro de los distribuidores finales del equipo piloto (cm)

#### 4.8.4. Diseño del sistema de producción de vacío

Deben ser ubicados en la base o lo más cercano a ésta en su defecto, para evitar que el agua sublimada pase a la bomba de vacío y humidifique el aceite en caso de operar con bombas que usen este fluido.

##### a) Características generales de la Bomba de Vacío

Los sistemas de generación de vacío más comunes son las bombas de desplazamiento positivo de vena rotatoria y las de pistón rotatorio, en las cuales el espacio angosto entre las partes estacionarias y las móviles están selladas por aceite. La presencia de sellado y aceite lubricante

reduce la fuga interna desde el lado de la descarga y el lado interior de la bomba. El aceite también llena el llamada espacio muerto de la válvula de descarga, esto permite muy altas razones de compresión, obteniendo presiones internas de  $10^{-2}$  torr (1,3 Pa) en una etapa simple y  $10^{-4}$  torr (0,01 Pa) en dos etapas (Hoffman et al., 1998: 75).

La elección del tipo de sistema de vacío requerido, estuvo basado en los resultados obtenidos en el primer objetivo referidos a la presión de operación recomendable a usar y en los sistemas de vacío más comúnmente usados en el mercado (ver Anexo N° 5).

El caudal requerido para el equipo diseñado fue estimado mediante las correlaciones brindadas por Chaudhari et al. (2011:1), con respecto al diámetro de la tubería según especificaciones de bombas de vacío se encuentra entre 1cm. a 2 cm; asimismo, se calculó la conductancia y la velocidad de succión de aire efectiva.

$$C = \frac{3,6r^3}{l} (2150 \cdot r \cdot P_m + 95) \quad (145)$$

$$S_{eff} = \frac{C \cdot S}{C + S} \quad (146)$$

$$P = \frac{P_{eff} \cdot S_{eff}}{S} \quad (147)$$

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (148)$$

Donde:

- $C$  : Conductancia ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )
- $S$  : Velocidad de succión ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )
- $S_{eff}$  : Velocidad de succión en el tanque ( $m^3 \cdot hr^{-1}$ )
- $P_m$  : Presión promedio (mBar) que se estima mediante iteración
- $P_{eff}$  : Presión efectiva (mBar) mostrada en la gráfica de curva característica de velocidad de bombeo cuando empieza a descender la velocidad de bombeo, según las gráficas del Anexo

N° 5 este valor para todos los casos es igual a 1 Torr (1,3 mBar)

$r$  : Radio de la tubería (cm)

$l$  : Longitud de la tubería, considerado como 200 cm

$t$  : Tiempo de vacío (min)

$V$  : Volumen del tanque ( $m^3$ ), relacionado con el volumen de la cámara principal y la cámara de condensación para este trabajo

$P_1, P_2$  : Presiones (mbar) que son la presión inicial y final respectivamente

**TABLA N° 4.13**  
**CARACTERÍSTICAS DE DIVERSAS BOMBAS DE VACÍO**

BOMBA DE VACÍO	PRESIÓN FINAL (mBar)	TIPO	DESPLAZAMIENTO AIRE	
			$l.min^{-1}$	$m^3.hr^{-1}$
VARIAN, INC. (Gas Ballast abierto)	0,020	(DS 102)	114	6,84
		(DS 202)	192	11,52
		(DS 302)	285	17,10
		(DS 402)	410	24,60
		(DS 602)	605	36,30
		(DS 1002)	1010	60,60
WELCH-ILMVAC	<0,00395	-	73	4,38
		-	320	19,20
VACUUM RESEARCH CORP (considerando uso de Gas ballast)	0,06	(Model 350)	100	6,00
		(Model 700)	200	12,00
		(Model 1400)	400	24,00
		(Model 2100)	600	36,00
		(Model 2800)	800	48,00
		(Model 3500)	1000	60,00
		(Model 5300)	1500	90,00
		(Model 6400)	1800	108,00
<b>VALOR MÍNIMO</b>				<b>4,38</b>
<b>VALOR MÁXIMO</b>				<b>108,00</b>

**Fuente:** Adaptado del Anexo N°5

La presión promedio se calculó iterativamente para los diversos casos de velocidad de succión según la metodología brindada por Chaudhari et al. (2011:1). Asimismo, el volumen de la cámara principal de secado y condensación fue estimado a partir de los apartados anteriores.

#### **b) Análisis del funcionamiento de una Bomba de Vacío**

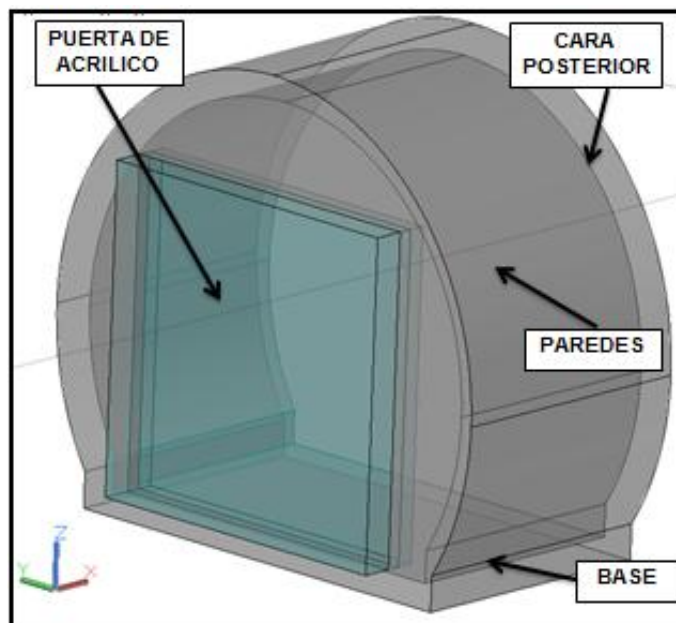
El comportamiento de la presión de vacío a lo largo de un determinado periodo de tiempo de operación, fue realizado con la

información adicional de la tesis realizada por Natividad (2011), durante una liofilización a nivel de laboratorio con un Liofilizador L-101, marca LIOTOP de la Empresa LIOBRAS.

#### 4.8.5. Diseño del aislamiento de la cámara

Se consideró el área lateral cilíndrica, la parte posterior, la base y algunas zonas en la parte frontal del equipo de acero recubierto con aislante; mientras que la en la parte frontal se considera un superficie gruesa de acrílico que permita resistir las presiones de vacío y a su vez visualizar en el interior del equipo.

**FIGURA N° 4.12**  
**PARTES DE LA CÁMARA DE SECADO CONSIDERADAS PARA**  
**CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR**



Adicionalmente, los coeficientes de transferencia de calor por convección se encuentran en los rango de 2 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a 25 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) y 25 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a 250 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) para tipo de convección de gases libres y forzados respectivamente (ASHRAE, 2009: 4.1)

ASHRAE (2009: 4.1) menciona que un cálculo común asociado con un aislamiento mecánico envuelve determinar el espesor del aislamiento requerido para el control de la temperatura de la superficie para un cierto valor de temperatura de operación dado del proceso y la temperatura del ambiente. Para esto se tiene la siguiente expresión:

$$Q_{\text{aislante}} = Q_{\text{superficie}} \quad (149)$$

$$\left(\frac{k}{L_x}\right)A(T_{\text{superficie}} - T_{\text{fría}}) = hA(T_{\text{ambiente}} - T_{\text{superficie}}) \quad (150)^7$$

$$L_x = (k/h)[(T_{\text{superficie}} - T_{\text{fría}})/(T_{\text{ambiente}} - T_{\text{superficie}})] \quad (151)$$

Donde:

- $L_x$  : Espesor de aislamiento (m)
- $k$  : Conductividad térmica del material aislante ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) = 0,022 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) según el Gráfico N° 4.3
- $A$  : Área de la sección transversal al flujo de calor ( $\text{m}^2$ )
- $T_{\text{fría}}$  : Temperatura de la superficie fría del interior (K)
- $T_{\text{ambiente}}$  : Temperatura del medio ambiente (K)
- $T_{\text{superficie}}$  : Temperatura de la superficie de la pared del equipo (K)
- $h$  : Coeficiente de superficie exterior del equipo ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ), como el máximo de 25 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) para gases libres

Asimismo, Bikov (2004:248) cita que la temperatura de medio externo a considerarse debe ser calculada de la siguiente manera:

$$T_{\text{ambiente}} = 0,4 \cdot T_m + 0,6 \cdot T_{\text{max}} = 27,32^\circ\text{C} \quad (152)^8$$

Donde:

- $T_{\text{ambiente}}$  : Temperatura de operación externa o de operación ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_m$  : Temperatura media anual ( $^\circ\text{C}$ )= 20,3
- $T_{\text{max}}$  : Temperatura máxima del mes más caliente del año ( $^\circ\text{C}$ ) = 32 $^\circ\text{C}$ .

La conductividad térmica del aislante (poliuretano expandido) considerada como el promedio de 0,021  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a la temperatura

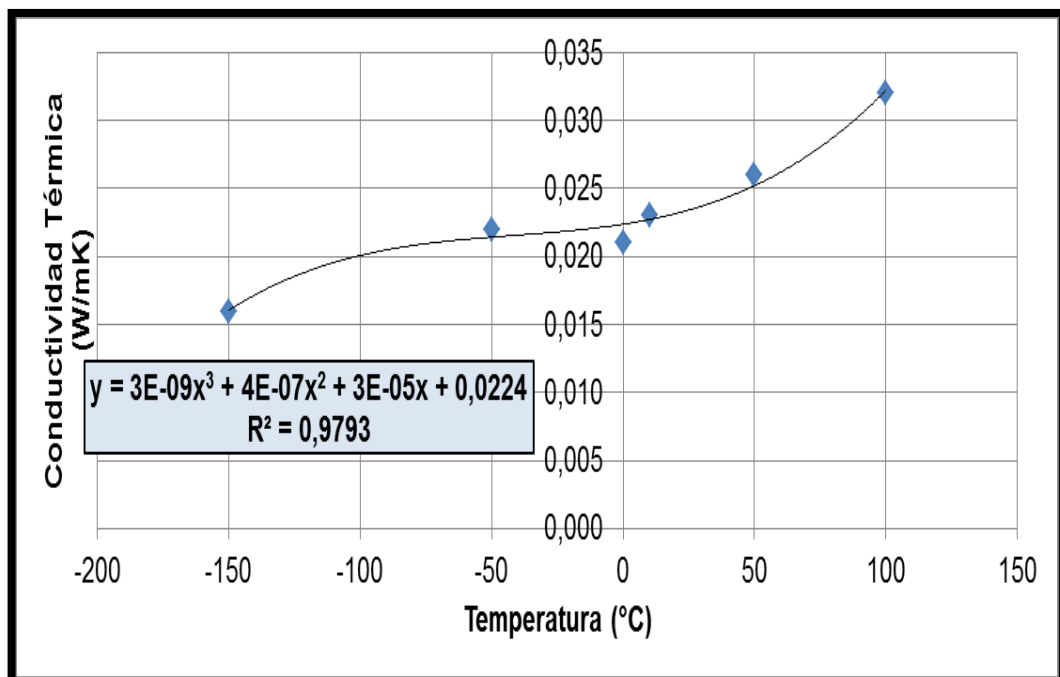
<sup>7</sup> Fue adaptada la expresión, considerando que dentro de la cámara de secado existe una temperatura fría en vez de una caliente como lo muestra la expresión original

<sup>8</sup>Ver Tabla N° 7.3 del Anexo N°7.

mínima de trabajo de  $-60^{\circ}\text{C}$  y  $0,024 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  correspondiente a la temperatura de ambiente (operación) de  $27,32^{\circ}\text{C}$ , la cual resulta  $0,022 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

La temperatura de superficie permitida debía ser menor que la de rocío según la humedad relativa del medio ambiente, la cual se puede considerar como 90% (ver Tabla N° 7.11A) para evitar la formación de gotas de agua a la temperatura de ambiente de  $27,32^{\circ}\text{C}$ , la cual resulta aproximadamente  $25,50^{\circ}\text{C}$  (ver Gráfico N° 7.4A del Anexo N° 7).

**GRÁFICO N° 4.3**  
**REPRESENTACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL**  
**POLIURETANO A DISTINTAS TEMPERATURAS**



**Nota:** Adaptado de la Tabla N° 7.8A

Se realizó el mismo procedimiento para estimar el espesor de aislamiento de la puerta principal de acrílico grueso con conductividad térmica de  $0,16 \text{ KCal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C} = 0,186 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

#### 4.8.6. Diseño del sistema mecánico de congelación

El sistema de congelación de los alimentos se debe ubicar dentro del equipo de liofilización, para evitar una contaminación del alimento en caso de que fuese externo o quemaduras por frío del personal manipulador. Asimismo, para que el aire no pueda entrar al sistema, la presión de vapor del refrigerante a la temperatura del evaporador, debe ser mayor que la atmosférica y la presión de vapor en la temperatura del condensador no debe ser excesivamente elevada debido al costo inicial y a los gastos de operación del equipo a presión elevada (Van Ness, 1997: 345).

##### a) Determinación de la cinética de congelación de los alimentos

Se determinó el tiempo de congelación de diversos alimentos con los modelos de Nagaoka y Levi.

**TABLA N° 4.14  
CONSTANTES GLOBALES CONSIDERADOS PARA CÁLCULO DEL  
TIEMPO DE CONGELACIÓN**

CONSTANTES	VALORES
$\lambda_A$	333,22 kJ.kg <sup>-1</sup>
$\lambda_{Am}$	6003 kJ.kmol <sup>-1</sup>
$R$	8,314 kJ.kmol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$T_i$	19,61 °C
$T_{a0}$	273,15K
$T_\infty$	-60,00 °C
$h_c$	Entre 50 y 120 (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
$L$	1,1x10 <sup>-2</sup> m

**Nota:**  $\lambda_A$ : Calor latente de fusión de hielo o de congelamiento;  $T_i$ : Temperatura del alimento al inicio de la congelación (K) (promedio de las temperaturas medias anuales en Lima-Callao/Aeropuerto Jorge Chávez (ver Tabla N°7.3 del Anexo N°7);  $T_\infty$ : Temperatura del medio de congelamiento (K);  $h_c$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) según Adicionalmente a los datos proporcionados en los Anexos, Orrego (2008: 35) y Ahmed (et al. 2012: 484) citan que el coeficiente de transferencia convectivo  $h_c$  (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) se encuentra entre 50 y 120 para un congelador de contacto de platos.);  $L$ : Espesor del alimento



**TABLA N° 4.15**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE CONGELACIÓN**

VARIABLE	MÉTODO	VARIABLES DE ENTRADA
$\Delta H$	Ecuación 18	$T_i, C_{p_{NC}}, T_c, \lambda_A, C_{p_C}, T, y_H$
$\Delta H'$	Ecuación 45	$T_i, C_{p_{NC}}, T_c, \lambda_A, C_{p_C}, T, y_H$
$\Delta H''$	Ecuación 47	$T_i, C_{p_{NC}}, T_c, \lambda_A, C_{p_C}, T, y_H$
$C_{p_{NC}}$	Ecuación de la Tabla N° 3.9A del Anexo N° 3	T, y (composición alimento)
	Dato de las Tablas N° 3.9C, 3.9D del Anexo N° 3	
$C_{p_C}$	Ecuación de la Tabla N° 3.9A del Anexo N° 3	T, y (composición alimento)
	Datos Tabla N°3.9B, 3.9D del Anexo N° 3	
$y_H$	Ecuación 25	$y_{a0}, y_{anc}$
$y_{a0}$	$y_0$ de la Tabla N° 4.9	-
$y_{anc}$	Ecuación N° 24	$y_s, y_{manc}, M_s, y_{manc_0}, \lambda_{Am}, R, T_{a0}, T_c, T$
$y_{manc_0}$	Ecuación N° 20	$\lambda_{Am}, R, T_{a0}, T_c$
$y_{manc}$	Ecuación N° 21	$\lambda_{Am}, R, T_{a0}, T$
$y_s$	Ecuación N° 22	$y_{a0}$
$M_s$	Ecuación N° 23	$y_s, y_{a0}, y_{manc_0}$
$T_c$	Datos Tablas N° 3.2A, 3.2B, 3.2C del Anexo N° 3	-
T	$T_h$ de la Tabla N° 4.9	-
$\rho_c$	Datos Tabla N° 5.29	-
$P_1$	Ecuación 39	$Pk, Ste, B_i$
$R_1$	Ecuación 40	$Pk, Ste$
Pk	Ecuación 43	$C_{p_{NC}}, T_i, T_c, \Delta H$
Ste	Ecuación 42	$C_{p_C}, T_c, T_\infty, \lambda_A$
$B_i$	Ecuación 41	$h_c, L, k_c$
$k_c$	Ecuaciones de la Tabla N° 3.8A del Anexo 3	Temperatura (T)

**Nota:**  $\Delta H', \Delta H''$ : Entalpías de pendiente de la correlación;  $C_{p_{NC}}$ : Calor específico del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ );  $T_c$ : Temperatura inicial de congelamiento (K);  $\lambda_A$ : Calor latente de congelamiento ( $J.kg^{-1}$ )=  $333,22 \times 10^3$ ;  $C_{p_C}$ : Calor específico del alimento ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ); T: Temperatura al final del congelamiento (K);  $T_h$ : Temperatura del frente de hielo (K);  $T_\infty$ : Temperatura del medio (K);  $y_H$ : Fracción de hielo;  $y_{A0}$ : Fracción másica correspondiente a la humedad inicial;  $y_{anc}$ : Fracción másica del agua no congelada;  $y_{manc}$ : Fracción molar del agua no congelada;  $y_{manc_0}$ : Fracción molar de agua no congelada al inicio;  $M_s$ : Peso molecular del soluto del alimento ( $kg.kmol^{-1}$ );  $\lambda_{Am}$ : Calor latente molar de

congelamiento;  $\rho_c$ : Densidad del alimento congelado;  $P_2$  y  $R_2$ : Constantes geométricas;  $P_k$ : Constante de Plank;  $St_e$ : Constante de Stefan;  $B_i$ : Constante de Biot;  $k_c$ : Conductividad térmica del alimento congelado;  $L$ : Espesor del alimento (m);  $h_c$ : Coeficiente de transferencia convectivo ( $W.m^{-2}.K^{-2}$ )

### b) Determinación de la carga calórica del producto principal

Clealand and Valentas citado por Ahmed (2012: 451).menciona que la carga calórica del producto principal puede ser estimada como sigue

$$Q_{\text{alimento}} = \dot{m} \times \Delta H \quad (153)$$

Donde:

$Q_{\text{alimento}}$  : Carga calórica del producto principal (W)  
 $\dot{m}$  : Velocidad de producción de alimento congelado ( $kg.s^{-1}$ )  
 $\Delta H$  : Cambio de entalpia estimada ( $J.kg^{-1}$ )

### c) Determinación de la carga térmica adicional del sistema

ASHRAE (2009:23.15) cita expresiones que calculan la transferencia de calor calculado diversas geometrías en estado estacionario:

$$q_k = -kA_1 \frac{(T_{\text{amb}} - T_{\text{sup}})}{L} \quad (154)$$

$$q_k = - \frac{kA_2(T_{\text{amb}} - T_{\text{sup}})}{\left[ r_2 \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right]} \quad (155)$$

Donde:

$q_k$  : Velocidad de flujo de calor por conducción (W)  
 $k$  : Conductividad térmica del material de aislamiento ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )  
 $A_1$  : Área de la sección transversal al flujo de calor ( $m^2$ )  
 $T_{\text{amb}}$  : Temperatura de operación externa o de operación = 27,32 °C  
 $T_{\text{sup}}$  : Temperatura de la superficie de la cámara = 25,50°C  
 $L$  : Espesor de la superficie plana se considera espesor aislante (m)  
 $A_2$  : Área de la superficie exterior ( $m^2$ )  
 $r_1$  : Radio exterior (m)  
 $r_2$  : Radio interno (m)

El área de la sección transversal al flujo de calor para superficies planas ( $A_1$ ) es la correspondiente a la ubicación frontal y posterior de la

cabina, la cual es igual al área circular menos el área del segmento circular inferior constituida por el arco y el segmento AC como se indica en la sección 4.8.3.d. calculado con las siguientes expresiones:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{Ht}{2}}{\frac{D_i}{2}} = \frac{Ht}{D_i} \quad (156)$$

$$\theta = 2 \cdot \arccos\left(\frac{Ht}{D_i}\right) \quad (157)$$

$$A_{sc} = \frac{R_i^2}{2} (\theta - \text{sen}(\theta)) \quad (158)$$

$$A_1 = \frac{\pi D_i^2}{4} - A_{sc} \quad (159)$$

Donde:

- $\theta$  : Ángulo en radianes
- $Ht$  : Altura del soporte contenedor de platos de liofilización (m)
- $D_i$  : Diámetro interno de la cámara de secado (m)
- $A_{sc}$  : Área del segmento circular (m<sup>2</sup>)
- $R_{ext}$  : Radio externo de la cámara de secado = (Dext/2) (m)
- $A_1$  : Área de la sección transversal al flujo de calor (m<sup>2</sup>)

El área de la superficie exterior para una geometría radial ( $A_2$ ) es la correspondiente a la cobertura envolvente de la cámara, usando la longitud de arco como:

$$L_{arc} = \frac{D_{externo}}{2} (2\pi - \theta) \quad (160)$$

$$A_2 = L_{arc} \cdot H_d \quad (161)$$

Donde:

- $L_{arc}$  : Longitud de arco de la cámara (m)
- $D_{externo}$  : Diámetro externo incluido el espesor de aislamiento de la cámara de secado y el espesor del acero (m)
- $\theta$  : Ángulo en radianes
- $H_d$  : Longitud total del cilindro (m) – depende del diámetro de los platos del liofilizador, incluyendo el espesor de aislamiento en cada base.
- $A_2$  : Área de la superficie exterior (m<sup>2</sup>)

La transferencia de calor desde la superficie es una combinación de convección y radiación. Usualmente, estos modelos son asumidos como aditivos, y por lo tanto el coeficiente de la superficie combinada puede ser usado para estimar el flujo de calor hacia y desde una superficie (ASHRAE, 2009:23.15).

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (162)$$

Donde:

- $h_{cr}$  : Coeficiente de superficie combinado ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
- $h_c$  : Coeficiente de convección considerado como el promedio de 2 ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) y 25 ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) para un tipo de convección de gases libres (ASHRAE, 2009: 4.1), puesto que en este periodo inicial no se ha encendido el vacío de la cámara.<sup>9</sup>
- $h_r$  : Coeficiente de radiación ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )

ASHRAE (2009: 4.1) cita que la materia emite radiación térmica en la superficie cuando su temperatura está por encima del cero absoluto. Esta radiación está en la forma de fotones de frecuencia variable. Estos fotones que dejan la superficie no necesitan medio para transportarlos, a diferencia de la conducción y la convección (en la cual la transferencia de calor ocurre).

ASHRAE (2009:23.15) también cita que asumiendo que el ambiente radiante es igual a la temperatura de ambiente del aire, la pérdida o ganancia de calor en la superficie puede ser calculada como:

$$q_{cr} = h_{cr} A_{12} (T_{sup 0} - T_{amb 0}) \quad (163)$$

---

<sup>9</sup> Se está considerando el rango del coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) usado dependiendo del autor citado, debido a esto las diferencias de dos rangos para  $h_c$ : 50 y 120  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$  según Barbosa et al. y 2 a 25  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$  según ASHRAE (2009).

$$h_r = \varepsilon \sigma \frac{(T_{sup0}^4 - T_{amb0}^4)}{(T_{sup0} - T_{amb0})} \quad (164)$$

Donde:

- Q : Velocidad de flujo de calor (W)
- $h_s$  : Coeficiente de superficie combinado ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
- $A_{12}$  : Área de la sección transversal al flujo de calor ( $m^2$ )=  $A_1 + A_2$
- $T_{sup0}$  : Temperatura de la superficie del material (K), considerada como la temperatura inicial de la cámara =  $27,32 \text{ °C} = 300,47 \text{ K}$
- $T_{amb0}$  : Temperatura del medio ambiente (K) deseado =  $-60 \text{ °C} = 213,15 \text{ K}$
- $\varepsilon$  : Emisividad de la superficie= 0,28 para acero galvanizado (ver Tabla N° 7.4 del Anexo N° 7)
- $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann=  $5,67 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$

Por tanto, la carga térmica por conducción, convección y radiación ( $q_1$ ) es la suma de  $q_k$  y  $q_{cr}$ .ASHRAE (2009:18.13) explica que la carga calórica debido a la infiltración de aire de afuera ( $q_2$ ) como la suma del calor ganado total, el calor sensible y el calor latente para el flujo de aire.

$$q_t = 1,2 \dot{v} \Delta h \quad (165)$$

$$q_s = 1,2(0,24 + 0,45Y_{aire}) \dot{v} \Delta t \quad (166)$$

$$q_l = 3010 \cdot \dot{v} \cdot \Delta Y_{aire} \quad (167)$$

Donde:

- $q_t$  : Calor ganado total (W)
- 1,2 : Densidad del aire a 101325 Pa ( $kg \cdot m^{-3}$ )
- $\dot{v}$  : Flujo de aire ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) considerado si el flujo de aire que se succiona por la bomba de vacío ingresa nuevamente con la misma intensidad.
- $\Delta t$  : Variación de tiempo (s), considerado como el tiempo promedio que tarda la congelación más el tiempo necesario para que la bomba de vacío alcance la presión de 4 Pa requerida= 118 minutos + 30 minutos= 148 minutos= 8880 segundos.
- $\Delta h$  : Diferencia de entalpía del aire ( $J \cdot kg^{-1}$ ) entre temperatura de ambiente de  $27,32 \text{ °C}$  (%HR=90%) y  $-60 \text{ °C}$  (%HR=100%)=  $80,53 - (-60,53) = 141,06 \text{ kJ} \cdot kg^{-1} = 141,06 \times 10^3 \text{ J} \cdot kg^{-1}$  (calculado con: <http://www.uigi.com/WebPsych.html>)
- $q_s$  : Calor sensible correspondiente al cambio de temperatura de bulbo seco para un determinado flujo de aire (condiciones estándar) (W)
- 0,24 : Calor específico del aire seco ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

- 0,45 : Calor específico de vapor de agua ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
 $Y_{aire}$  : Razón de humedad de aire (kg agua/ kg aire seco) a las condiciones de Lima-Callao=0,02080 kg agua/kg aire seco  
 $q_1$  : Calor latente correspondiente al cambio de la razón de humedad para un flujo de aire (W)  
 $\Delta Y_{aire}$  : Se considera aproximadamente igual a  $Y_{aire}$  debido a que para temperaturas muy bajas la humedad absoluta tiende a ser cero.

ASHRAE (2009:18.5) manifiesta que la ganancia de calor debido a la aplicación de la luz que proviene de lámparas ( $q_3$ ) puede ser estimada como el valor correspondiente a la estancia de laboratorio de  $15 W.m^{-2}$ .

#### **d) Determinación de la carga térmica total**

Una vez realizado el cálculo de los calores de la sección 4.8.4 b y c se calcula la carga térmica total para congelar los alimentos mediante la suma de todos los calores estimados.

$$Q_{total} = Q_{alimento} + q_1 + q_2 + q_3 \quad (168)$$

Donde:

- $Q_{total}$  : Carga térmica total (W)  
 $Q_{alimento}$  : Carga térmica de congelación del alimento (W)  
 $q_1$  : Carga térmica por conducción, convección y radiación (W)  
 $q_2$  : Carga térmica por infiltración del aire de afuera (W)  
 $q_3$  : Carga térmica por uso de luz dentro del compartimiento (W)

#### **e) Determinación de las condiciones de operación del sistema de congelación y balances de materia y energía**

La elección del refrigerante fue considerada dentro de los sustitutos de los compuestos clorofluorocarbonos completamente halogenados que ocasionan la destrucción de la capa de ozono, debido a que la temperatura del condensador se debe mantener a  $-60^{\circ}C$ , y además se desea obtener una temperatura de congelación menor a los  $-50^{\circ}C$  en

algunos casos, partiendo desde una temperatura de ambiente entre 15° a 30°C; considerando al refrigerante Suva (R) 95 (ver Anexo N° 6). Asimismo, dicho refrigerante debe trabajar en un sistema de dos ciclos de doble etapa para tener una mejor transferencia de calor a diferencia de uno en cascada (Van Ness, 1997: 347).

Se utilizó el Software Aspen Hysys versión 7.2 (ver Anexo N° 8); en el cual se definieron previamente las propiedades del fluido, las condiciones termodinámicas, condiciones de operación y los equipos utilizados en el ciclo de congelación de doble etapa.

Previamente se debe considerar que el refrigerante Suva (R) 95 es una mezcla de los compuestos químicos Perfluoroetano C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> (FC-116) y Trifluorometano CHF<sub>3</sub> (HFC-23) con composiciones de 54% y 46%, respectivamente. La elección del modelo termodinámico se realizó según el asistente de selección de paquete termodinámico que brinda el programa, que propone el uso del modelo Peng-Robinson o su modificación por Stryjek y Vera (PRSV) al seleccionar un proceso criogénico; para este cálculo se utilizó el primero.

**TABLA N° 4.16**  
**DESEMPEÑO TEÓRICO DE SISTEMA EN CASCADA CON SUVA 95**

Presión de descarga kPa (psia)	1013 (147)
Presión de succión, kPa (psia)	124 (18)
Temperatura de descarga °C (°F)	85 (186)

**Fuente:** [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh)

**Nota:** Condiciones de operación: -84,4°C (-120°F) en el evaporador; -35°C (-31°F) en el condensador; -17,8° (0°F) temperatura de succión; 70% de eficiencia de compresión isoentrópica;

**TABLA N° 4.17**

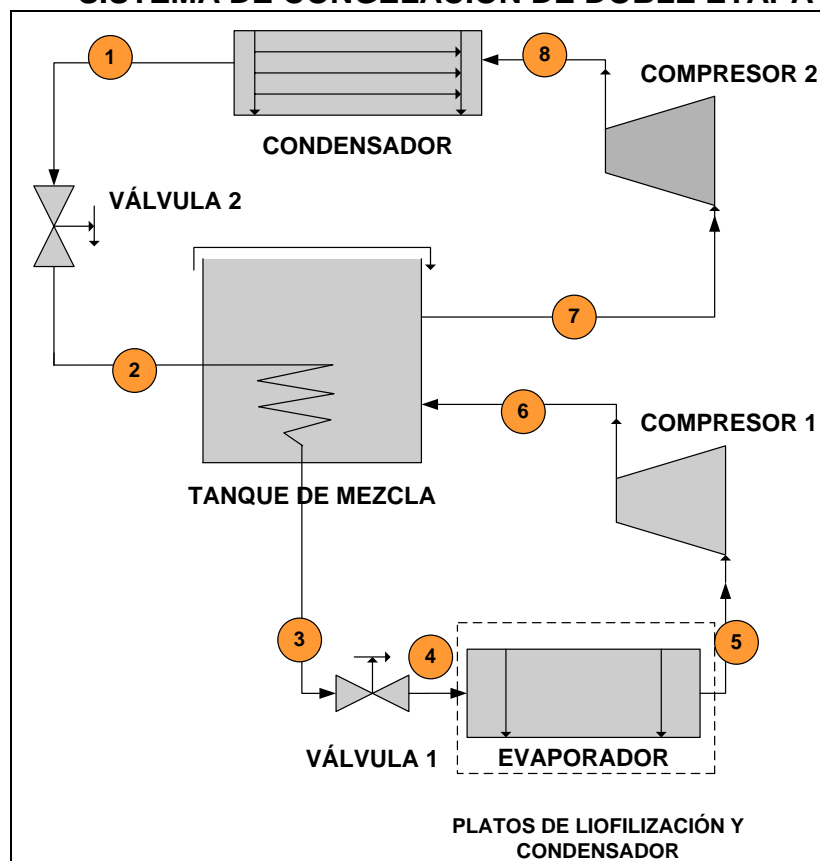
**LISTA DE PROPIEDADES GENERALES DE SUVA (R) 95**

Punto de ebullición (1 atm)	-88 °C (-126,5 °F)
Temperatura crítica	13,7 °C (56,7 °F)
Presión crítica	3935 kPa (571 psia)
Inflamabilidad	No inflamable

**Fuente:**

[http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh)

**FIGURA N° 4.13  
SISTEMA DE CONGELACIÓN DE DOBLE ETAPA**

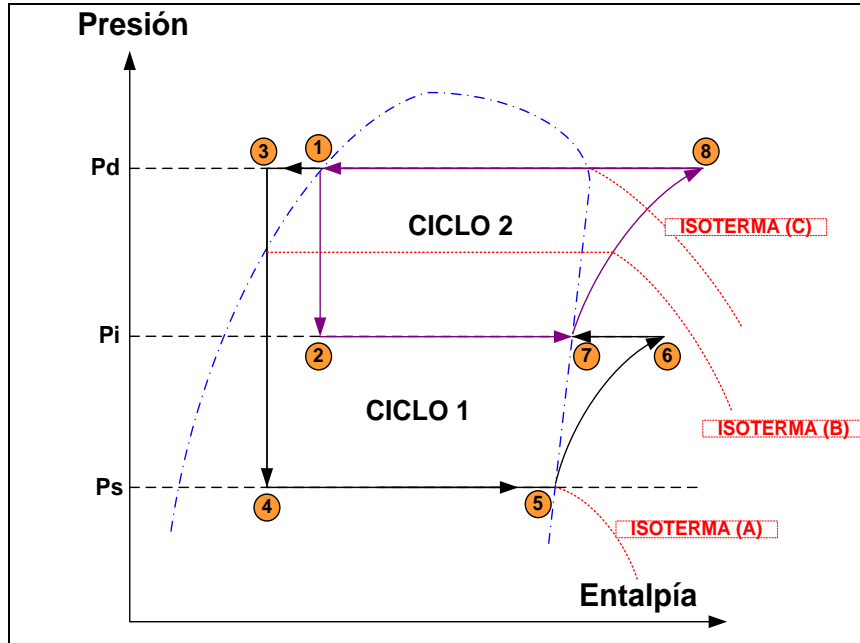


**Nota:** Elaborado en Visio XP

Se propone el esquema de congelación de doble etapa con un tanque intermedio de mezcla en vez de uno de cascada con intercambiador de calor intermedio. A partir del esquema anterior, se preparó el diagrama entalpía vs. Presión representando ambos ciclos de congelación.



**FIGURA N° 4.14  
DIAGRAMA PRESIÓN VS. ENTALPÍA DEL CICLO DE CONGELACIÓN**



**Nota:** Elaborado en Visio XP; Pd: Presión de descarga; Pi: Presión intermedia, Ps: Presión de succión.

Las características generales del Sistema de Congelación como la presión de los compresores usados y el Coeficiente de Performance (COP) para diversos casos, fue evaluado en función de los balances de masa y energía para cada uno de los dos ciclos propuestos, usando el esquema de la figura anterior y las relaciones dadas por Ibarz y Barbosa, (2005: 553):

- Balance de masa en el Ciclo (1) y Ciclo (2), donde  $m_I$  con  $m_{II}$  representan los flujos máscicos del Ciclo (1) y Ciclo (2) respectivamente.

$$m_I = m_3 = m_4 = m_5 = m_6 \quad (169)$$

$$m_{II} = m_7 = m_8 = m_1 \quad (170)$$

$$m_1 = m_2 + m_I \quad (171)$$

$$m_{II} = m_I + m_2 \quad (172)$$

- Balance de calor en el evaporador del Ciclo N°1, en el condensador del Ciclo N°2.

$$Q_{c1c} = m_{II}(H_5 - H_4) \quad (173)$$

$$Q_{c2c} = m_I(H_8 - H_1) \quad (174)$$

Donde:

$m_i$  : Flujos másicos (kg/s) para cada corriente  $i$ ;  $i = [1,2]$

$Q_{cic}$  : Flujo calórico para cada Ciclo  $i$  (J/s);  $i = [1,2]$

$H$  : Entalpía J/kg para cada corriente

➤ Potencia para cada Compresor:

$$Pot_I = m_I(H_6 - H_5) \quad (175)$$

$$Pot_{II} = m_{II}(H_4 - H_3) \quad (176)$$

Donde:

$Pot_i$  : Potencias de los compresores (W),  $i = [1,2]$

$m_i$  : Flujos másicos (kg/s) para cada corriente  $i$ ;  $i = [1,2]$

$H$  : Entalpía J/kg para cada corriente

➤ Coeficiente de Performance (COP):

$$COP = \frac{m_I(H_5 - H_4)}{m_I(H_6 - H_5) + m_{II}(H_8 - H_7)} \quad (177)$$

$$COP = \frac{(H_5 - H_4)}{(H_6 - H_5) + \frac{m_{II}}{m_I}(H_8 - H_7)} \quad (178)$$

Donde:

COP : Coeficiente de Performance

$m_i$  : Flujos másicos (kg/s) para cada corriente  $i$ ;  $i = [1,2]$

$H$  : Entalpía J/kg para cada corriente

## f) Determinación del flujo másico del refrigerante

Estimado la carga térmica total ( $Q_{total}$ ) y el cambio de entalpía en la línea de evaporación del refrigerante, calculamos el flujo másico requerido por el refrigerante de la siguiente manera.

$$m_{ref} = \frac{Q_{total}}{H_5 - H_4} \quad (179)$$

Donde:

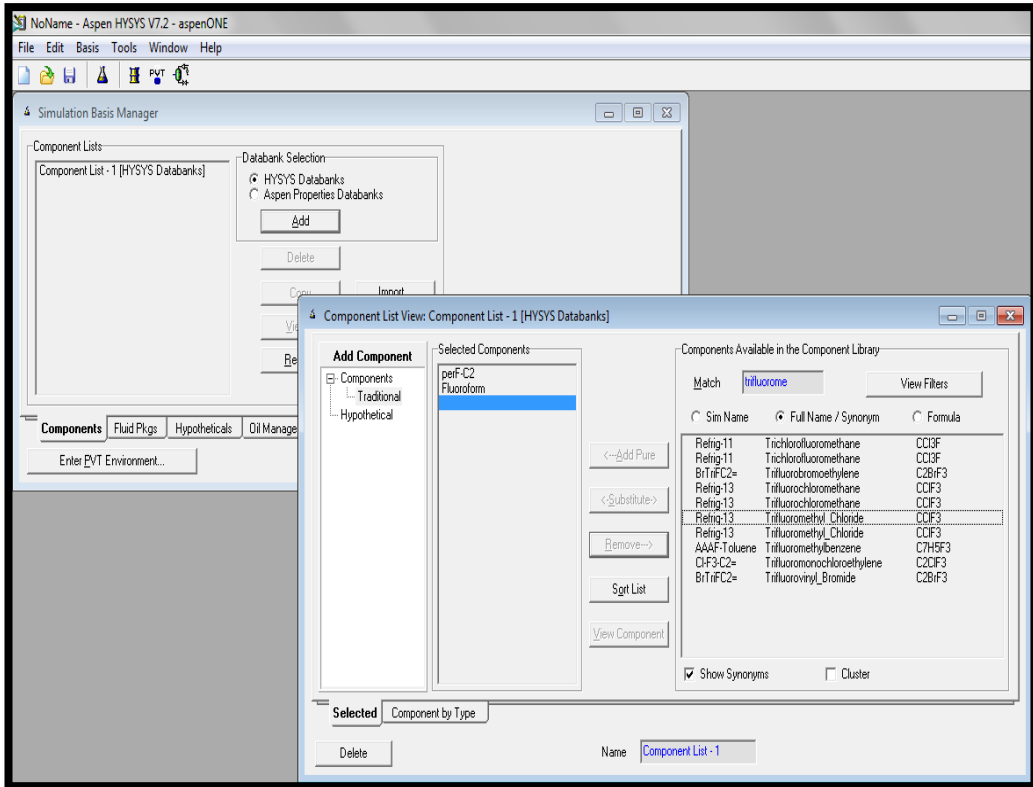
$m_{ref}$  : Flujo másico del refrigerante ( $kg \cdot s^{-1}$ )

$Q_{total}$  : Carga térmica total (W)

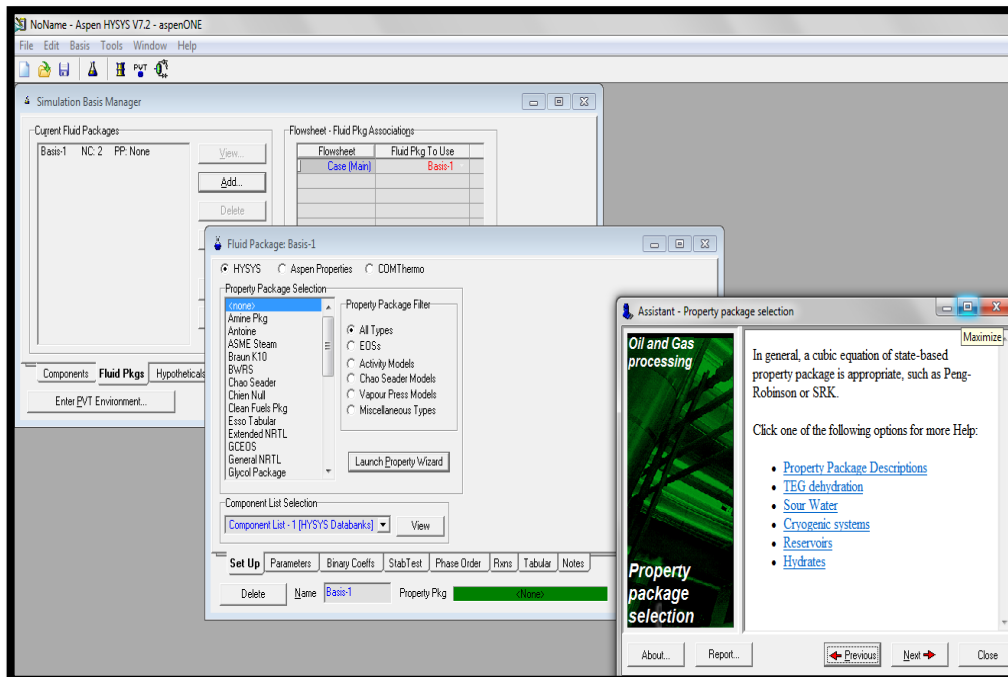
$H_4$  : Entalpía del refrigerante a la entrada del evaporador ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$H_5$  : Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador ( $J \cdot kg^{-1}$ )

**FIGURA N° 4.15**  
**COMPONENTES QUE CONFORMAN EL REFRIGERANTE SUVA (R) 95**



**FIGURA N° 4.16**  
**MODELO TERMODINÁMICO DEL REFRIGERANTE SUVA (R) 95**



### **g) Cálculo del área de transferencia requerida de las tuberías del refrigerante**

Serth (2007:54) cita que para analizar la transferencia de calor en tuberías circulares con un flujo turbulento desarrollado a un número de Reynolds de aproximadamente  $10^4$  se estima el número de Nusselt ( $Nu_1$ ) con la correlación correspondiente, la cual es válida para número de Prandtl entre 0,5 y 17000 y para tuberías con una relación entre longitud y Diámetro ( $L/D$ ) mayor a 10. Sin embargo, para tuberías cortas con  $10 < L/D < 60$ , la correlación es multiplicada por el factor  $[1 + (D/L)^{2/3}]$  para corregir.

Para un flujo laminar en tuberías circulares ( $Re < 2100$ ), la correlación de Seider-Tate toma una forma específica para determinar el número de Nusselt con una segunda correlación ( $Nu_2$ ), la cual es válida para el intervalo de número de Prandtl entre 0,5 y 17000, y  $[RePrD/L]^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0,14} > 2$ , con una precisión dentro del 25% (Serth 2007:55). Para regiones de flujo de transición ( $2100 < Re < 10^4$ ), la correlación de Hausen es recomendada para determinar el número de Nusselt ( $Nu_3$ ) (Serth 2007:55).

Finalmente, una ecuación alternativa para regímenes de transición y turbulencia ha sido propuesto por Gnielinski ( $Nu_4$ ), la cual es válida para  $2100 < Re < 10^6$  y  $0,6 < Pr < 2000$  (Serth 2007:55).

Con el número de Nusselt, se calculó el coeficiente de convección interno por donde circula el refrigerante, el coeficiente de transferencia de

calor por convección ( $h_0$ ) es considerado como el promedio de los extremos de los rangos a partir de los datos por ASHRAE (2009: 4.1), es decir,  $12,5 \text{ W.m}^{-2}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>10</sup>.

El coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ) es simplificado suponiendo una conductividad elevada del plato metálico donde se encuentra el alimento y un diámetro externo e interno muy parecidos; la diferencia de temperatura promedio es establecida a partir de las temperaturas inicial y final del refrigerante que circula y del aire que se mueve por convección dentro de la cabina de liofilización antes de aplicar el vacío. El área de transferencia y por ende la longitud y diámetro de la tubería es calculada a partir de la cantidad de calor necesaria, coeficiente global de transferencia de calor y la diferencia de temperatura promedio (Serth 2007:94).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (180)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k_r} \quad (181)$$

$$Nu_1 = 0,027 Re^{0,8} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0,14} \quad (182)$$

$$Nu_2 = 1,86 [Re Pr D/L]^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0,14} \quad (183)$$

$$Nu_3 = 0,116 [Re^{2/3} - 125] Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0,14} [1 + (D/L)^{2/3}] \quad (184)$$

$$Nu_4 = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} [1 + (D/L)^{2/3}] \quad (185)$$

$$f = (0,782 \ln Re - 1,51)^{-2} \quad (186)$$

$$h_i = \left(\frac{k_r}{D}\right) Nu \quad (187)$$

$$U = \left[ \frac{D_0}{h_i D_{it}} + \frac{D_0 \ln(D_0/D_{it})}{2k} + \frac{1}{h_0} \right]^{-1} \cong \frac{h_0 h_i}{h_0 + h_i} \quad (188)$$

<sup>10</sup>No es considerado el rango de  $h_c$  entre  $50 \text{ W.m}^{-2}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}$  y  $120 \text{ W.m}^{-2}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}$  dado por Barbosa et al. debido a que se considera un ambiente inicial a temperatura ambiental y éste autor considera dichos valores para un medio frío.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (189)$$

$$D_{it} = \frac{Q}{\pi U \Delta T_m L} \quad (190)$$

Donde:

- $Re$  : Número de Reynolds
- $v$  : Velocidad del fluido refrigerante ( $m.s^{-1}$ )
- $\dot{m}$  : Flujo másico del refrigerante ( $kg.s^{-1}$ )
- $Pr$  : Número de Prandtl
- $C_p$  : Capacidad calórica del refrigerante ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) como líquido saturado a partir del Anexo N°6.C.
- $k_r$  : Conductividad térmica refrigerante ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) como líquido saturado a partir del Anexo N°6.C.
- $un$  : Número de Nusselt
- $\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido refrigerante (Pa.s) como líquido saturado a partir del Anexo N°6.C.
- $\mu_w$  : Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de la pared (Pa.s), la temperatura de la pared se considerará como  $-60^\circ C$ .
- $D$  : Diámetro de la tubería (m), se considerará diámetro interno (3,91 cm.)
- $L$  : Longitud de la tubería (m), la cual de acuerdo al diámetro del plato de 0,73 m y la distribución de la tubería en el plato resulta aproximadamente 3,10 m.
- $f$  : Factor de fricción en función del número de Reynolds
- $k$  : Conductividad térmica del material ( $W.m^{-1}.^\circ C^{-1}$ ), que es cobre con valores entre 372,1-385,2 (se consideró promedio= 378,65)
- $h_i$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección interior ( $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$ )
- $U$  : Coeficiente global de transferencia de calor ( $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$ )
- $D_0$  : Diámetro externo de la tubería (m), asumido según la distribución geométrica inicial como 4,13 cm. y recalculada
- $D_{it}$  : Diámetro interno de la tubería (m), asumido según la distribución geométrica inicial como 3,91 cm. y recalculada
- $h_0$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección exterior ( $W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$ ) =  $12,5 W.m^{-2}.^\circ C^{-1}$
- $\Delta T_m$  : Diferencia de temperatura promedio ( $^\circ C$ )
- $\Delta T_1$  : Diferencia de temperatura en la entrada y salida de la tubería ( $^\circ C$ ), considerando como máximo permitido el valor de  $10^\circ C$
- $\Delta T_2$  : Diferencia de temperatura en la entrada y salida del compartimiento ( $^\circ C$ ), el cual varía dependiendo del tiempo, se considerará la diferencia de la temperatura de Lima y Callao ( $27,32^\circ C$ ) y la temperatura de  $-60^\circ C$  deseada.
- $Q$  : Transferencia de calor requerido por plato de liofilización ( $J.s^{-1}$ )

#### **4.8.7. Diseño del sistema de calentamiento**

Para tener una sublimación de agua continua en los productos, el calor latente de sublimación debe ser brindado al material a partir de una fuente externa, suministrado usualmente mediante conducción, convección o radiación, la conducción es realizada por un contacto entre platos de calentamiento. La cantidad de calor suministrado al producto no puede ser incrementado libremente, porque hay ciertas condiciones limitantes que deben ser satisfechas durante el secado primario (mantener la temperatura de congelación) o en el secundario (temperatura mayores a los cero grados), donde se puede producir colapso estructural o pérdida de bioactividad, cambio de color, la posibilidad de reacciones químicas o bioquímicas degradativas, deformación estructural, respectivamente (Mujumdar, 2006: 260).

El calor es suministrado por conducción desde la parte inferior de las bandejas y por radiación desde la bandeja superior, los platos y bandejas deben ser diseñados para asegurar un buen contacto térmico (Brennan, 2006: 98). El Sistema generación de energía calórica está conformado por resistencias eléctricas. Por encima del plato superior debe existir una plancha metálica que simule la transferencia de calor por radiación como sucede en los platos inferiores. Existen dos momentos de calentamiento principales durante la liofilización de los alimentos: calentamiento para proporcionar calor de sublimación (secado primario) y para proporcionar el calor durante el secado secundario.

Carrasco (2011:247) brinda las siguientes relaciones para determinar la generación de calor de origen eléctrico y el flujo de calor en el plato base de los pines para que se proporcione un flujo calórico equivalente al calor de sublimación del agua. El calor de desorción aplicado depende de un termostato instalado que regule el flujo de corriente eléctrica

$$Q_s = \Delta H_s \cdot m_s \quad (191)$$

$$G = \frac{Q_s}{\pi R^2 L} \quad (192)$$

Donde:

- $Q_s$  : Flujo de calor requerido (W)
- $\Delta H_s$  : Calor latente de sublimación =  $2,89 \times 10^6$  (J.kg<sup>-1</sup>) de la Tabla N° 4.6
- $m_s$  : Velocidad de sublimación del agua, estimada en el análisis de cinética de liofilización (kg.s<sup>-1</sup>) de la Tabla 5.25 como el requerimiento para una máxima velocidad de sublimación ( $1,07 \times 10^{-3}$  kg.s<sup>-1</sup>)
- $G$  : Generación de energía de origen eléctrico (J.m<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $R$  : Radio del cilindro (m) (mitad del diámetro del plato calentador) =  $0,73\text{m}/2 = 0,365\text{m}$ .
- $L$  : Espesor del plato calentador (m) considerad como de espesor parecida al del acero comercial = 3,430 mm.

#### 4.9. Metodología para el desarrollo del tercer objetivo

La simulación fue realizada considerando un estado no estacionario, donde se determinaron los perfiles de temperatura en la capa seca (I), capa congelada (II), y concentraciones de vapor de agua en la capa seca.

Las ecuaciones diferenciales planteadas por Liapis y Bruttini citados por Turner et al. (1997:481), analizadas desde las ecuaciones de conservación de materia y energía en el Anexo N° 9.



#### 4.9.1. Metodología de cálculo de las ecuaciones planteadas

Se discretizaron el sistema de ecuaciones diferenciales gobernantes, usando el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden, mostrado en el Anexo N° 11. La resolución de las ecuaciones fue realizada utilizando el método numérico de Milnes, con Runge Kutta de cuarto orden (RK-4) para un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), mediante discretización en intervalos pequeños de tiempos.

Se presentó el programa de cálculo en Matlab en el Anexo N° 10, requerido para el cálculo iterativo previamente propuesto; para algunas propiedades se consideró despreciable su cambio con respecto a la temperatura u otra condición, para disminuir la complejidad del cálculo.

#### 4.9.2. Estimación de variables necesarias para la simulación

Las variables utilizadas fueron clasificadas como: constantes globales, variables de entrada según discretización con métodos numéricos, variables de entrada iniciales, datos de entrada consideradas (propiedades previamente analizadas), datos de entrada por estimar (considerados constantes), variables intermedias (derivadas de todas las anteriores) y las variables de respuesta. El esquema resumido del algoritmo de resolución se presenta a continuación:

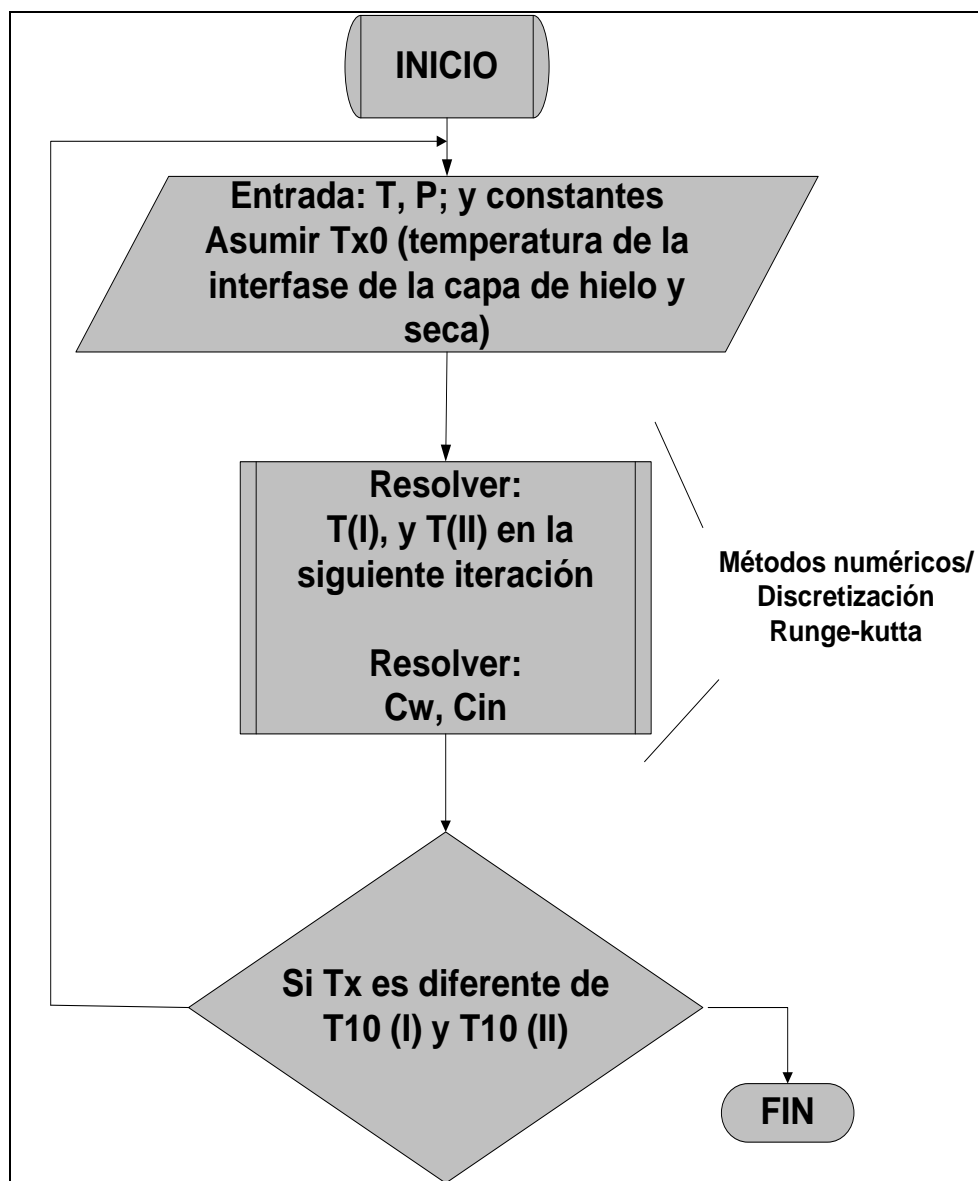
**TABLA N° 4.18  
CONSTANTES GLOBALES REQUERIDAS PARA LA SIMULACIÓN**

CONSTANTE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Constante de los gases ideales	R	8,314	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	5,67x10 <sup>-8</sup>	W.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup>
Peso molecular del agua	M <sub>w</sub>	18,016	g.mol <sup>-1</sup>
Peso molecular del aire (inerte)	M <sub>in</sub>	28,97	g.mol <sup>-1</sup>
Calor latente de vaporización	H <sub>v</sub>	2 257 x 10 <sup>3</sup>	J.kg <sup>-1</sup>

**TABLA N° 4.19**  
**VARIABLES DE ENTRADA SEGÚN DISCRETIZACIÓN POR MÉTODOS**  
**NUMÉRICOS**

VARIABLE	ESPECIFICACIÓN
$\Delta x$	Espaciamiento en la capa seca, se considera la décima parte del espesor de dicha capa.
$\Delta z$	Espaciamiento en la capa congelada, se considera la décima parte del espesor de dicha capa.

**FIGURA N° 4.17**  
**ALGORITMO DE RESOLUCIÓN DE LA SIMULACIÓN**



**Nota:** Realizado en Visio XP; T(I): Temperatura de la capa congelada; T(II): Temperatura de la capa seca; Cw y Cin.

**TABLA N° 4.20**  
**VARIABLES DE ENTRADA ASUMIDAS PARA LA SIMULACIÓN-**  
**CONDICIONES DE INICIALES DE FRONTERA**

VARIABLE	ESPECIFICACIÓN
Capa seca (t=0) $T_0^I = T_1^I = T_2^I = \dots = T_9^I; T_0^{II} = T_0^{II}$ Capa congelada (t=0) $T_0^{II} = T_1^{II} = T_2^{II} = \dots = T_9^{II}$	Depende de la temperatura de congelación del grupo de alimentos
Capa seca (t=0) $C_{w1} = C_{w2} = \dots = C_{w8} = C_{w9} = 0$ $C_{in1} = C_{in2} = \dots = C_{in9} = C_{in10} = 0$	Al inicio como no existen poros y la capa seca es despreciable no hay agua ni inerte (aire) presente.
$T_{UP}$	Temperatura de la placa calefactora generadora del calor por radiación considerada
$T_x$	Temperatura asumida, que se va a ir corrigiendo durante el cálculo iterativo.
X	Posición de la interfase

**Nota:** En la temperatura (T), el subíndice representa la posición según la Figura 11.A.1 según discretización y el superíndice indica la capa a la cual pertenece (I= Capa seca, II= Capa congelada), en el caso de la concentración C, “w” representa el vapor de agua e “in” representa el inerte presente;  $T_{UP}$  (K),  $T_x$  (K)

Se estimó la fracción molar del vapor de agua y del aire considerando la relación de flujosmásicos de agua y aire ( $N_w/N_{in}$ ) de 5.

$$y_w = \frac{\frac{5}{18}}{\frac{5}{18} + \frac{1}{28,97}} = 0,89 \quad (193)$$

$$y_{in} = 1 - 0,89 = 0,11 \quad (194)$$

$$P_{inX} = P_{wX} \times \frac{y_{in}}{y_w} \quad (195)$$

$$P_X = P_{wX} + P_{inX} \quad (196)$$

$$P_{in}^0 = P_w^0 \times \frac{y_{in}}{y_w} \quad (197)$$

$$P_0 = P_w^0 + P_{in}^0 \quad (198)$$

**TABLA N° 4.21**  
**VARIABLES INTERMEDIAS ESTIMADAS PARA LA SIMULACIÓN (i)**

VARIABLE	MÉTODO DE DETERMINACIÓN	VARIABLE INICIAL
$C_w$	$C_w = C_w^0 = M_w \left[ \frac{P_w^0}{RT_l^0} \right]$ (199)	$C_{wi}$
$C_{in}$	$C_{in} = C_{in}^0 = M_{in} \left[ \frac{P_{in}^0}{RT_l^0} \right]$ (200)	$C_{in i}$
$\frac{\partial P}{\partial x}$	$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{(P_0 - P_x)}{x}$ (201)	$P_0, P_x, x = X$ de la Interfase
$V_p$	Reemplazando la ecuación N° 95 en la N° 36:	
	$V_p = \frac{K_{p1}}{(C_w + C_{in})} \frac{\partial P}{\partial x}$ (202)	$K_{p1}, C_w, C_{in} \frac{\partial P}{\partial x}$

**Donde:**  $C_w$ : Concentración de vapor de agua ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $C_w^0$ : Concentración de vapor de agua en la capa superior ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $M_w$ : Peso molecular del agua ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );  $P_w^0$ : Presión de vapor de agua en la superficie (Pa);  $C_{in}$ : Concentración de aire ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $C_{in}^0$ : Concentración del inerte en la capa superior ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $M_{in}$ : Peso molecular del aire ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );  $P_{in}^0$ : Presión de inerte en la superficie (Pa);  $T_l^0$ : Temperatura inicial en la capa seca (K);  $R$ : Constante universal de los gases ( $\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ );  $\frac{\partial P}{\partial x}$ : Cambio de presión en la capa seca;  $V_p$ : velocidad convectiva del gas (vapor de agua e inertes) en la capa seca porosa;  $K_{p1}$ : Permeabilidad ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )

Dentro de los datos por estimar tenemos a la conductividad térmica de la capa congelada ( $k_{II}$ ), la capacidad calorífica efectiva de la capa ( $C_{ple}$ ), la capacidad calorífica del gas en la capa seca ( $C_{pg}$ ), la Difusividad efectiva de vapor de agua en una mezcla binaria de gas inerte y vapor de agua en la capa seca ( $D_{win,e}$ ), la Difusividad efectiva del inerte (aire) en una mezcla binaria de gas inerte y vapor de agua en la capa seca ( $D_{inw,e}$ ).

La conductividad térmica de la capa congelada ( $k_{II}$ ), fue estimada para los diversos grupos de alimentos tomando mínimo, máximo y promedio, en función de la temperatura de congelación y la composición de los alimentos de cada grupo con las relaciones de la Tabla N° 3.9A del

Anexo N°3, debido a la limitada cantidad de datos experimentales. Asimismo, se consideraron los datos de las Tablas N°3.8J, 3.9J para verificar los rangos de valores estimados con los datos experimentales.

**TABLA N° 4.22**  
**DATOS DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN**

Grupo	RANGO	$\rho_{Ie}$	$\rho_{II}$	$k_{Ie}$	$\varepsilon$	$C_{pII}$
1: Cereales	Mínimo	449,00	1141,7	0,055	0,49	1549,06
	Máximo	785,00	1545,1	0,104	0,48	1817,75
	Promedio	557,40	1428,1	0,059	0,48	1646,10
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	224,00	1006,2	0,064	0,59	1682,45
	Máximo	975,50	1334,9	0,144	0,48	1933,95
	Promedio	653,67	1054,2	0,124	0,49	1886,72
3: Frutas	Mínimo	755,50	481,0	0,016	0,69	1836,21
	Máximo	1057,00	1266,0	0,199	0,48	1993,70
	Promedio	856,00	781,6	0,071	0,48	1926,66
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	212,49	990,7	0,019	0,58	1922,50
	Máximo	751,10	1056,0	0,133	0,48	2011,84
	Promedio	481,80	1023,4	0,057	0,48	1971,16
5: Carnes	Mínimo	640,00	1021,6	0,014	0,60	1965,92
	Máximo	1080,00	1073,5	0,201	0,48	2015,76
	Promedio	860,00	1045,1	0,059	0,49	1987,28
6: Leches y derivados	Mínimo	563,00	993,0	0,022	0,67	1136,36
	Máximo	610,00	1052,4	0,081	0,48	1935,48
	Promedio	586,50	1028,7	0,043	0,54	1770,26
7: Productos azucarados	Mínimo	628,32	1402,0	0,050	0,54	1521,83
	Máximo	628,32	1481,2	0,058	0,54	1545,20
	Promedio	628,32	1449,2	0,053	0,54	1531,98
8: Leguminosas	Mínimo	628,32	1052,4	0,051	0,50	1627,91
	Máximo	628,32	1478,9	0,119	0,49	1883,50
	Promedio	628,32	1345,6	0,064	0,49	1707,74
9: Tubérculos	Mínimo	93,00	1017,3	0,009	0,67	1886,27
	Máximo	660,00	1206,2	0,042	0,48	2064,29
	Promedio	344,00	1110,2	0,026	0,48	1980,88

**Nota:**  $\rho_{Ie} = \rho_s$  : Densidad de la capa seca ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  $\rho_{II} = \rho_c$ : Densidad de la capa congelada ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $k_{Ie} = k_s$ : Conductividad térmica del sólido seco ( $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )  
 $\varepsilon$ : Fracción volumétrica del hielo, se considera como la porosidad.);  $D_{win,e} = D_{eff}$ : Difusividad efectiva del vapor de agua en una mezcla vapor de agua y gas inerte

en la capa seca considerado en situación con bajo contenido de humedad ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )  $C_{pII} = C_{pC}$ : Capacidad calorífica de la capa congelada ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

La capacidad calorífica efectiva de la capa seca ( $C_{pIe}$ ), fue considerada como el valor mínimo, máximo y promedio de los alimentos liofilizados brindados a la menor temperatura en la Tabla N° 3.9E.

La capacidad calorífica del gas en la capa seca ( $C_{pg}$ ) para una mezcla de gases fue calculada según la relación presentada por Himmelblau (1997: 411), ponderada por moles de las capacidades caloríficas de los componentes. Adicionalmente, con la ayuda del software de simulación Hysys fue simulada las capacidades caloríficas del vapor de agua y del aire en el rango de trabajo de la liofilización desde  $-60^\circ C$  hasta  $50^\circ C$ .

$$C_{pg} = \sum_{i=1}^n y_i C_{pgi} = y_w C_{pgw} + y_{in} C_{pgin} \quad (203)$$

Donde:

- $C_{pg}$  : Capacidad calorífica de una mezcla de gases ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $y_i$  : Fracción molar del componente i
- $C_{pgi}$  : Capacidad calorífica del componente i ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $y_w$  : Fracción molar del vapor de agua, entre 0 y 1
- $C_{pgw}$  : Capacidad calorífica del vapor de agua ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $y_{in}$  : Fracción molar del inerte, entre 0 y 1
- $C_{pgin}$  ; Capacidad calorífica del inerte ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

Athanasios, Liapis y Bruttini citados por Mujumdar (2006: 303) explican que  $D_{win,e}$  y  $D_{inw,e}$  en el material seco son funciones de la estructura del material, la difusividad de Knudsen, y la difusividad molecular. Las expresiones simplificadas son las siguientes:

$$D_{Kw} = 97,0 \cdot \bar{r} \cdot (T_i/M_w)^{1/2} \quad (204)$$

$$D_{Kin} = 97,0 \cdot \bar{r} \cdot (T_i/M_{in})^{1/2} \quad (205)$$

$$D_{win} = \frac{1,8583 \times 10^{-7} T_I^{3/2}}{P \sigma_{win}^2 \Omega_{win}} \left( \frac{1}{M_w} + \frac{1}{M_{in}} \right)^{1/2} \quad (206)$$

$$D_{inw} = \frac{1,8583 \times 10^{-7} T_I^{3/2}}{P \sigma_{inw}^2 \Omega_{inw}} \left( \frac{1}{M_{in}} + \frac{1}{M_w} \right)^{1/2} \quad (207)$$

$$\alpha = 1 + (N_{in} M_w / N_w M_{in}) \quad (208)$$

$$\beta = 1 + (N_w M_{in} / N_{in} M_w) \quad (209)$$

$$D_{win,e} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left( \frac{1}{(1 - \alpha y_w) / D_{win} + 1 / D_{Kw}} \right) \quad (210)$$

$$D_{inw,e} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left( \frac{1}{(1 - \beta y_{in}) / D_{inw} + 1 / D_{Kin}} \right) \quad (211)$$

$$\Omega = \frac{1,06036}{T^{*0,15610}} + \frac{0,19300}{\exp(0,47635T^*)} + \frac{1,03587}{\exp(1,52996T^*)} + \frac{1,76474}{\exp(3,89411T^*)} \quad (212)$$

$$T^* = \frac{\kappa T}{\varepsilon_{AB}} = \frac{T}{\sqrt{\frac{\varepsilon_A}{\kappa} \times \frac{\varepsilon_B}{\kappa}}} \quad (213)$$

Donde:

- $D_{Kw}$  : Difusividad de Knudsen del vapor de agua ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $D_{Kin}$  : Difusividad de Knudsen del aire (inerte) ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\bar{r}$  : Radio de poro promedio de la capa seca (m)
- $T_I$  : Temperatura de la capa seca (K) dependiendo del alimento
- $M_w$  : Peso molecular del agua= 18,016 kg.kmol<sup>-1</sup>
- $M_{in}$  : Peso molecular del aire (inerte) = 28,97 kg.kmol<sup>-1</sup>
- $D_{AB}$  : Difusividad molecular de una mezcla binaria de vapor de agua y gas inerte ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) considerando  $D_{win} = D_{inw}$  , debido a la correlación usada
- $P$  : Presión total en la capa seca ( $N \cdot m^{-2}$ ), considerado como la presión mínima de vacío alcanzado equivalente a 4 Pa.
- $\sigma$  : Diámetro de colisión promedio del vapor de agua y de inerte (nm), considerando que  $\sigma_{win} = \sigma_{inw}$  , se estima como  $0,5 \times (r_w + r_{in}) = 0,5 \times (0,2641 + 0,3711)nm = 0,3176 nm$ , donde  $r_w$  y  $r_{in}$  la separación molecular durante el choque (Treybal, 1988: 35)
- $\Omega$  : Integral de colisión del vapor de agua y de inerte (-) para la difusividad, considerando que  $\Omega_{win} = \Omega_{inw}$
- $D_{win,e}$  : Difusividad efectiva de poro de vapor de agua en una mezcla de vapor de agua y de gas inerte en la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $D_{inw,e}$  : Difusividad efectiva de poro del inerte en una mezcla de vapor de agua y de gas inerte en la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\varepsilon$  : Fracción vacía en la capa seca tomada como la porosidad del alimento.
- $\tau$  : Factor de tortuosidad de la capa seca considerado como 4,2 según el segundo objetivo realizado

- $N_w$  : Flux másico de vapor de agua en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  
 supuesta como 5 veces  $N_{in}$  debido a la mayor proporción de agua  
 en comparación de aire presente en los tejidos del alimento  
 $N_{in}$  : Flux másico de gas inerte en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $A$  : Parámetro (-)  
 $\beta$  : Parámetro (-)  
 $\frac{\epsilon_A}{K}$  : Constantes de fuerzas de gases, aire=78,6K, agua=809,1K  
 $T^*$  : Variable representativa de las fuerzas de gases (-)

La difusividad o coeficiente de difusión ( $D_{win}$ ,  $D_{inw}$ ) es una propiedad que depende de la temperatura, presión y de la naturaleza de los compuestos. Asimismo, cuando no se cuentan con datos experimentales, están basadas en la teoría cinética de los gases, siendo recomendada la correlación de Wilke-Lee para una mezcla de gases la cual tiene la misma forma que la correlación ya presentada (Treybal, 1988: 34).

El flujo total de vapor de agua y de inerte es calculado a partir de la siguiente expresión, teniendo en cuenta que el flujo de vapor de agua es más representativo que la del aire por la proporción en la que se encuentran en el alimento:

$$N_t = N_w + N_{in} \cong N_w \quad (214)$$

Donde:

- $N_{in}$  : Flux másico de gas inerte en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $N_w$  : Flux másico de vapor de agua en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $N_t$  : Flux másico total en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

El término de velocidad de cambio en los balances de masa y de energía fue considerada despreciable debido a que el agua adsorbida o ligada es más difícil de eliminar y requiere mayor tiempo en operaciones de secado, haciendo el término  $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  pequeño. Asimismo, la consideración



de éste término acompleja los cálculos al estar en función de la variable independiente principal (tiempo) una vez discretizadas las ecuaciones en el Anexo N° 11. Habiendo establecidos las diversas variables citadas anteriormente se procede a realizar el cálculo iterativo según el programa iterativo descrito en el Anexo N° 12 en el programa Matlab.

**TABLA N° 4.23**  
**VARIABLES INTERMEDIAS ESTIMADAS PARA LA SIMULACIÓN (II)**

VARIABLE	MÉTODO DE DETERMINACIÓN	VARIABLE INICIAL
$F$	Utilizando el Gráfico N° 7.1A, a partir de las consideraciones geométricas del apartado 4.8.2	$r_1, r_2$ y $L_{sep}$
$V$	Ecuación (n) del Anexo N° 10	$N_w, \rho_{Ie}$ , de las Tablas ..
$N_w$	Gráfico N° 5.38	Tiempo, alimento
$\alpha_{Ie}$	Relación N° 13,	$k_{Ie}, \rho_{Ie}, C_{ple}$
$\alpha_{II}$	Relación N° 13.	$k_{II}, \rho_{II}, C_{pII}$

**Donde:**  $F$ : Factor de visión de Hottel ;  $V_p$ : velocidad convectiva del gas (vapor de agua e inertes) en la capa seca porosa;  $N_w$ : flux másico del vapor de agua en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $r_1$ : Radio del plato de liofilizador (m);  $r_2$ : Radio del plato de calentamiento del liofilizador;  $L_{sep}$ : Separación entre el superficie superior del alimento y el plato de calentamiento (m)

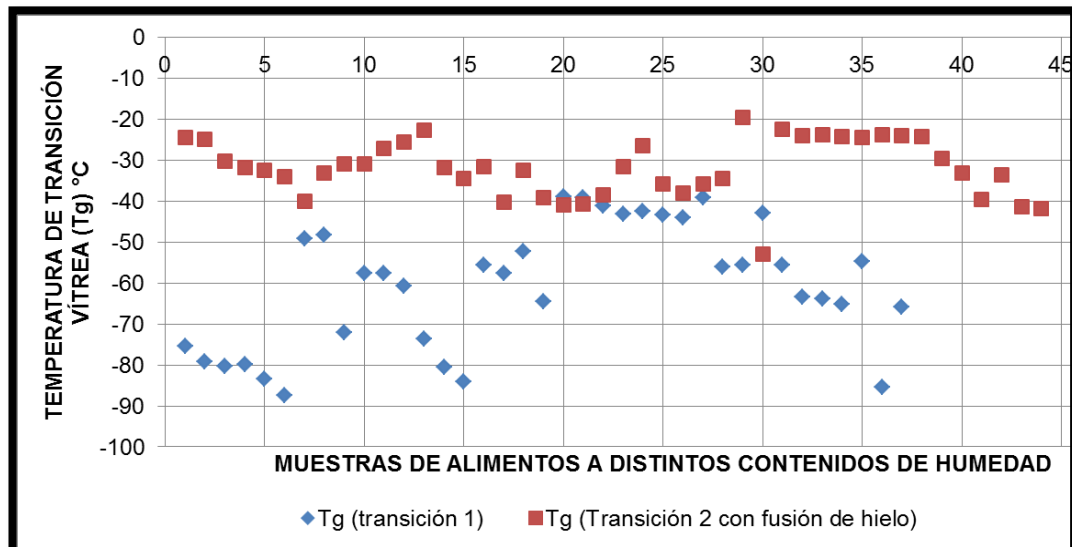
## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados del desarrollo del primer objetivo

#### 5.1.1. Rango de temperatura de congelación de los alimentos durante la liofilización

Se graficaron y analizaron para los casos correspondientes a la transición 1 y a la transición 2 brindados en la bibliografía.

**GRÁFICO N° 5.1**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2 PARA DIVERSOS ALIMENTOS**



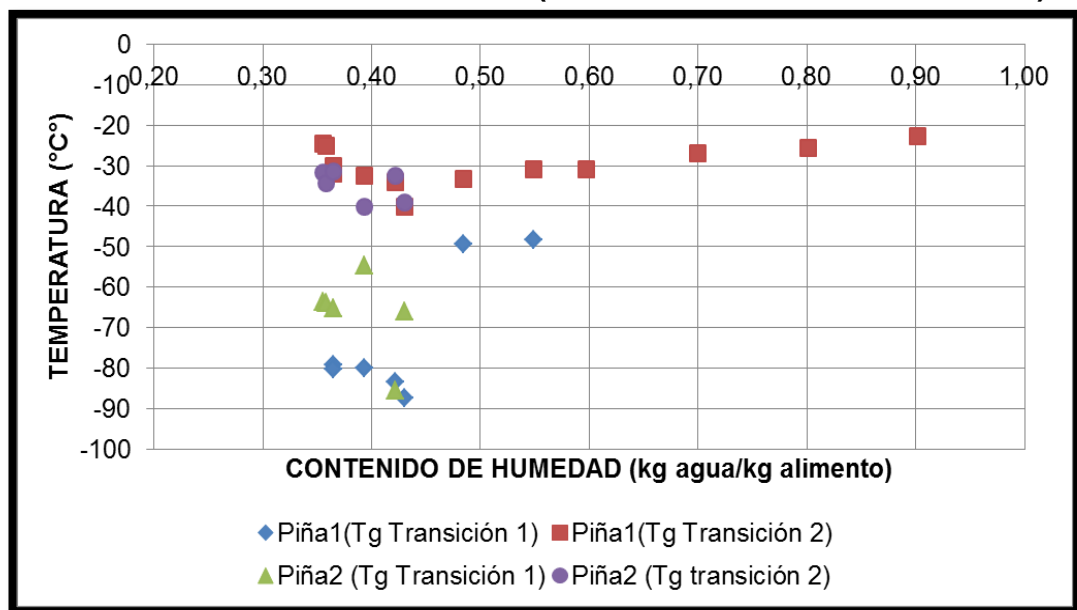
**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

**Nota:** véase la Tabla N° 3.1A y Tabla N°3.1B del Anexo N° 3)

En el gráfico anterior, se observa que los datos referidos a la temperatura de transición vítrea durante la transición 1 (primera medición) en su mayoría resultan menores a los correspondientes a la transición 2 (segunda medición, con fusión de hielo). Asimismo, muchos de los valores del primer caso mencionado están por debajo de los -50°C.

Los gráficos de las temperaturas de transición vítrea en los estados de transición 1 y 2, con distintos contenidos de agua por cada alimento, se presentan a continuación:

**GRÁFICO N° 5.2**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA PIÑA PARA**  
**DISTINTOS CASOS DE MEDICIÓN (TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2)**

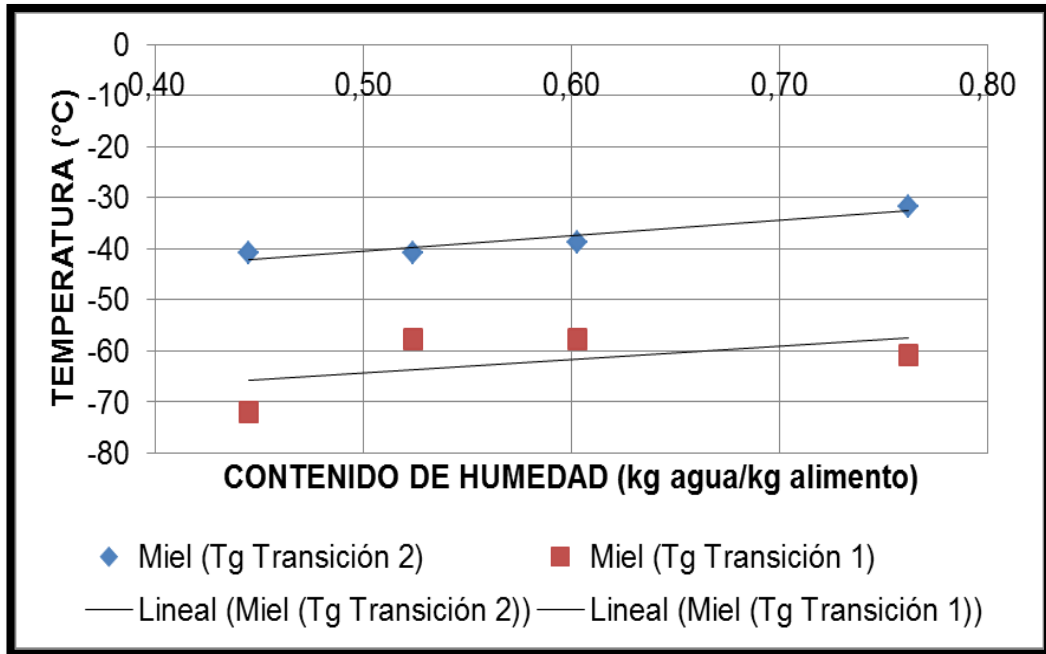


**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

**Nota:** Piña 1: (Telis y Sobral, 2001; sin recocido, método DSC, velocidad de congelamiento: 10°C/min, tamaño de la muestra: 10 mg); Piña 2: (Telis y Sobral, 2001; sin recocido, método DSC, velocidad de congelamiento: 10°C/min, tamaño de la muestra: 10 mg)

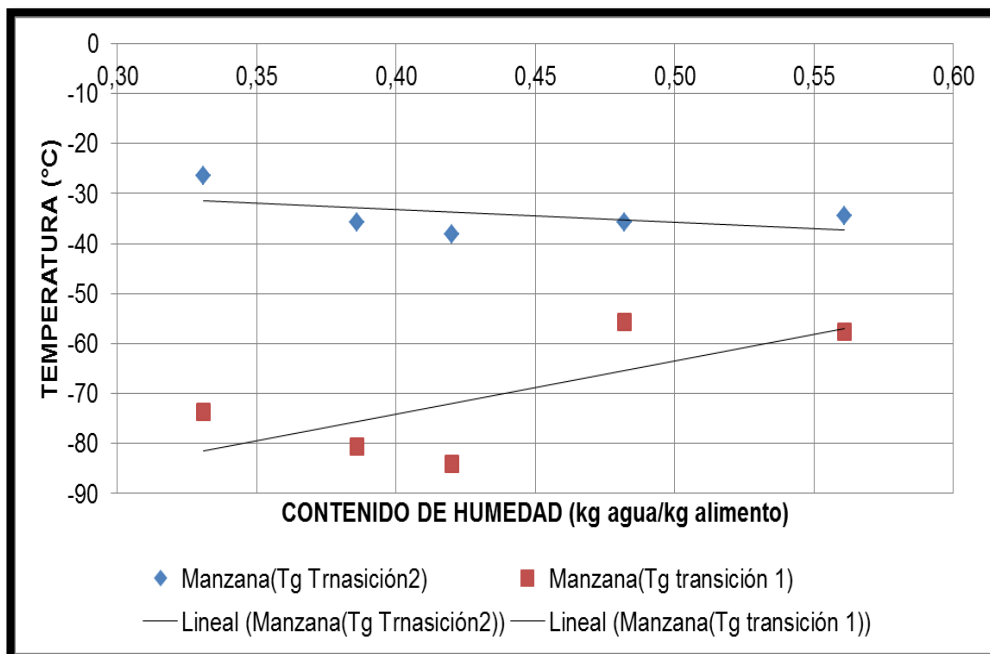
A partir del gráfico anterior, se deduce que, los datos obtenidos experimentalmente para la manzana, no muestran una tendencia determinada, con respecto al contenido de humedad. Para este caso la temperatura de transición vítrea para la transición 2 y para contenidos de humedad elevados bordean los -20°C; mientras que la  $T_g$  para la transición 1, se encuentra por debajo de los -50°C, pero solo fue medida para contenidos de humedad bajo.

**GRÁFICO N° 5.3**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA MIEL PARA**  
**DISTINTOS CASOS DE MEDICIÓN (TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2)**



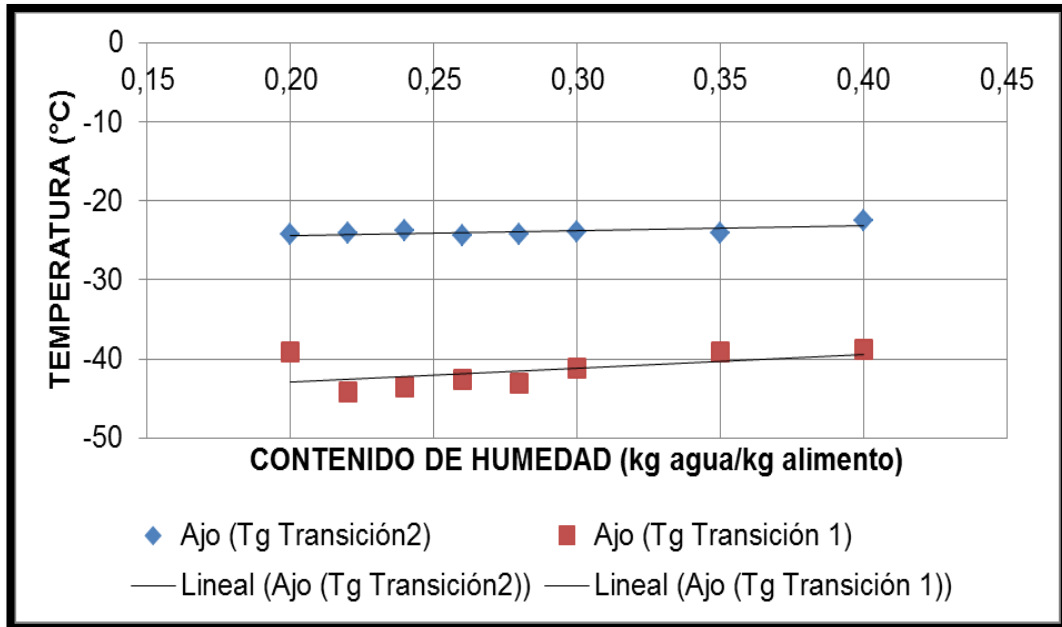
**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

**GRÁFICO N° 5.4**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA MANZANA PARA**  
**DISTINTOS CASOS DE MEDICIÓN (TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2)**



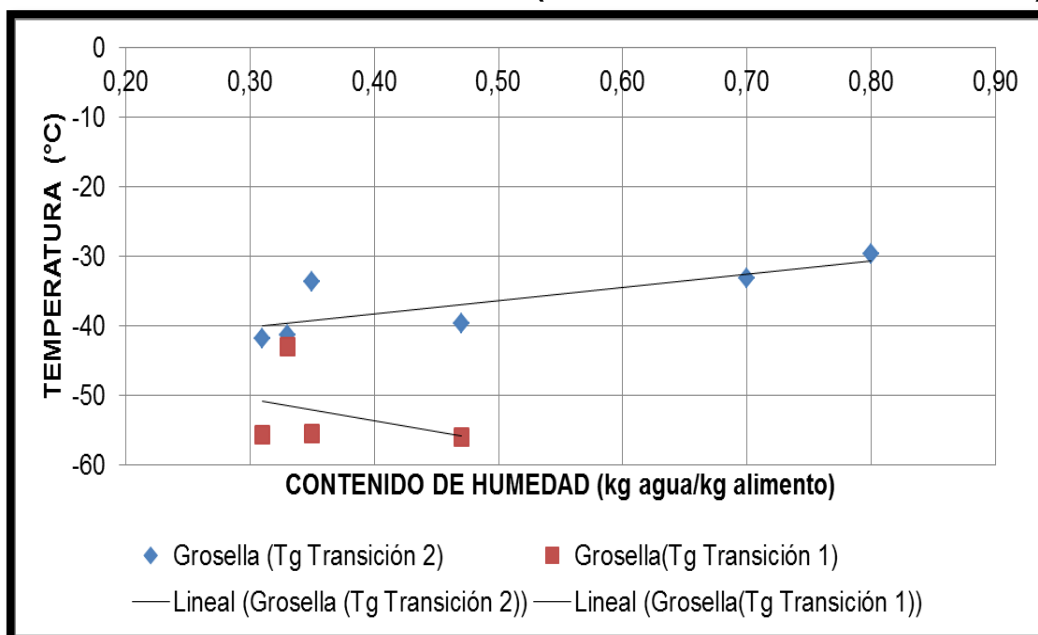
**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

**GRÁFICO N° 5.5**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DEL AJO PARA**  
**DISTINTOS CASOS DE MEDICIÓN (TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2)**



**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

**GRÁFICO N° 5.6**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA GROSELLA PARA**  
**DISTINTOS CASOS DE MEDICIÓN (TRANSICIÓN 1 Y TRANSICIÓN 2)**



**Fuente:** Adaptado de Rahman (2009:276)

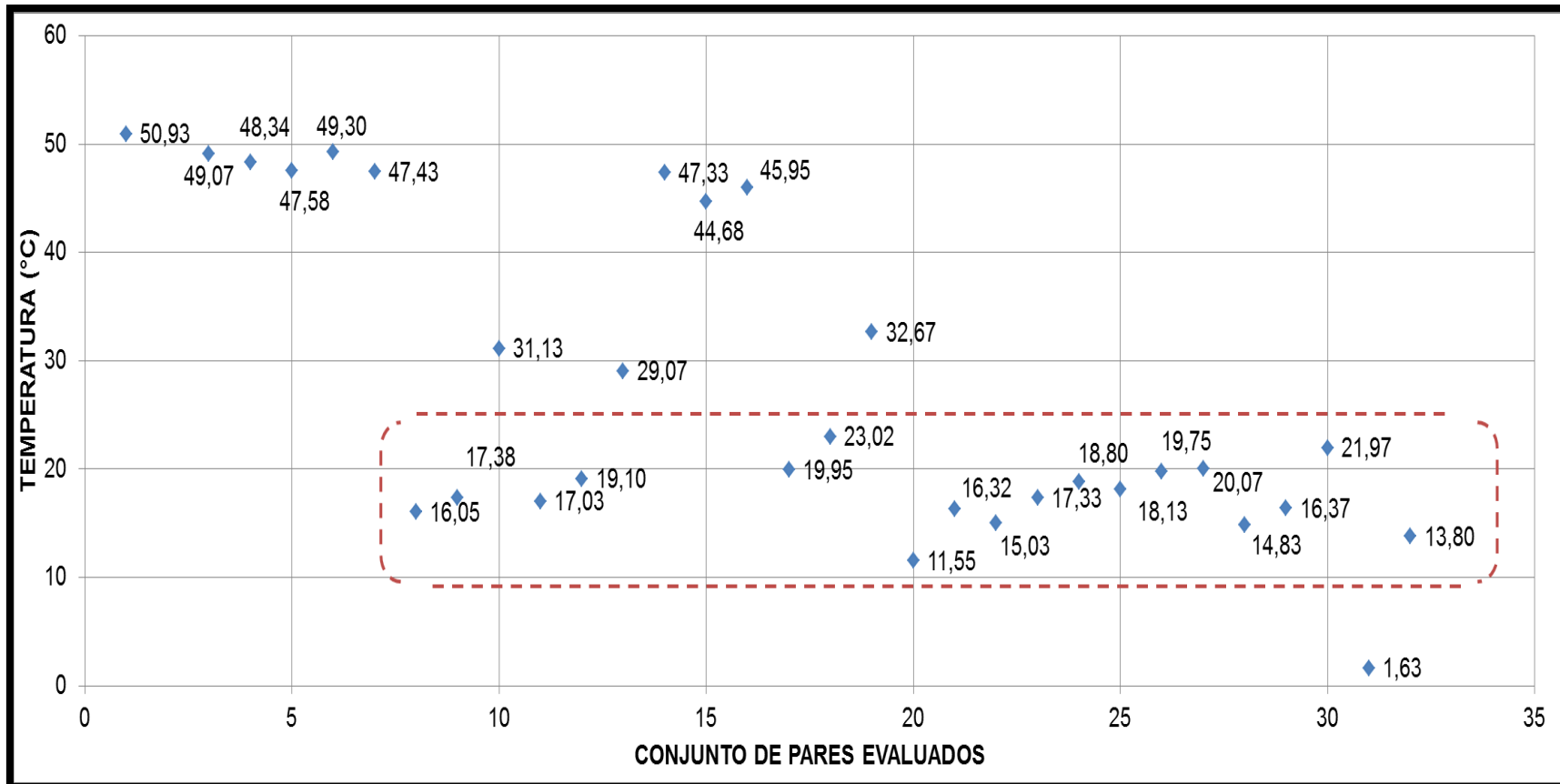
De igual forma, la fresa presenta una temperatura de transición vítrea en la transición 1 por debajo de los  $-50^{\circ}\text{C}$  y en la transición 2 por encima de los  $-20^{\circ}\text{C}$ , mientras que la uva presenta temperaturas de transición vítrea para ambos casos muy parecidas y por debajo de  $-50^{\circ}\text{C}$  para un contenido de humedad bajo.

De los gráficos anteriormente mostrados, se observa que no existe una tendencia definida de la temperatura de transición vítrea con respecto al contenido de humedad en cada uno de los alimentos.

Adicionalmente, a lo indicado por Rahman (2008:372) quien indica que la temperatura de colapso debería encontrarse  $20^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura de transición vítrea, solo podría ser válido considerando la  $T_g$  de transición 1, puesto que si es considerada esta regla en la transición 2, la temperatura de colapso estaría cercana al rango de temperatura inicial de congelamiento (véase Anexo N° 3.2) lo que sería incoherente, por ser ésta última muy elevada.

Por otro lado, las temperaturas de transición vítrea para diversos alimentos (véase Anexo N° 3.1) se encuentran por encima de  $-50^{\circ}\text{C}$ , deduciéndose que éstas corresponderían a las mediciones durante la transición 2, aunque no lo especifiquen los autores. En el gráfico mostrado a continuación, se muestra que la mayor parte de las diferencias entre las  $T_g$  de transición 1 y 2, bordean los  $20^{\circ}\text{C}$ , por lo que la  $T_g$  en la transición 2, puede ser considerada cercana o similar a la temperatura de colapso.

**GRÁFICO N° 5.7**  
**DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS ENTRE T<sub>g</sub> DE TRANSICIÓN 2 MENOS LA TRANSICIÓN 1 DE DISTINTOS ALIMENTOS**



Fuente: Adaptado de Rahman (2009:276)

Se correlacionaron las temperaturas de colapso ( $T_{clp}$ ) citadas por la bibliografía con sus composiciones de las grupo de las frutas, obteniendo una índice de correlación muy cercano a la unidad ( $R^2= 0,9841$ ). A continuación se presentan los resultados:

**TABLA N° 5.1**  
**CORRELACIÓN DE LA TEMPERATURA DE COLAPSO EN FUNCIÓN**  
**DE LA COMPOSICIÓN PROXIMAL EN LAS FRUTAS**

COEFICIENTES DE LA CORRELACIÓN							
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	
1057,33	-1109,57	-119,44	3492,84	-1061,71	-2634,83	-1250,07	
$r^2$	0,9841						
Rangos	Composición proximal						$T_{clp}$ (°C)
	$y_a$	$y_p$	$y_g$	$y_{ca}$	$y_{ce}$	$y_f$	
Mínimo	0,740	0,000	0,000	0,088	0,000	0,000	-46
Máximo	0,895	0,010	0,008	0,230	0,010	0,014	-15

**Nota:**  $y_a$ : Composición proximal del agua,  $y_p$ : proteína;  $y_g$ : grasa;  $y_{ca}$ : carbohidrato;  $y_{ce}$ : ceniza;  $y_f$ : fibra;  $T_{clp}$ : Temperatura de colapso

La verificación del modelo propuesto para determinar la temperatura de colapso de las frutas se presenta a continuación:

**TABLA N° 5.2**  
**COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURAS TEÓRICAS Y**  
**CALCULADAS DE LAS FRUTAS**

ALIMENTO	TEMPERATURA DE COLAPSO		%ERROR
	TEÓRICA	CALCULADA	
Naranja	-43,0	-41,97	2,39%
Limón	-36,5	-38,02	4,16%
Manzana	-41,5	-43,43	4,64%
Piña	-37,0	-36,36	1,74%
Uva	-46,0	-44,45	3,36%
Toronja	-30,5	-30,20	0,98%
Fresa	-15,0	-14,98	0,13%
Plátano	-35,0	-35,49	1,39%
Durazno	-35,61	-35,61	1,09%

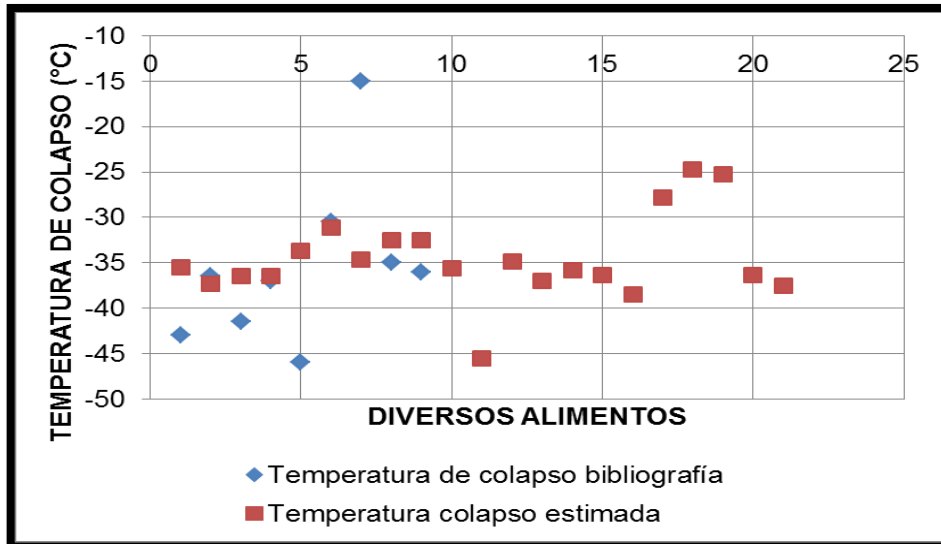


**TABLA N° 5.3**  
**TEMPERATURAS DE COLAPSO ( $T_{clp}$ ) Y DE CONGELACIÓN**  
**( $T_{cgn}$ ) ESTIMADAS DE LOS ALIMENTOS ELEGIDOS**

GRUPO	ALIMENTOS	$T_{clp}$ (°C)	$T_{cgn}$ (°C)	Ref.
1	Maíz, grano fresco	-15	-20	(a)
2	Verdura promedio	-41 a -12	-46 a -17	(b)
	Ají amarillo molido	-23,3	-28,3	(c)
	Lechuga americana	-14,5	-19,5	(d)
3	Fruta promedio	-46 a -12	-51 a -17	(e)
	Tamarindo	-32,9	-37,9	(f)
	Agua de Coco	-32,9	-37,9	(f)
4	Pescado promedio	-40 a -6,3	-45 a -11,3	(g)
	Machas	-14,2	-19,2	(h)
	Pota	-14,2	-19,2	(h)
5	Carne promedio	-40 a -5	-45 a -10	(i)
	Carne de pato	-16,5	-21,5	(j)
	Criadillas de res	-16,5	-21,5	(j)
6	Leche promedio	-27	-32	(k)
	Queso mantecoso	-24	-29	(l)
	Leche fresca	-27	-32	(k)
7	Chancaca	-40,8 a -31,7	-45,8 a -36,7	(n)
	Miel de abeja	-40,8 a -31,7	-45,8 a -36,7	(n)
	Miel de caña	-40,8 a -31,7	-45,8 a -36,7	(n)
8	Leguminosa promedio	-25	-30	(o)
	Frijol tarhui o chocho	-25	-30	(o)
	Frijol shimpe fresco	-25	-30	(o)
9	Papa promedio	-12	-17	(p)
	Ashipa	-12	-17	(p)
	Arracacha o racacha	-12	-17	(p)

**Nota:**(a)  $T_{clp}=T_g$  del maíz (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1); (b)  $T_{clp}$ =rango de  $T_g$  Grupo 2 de la Tabla N°3.1D (Anexo 3.1); (c) $T_{clp}$ =promedio $T_g$  Grupo 2 (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1) (d) $T_{clp}$ =promedio  $T_g$  de la espinaca y el brócoli (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1); (e) $T_{clp}$ =rango  $T_g$  del Grupo 3 (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1) y  $T_{clp}$  del Grupo 3 (Tabla N°4.2); (f) $T_{clp}$ =promedio  $T_g$  Grupo 3 (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1) y  $T_{clp}$  del Grupo 3 (Tabla N°4.2); (g): Rango de  $T_g$  Grupo 4 (Tabla N°3.1C y 3.1D), sin considerar los valores menores a -50°C (Anexo 3.1); (h) Promedio de  $T_g$  del Grupo 4 de la Tabla N°3.1C y 3.1D, sin considerar los valores menores a -50°C (Anexo 3.1); (i) $T_{clp}$ =Rango  $T_{clp}$  Grupo 5 de Tabla N°4.2 y  $T_g$  Grupo 5 (Tabla N°3.1C y 3.1D, Anexo 3.1); (j)Promedio  $T_{clp}$  Grupo 5 de Tabla N°4.2 y  $T_g$ del grupo 5 (Tabla N°3.1C y Tabla N°3.1D, Anexo 3.1); (k) $T_{clp}$ =promedio Grupo 6 Tabla N°4.2 y Tabla N°3.1D (Anexo 3.1); (l) $T_{clp}=T_{clp}$  Tabla N°4.2; (n)  $T_{clp}$ =Rango 20°C por encima  $T_g$ (transición 1) y  $T_g$ (transición 2) de la Tabla 3.1A (Anexo 3.1); (o)  $T_{clp}=T_g$ arveja (Tabla N°3.1D, Anexo 3.1); (p): $T_{clp}=T_{clp}$  papa de la Tabla N°4.2.

**GRÁFICO N° 5.8**  
**TEMPERATURAS DE COLAPSO ESTIMADAS DE LAS FRUTAS EN**  
**FUNCIÓN DE SU COMPOSICIÓN**

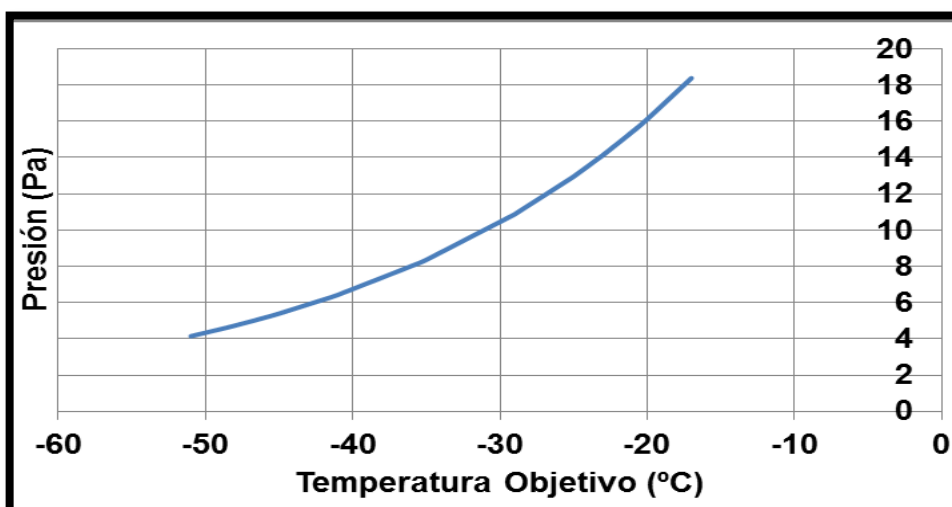


**Nota:** Para el cálculo se utilizaron 21 frutas cuyas composiciones se encontraban entre los rangos mínimo y máximo de la relación de 87 frutas brindada (véase la Tabla N° 2.C del Anexo N°2)

**5.1.2. Rango de presiones de vacío durante la liofilización**

La representación gráfica de la presión de la cámara en función de la temperatura objetivo se presenta a continuación:

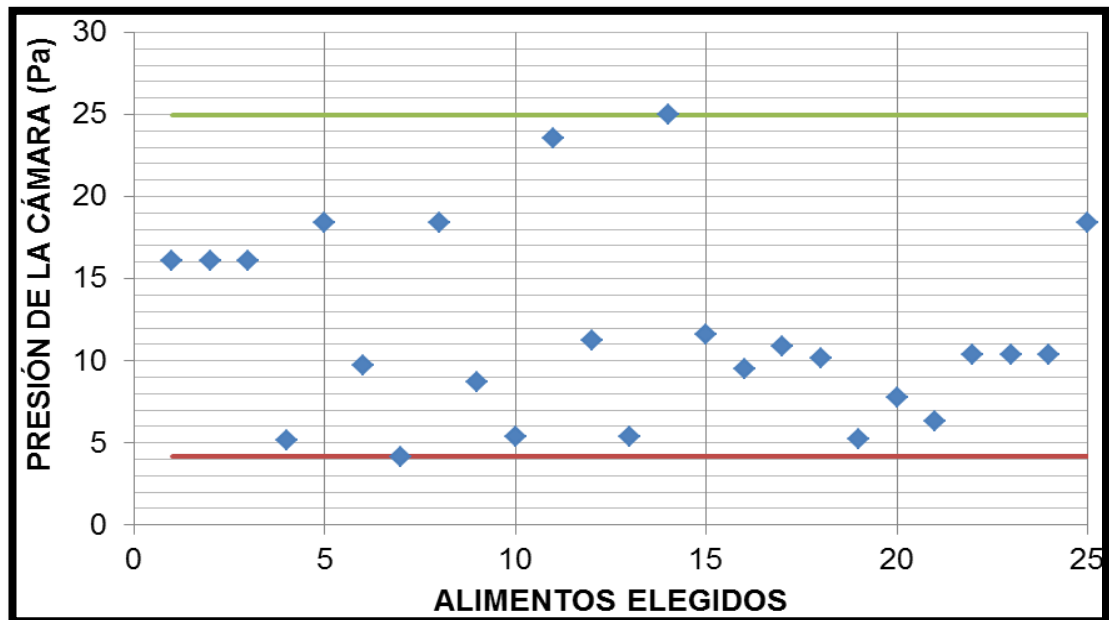
**GRÁFICO N° 5.9**  
**PRESIÓN DE LA CÁMARA RECOMENDADA EN FUNCIÓN DE LA**  
**TEMPERATURA OBJETIVO DE CONGELACIÓN**



**Fuente:** Adaptado de lo citado por Ahmed, et al., (2012: 634),

Realizado el cálculo de la Presión de la cámara, en función de las temperaturas de congelación objetivo ( $T_{cgn}$ ) de los alimentos elegidos se encontró un valor presión mínimo de 4,15 Pa (0,03 mmHg=  $4,1 \cdot 10^{-2}$ mBar) y un máximo de 18,38 Pa (0,14 mmHg=  $1,8 \cdot 10^{-1}$ mBar) para el grupo de datos evaluados, para fines prácticos del diseño se considera una presión absoluta de 4 Pa (0,03 mmHg= $3,9 \cdot 10^{-2}$  mBar).

**GRÁFICO N° 5.10**  
**PRESIÓN DE LA CÁMARA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE CONGELACIÓN OBJETIVO DE DIVERSOS ALIMENTOS**



### 5.1.3. Rango de temperaturas del condensador de agua sublimada durante el ciclo de liofilización

La correlación polinómica de tercer grado de la temperatura en función de la presión de vapor entre 4 y 20 Pa:

$$T = -58,8461 + 2,6876 \times P - 0,1281 \times P^2 + 0,0025 \times P^3 \quad (215)$$

Donde:

T : Temperatura (°C)

P : Presión (Pa)

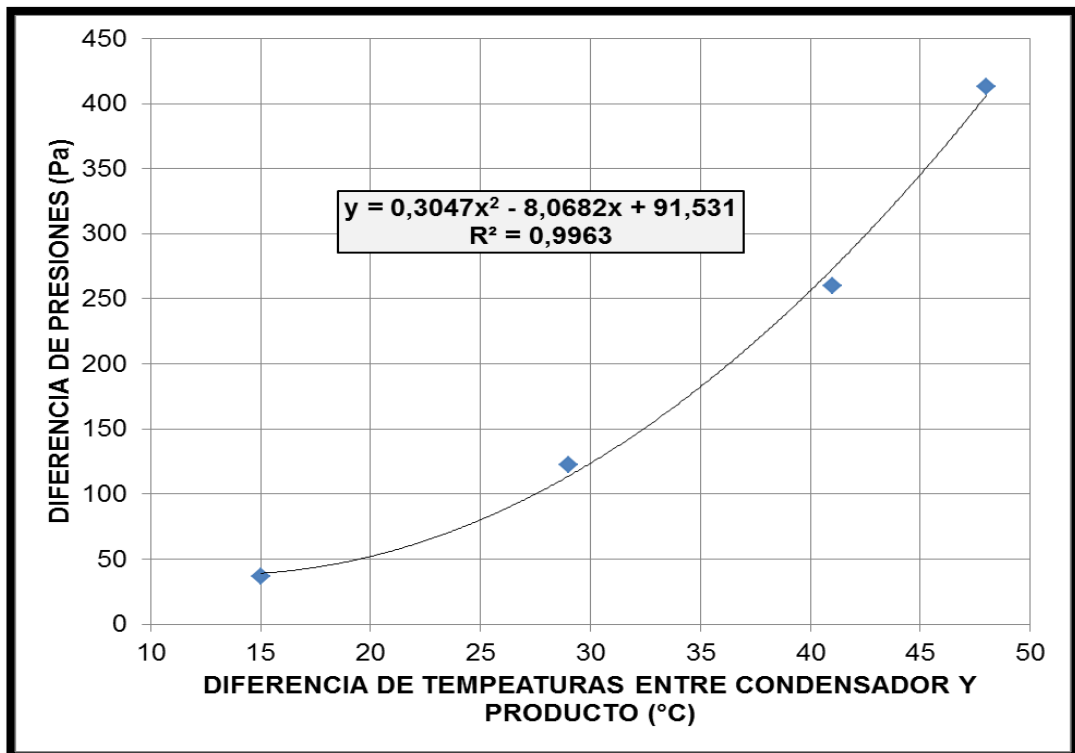
**TABLA N° 5.4**  
**DIFERENCIA DE PRESIONES EN FUNCIÓN DE LA DIFERENCIA DE**  
**TEMPERATURAS ENTRE EL CONDENSADOR Y EL PRODUCTO**

PRODUCTO	TEMPERATURA (°C)		DIFERENCIA DE PRESIONES (Pa) (b)
	SUPERFICIE CONDENSADOR (a)	DIFERENCIA	
-5	-53	48	413
-10	-51	41	260
-18	-47	29	123
-30	-45	15	37

**Nota:** (a) La temperatura de la superficie del condensador para cada temperatura del producto, fue extraída en el punto donde la gráfica empieza a disminuir rápidamente, ésta fue visualizada mediante el uso de una línea tangente horizontal (b) Se cambiaron las unidades considerando: 1000 micromercurios=1 mmHg, 760 mmHg=101325 Pa

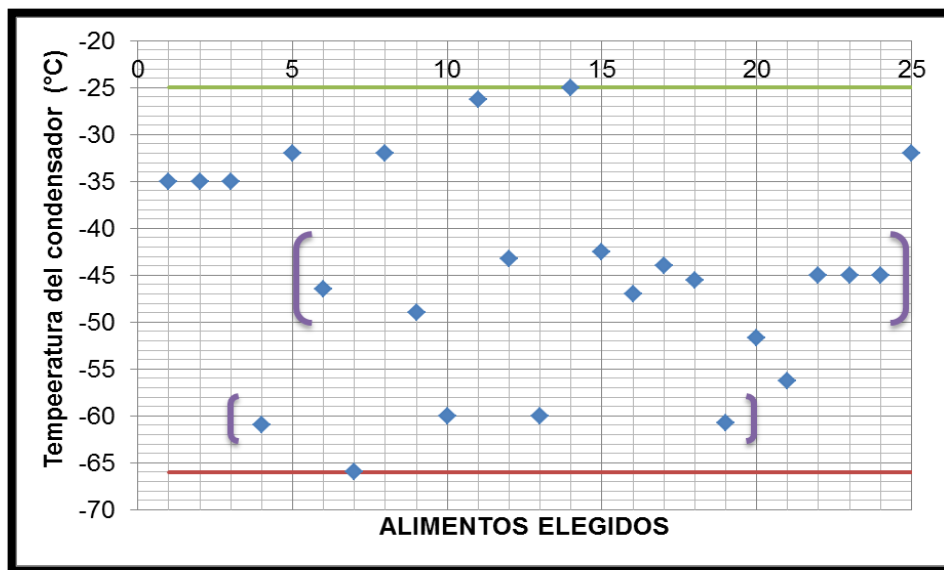
En la tabla anterior se visualiza que la diferencia de temperaturas entre el producto y la superficie del condensador es directamente proporcional fuerza impulsora de extracción del agua sublimada.

**GRÁFICO N° 5.11**  
**DIFERENCIA DE PRESIONES EN FUNCIÓN DE LAS DIFERENCIAS DE**  
**TEMPERATURA ENTRE EL CONDENSADOR Y EL PRODUCTO**



De la gráfica anterior, se aprecia que una diferencia de temperaturas entre el producto y el condensador de 15°C para temperaturas del producto por debajo de los -30°C, este último valor se considerará para todos los casos evaluados.

**GRÁFICO N° 5.12  
TEMPERATURAS DEL CONDENSADOR PARA VARIOS ALIMENTOS**



Utilizando las temperaturas de congelación mínimas, máximas y promedios para cada grupo de alimentos, se deduce el rango de temperatura del condensador necesario para cada grupo de alimentos, considerándola 15°C menor; y a partir de todo el conjunto de datos se obtuvo una temperatura promedio del condensador de -44,6°C, una mediana de -45°C, un valor máximo de -25°C (en el caso de congelación de alimento a -10°C en el Grupo N°5 de las carnes), y un mínimo de -66°C (en el caso de congelación a -51°C en el Grupo N°3 de las Frutas).

Adicionalmente, si la temperatura del condensador es -60°C, la cual es menor aún que la temperatura mínima de -51°C para el grupo de

alimentos, se tiene una presión de vapor según la curva de equilibrio de vapor de agua de 1,1 Pa siendo éste menor a la presión mínima recomendado en el apartado 5.1.2 (4,15 Pa), para coherencia de cálculos en algunos se consideró 1,1 Pa.

#### **5.1.4. Rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario o desorción**

El beta-caroteno y el retinol como pro vitaminas de la vitamina A y ésta última, se presentan en cantidades importantes en los grupos de alimentos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 9; por lo que deben ser trabajados a temperaturas aún menores a los 50°C). Las vitaminas B1, B2 y B3 son altamente resistentes a las temperaturas, por lo que se debe considerar principalmente el contenido de vitamina C apreciable en los grupos de alimentos 2 y 3, puesto que ésta es una sustancia termosensible y es la más volátil de los nutrientes, así que su degradación es usada como un indicador de calidad (Smith et al. 2004: 486). Según lo indicado en la metodología sería factible calentar la muestra hasta 40°C como máximo.

**TABLA N° 5.5  
DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS ENTRE EL PRODUCTO FINAL Y EL PLATO DE CALENTAMIENTO**

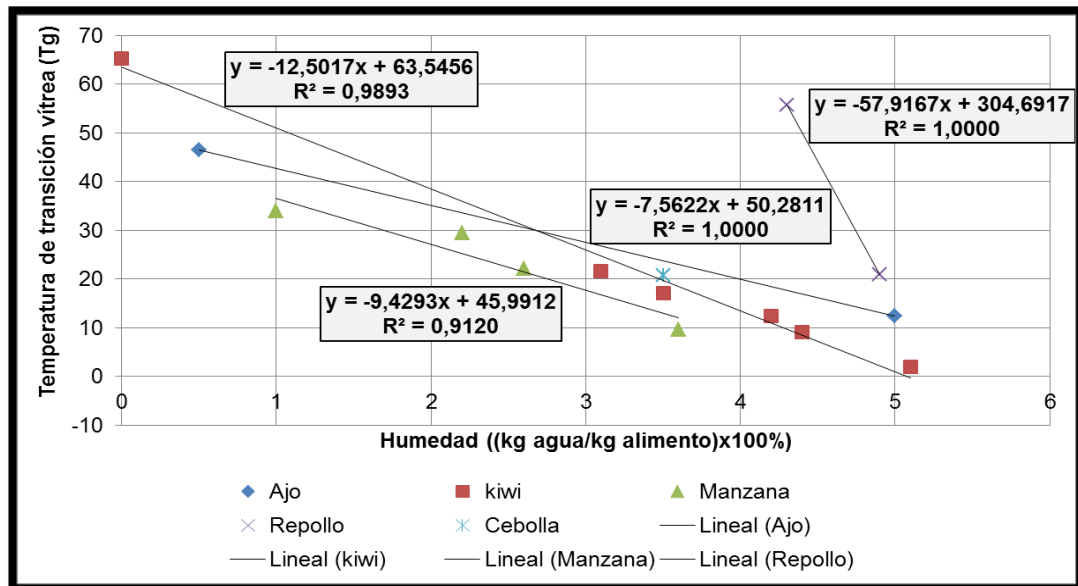
Temperatura del plato de calentamiento (°C)	Temperatura final del producto (°C)	Diferencia de temperaturas (°C)
24,85	22,98	1,87
50	42,84	7,16
70	59,90	10,10

**Nota:** Los datos fueron extraídos con el programa plotdigitizer del Gráfico N° 4.2

Se deduce del cuadro anterior que la desviación promedio de las temperaturas del plato de calentamiento y el producto puede ser

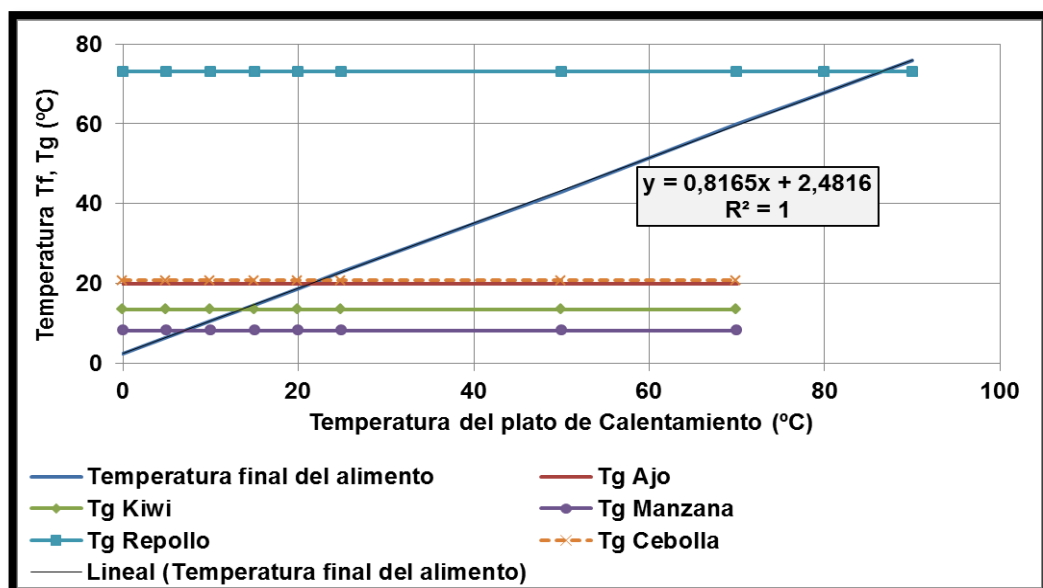
considerada como 6,38°C. Usando las temperatura de transición vítrea de los alimentos (véase Tabla N° 3.1 E del Anexo N°3), se determinó la Tg.

**GRÁFICO N° 5.13  
TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LOS ALIMENTOS**



De acuerdo con la Gráfica anterior, se deduce que las temperaturas de transición vítrea para estos alimentos se consideran casi constantes.

**GRÁFICO N° 5.14  
DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PLATO DE CALENTAMIENTO MÁXIMO DURANTE LA DESORCIÓN**



**TABLA N° 5.6  
DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA MÁXIMA DEL PLATO DE  
CALENTAMIENTO**

<b>Alimento</b>	<b>T<sub>g</sub> (°C) para 4% humedad</b>	<b>Temperatura máxima de plato T<sub>smax</sub> (°C)</b>	<b>Diferencia de temperaturas (°C)</b>
Ajo	20,03	21,49	1,46
Kiwi	13,54	13,54	0,0027
Manzana	8,27	7,09	-1,18 (*)
Repollo	73,02	86,39	13,37
Cebolla	20,75	22,37	1,62

**Nota:** (\*) Se aprecia una desviación errónea usando la Temperatura del producto en función de la temperatura del plato para temperaturas bajas de transición vítrea.

De la Tabla anterior, se descartan los resultados para el repollo por ser muy elevados, según lo presentado en la evaluación nutricional vitamínica. Para todos los alimentos de la tabla anterior sin considerar a la manzana (valor atípico) se tiene una diferencia de temperatura promedio con respecto al plato de calentamiento de 4,11°C, cercano al valor de 6,38 deducido anteriormente.

**TABLA N° 5.7  
DESVIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA Y LA  
TEMPERATURA DEL PLATO DE CALENTAMIENTO**

<b>Casos</b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>T<sub>smax</sub></b>	<b>T<sub>smax</sub>-T<sub>g</sub></b>
1	8,2738	7,09	-1,18
2	10,00	9,21	-0,79
3	20,00	21,45	1,45
4	30,00	33,70	3,70
5	40,00	45,95	5,95
6	50,00	58,20	8,20
7	60,00	70,44	10,44
8	70,00	82,69	12,69



El resultado atípico para la manzana se analizó asumiendo diferentes temperaturas de transición vítrea, y verificando la desviación de la temperatura del plato de calentamiento calculada del intercepto, de esta manera se verificó que la desviación se hace apreciable desde rangos mayores a los 40°C.

**TABLA N° 5.8**  
**TEMPERATURAS MÁXIMAS RECOMENDADAS DURANTE EL SECADO**  
**SECUNDARIO ( $T_{ass}$ ) Y DEL PLATO ( $T_{pc}$ )**

GRUPO	ALIMENTOS	$T_{ass}$ (°C)	$T_{pc}$ (°C)	Notas
1: Cereales y Derivados	Maíz, grano fresco	50	54,11	(a)
2: Verduras y Hortalizas	Verdura promedio	40	44,11	(b)
	Ají amarillo molido	40	44,11	(b)
	Lechuga americana	40	44,11	(b)
3: Frutas	Fruta promedio	40	44,11	(b)
	Tamarindo	40	44,11	(b)
	Agua de Coco	40	44,11	(b)
4: Pescados y Mariscos	Pescado promedio	50	54,11	(a)
	Machas	50	54,11	(a)
	Pota	50	54,11	(a)
5: Carnes	Carne promedio	50	54,11	(a)
	Carne de pato	50	54,11	(a)
	Criadillas de res	50	54,11	(a)
6: Leches y derivados	Leche promedio	50	54,11	(a)
	Queso mantecoso	50	54,11	(a)
	Leche fresca	50	54,11	(a)
7: Productos azucarados	Chancaca	50	54,11	(c)
	Miel de abeja	50	54,11	(c)
	Miel de caña	50	54,11	(c)
8: Leguminosas	Leguminosa promedio	50	54,11	(c)
	Frijol tarhui o chocho	50	54,11	(c)
	Frijol shimpe fresco	50	54,11	(c)
9: Tubérculos	Papa promedio	50	54,11	(a)
	Ashipa	50	54,11	(a)
	Arracacha o racacha	50	54,11	(a)

**Nota:**(a) Según la deducción dependiendo del contenido vitamínico; (b) Según temperatura recomendada para alimentos con alto contenido de vitamina C; (c) No se cuenta con información, se considera 50°C. Las temperaturas pueden ser aún menores.

## 5.2. Resultados del segundo objetivo

### 5.2.1. Resultados del diseño del sistema de platos de liofilización

#### a) Propiedades del alimento necesarias para calcular el espesor del alimento en función del tiempo de liofilización

El tamaño de poro de alimentos liofilizados, requerida para la estimación de la permeabilidad se presenta a continuación:

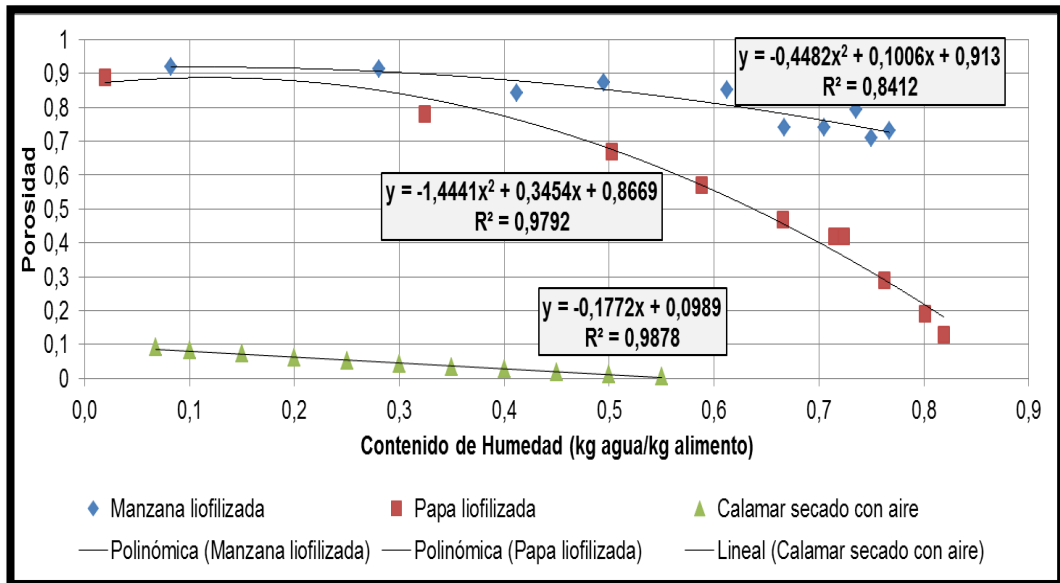
**TABLA N° 5.9  
TAMAÑO DE PORO DE ALIMENTOS LIOFILIZADOS**

GRUPO	ALIMENTO	$d_p$	$r_p$	Mét.
1: Cereales	Arroz	5,0-10,0	2,5-5,0	(c)
3: Frutas	Fresa liofilizada temperatura -30°C	169,5	84,8	(a)
	Mango liofilizado	29,7	14,9	(b)
	Pera liofilizada congelamiento rápido	5,0 - 8,0	2,5 a 4,0	(c)
	Pera liofilizada congelamiento lento	9,0 – 12,0	4,5 a 6,0	(c)
4: Pescados y mariscos	Pepino de Mar	10,2	5,1	(a)
	Cubos de “Loco”	0,70	0,4	(c)
5: Carnes	Pollo	10,0 -30,0	5,0 a 15,0	(c)
9: Tubérculos	Papa	50	25	(c)
Otros	Café	12,2	6,1	(a)

**Nota:**  $d_p$ : Diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ ); Mét.: Método;  $r_p$ : Radio de poro ( $\mu\text{m}$ ); (a) Estimada; (b) Promedio de lo indicado en la Figura 3.5D; (c) Indicado en la respectivas Figuras 3.5A, 3.5E, 3.5G, Tabla 3.5A; para los grupos sin datos de referencia se consideró lo citado por Sagara (2001: 184) quien menciona que el rango del radio de poro está entre 10 y 300  $\mu\text{m}$

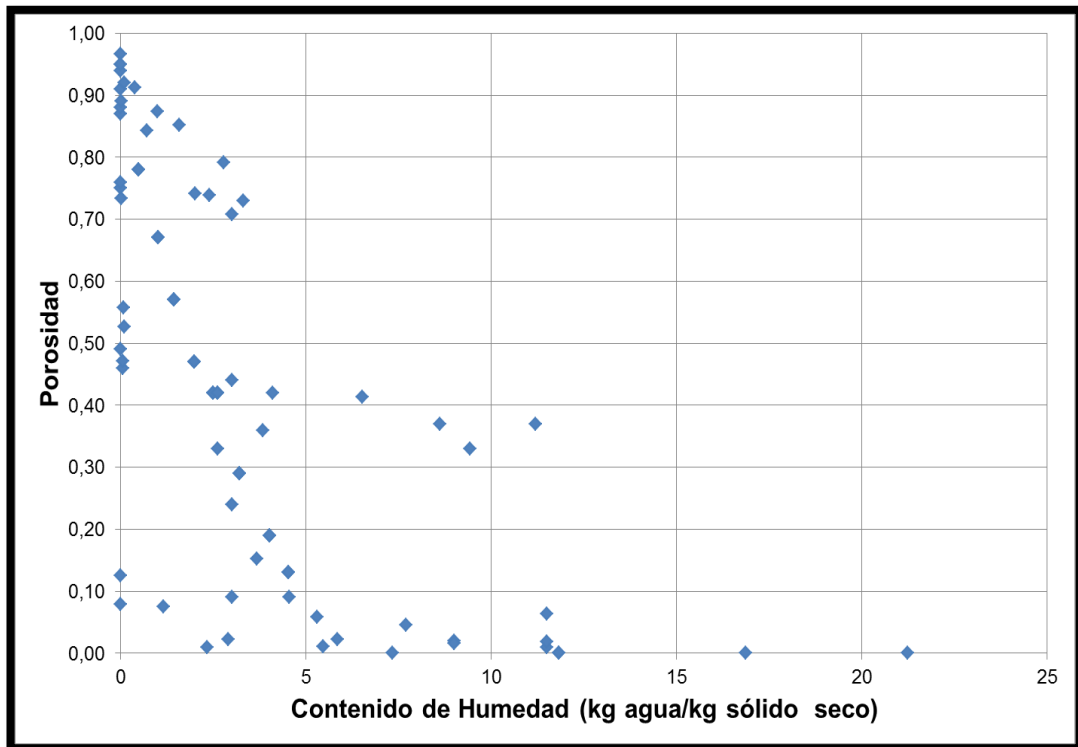
Las porosidades de la manzana, papa y calamar en función del contenido de humedad para la futura evaluación de las conductividades térmicas se brinda a continuación:

**GRÁFICO N° 5.15**  
**POROSIDAD EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD DE LA MANZANA, PAPA Y CALAMAR**



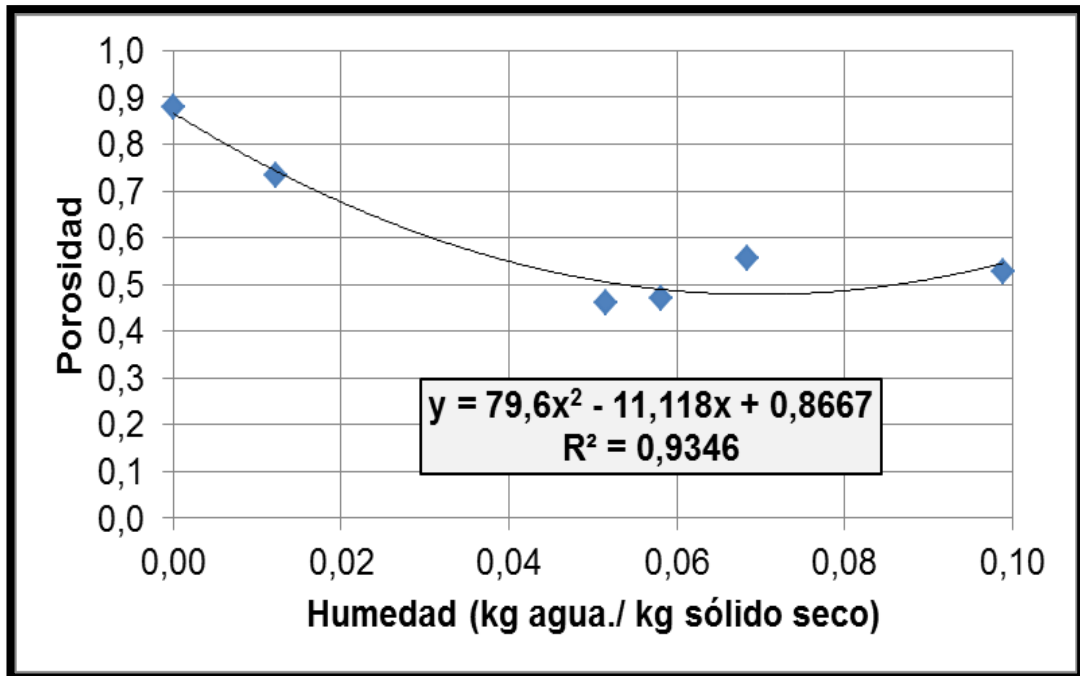
**Nota:** Datos procedentes de Tablas N° 3.4B para la papa y la manzana (liofilizados) y relación N° 3.4A.a para calamar (secado con aire)

**GRÁFICO N° 5.16**  
**POROSIDAD EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD**



**Nota:** Adaptado de los datos de la Tabla N° 3.4C del Anexo N° 3

**GRÁFICO N° 5.17**  
**POROSIDAD DE ALIMENTOS CON BAJO CONTENIDO HUMEDAD**



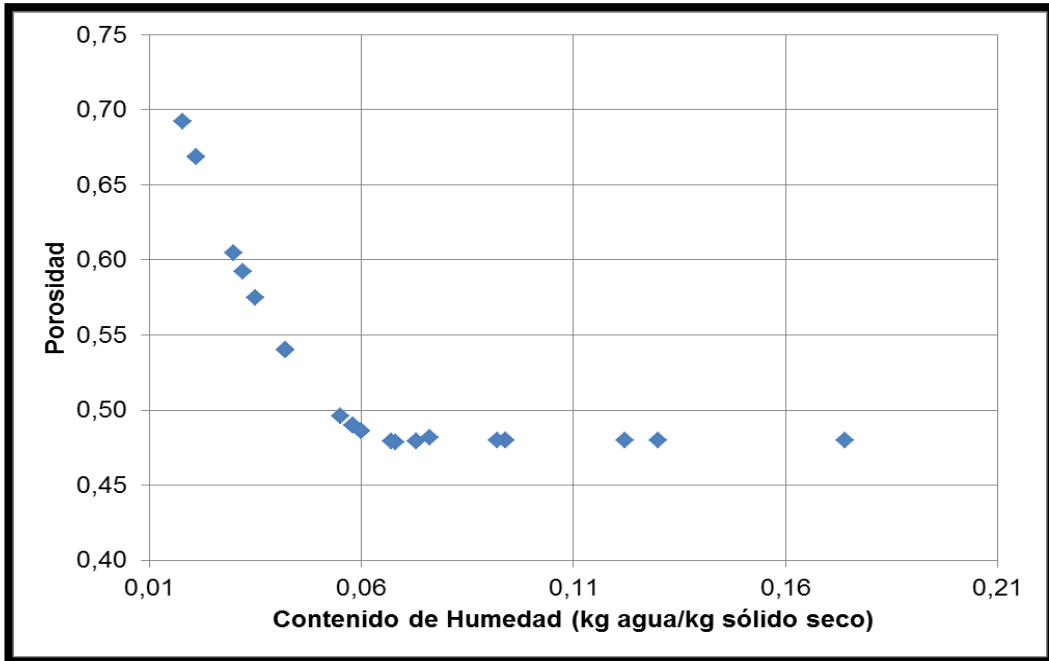
La corroboración de la porosidad calculada con el modelo propuesto para alimentos con bajo contenido de humedad con los datos procedentes de la Tabla N°3.5I, se muestra a continuación

**TABLA N° 5.10**  
**ANÁLISIS DE LA POROSIDAD EXPERIMENTAL Y LA ESTIMADA**

ALIMENTOS	POROSIDAD EXPERIMENTAL <sup>(a)</sup>	$x_w$ <sup>(a)</sup>	POROSIDAD ESTIMADA	%Error
Palta	0,734	0,012	0,743	1,28%
Arveja	0,460	0,052	0,505	9,82%
Cereza	0,527	0,099	0,546	3,55%
Fresa	0,471	0,058	0,489	3,88%

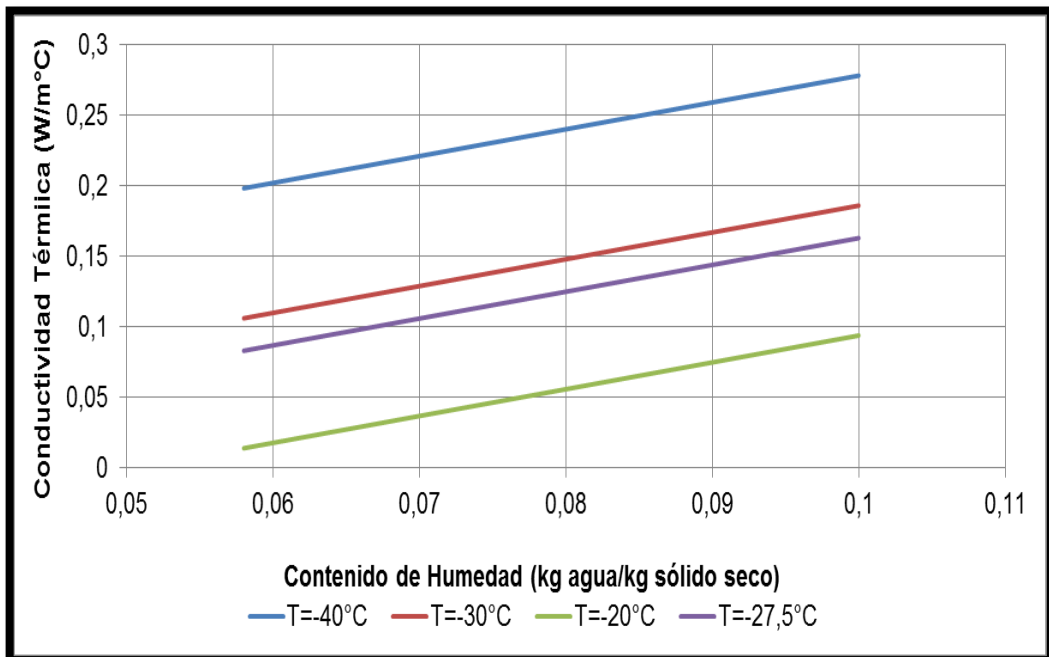
**Nota:** (a) Datos sacados de la Tabla N° 3.4C, (b)  $x_w$ : Humedad en base seca ( $\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{sólido seco}}$ )

**GRÁFICO N° 5.18**  
**POROSIDAD ESTIMADA EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD**



**Nota:** Data procedente de la Tabla n° 4.9

**GRÁFICO N° 5.19**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN LA CARNE DE RES A DIVERSAS TEMPERATURAS Y HUMEDAD**



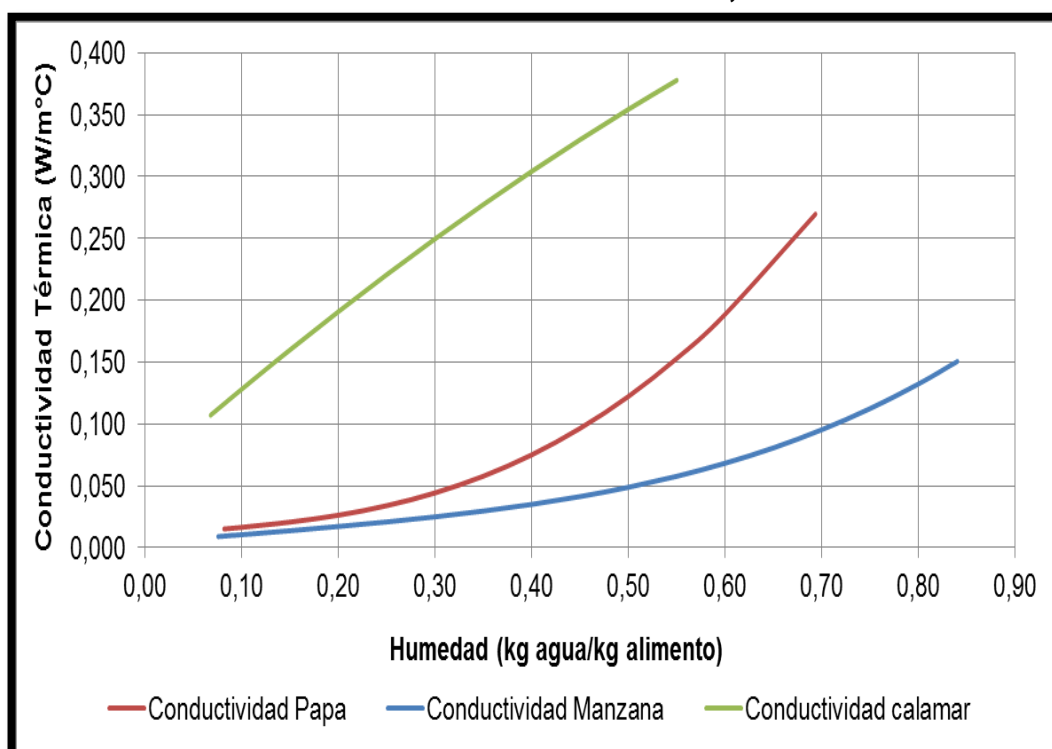
**Nota:** Estimada con la correlación (b) de la Tabla N° 3.9B (véase Anexo N° 3).

**TABLA N° 5.11  
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA VERDADERA DE ALIMENTOS**

$T_{cgn}$	Alimento	$y_a$	$k_{\text{paralelo}}^{(d)}$	$k_{\text{serie}}^{(e)}$	$k_{\text{promedio}}$
-46,5 <sup>(a)</sup>	Manzana	0,84	0,44	0,37	0,41
-17,00 <sup>(b)</sup>	Papa	0,69	0,46	0,37	0,41
-28,20 <sup>(c)</sup>	Pulpo	0,82	0,47	0,39	0,43

**Nota:**  $T_{cgn}$  (Temperatura de Congelación del alimento °C);  $y_a$  (Contenido de humedad kg agua.kg alimento-1); k (conductividad térmica,  $W.m^{-1}°C^{-1}$ ); (a) De la Tabla N° 5.2; (b) De la Tabla N° 5.3; (c) De la Tabla N° 4.9; (d) Calculado con la ecuación N° 3; (e) Calculado con la ecuación N° 5; las relaciones para el cálculo de las conductividades por componente está en Tabla N° 3.8A del Anexo N°3

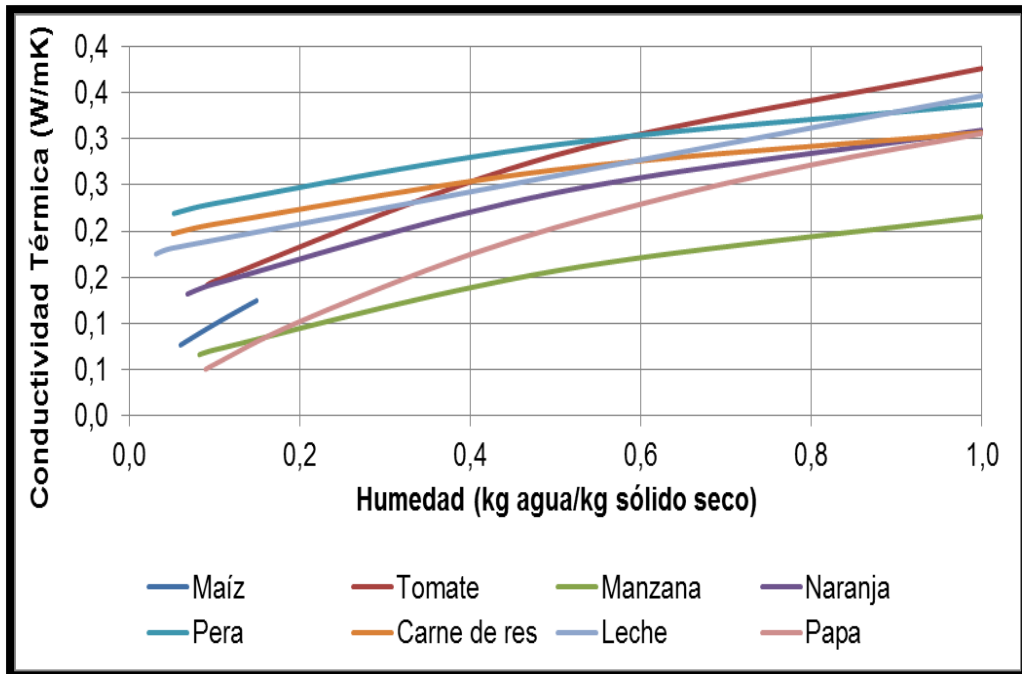
**GRÁFICO N° 5.20  
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA MANZANA, PAPA Y CALAMAR**



(a) Conductividad térmica vs. Humedad (base húmeda)

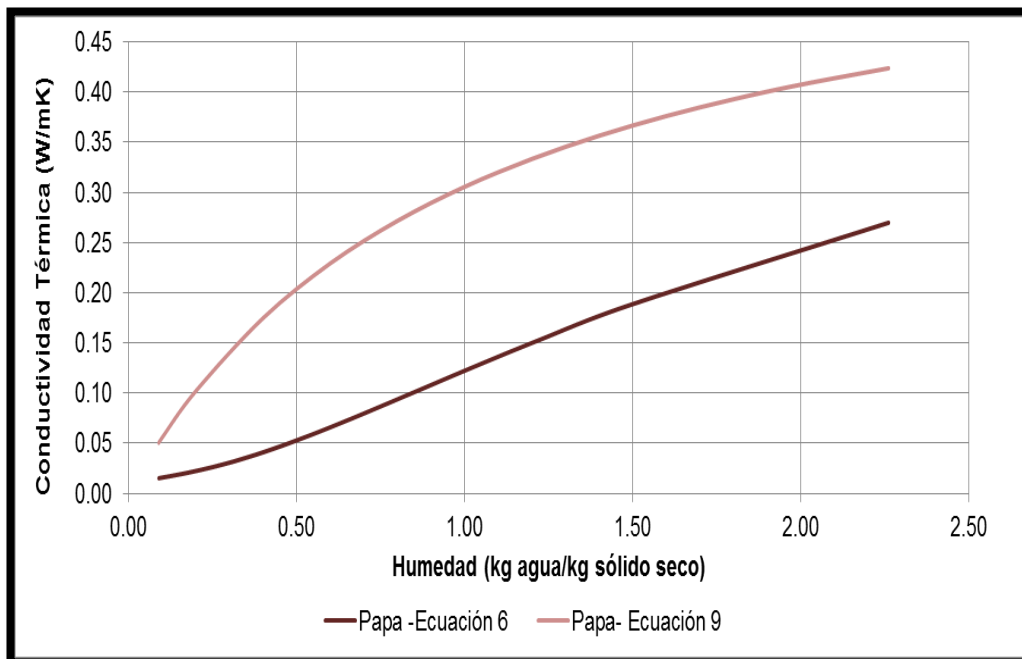
**Nota:** Estimados con la ecuación N° 6. Datos procedentes de Tablas N° 3.8C para la papa y la manzana (liofilizados).

**GRÁFICO N° 5.21**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DIVERSOS ALIMENTOS**

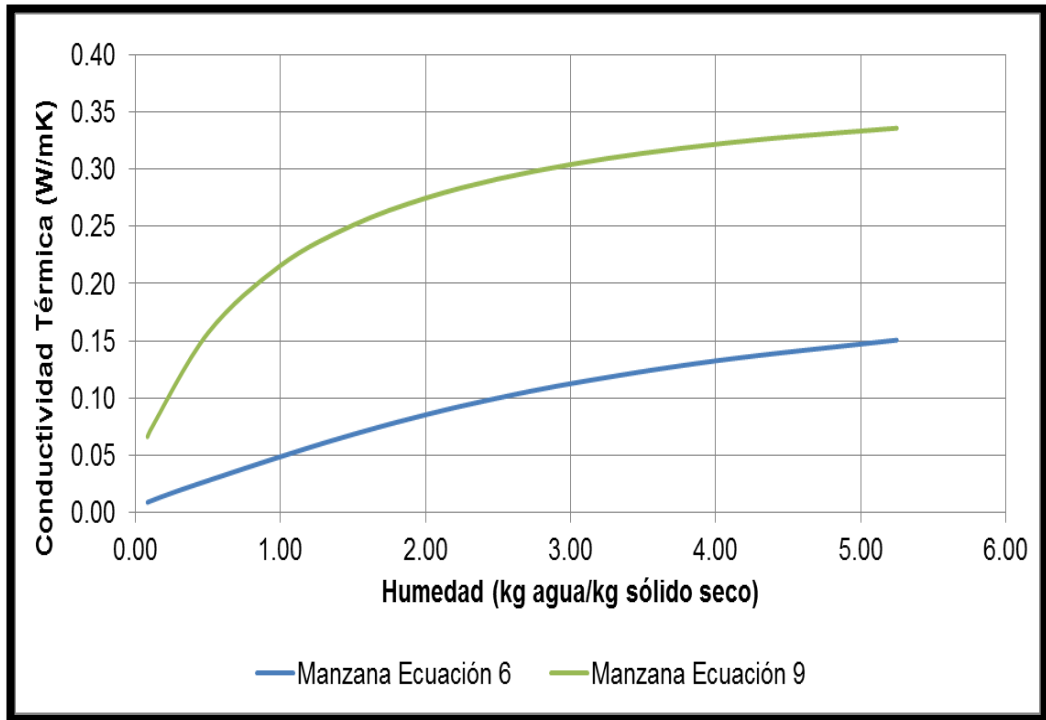


**Nota:** Estimados con la ecuación N° 9

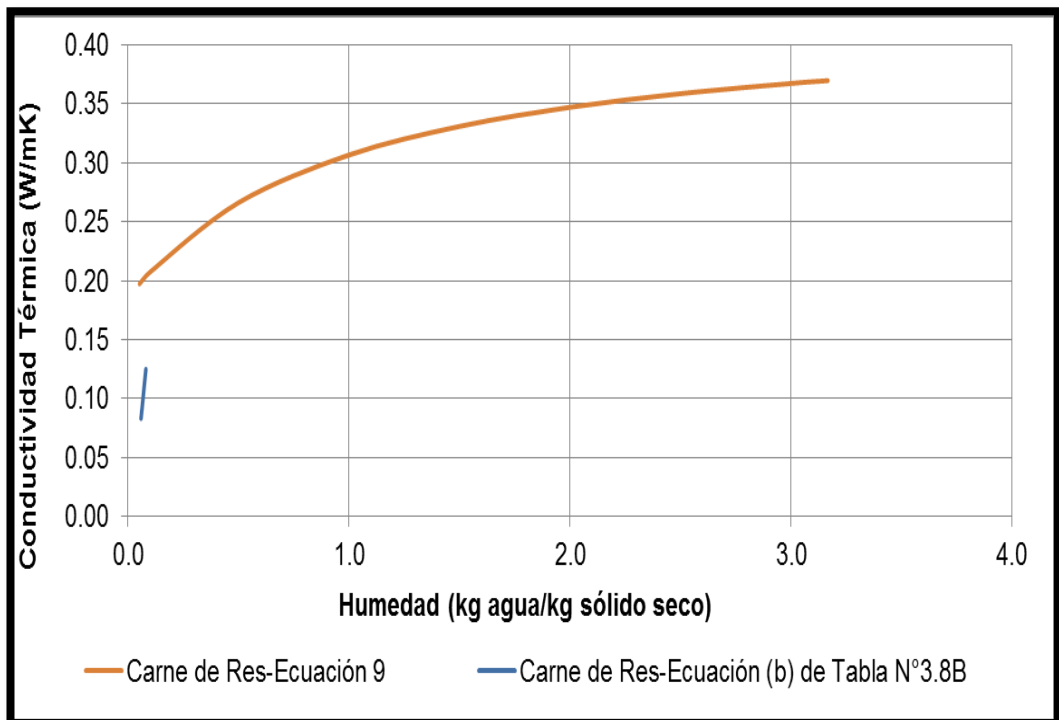
**GRÁFICO N° 5.22**  
**COMPARACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA PAPA, MANZANA Y RES CALCULADA POR DISTINTAS ECUACIONES**



**(a)**



(b)

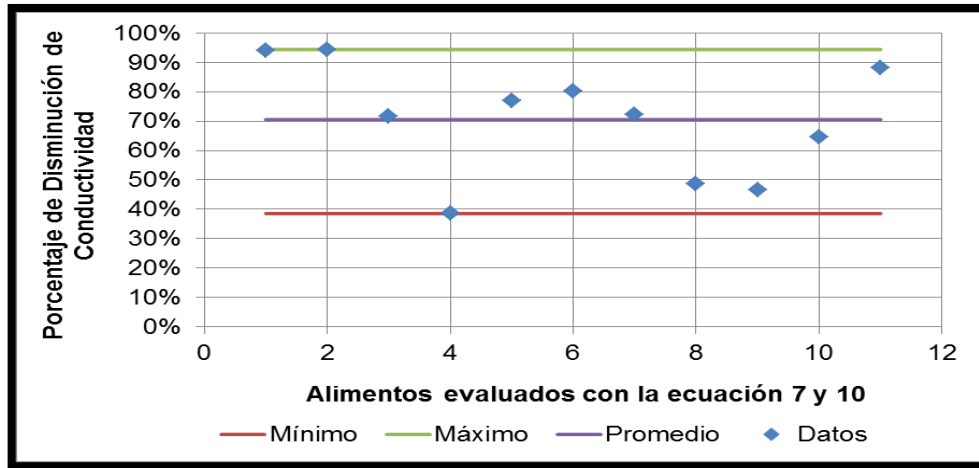


(c)

**Nota:** Conductividad térmica de: (a) la papa; (b) la manzana; (c) la res



**GRÁFICO N° 5.23**  
**DISMINUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL ALIMENTO**  
**SECO CON RESPECTO A LA HUMEDAD INICIAL**



A partir de los rangos de valores experimentales para el almidón de papa liofilizada, su conductividad se encuentra entre  $0,009$  y  $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , la conductividad de la manzana liofilizada está entre  $0,056$  y  $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  y para la res liofilizada entre  $0,035$  y  $0,201 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  observándose una desviación marcada solamente para la primera; mientras que para los demás datos experimentales se encuentran en el rango calculado. Se calculó un porcentaje de disminución promedio de  $70,56\%$  de la conductividad del alimento liofilizado con respecto a la conductividad estimada con la humedad inicial. La permeabilidad encontrada con las ecuaciones N° 23 y su modificatoria, la ecuación N° 26, brindan valores superiores a los mostrados en la Figura N° 3.7A y la Tabla N° 3.7B (véase Anexo N° 3) para el caso de la res. Adicionalmente, se consideró la existencia del factor de corrección según el modelo estructural celular citado en la teoría en el caso de datos calculados que distan de los valores experimentales (Sagara, 2001: 183).

**TABLA N° 5.12**  
**CALCULO DE LA PERMEABILIDAD  $K_{p2}$  DE LA CARNE**

DATOS	RESULTADOS PRELIMINARES Y FINALES							
T (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30
T(K)	233,15	243,15	253,15	263,15	273,15	283,15	293,15	303,15
P(Pa) <sup>(a)</sup>	50	50	50	50	50	50	50	50
$\lambda = \frac{k_{\text{Boltz}} T}{\sqrt{2}\pi(d_m)^2 P}$	6,85E-05	7,14E-05	7,44E-05	7,73E-05	8,02E-05	8,32E-05	8,61E-05	8,90E-05
$\Omega$	9,90E-01	9,87E-01	9,84E-01	9,82E-01	9,80E-01	9,78E-01	9,76E-01	9,75E-01
$\bar{v} = \left(\frac{8RT}{\pi M_w}\right)^{\frac{1}{2}}$	1,66E+04	1,69E+04	1,73E+04	1,76E+04	1,79E+04	1,82E+04	1,86E+04	1,89E+04
$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r$	6,40E-01	6,54E-01	6,67E-01	6,80E-01	6,93E-01	7,06E-01	7,18E-01	7,30E-01
<b><math>K_{p2}</math> (Ec. 23)</b>	<b>0,097</b>	<b>0,098</b>	<b>0,100</b>	<b>0,102</b>	<b>0,103</b>	<b>0,105</b>	<b>0,107</b>	<b>0,108</b>
$2r/\lambda$	1,69E+00	1,62E+00	1,56E+00	1,50E+00	1,45E+00	1,39E+00	1,35E+00	1,30E+00
$\left\{ \frac{3}{32k'} \frac{2r}{\lambda} + \delta_1 \right\}$	6,53E-01	6,50E-01	6,48E-01	6,45E-01	6,43E-01	6,41E-01	6,40E-01	6,38E-01
$(1 - e^{-2r/\lambda})$	8,16E-01	8,03E-01	7,90E-01	7,77E-01	7,64E-01	7,52E-01	7,40E-01	7,28E-01
$e^{-2r/\lambda}$	1,84E-01	1,97E-01	2,10E-01	2,23E-01	2,36E-01	2,48E-01	2,60E-01	2,72E-01
<b><math>K_{p2}</math> (Ec. 26)</b>	<b>0,070</b>	<b>0,072</b>	<b>0,073</b>	<b>0,075</b>	<b>0,077</b>	<b>0,079</b>	<b>0,080</b>	<b>0,082</b>

**Nota:**(a) Presión mostrada en la Figura N° 3.7A del Anexo N°3; T: Temperatura de la muestra; P: Presión de liofilización;  $\lambda$ : Camino libre promedio de las moléculas del gas (m);  $k_{\text{Boltz}}$ : Constante de Boltzmann= $1,3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>;  $d_m$ : Diámetro de una molécula de agua= $4,6 \times 10^{-10}$  m;  $\Omega$ : Total de contribuciones por separado del flujo de Poiseuille, flujo de resbalo, y flujo de Knudsen  $\bar{v}$ : Velocidad molecular promedio (m.s<sup>-1</sup>); R: Constante de los gases (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $M_w$ : Peso molecular del agua (kg.mol<sup>-1</sup>); r: Radio del poro (m);  $D_k$ : Difusividad de Knudsen (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $k'$ : Constante estructural;  $K_{p2}$ : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $\delta_1$ : Factor de fricción del poro.

**TABLA N° 5.13  
COMPARACIÓN DE LA PERMEABILIDAD  $K_{p2}$  CALCULADA CON LA  
REPORTADA EXPERIMENTALMENTE DE LA CARNE DE RES**

T (°C)	P (Pa)	CALCULADAS			EXPERIMENTAL	FACTOR 1
		$K_{p2}^{(a)}$	$K_{p2}^{(b)}$	$K_{p2}^{(c)}$	$K_{p2}$	
-40,0	50	0,097	0,070	0,083	0,0025 <sup>(1)</sup>	33,2
-30,0	50	0,098	0,072	0,085	0,0025 <sup>(1)</sup>	34,0
-20,0	50	0,100	0,073	0,087	0,0025 <sup>(1)</sup>	34,8
-10,0	50	0,102	0,075	0,088	0,0025 <sup>(1)</sup>	35,2
0,0	50	0,103	0,077	0,090	0,0025 <sup>(1)</sup>	36,0
10,0	50	0,105	0,079	0,092	0,0025 <sup>(1)</sup>	36,8
20,0	50	0,107	0,080	0,094	0,0025 <sup>(1)</sup>	37,6
30,0	50	0,108	0,082	0,095	0,0025 <sup>(1)</sup>	38,0
3,0 <sup>(2)</sup>	7	0,104	0,098	0,101	0,0025 <sup>(3)</sup>	40,4
40,8 <sup>(2)</sup>	7	0,111	0,106	0,108	0,0025 <sup>(3)</sup>	43,2
3,0 <sup>(2)</sup>	30	0,102	0,008	0,093	0,0025 <sup>(3)</sup>	37,2
40,8 <sup>(2)</sup>	30	0,109	0,090	0,100	0,0025 <sup>(3)</sup>	40,0
<b>FACTOR PROMEDIO</b>						<b>37,2</b>

**Nota:**  $K_{p2}$ : Permeabilidad ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ); (a) Ecuación 23; (b) Ecuación 26; (c) Promedio de permeabilidades calculadas de (a) y (b); (1) Valores  $K_{p2}$  experimentales visualizados en la Figura 3.7A; (2) Temperatura mínimas y máximas consideradas por Sagara et al. (1982) de la Tabla N°3.7B; (3) Valores  $K_{p2}$  experimentales promedios del rango reportado por Sagara et al. (1982) de la Tabla N°3.7B ( $9 \times 10^{-4}$  y  $4,05 \times 10^{-3}$ ); Factor 1: División de  $K_{p2}^{(c)}$  entre  $K_{p2}$  (experimental).

El factor de corrección promedio fue de 37,2, siendo éste menor al valor de 71,4 encontrado para manzana y mayor al factor de 10 para manzanas en rodajas (Sagara, 2001: 183). Para las estimaciones de las permeabilidades de los demás alimentos se considera el promedio de estos tres valores, el cual es 39,53.

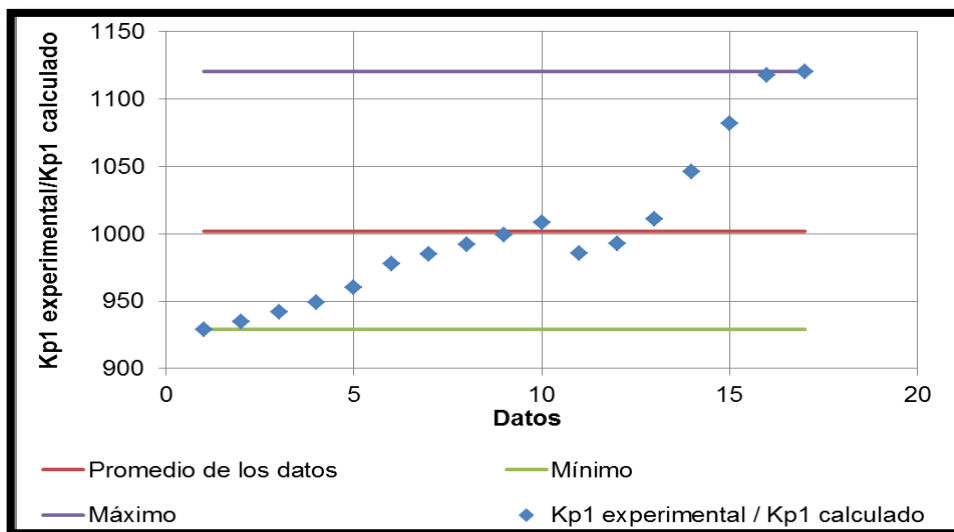
Comparando los valores de  $K_{p1}$  medidos y calculados se tiene un factor correctivo promedio de 1002, como se muestra a continuación:

**TABLA N° 5.14**  
**PERMEABILIDAD  $K_{p1}$  CALCULADA A PARTIR DE LA  $K_{p2}$  ESTIMADA**

$K_{p2} \times 10^3$ (a)	T(°C) <sup>(b)</sup>	T (K)	$K_{p1} \times 10^{11}$ (c)	$K_{p1}$ <sup>(d)</sup>
<b>MANZANA</b>				
4,50	-13,6	259,55	3,75	$3,49 \times 10^{-8}$
4,50	-12,0	261,15	3,73	
4,50	-10,0	263,15	3,70	
4,50	-8,0	265,15	3,67	
4,50	-5,0	268,15	3,63	
4,50	0,0	273,15	3,57	
4,50	2,0	275,15	3,54	
4,50	4,0	277,15	3,52	
4,50	6,0	279,15	3,49	
4,50	8,5	281,65	3,46	
<b>RES</b>				
2,48	3,0	276,15	1,94	$1,91 \times 10^{-8}$
2,48	5,0	278,15	1,93	
2,48	10,0	283,15	1,89	
2,48	20,0	293,15	1,83	
2,48	30,0	303,15	1,77	
2,48	40,0	313,15	1,71	
2,48	40,8	313,95	1,71	

**Nota:** (a)  $K_{p2}$ : Permeabilidad ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) considerada como el promedio entre el valor mínimo y máximo de la Tabla N°3.7B; (b) T: Temperatura promedio de la capa seca; (c)  $K_{p1}$ : Permeabilidad en  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ , evaluadas en el rango de temperaturas de medición según la Tabla N°3.7B; (d)  $K_{p1}$ : Permeabilidad promedio en  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$  de los valores medidos brindados en la Tabla N°3.7A, este valor se considera igual puesto que no se especifica temperatura de medición.

**GRÁFICO N° 5.24**  
**RELACIÓN DE LA PERMEABILIDAD MEDIDA Y LA CALCULADA**



**TABLA N° 5.15**  
**PERMEABILIDAD  $K_{p1}$  CALCULADA DE ALIMENTOS**

VARIABLES	ARROZ	FRESA	MANGO	PERA	PEPINO DE MAR	LOCO	POLLO	PAPA
r (m)	3,75E-06	8,48E-05	1,49E-05	3,25E-06	5,10E-06	4,00E-07	1,00E-05	2,50E-05
Porosidad	0,48	0,71	0,152	0,48	0,48	0,48	0,49	0,88
T(K)	253,15	239,15	239,15	239,15	244,95	244,95	245,65	256,15
P(Pa) <sup>(a)</sup>	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
$\lambda = \frac{k_{Boltz} T}{\sqrt{2}\pi(d_m)^2 P}$	3,30E-04	3,12E-04	3,12E-04	3,12E-04	3,19E-04	3,19E-04	3,20E-04	3,34E-04
$\Omega$	9,97E-01	9,64E-01	9,88E-01	9,97E-01	9,96E-01	1,00E+00	9,92E-01	9,83E-01
$\bar{v} = \left(\frac{8RT}{\pi M_w}\right)^{\frac{1}{2}}$	1,73E+04	1,68E+04	1,68E+04	1,68E+04	1,70E+04	1,70E+04	1,70E+04	1,74E+04
$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r$	4,31E-02	9,48E-01	1,67E-01	3,63E-02	5,77E-02	4,53E-03	1,13E-01	2,89E-01
<b><math>K_{p2}</math> (Ec. 23)</b>	<b>0,005</b>	<b>0,155</b>	<b>0,006</b>	<b>0,004</b>	<b>0,007</b>	<b>0,001</b>	<b>0,013</b>	<b>0,060</b>
<b><math>K_{p2}</math> (Ec. 26)</b>	<b>0,005</b>	<b>0,134</b>	<b>0,006</b>	<b>0,004</b>	<b>0,007</b>	<b>0,001</b>	<b>0,013</b>	<b>0,057</b>
<b><math>K_{p2}</math> promedio</b>	<b>0,005</b>	<b>0,144</b>	<b>0,006</b>	<b>0,004</b>	<b>0,007</b>	<b>0,001</b>	<b>0,013</b>	<b>0,058</b>
<b><math>K_{p2}</math> corregido<sup>(b)</sup></b>	<b>1,24E-04</b>	<b>3,65E-03</b>	<b>1,49E-04</b>	<b>1,04E-04</b>	<b>1,65E-04</b>	<b>1,31E-05</b>	<b>3,29E-04</b>	<b>1,48E-03</b>
<b><math>K_{p1}</math> calculado<sup>(c)</sup></b>	<b>1,06E-12</b>	<b>3,30E-11</b>	<b>1,35E-12</b>	<b>9,46E-13</b>	<b>1,46E-12</b>	<b>1,16E-13</b>	<b>2,90E-12</b>	<b>1,25E-11</b>
<b><math>K_{p1}</math> corregido<sup>(d)</sup></b>	<b>1,06E-09</b>	<b>3,30E-08</b>	<b>1,35E-09</b>	<b>9,46E-10</b>	<b>1,46E-09</b>	<b>1,16E-10</b>	<b>2,90E-09</b>	<b>1,25E-08</b>

**Nota:** (a) Presión promedio del rango estimado en 5.1.2 ; (b) Factor de corrección de 39,53; (c) Calculado con la relación N° 92; (d) Factor2=1002; T: Temperatura del frente de hielo del grupo al que pertenecen (véase Tabla N° 4.6 de la página... );  $\lambda$ : Camino libre promedio de las moléculas del gas (m);  $k_{Boltz}$ : Constante de Boltzmann= $1,3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>;  $d_m$ : Diámetro de una molécula de agua= $4,6 \times 10^{-10}$  m;  $\bar{v}$ : Velocidad molecular promedio (m.s<sup>-1</sup>); R: Constante de los gases (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $M_w$ : Peso molecular del agua (kg.mol<sup>-1</sup>); r: Radio del poro (m);  $D_k$ : Difusividad de Knudsen (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>); k: Constante estructural;  $K_{p2}$ : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $K_{p1}$ : Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>).

**TABLA N° 5.16**  
**PERMEABILIDAD  $K_{p1}$  CALCULADA DE LOS GRUPOS DE ALIMENTOS-PRIMERA PARTE**

VARIABLES	GRUPO 1			GRUPO 2			GRUPO 3		
	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM
$r \times 10^6$ (m)	3,75	300	151,875	10	300	155	3,25	84,8	44,025
Porosidad	0,49	0,48	0,48	0,59	0,48	0,49	0,69	0,48	0,48
T(°C)	-20	-20	-20	-46	-17	-31,5	-51	-17	-34
P(Pa) <sup>(a)</sup>	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
$\lambda$	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04	2,96E-04	3,34E-04	3,15E-04	2,90E-04	3,34E-04	3,12E-04
$\Omega$	9,97E-01	9,95E-01	9,65E-01	9,91E-01	9,94E-01	9,66E-01	9,97E-01	9,65E-01	9,74E-01
$\bar{v}$	1,73E+04	1,73E+04	1,73E+04	1,63E+04	1,74E+04	1,69E+04	1,62E+04	1,74E+04	1,68E+04
$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r$	4,31E-02	3,45E+00	1,75E+00	1,09E-01	3,47E+00	1,74E+00	3,50E-02	9,81E-01	4,92E-01
$K_{p2}$ (Ec. 23)	0,005	0,393	0,192	0,015	0,395	0,196	0,006	0,108	0,055
$K_{p2}$ (Ec. 26)	0,005	0,281	0,154	0,015	0,283	0,156	0,006	0,095	0,051
$K_{p2}$ promedio	0,005	0,337	0,173	0,015	0,339	0,176	0,006	0,101	0,053
$K_{p2}$ corregido <sup>(b)</sup>	1,26E-04	8,52E-03	4,38E-03	3,82E-04	8,57E-03	4,45E-03	1,45E-04	2,57E-03	1,33E-03
$K_{p1}$ calculado <sup>(c)</sup>	1,07E-12	7,29E-11	3,75E-11	3,64E-12	7,24E-11	3,99E-11	1,41E-12	2,17E-11	1,20E-11
$K_{p1}$ corregido <sup>(d)</sup>	1,07E-09	7,29E-08	3,75E-08	3,64E-09	7,24E-08	3,99E-08	1,41E-09	2,17E-08	1,20E-08

**Nota:** (a) Presión promedio del rango estimado en 5.1.2 ; (b) Factor de corrección de 39,53; (c) Calculado con la relación N° 92; (d) Factor2=1002; T: Temperatura del frente de hielo del grupo al que pertenecen (véase Tabla N° 4.6 de la página... ) ;  $\lambda$  :Camino libre promedio de las moléculas del gas (m);  $k_{Boltz}$  : Constante de Boltzmann= $1,3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>;  $d_m$  :Diámetro de una molécula de agua= $4,6 \times 10^{-10}$  m;  $\bar{v}$ : Velocidad molecular promedio (m.s<sup>-1</sup>); R: :Constante de los gases (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $M_w$ : Peso molecular del agua (kg.mol<sup>-1</sup>); r:Radio del poro (m);  $D_k$ : :Difusividad de Knudsen (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $k'$ :Constante estructural;  $K_{p2}$ : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $K_{p1}$ :Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>).

**TABLA N° 5.16**  
**PERMEABILIDAD  $K_{p1}$  CALCULADA PARA LOS DIVERSOS GRUPOS DE ALIMENTOS-SEGUNDA PARTE**

VARIABLES	GRUPO 4			GRUPO 5			GRUPO 6		
	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM
$r \times 10^6(m)$	0,4	5,1	2,75	10	58	34	10	300	155
Porosidad	0,58	0,48	0,48	0,60	0,48	0,49	0,67	0,48	0,54
T(°C)	<b>-45</b>	<b>-11,3</b>	<b>-28,2</b>	<b>-45</b>	<b>-10</b>	<b>-27,5</b>	<b>-32</b>	<b>-29</b>	<b>-30,5</b>
P(Pa) <sup>(a)</sup>	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
$\lambda$	2,97E-04	3,41E-04	3,19E-04	2,97E-04	3,43E-04	3,20E-04	3,14E-04	3,18E-04	3,16E-04
$\Omega$	1,00E+00	9,96E-01	9,98E-01	9,91E-01	9,71E-01	9,78E-01	9,92E-01	9,99E-01	9,66E-01
$\bar{v}$	1,64E+04	1,75E+04	1,70E+04	1,64E+04	1,76E+04	1,70E+04	1,68E+04	1,69E+04	1,69E+04
$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r$	4,37E-03	5,97E-02	3,11E-02	1,09E-01	6,80E-01	3,85E-01	1,12E-01	3,39E+00	1,75E+00
$K_{p2}$ (Ec. 23)	0,001	0,007	0,004	0,016	0,075	0,044	0,018	0,388	0,217
$K_{p2}$ (Ec. 26)	0,001	0,007	0,004	0,015	0,069	0,041	0,017	0,276	0,172
$K_{p2}$ promedio	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>	<b>0,004</b>	<b>0,015</b>	<b>0,072</b>	<b>0,043</b>	<b>0,018</b>	<b>0,332</b>	<b>0,194</b>
$K_{p2}$ corregido <sup>(b)</sup>	<b>1,51E-05</b>	<b>1,71E-04</b>	<b>8,94E-05</b>	<b>3,91E-04</b>	<b>1,83E-03</b>	<b>1,08E-03</b>	<b>4,44E-04</b>	<b>8,40E-03</b>	<b>4,92E-03</b>
$K_{p1}$ calculado <sup>(c)</sup>	<b>1,43E-13</b>	<b>1,41E-12</b>	<b>7,90E-13</b>	<b>3,71E-12</b>	<b>1,50E-11</b>	<b>9,52E-12</b>	<b>3,99E-12</b>	<b>7,45E-11</b>	<b>4,39E-11</b>
$K_{p1}$ corregido <sup>(d)</sup>	<b>1,43E-10</b>	<b>1,41E-09</b>	<b>7,90E-10</b>	<b>3,71E-09</b>	<b>1,50E-08</b>	<b>9,52E-09</b>	<b>3,99E-09</b>	<b>7,45E-08</b>	<b>4,39E-08</b>

**Nota:** (a) Presión promedio del rango estimado en 5.1.2 ; (b) Factor de corrección de 39,53; (c) Calculado con la relación N° 92; (d) Factor2=1002; T: Temperatura del frente de hielo del grupo al que pertenecen (véase Tabla N° 4.6 de la página... );  $\lambda$  :Camino libre promedio de las moléculas del gas (m);  $k_{Boltz}$  : Constante de Boltzmann= $1,3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>;  $d_m$ :Diámetro de una molécula de agua= $4,6 \times 10^{-10}$  m;  $\bar{v}$ : Velocidad molecular promedio (m.s<sup>-1</sup>); R: :Constante de los gases (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $M_w$ : Peso molecular del agua (kg.mol<sup>-1</sup>); r:Radio del poro (m);  $D_k$ : :Difusividad de Knudsen (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $k'$ : Constante estructural;  $K_{p2}$ : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $K_{p1}$ :Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>).

**TABLA N° 5.16**  
**PERMEABILIDAD  $K_{p1}$  CALCULADA PARA LOS DIVERSOS GRUPOS DE ALIMENTOS-TERCERA PARTE**

VARIABLES	GRUPO 7			GRUPO 8			GRUPO 9		
	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM	MIN	MAX	PROM
$r \times 10^6(m)$	10	300	155	10	300	155	25	300	162,5
Porosidad	0,54	0,54	0,54	0,50	0,49	0,49	0,67	0,48	0,48
T(°C)	<b>-45,8</b>	<b>-36,7</b>	<b>-41,3</b>	<b>-30</b>	<b>-30</b>	<b>-30</b>	<b>-17</b>	<b>-17</b>	<b>-17</b>
P(Pa) <sup>(a)</sup>	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
$\lambda$	2,96E-04	3,08E-04	3,02E-04	3,17E-04	3,17E-04	3,17E-04	3,34E-04	3,34E-04	3,34E-04
$\Omega$	9,91E-01	1,00E+00	9,67E-01	9,92E-01	9,99E-01	9,66E-01	9,83E-01	9,94E-01	9,66E-01
$\bar{v}$	1,64E+04	1,67E+04	1,65E+04	1,69E+04	1,69E+04	1,69E+04	1,74E+04	1,74E+04	1,74E+04
$D_k = \frac{2}{3} \bar{v} r$	1,09E-01	3,34E+00	1,71E+00	1,13E-01	3,38E+00	1,75E+00	2,89E-01	3,47E+00	1,88E+00
$K_{p2}$ (Ec. 23)	0,014	0,430	0,212	0,013	0,391	0,197	0,045	0,395	0,207
$K_{p2}$ (Ec. 26)	0,014	0,305	0,167	0,013	0,278	0,156	0,043	0,283	0,165
$K_{p2}$ promedio	<b>0,014</b>	<b>0,367</b>	<b>0,190</b>	<b>0,013</b>	<b>0,335</b>	<b>0,176</b>	<b>0,044</b>	<b>0,339</b>	<b>0,186</b>
$K_{p2}$ corregido <sup>(b)</sup>	<b>3,48E-04</b>	<b>9,29E-03</b>	<b>4,80E-03</b>	<b>3,31E-04</b>	<b>8,47E-03</b>	<b>4,46E-03</b>	<b>1,12E-03</b>	<b>8,57E-03</b>	<b>4,70E-03</b>
$K_{p1}$ calculado <sup>(c)</sup>	<b>3,32E-12</b>	<b>8,50E-11</b>	<b>4,48E-11</b>	<b>2,95E-12</b>	<b>7,54E-11</b>	<b>3,97E-11</b>	<b>9,48E-12</b>	<b>7,24E-11</b>	<b>3,97E-11</b>
$K_{p1}$ corregido <sup>(d)</sup>	<b>3,32E-09</b>	<b>8,50E-08</b>	<b>4,48E-08</b>	<b>2,95E-09</b>	<b>7,54E-08</b>	<b>3,97E-08</b>	<b>9,48E-09</b>	<b>7,24E-08</b>	<b>3,97E-08</b>

**Nota:** (a) Presión promedio del rango estimado en 5.1.2 ; (b) Factor de corrección de 39,53; (c) Calculado con la relación N° 92; (d) Factor2=1002; T: Temperatura del frente de hielo del grupo al que pertenecen (véase Tabla N° 4.6 de la página... );  $\lambda$  :Camino libre promedio de las moléculas del gas (m);  $k_{Boltz}$  : Constante de Boltzmann= $1,3806504 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>;  $d_m$ :Diámetro de una molécula de agua= $4,6 \times 10^{-10}$  m;  $\bar{v}$ : Velocidad molecular promedio (m.s<sup>-1</sup>); R: :Constante de los gases (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $M_w$ : Peso molecular del agua (kg.mol<sup>-1</sup>); r:Radio del poro (m);  $D_k$ : :Difusividad de Knudsen (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $k'$ : Constante estructural;  $K_{p2}$ : Permeabilidad (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>);  $K_{p1}$ :Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>).



**TABLA N° 5.17**  
**VARIABLES INTERMEDIAS CALCULADAS PARA DETERMINAR EL**  
**TIEMPO DE LIOFILIZACIÓN**

Grupo	RANGO	$x_0$	$P_h$	$\rho_c^{(a)}$	$k_s^{(b)}$	$K_{p1}^{(c)}$
1	Mínimo	0,08	48,67	1141,7	0,055	1,07E-09
	Máximo	1,94	48,67	1545,1	0,104	7,29E-08
	Promedio	0,20	48,67	1428,1	0,059	3,75E-08
2	Mínimo	0,43	2,78	1006,2	0,064	3,64E-09
	Máximo	24,00	65,22	1334,9	0,144	7,24E-08
	Promedio	8,30	14,81	1054,2	0,124	3,99E-08
3	Mínimo	0,67	1,49	481,0	0,016	1,41E-09
	Máximo	24,00	65,22	1266,0	0,199	2,17E-08
	Promedio	5,38	11,26	781,6	0,071	1,20E-08
4	Mínimo	2,33	3,14	990,7	0,019	1,43E-10
	Máximo	11,50	111,68	1056,0	0,133	1,41E-09
	Promedio	3,73	21,18	1023,4	0,057	7,90E-10
5	Mínimo	1,17	3,14	1021,6	0,014	3,71E-09
	Máximo	6,69	125,84	1073,5	0,201	1,50E-08
	Promedio	3,28	22,68	1045,1	0,059	9,52E-09
6	Mínimo	0,82	14,03	993,0	0,022	3,99E-09
	Máximo	13,29	19,36	1052,4	0,081	7,45E-08
	Promedio	5,99	16,50	1028,7	0,043	4,39E-08
7	Mínimo	0,16	2,85	1402,0	0,050	3,32E-09
	Máximo	0,35	8,32	1481,2	0,058	8,50E-08
	Promedio	0,23	4,92	1449,2	0,053	4,48E-08
8	Mínimo	0,11	17,40	1052,4	0,051	2,95E-09
	Máximo	5,25	17,40	1478,9	0,119	7,54E-08
	Promedio	0,71	17,40	1345,6	0,064	3,97E-08
9	Mínimo	1,22	65,22	1017,3	0,009	9,48E-09
	Máximo	24,00	65,22	1206,2	0,042	7,24E-08
	Promedio	3,42	65,22	1110,2	0,026	3,97E-08

**Nota:** Grupo (1): Cereales, (2): verduras y hortalizas, (3): Frutas, (4) Pescados y mariscos, (5): Carnes (6): Leches y derivados, (7): Productos azucarados, (8): Leguminosas, (9): Tubérculos y raíces;  $x_0$ : Contenido de humedad inicial (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>);  $P_h$ : Presión de vapor absoluta en la interfase (Pa); (a)  $\rho_c$ : Densidad de alimento congelado kg.m<sup>-3</sup>, fue estimada para los Grupos 1, 2, 5, 7, 8 y 9 a la temperatura de congelación promedio por grupo; (b)  $k_s$ : Conductividad térmica del sólido seco (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>) estimada en los grupos 1, 2, 6, 7 y 8; (c) Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) estimada.

b) Resultados de la determinación del espesor del alimento en el plato del liofilizador en función del tiempo de liofilización

**TABLA N° 5.18**  
**CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD ENTRE EL TIEMPO Y EL ESPESOR DEL ALIMENTO**

Grupo	RANGO	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>promedio</sub>
1	Mínimo	7,94E+06	6,80E+09	8,82E+07	2,30E+09
	Máximo	2,25E+08	1,10E+08	2,09E+08	1,81E+08
	Promedio	6,17E+07	2,44E+08	1,98E+07	1,09E+08
2	Mínimo	7,35E+07	6,40E+10	7,29E+09	2,38E+10
	Máximo	2,25E+08	3,87E+07	2,51E+09	9,25E+08
	Promedio	1,52E+08	3,66E+08	4,92E+09	1,81E+09
3	Mínimo	1,86E+08	(*)	4,48E+11	2,24E+11
	Máximo	1,54E+08	7,51E+07	9,05E+09	3,09E+09
	Promedio	1,79E+08	(*)	1,86E+10	9,41E+09
4	Mínimo	5,47E+08	1,33E+12	8,36E+11	7,23E+11
	Máximo	1,70E+08	9,78E+08	2,74E+10	9,52E+09
	Promedio	2,57E+08	1,71E+10	5,55E+10	2,43E+10
5	Mínimo	5,83E+08	2,52E+10	4,82E+10	2,47E+10
	Máximo	1,10E+08	(*)	1,90E+09	1,01E+09
	Promedio	2,49E+08	4,50E+08	6,74E+09	2,48E+09
6	Mínimo	3,49E+08	4,17E+09	4,36E+09	2,96E+09
	Máximo	2,20E+08	1,63E+08	2,96E+09	1,11E+09
	Promedio	3,65E+08	3,27E+08	2,58E+09	1,09E+09
7	Mínimo	4,30E+07	6,66E+10	6,38E+09	2,43E+10
	Máximo	9,71E+07	6,95E+08	1,58E+08	3,17E+08
	Promedio	6,61E+07	2,40E+09	3,45E+08	9,37E+08
8	Mínimo	1,85E+07	4,41E+09	3,59E+08	1,60E+09
	Máximo	1,86E+08	3,46E+08	1,33E+09	6,20E+08
	Promedio	1,45E+08	5,54E+08	3,17E+08	3,39E+08
9	Mínimo	1,32E+09	7,60E+08	9,17E+07	7,23E+08
	Máximo	5,91E+08	5,88E+07	1,70E+09	7,82E+08
	Promedio	6,99E+08	1,50E+08	2,27E+08	3,59E+08

**Nota:** A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> son las constantes de proporcionalidad expresadas en s.m<sup>-2</sup>, (\*) los valores obtenidos son negativos debido a que la densidad del alimento congelado seleccionado es menor que la del alimento seco, por lo que no se considera estos datos.

**TABLA N° 5.19**  
**DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO DEL ALIMENTO**

Grupo	RANGO	$m_1$	$b_1$	$m_2$	$b_2$	L (m)
1	Mínimo	5111,61	-8,52	23002,27	-205,32	0,011
	Máximo	402,36	-0,67	1810,62	-16,16	0,011
	Promedio	241,17	-0,40	1085,28	-9,69	0,011
2	Mínimo	52828,36	-88,05	237727,63	-2121,94	0,011
	Máximo	2055,67	-3,43	9250,52	-82,57	0,011
	Promedio	4031,66	-6,72	18142,46	-161,94	0,011
3	Mínimo	497859,18	-829,77	2240366,31	-19997,34	0,011
	Máximo	6873,10	-11,46	30928,96	-276,07	0,011
	Promedio	20918,61	-34,86	94133,74	-840,23	0,011
4	Mínimo	1607570,75	-2679,28	7234068,40	-64570,76	0,011
	Máximo	21150,84	-35,25	95178,80	-849,56	0,011
	Promedio	53972,59	-89,95	242876,66	-2167,90	0,011
5	Mínimo	54810,07	-91,35	246645,32	-2201,54	0,011
	Máximo	2238,38	-3,73	10072,72	-89,91	0,011
	Promedio	5513,29	-9,19	24809,79	-221,45	0,011
6	Mínimo	6575,02	-10,96	29587,58	-264,10	0,011
	Máximo	2477,77	-4,13	11149,95	-99,52	0,011
	Promedio	2424,06	-4,04	10908,27	-97,37	0,011
7	Mínimo	54078,01	-90,13	243351,03	-2172,13	0,011
	Máximo	703,44	-1,17	3165,48	-28,25	0,011
	Promedio	2081,18	-3,47	9365,30	-83,59	0,011
8	Mínimo	3546,29	-5,91	15958,33	-142,44	0,011
	Máximo	1377,11	-2,30	6197,01	-55,31	0,011
	Promedio	752,26	-1,25	3385,17	-30,22	0,011
9	Mínimo	1606,41	-2,68	7228,84	-64,52	0,011
	Máximo	1738,54	-2,90	7823,45	-69,83	0,011
	Promedio	796,79	-1,33	3585,53	-32,00	0,011

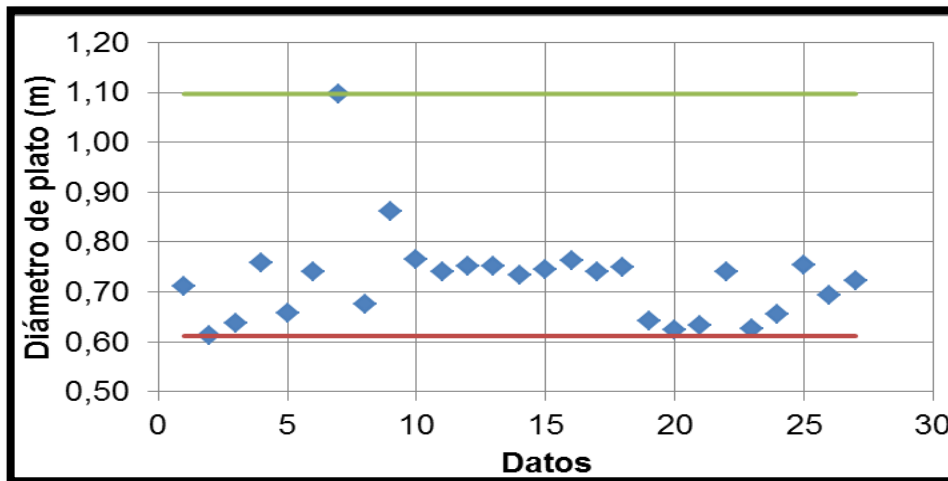
**Nota:**  $m_1$  y  $m_2$ : Pendiente de las rectas que pasan por los tres primeros y tres últimos puntos de la curva: tiempo de liofilización vs espesor;  $b_1$  y  $b_2$  Intersección de las rectas que pasan por los tres primeros y tres últimos puntos de la curva: tiempo de liofilización vs espesor

**c) Resultados de la determinación del diámetro del plato de liofilización**

Los resultados para el conjunto de dato mostrados en la tabla anterior, se ubica en el siguiente Gráfico; se aprecia que la mayor

cantidad de puntos se ubica entre un diámetro de 0,60 m a 0,80 m; siendo el promedio el valor de 0,73 m.

**GRÁFICO N° 5.25  
DIÁMETRO DE PLATO ESTIMADO**



**d) Resultados de la determinación de la altura de plato de liofilización**

La altura del plato de liofilización ( $L_t$ ), calculada a partir de los resultados de las sección 5.2.1b) es de 1,65 cm, valor que para fines prácticos de construcción podría ser considerado como 2 cm.

**5.2.2. Resultado de la determinación de las dimensiones de la cámara de secado**

El diámetro de la tubería del refrigerante aproximado es la catorceava parte de 73 cm., lo que brinda 5,2 cm. (2,05 pulgadas de diámetro externo), según este valor encontrado se establece que la tubería recomendada debe ser de diámetro nominal de 1 ½, de cobre tipo K (con mayor espesor) según ASTM B88, con diámetro externo de 1,625 pulgadas (4,13 cm.) y diámetro interno de 1,481pulgadas (3,91 cm.). El espacio transversal ocupado por la tubería equivale a 24,78 cm.

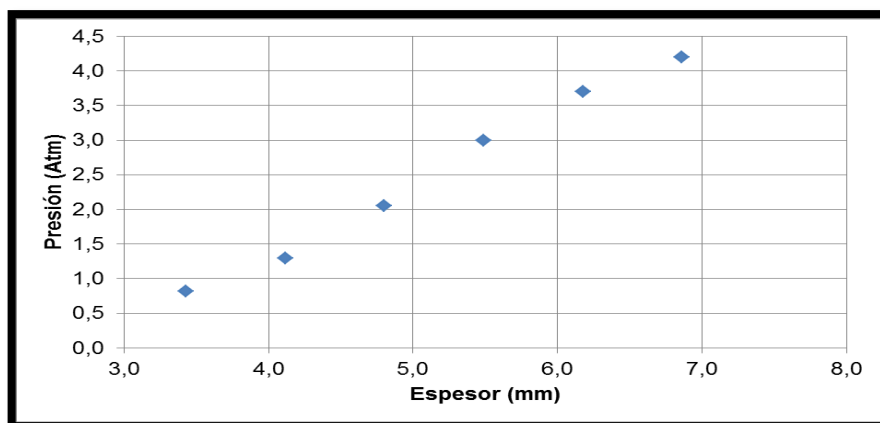
ysobrando un espacio de 48,22 cm., lo cual es equivalente a un espacio entre tuberías de 6,89 cm.

Los espesores de la placa de calentamiento superior e inferior fueron considerados como los de mayor valor para evitar problemas de ruptura durante la operación, según la Tabla N° 7.6A (véase Anexo N° 7) como lámina de acero de 3,430 mm. Asimismo, el espaciamiento total entre la base del plato conductor y de calentamiento es igual a  $sp2 = e1 + Lpines + e2 = 0,00343 + 0,0689 + 0,00343 = 0,08$  m. El cálculo del diámetro interno de la cámara de liofilización ( $D_i$ ), usando la relación N°

$$103:D_i = 2\sqrt{\left(\frac{0,73}{2}\right)^2 + (0,10 + 2,5 \cdot 0,10 + 2 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,02)^2} = 1,32 \text{ m.}$$

El largo ( $L_c$ ) de éste debe ser ligeramente mayor al diámetro de plato estimado (0,73 m), por lo que se toma como valor 0,90m para permitir ubicación de los diversos accesorios internos debido a la forma cilíndrica. El gráfico anterior muestra que para valores de espesores mayores a los 4 mm de espesor es suficiente para resistir la presión externa atmosférica,

**GRÁFICO N° 5.26**  
**PRESIÓN EXTERNA EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE UNA PARED DE ACERO 316L PARA LA CABINA DEL LIOFILIZADOR**



### 5.2.3. Resultados del diseño del condensador de agua sublimada

#### a) Cantidad de agua a sublimar por alimento

La cantidad de agua sublimada, según lo indicado en la metodología correspondiente, brinda los siguientes resultados:

**TABLA N° 5.20  
CONTENIDO DE AGUA REMOVIDA EN LA LIOFILIZACIÓN**

Grupo	RANGO	$y_f$	$m_{\text{sólido seco}}$	$m_{\text{agua 0}}$	$m_{\text{agua f}}$	$m_{\text{agua s}}$	$m_{\text{agua s}} / \text{plato}$
1: Cereales	Mínimo	0,06	18,60	1,40	1,12	0,28	0,07
	Máximo	0,09	6,80	13,20	0,64	12,56	3,14
	Promedio	0,07	17,20	2,80	1,26	1,54	0,39
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,03	14,00	6,00	0,45	5,55	1,39
	Máximo	0,09	0,80	19,20	0,08	19,12	4,78
	Promedio	0,05	3,00	17,00	0,17	16,83	4,21
3: Frutas	Mínimo (*)	0,02	4,80	3,20	0,09	3,11	0,78
	Máximo	0,15	0,80	19,20	0,14	19,06	4,77
	Promedio	0,06	4,20	15,80	0,29	15,51	3,88
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,03	6,00	14,00	0,21	13,79	3,45
	Máximo	0,11	1,60	18,40	0,20	18,20	4,55
	Promedio	0,07	4,40	15,60	0,32	15,28	3,82
5: Carnes	Mínimo	0,03	9,20	10,80	0,28	10,52	2,63
	Máximo	0,08	2,60	17,40	0,24	17,16	4,29
	Promedio	0,05	5,00	15,00	0,29	14,71	3,68
6: Leches y derivados	Mínimo	0,02	11,00	9,00	0,23	8,77	2,19
	Máximo	0,07	1,40	18,60	0,11	18,49	4,62
	Promedio	0,04	4,00	16,00	0,17	15,83	3,96
7: Productos azucarados	Mínimo	0,04	17,20	2,80	0,72	2,08	0,52
	Máximo	0,04	14,80	5,20	0,62	4,58	1,14
	Promedio	0,04	16,20	3,80	0,68	3,12	0,78
8: Leguminosas	Mínimo	0,05	18,00	2,00	0,99	1,01	0,25
	Máximo	0,06	3,20	16,80	0,19	16,61	4,15
	Promedio	0,05	14,60	5,40	0,85	4,55	1,14
9: Tubérculos	Mínimo	0,02	9,00	11,00	0,19	10,81	2,70
	Máximo	0,12	0,80	19,20	0,10	19,10	4,77
	Promedio	0,06	5,60	14,40	0,38	14,02	3,51

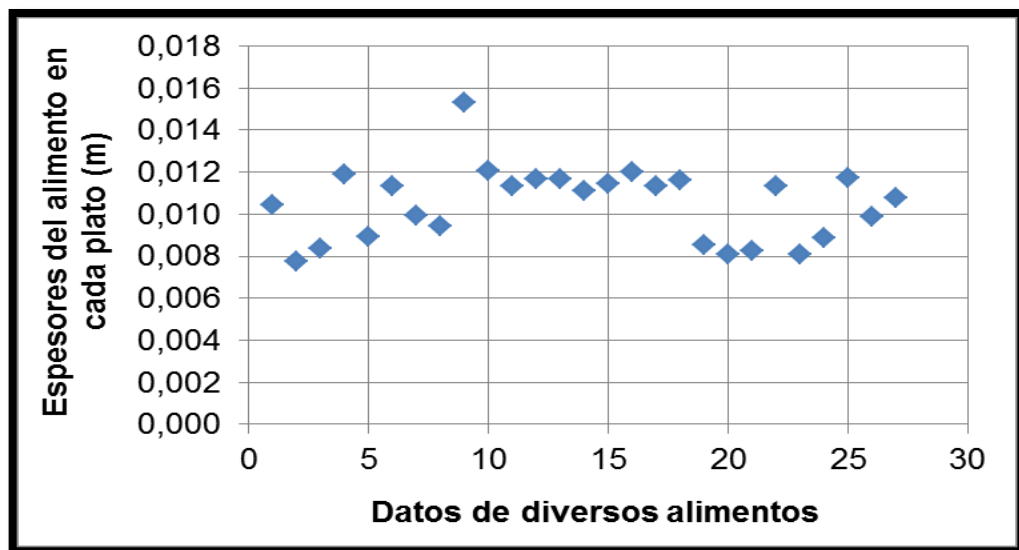
**Nota:**  $y_f$ : Humedad en base húmeda ( $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ );  $m_{\text{sólido seco}}$ : Masa del sólido seco presente en el alimento a liofilizar (kg);  $m_{\text{agua 0}}$ : Masa de agua contenida inicialmente en la muestra (kg);  $m_{\text{agua f}}$ : Masa de agua final contenida en

la muestra liofilizada (kg);  $m_{\text{agua s}}$ : Masa de agua sublimada (kg);  $m_{\text{agua s}}/\text{plato}$ : Masa de agua sublimada en cada uno de los cuatro platos (kg); (\*) Se considera 8 kg de alimento en vez de 20 kg de muestra para los demás casos para evitar un resultado atípico según Gráfico N° 5.27.

## b) Resultados de la determinación del tiempo de liofilización de alimentos

Tomando en cuenta 20 kg de carga inicial de alimento congelado, repartido en 4 platos, se recalcularon los espesores del alimento por plato según las dimensiones de éste y la densidad.

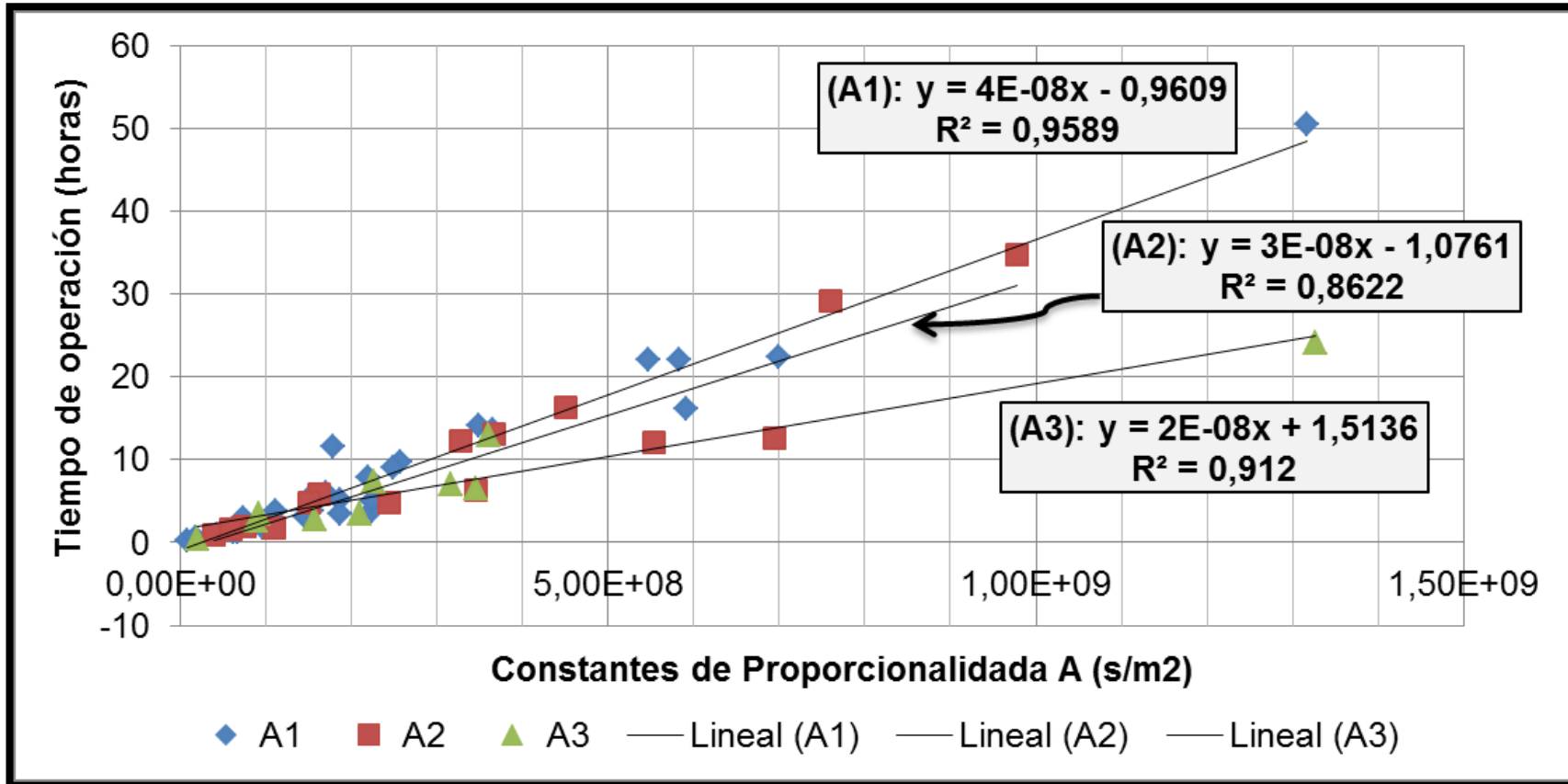
**GRÁFICO N° 5.27  
ESPESOR DE ALIMENTOS CONTENIDOS EN EL PLATO DE LIOFILIZACIÓN**



**Nota:** Debido a la densidad de  $481 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  para el menor valor de la fruta, bastante bajo comparado a los demás datos de densidad, se consideró una carga de 1 kg/plato para este caso (1 cm de espesor).

Se calcularon tres tiempos de liofilización para cada caso utilizando las constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ . La primera ecuación brindó resultado lógicos para todos los casos evaluados; se obtuvieron 15 y 10 datos lógicos para el segundo y tercer caso de los 27 datos totales.

**GRÁFICO N° 5.28**  
**TIEMPO DE LIOFILIZACIÓN ESTIMADO CON LAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD DE LAS DIVERSAS ECUACIONES USADAS**



**Nota:** Los datos presentados, corresponden a alimentos con espesores recalculados entre 0,008 m y 0,015m



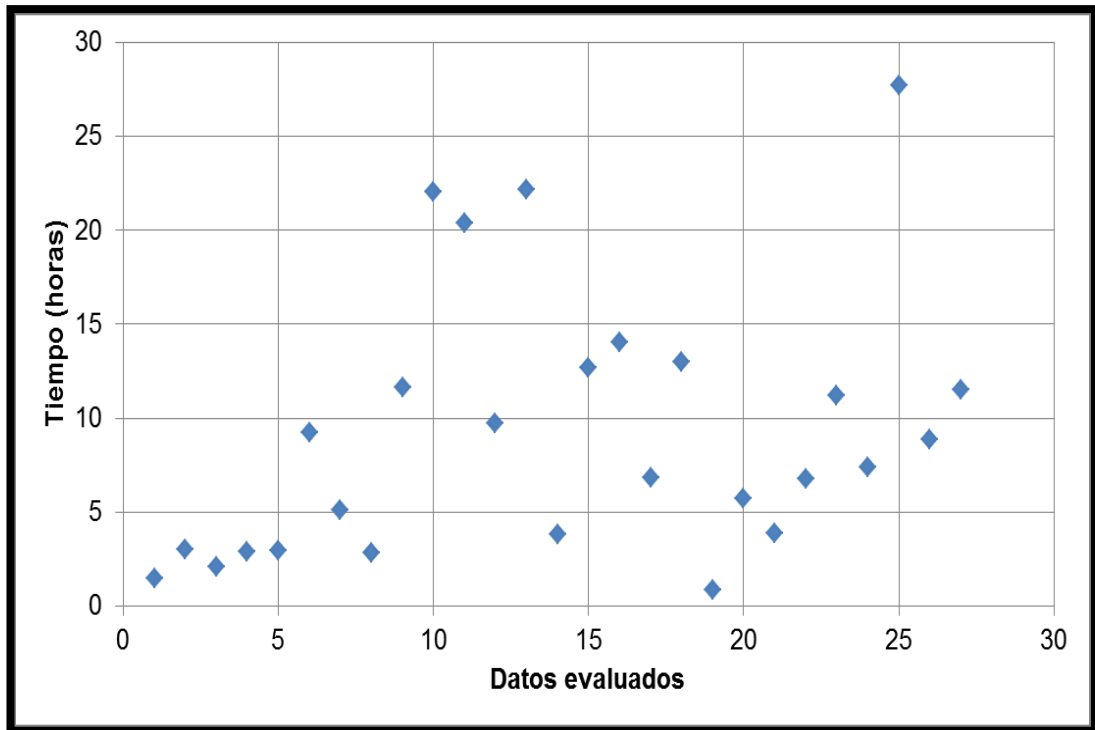
El tiempo de liofilización calculado fue considerado como el promedio de los tres tiempos calculados, obviando los resultados anómalos.

**TABLA N° 5.21  
TIEMPO DE LIOFILIZACIÓN ESTIMADO Y MASA DE AGUA  
REMOVIDA TOTAL**

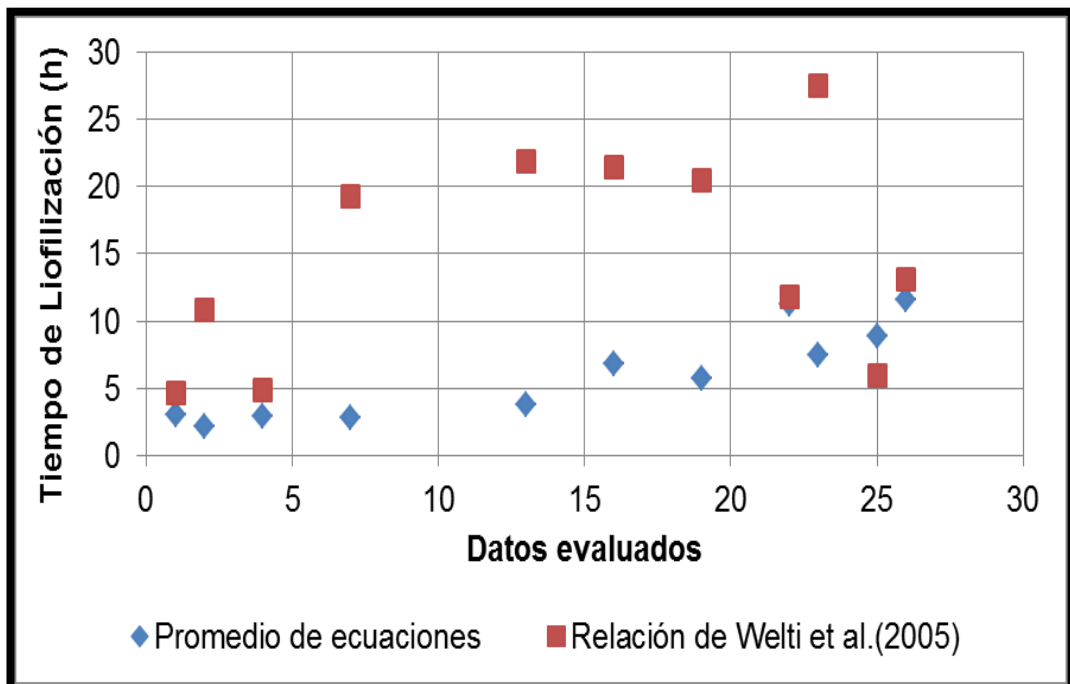
<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	<b>Tiempo de liofilización (horas)</b>	<b>Masa de agua sublimada total (kg)</b>
1: Cereales	Mínimo	1,46	<b><u>0,28</u></b>
	Máximo	3,01	12,56
	Promedio	2,11	1,54
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	2,88	5,55
	Máximo	2,93	<b><u>19,12</u></b>
	Promedio	9,25	<b><u>16,83</u></b>
3: Frutas	Mínimo	5,11	3,11
	Máximo	2,83	19,06
	Promedio	11,61	15,51
4: Pes y Mariscos	Mínimo	22,08	13,79
	Máximo	20,41	18,20
	Promedio	9,71	15,28
5: Carnes	Mínimo	22,15	10,52
	Máximo	3,80	17,16
	Promedio	12,69	14,71
6: Leches y derivados	Mínimo	14,04	8,77
	Máximo	6,84	18,49
	Promedio	12,97	15,83
7: Productos azucarados	Mínimo	<b><u>0,87</u></b>	2,08
	Máximo	5,72	4,58
	Promedio	3,88	3,12
8: Leguminosas	Mínimo	6,76	1,01
	Máximo	11,23	16,61
	Promedio	7,41	4,55
9: Tubérculos	Mínimo	<b><u>27,69</u></b>	10,81
	Máximo	8,86	19,10
	Promedio	11,53	14,02
<b>VALOR MÍNIMO GLOBAL</b>		<b>0,87</b>	<b>0,28</b>
<b>VALOR MÁXIMO GLOBAL</b>		<b>27,69</b>	<b>19,12</b>

**Nota:** Comparando los promedios de cada grupo, el Grupo N°2 es el que contiene el mayor contenido de agua a sublimar.

**GRÁFICO N° 5.29**  
**RANGOS DE TIEMPOS DE LIOFILIZACIÓN PROMEDIO**



**GRÁFICO N° 5.30**  
**COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE LIOFILIZACIÓN CON EL MODELO DE WELTI ET AL. (2005)**



**TABLA N° 5.22**  
**VARIABLES REQUERIDAS EN EL MODELO DE WELTI ET AL. (2005)**

<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	$\varepsilon$	$D_k$	$\rho_h$	$\alpha$	$\beta$
1: Cereales	Mínimo	0,49	0,04	792,61	9,74E+08	2,39E-05
	Máximo	0,48	3,45	792,61	9,74E+08	2,36E-05
	Promedio	0,48	1,75	792,61	9,74E+08	2,36E-05
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,59	0,11	259,45	8,10E+09	2,02E-06
	Máximo	0,48	3,47	827,10	7,63E+08	3,10E-05
	Promedio	0,49	1,74	608,60	2,48E+09	7,99E-06
3: Frutas	Mínimo	0,69	0,04	108,76	1,43E+10	1,31E-06
	Máximo	0,48	0,98	827,10	7,63E+08	3,10E-05
	Promedio	0,48	0,49	557,72	3,03E+09	6,05E-06
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,58	0,00	287,72	7,43E+09	2,20E-06
	Máximo	0,48	0,06	877,22	4,80E+08	5,08E-05
	Promedio	0,48	0,03	669,81	1,89E+09	1,09E-05
5: Carnes	Mínimo	0,60	0,11	287,72	7,43E+09	2,31E-06
	Máximo	0,48	0,68	885,82	4,32E+08	5,66E-05
	Promedio	0,49	0,39	681,92	1,79E+09	1,19E-05
6: Leches y derivados	Mínimo	0,67	0,11	598,73	2,58E+09	1,04E-05
	Máximo	0,48	3,39	655,59	2,02E+09	1,01E-05
	Promedio	0,54	1,75	627,86	2,28E+09	9,75E-06
7: Productos azucarados	Mínimo	0,54	0,11	265,15	7,96E+09	1,89E-06
	Máximo	0,54	3,34	498,41	3,77E+09	5,15E-06
	Promedio	0,54	1,71	386,93	5,42E+09	3,15E-06
8: Leguminosas	Mínimo	0,50	0,11	637,26	2,20E+09	9,41E-06
	Máximo	0,49	3,38	637,26	2,20E+09	9,22E-06
	Promedio	0,49	1,75	637,26	2,20E+09	9,29E-06
9: Tubérculos	Mínimo	0,67	0,29	827,10	7,63E+08	4,31E-05
	Máximo	0,48	3,47	827,10	7,63E+08	3,10E-05
	Promedio	0,48	1,88	827,10	7,63E+08	3,09E-05

**Nota:**  $\varepsilon$ : Fracción volumétrica del hielo, se considera como la porosidad, considerando que la sublimación del hielo deja espacios libres, tomando en consideración la estimada según el contenido de humedad;  $D_k$ : Coeficiente de difusión de Knudsen del vapor de agua ( $m^2.s^{-1}$ );  $\rho_h$ : Densidad del hielo ( $kg.m^{-3}$ ) estimada en función de la temperatura del frente de hielo ( $T_h$ );  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes para determinar el tiempo de liofilización

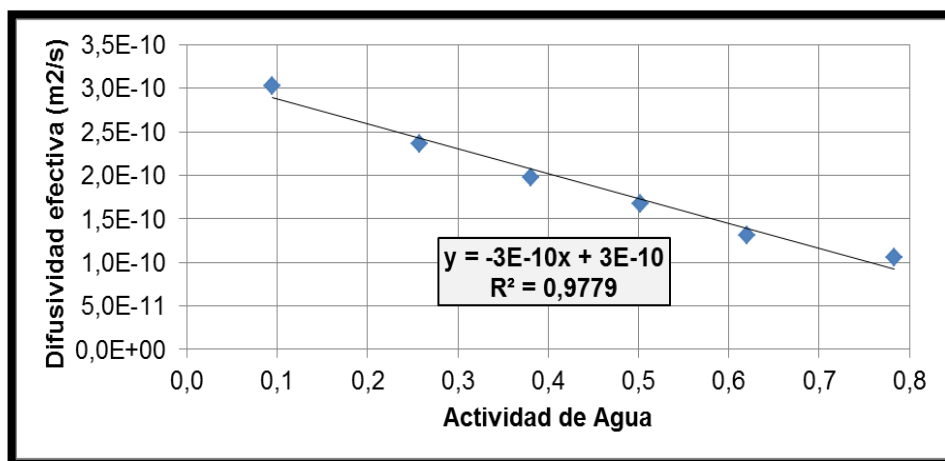
La comparación de los resultados del tiempo de liofilización, provenientes del modelo de Welti et al. (2005:8), es mostrada en el Gráfico anterior, cabe mencionar que 11 de los datos estimados brindaron, valores atípicos; sin embargo, se realizó una comparación de

los considerados con los previamente calculándose, observando desviaciones entre ambos, en la mayor cantidad de sus datos; debiéndose a la que el segundo modelo evalúa el comportamiento del hielo predominantemente.

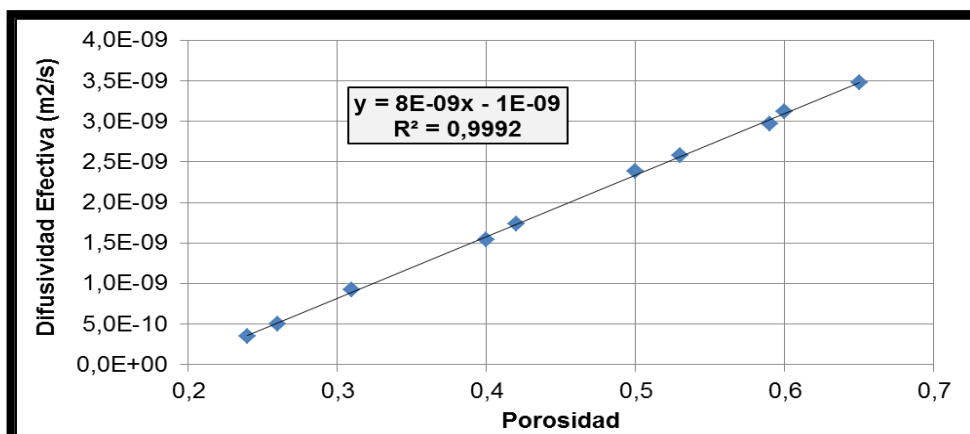
**c) Resultados de la velocidad de liofilización del alimento**

El análisis previo de la Difusividad Efectiva ( $D_{eff}$ ) en un alimento seco se realizó observando la Gráfica N°5.31 y la N° 5.32.

**GRÁFICO N° 5.31  
DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD EN LA PAPA LIOFILIZADA A 30° C**



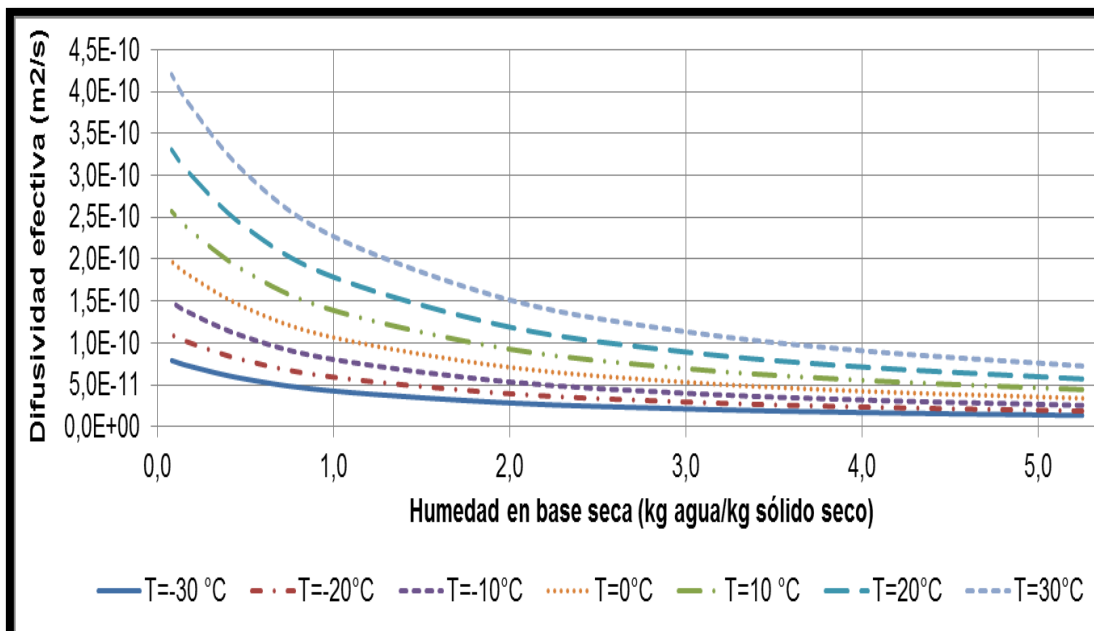
**GRÁFICO N° 5.32  
DIFUSIVIDAD EFECTIVA COMO FUNCIÓN DE LA POROSIDAD**



Se pudo apreciar indirectamente que la Difusividad efectiva es inversamente proporcional a la humedad contenida en el alimento, puesto que la actividad de agua y la porosidad tienen una relación directa e inversa con esta última respectivamente.

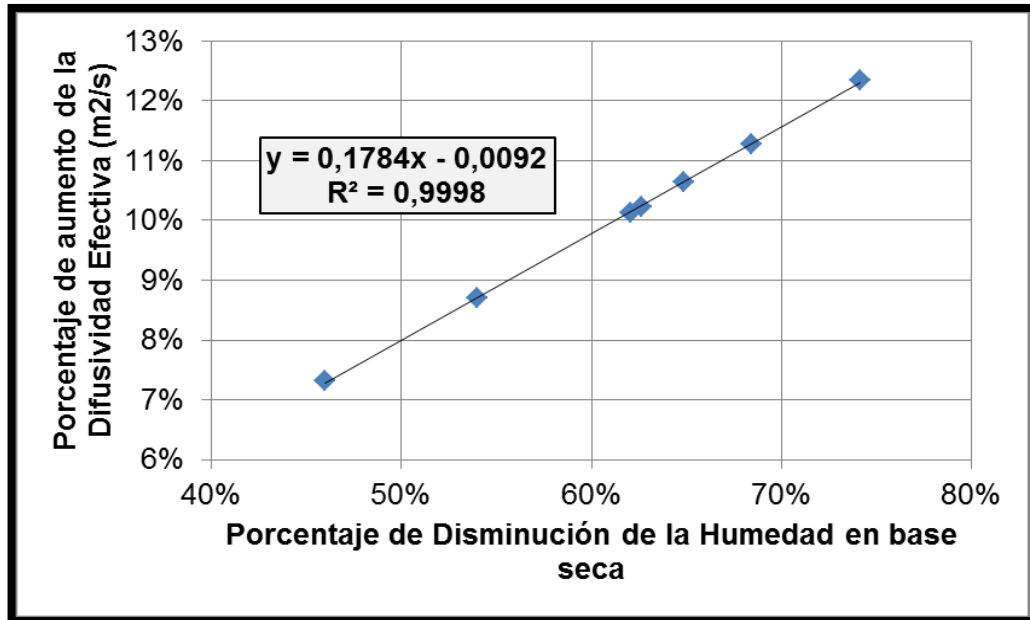
La ecuación N°15 permitió calcular el porcentaje de aumento de la Difusividad efectiva con respecto a la disminución de humedad, necesarios para realizar la corrección de valores citados en Tablas, utilizando los datos calculados para la manzana, plátano, uvas, zanahoria, ajo, cebolla y papa se obtuvo una relación lineal para humedades pequeñas como se muestra en el siguiente Gráfico.

**GRÁFICO N° 5.33**  
**DIFUSIVIDAD EFECTIVA DE LA MANZANA EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD**



**Nota:** La ecuación N°15 fue utilizada

**GRÁFICO N° 5.34**  
**PORCENTAJE DE AUMENTO DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA EN FUNCIÓN DE LA DISMINUCIÓN DE HUMEDAD EN BASE SECA**



**TABLA N° 5.23**  
**CORRECCIÓN DE LOS DATOS DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA**

GRUPO	ALIMENTO	$x_0$	$x_f$	$D_{eff}$	%D	%A	$D_{eff}$ corregido
Tabla N°3.12C	Cebolla	6,00	0,09	1,60E-10	98%	17%	1,87E-10
Tabla N°3.12C	Pera	6,50	0,09	9,60E-10	99%	17%	1,12E-09
Tabla N°3.12C	Pez espada	1,00	0,04	8,90E-10	96%	16%	1,03E-09
Tabla N°3.12C	Papa	3,39	0,07	3,20E-10	98%	17%	3,73E-10
1: Cereales	Grano de maíz	0,20	0,06	4,00E-11	70%	12%	4,46E-11
	Grano de trigo	0,20	0,07	3,00E-11	65%	11%	3,32E-11
	Arroz	0,20	0,07	4,00E-11	68%	11%	4,44E-11
2: Verduras y Hortalizas	Zanahoria	0,30	0,05	2,00E-10	85%	14%	2,28E-10
3: Frutas	Manzana	0,50	0,08	2,00E-10	84%	14%	2,28E-10
4: Pescados y Mariscos	Bacalao	0,50	0,12	2,00E-10	76%	13%	2,25E-10
	Pez caballa	0,40	0,12	5,00E-11	70%	11%	5,57E-11
5: Carnes	Carne picada	0,60	0,09	1,00E-10	85%	14%	1,14E-10
9: Tubérculos	Papa	0,30	0,07	5,00E-10	78%	13%	5,65E-10

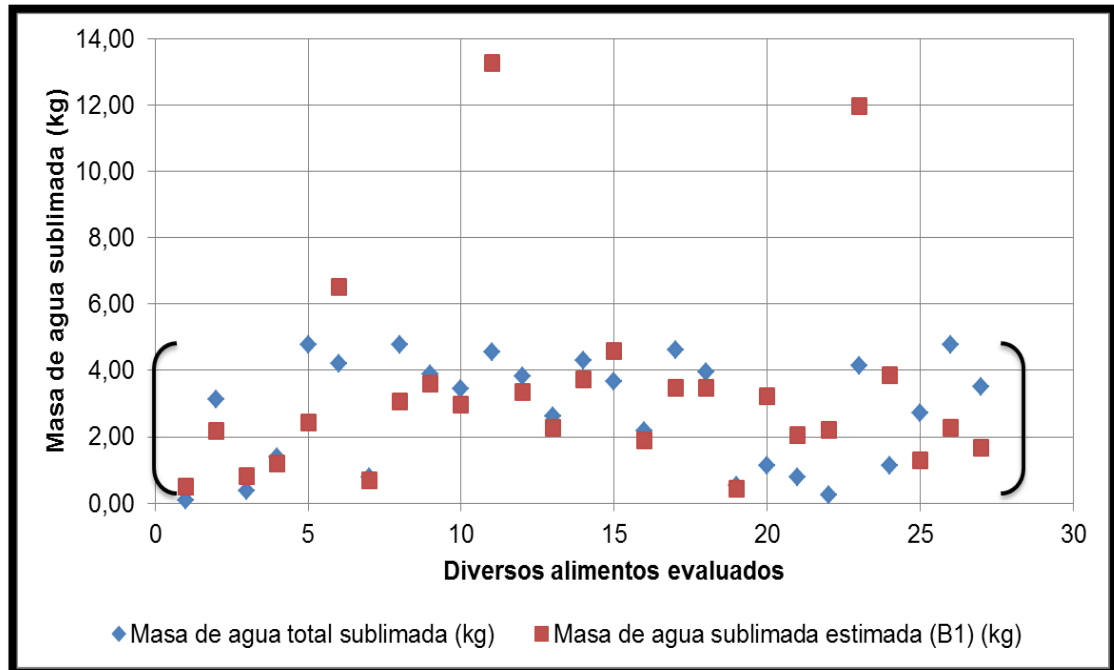
**Nota:**  $x_0$ : Humedad inicial (kg.kg materia seca<sup>-1</sup>);  
 $x_f$ : Humedad final (kg.kg materia seca<sup>-1</sup>);  
 $D_{eff}$ : Difusividad efectiva (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>); %D: Porcentaje de Disminución de la humedad; %A: Porcentaje de aumento de la Difusividad;  $D_{eff}$  corregido (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 5.24**  
**CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD DE LAS**  
**ECUACIONES DE CINÉTICA DE LIOFILIZACIÓN**

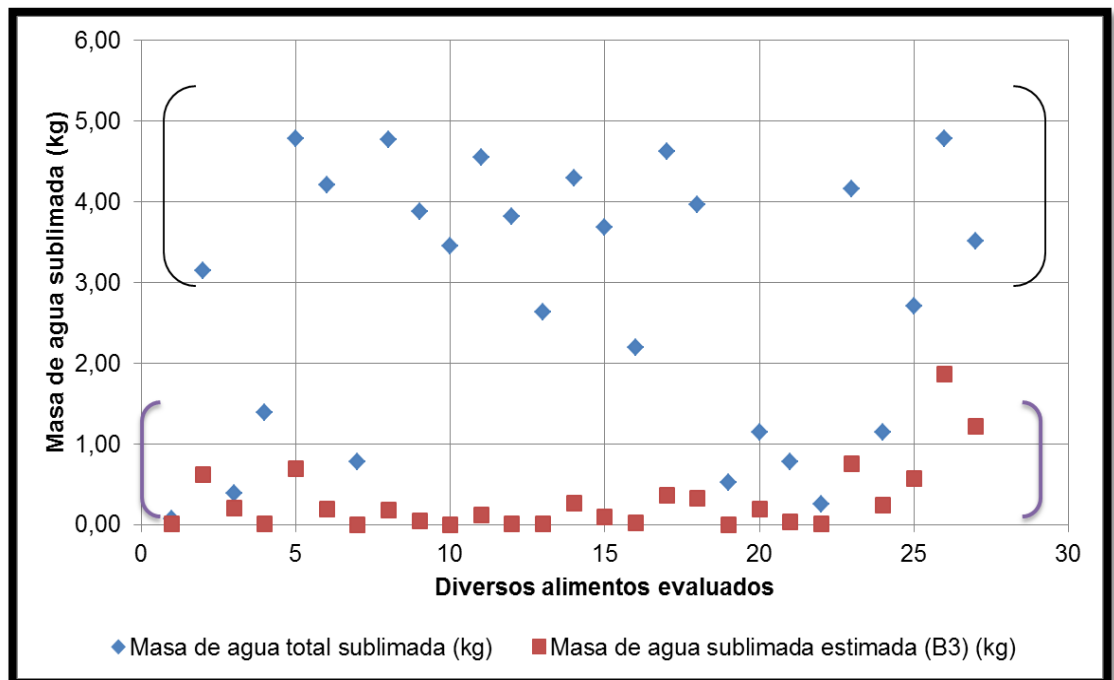
<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	<b>D<sub>eff</sub></b>	<b>B<sub>1</sub></b>	<b>B<sub>2</sub></b>	<b>B<sub>3</sub></b>
1: Cereales	Mínimo	3,32E-11	5,58E-07	4,97E-18	2,93E-09
	Máximo	4,46E-11	9,04E-07	6,80E-18	2,52E-07
	Promedio	4,08E-11	5,13E-07	6,21E-18	1,28E-07
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	2,63E-11	7,97E-07	1,48E-19	3,66E-10
	Máximo	8,00E-09	1,19E-06	1,63E-15	3,40E-07
	Promedio	2,54E-09	1,28E-06	1,14E-16	3,82E-08
3: Frutas	Mínimo	3,07E-11	2,11E-07	4,06E-20	3,65E-11
	Máximo	6,40E-09	1,64E-06	1,31E-15	9,61E-08
	Promedio	1,55E-09	7,61E-07	5,16E-17	7,85E-09
4: Pes y Mariscos	Mínimo	1,90E-11	2,61E-07	1,28E-19	0,00E+00
	Máximo	5,28E-09	1,18E-06	1,81E-15	9,87E-09
	Promedio	6,48E-10	6,46E-07	4,15E-17	9,23E-10
5: Carnes	Mínimo	8,00E-14	1,93E-07	5,37E-22	4,43E-10
	Máximo	1,14E-10	1,75E-06	4,41E-17	1,26E-07
	Promedio	6,68E-11	6,62E-07	4,59E-18	1,32E-08
6: Leches y derivados	Mínimo	2,1E-11	2,61E-07	8,73E-19	3,06E-09
	Máximo	2,1E-11	9,27E-07	1,23E-18	9,50E-08
	Promedio	2,1E-11	5,01E-07	1,04E-18	4,67E-08
7: Productos azucarados	Mínimo	8,00E-14	6,94E-07	4,61E-22	3,43E-10
	Máximo	8,00E-09	7,28E-07	1,87E-16	4,22E-08
	Promedio	1,12E-09	7,01E-07	1,40E-17	1,15E-08
8: Leguminosas	Mínimo	4,3E-10	5,91E-07	2,24E-17	2,87E-09
	Máximo	4,3E-10	1,38E-06	2,24E-17	8,65E-08
	Promedio	4,3E-10	7,41E-07	2,24E-17	4,48E-08
9: Tubérculos	Mínimo	8,30E-12	8,73E-08	1,67E-18	3,90E-08
	Máximo	5,65E-10	4,08E-07	1,13E-16	3,34E-07
	Promedio	2,45E-10	2,52E-07	4,93E-17	1,81E-07

**Nota:** D<sub>eff</sub>: Difusividad efectiva de alimentos con bajo contenido de humedad seleccionados y estimados (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>); B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> y B<sub>3</sub> son constantes de proporcionalidad (kg.m.s<sup>-1</sup>)

**GRÁFICO N° 5.35**  
**MASA DE AGUA TOTAL SUBLIMADA POR PLATO Y MASA DE AGUA SUBLIMADA ESTIMADA CON LA CONSTANTE B<sub>1</sub>**

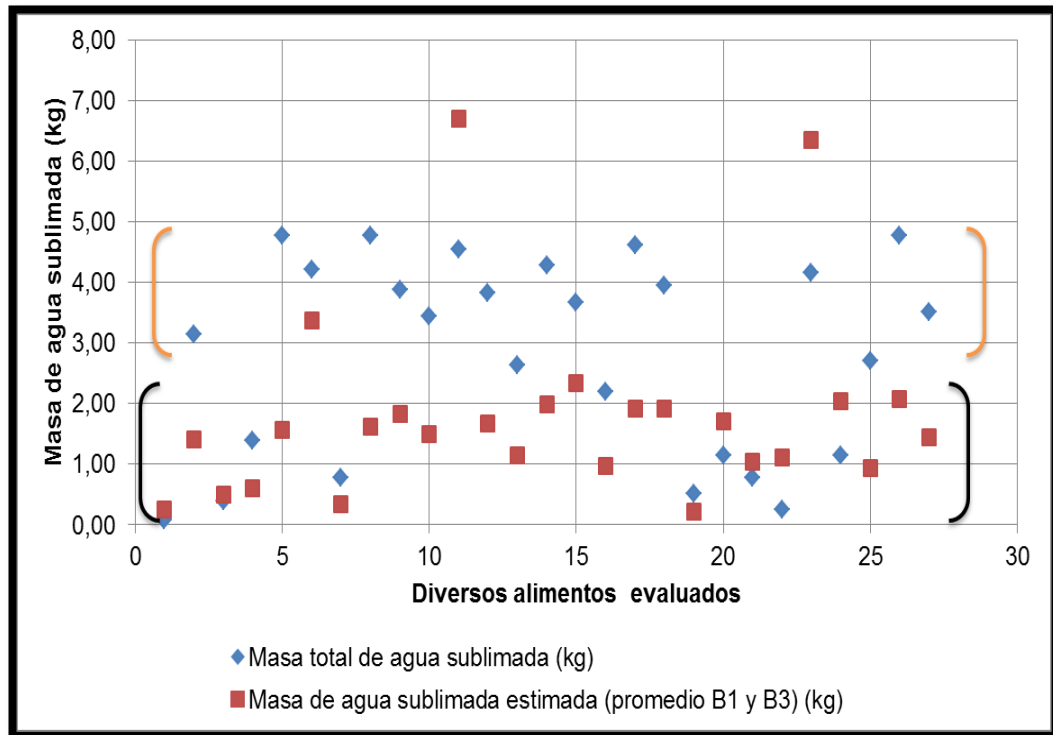


**GRÁFICO N° 5.36**  
**MASA DE AGUA TOTAL SUBLIMADA POR PLATO Y MASA DE AGUA SUBLIMADA ESTIMADA CON LA CONSTANTE B<sub>3</sub>**





**GRÁFICO N° 5.37**  
**MASA DE AGUA TOTAL SUBLIMADA POR PLATO Y MASA DE AGUA SUBLIMADA ESTIMADA CON EL PROMEDIO DE LAS CONSTANTES  $B_1$  Y  $B_3$**



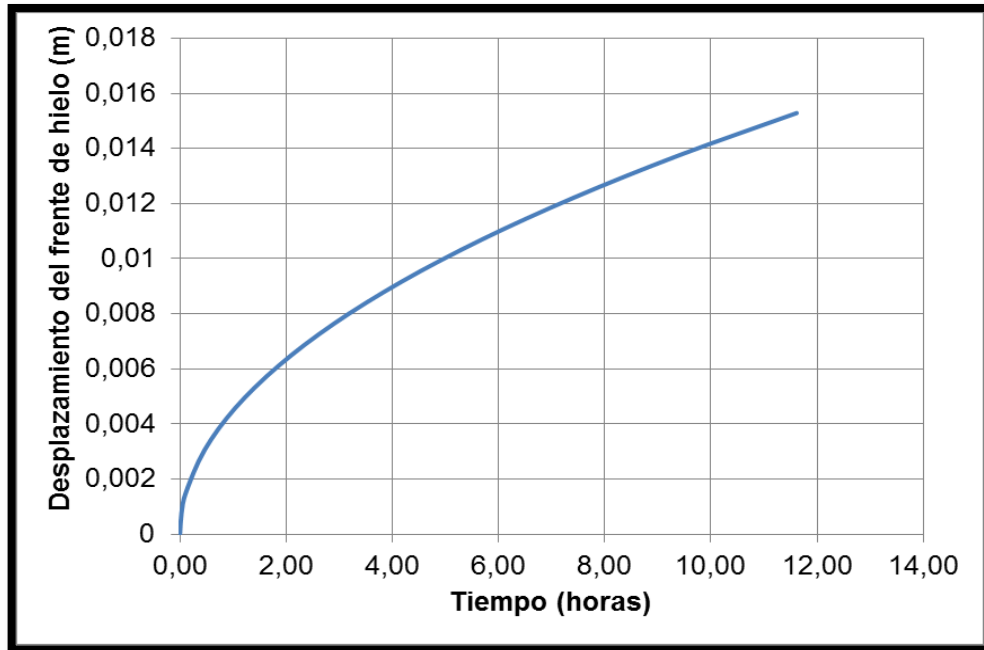
Debido a que la constante  $B_2$ , calculada es demasiado pequeña, no fue considerada durante la evaluación. Asimismo, las constantes  $B_1$ ,  $B_3$  y el promedio de ambas fueron usadas para estimar la masa de agua sublimada según el procedimiento dado en la metodología.

Fue observado que de los tres casos la constante  $B_1$  es la que brinda el rango de valores más cercanos según los tiempos y masa de agua sublimada según los apartados anteriores.

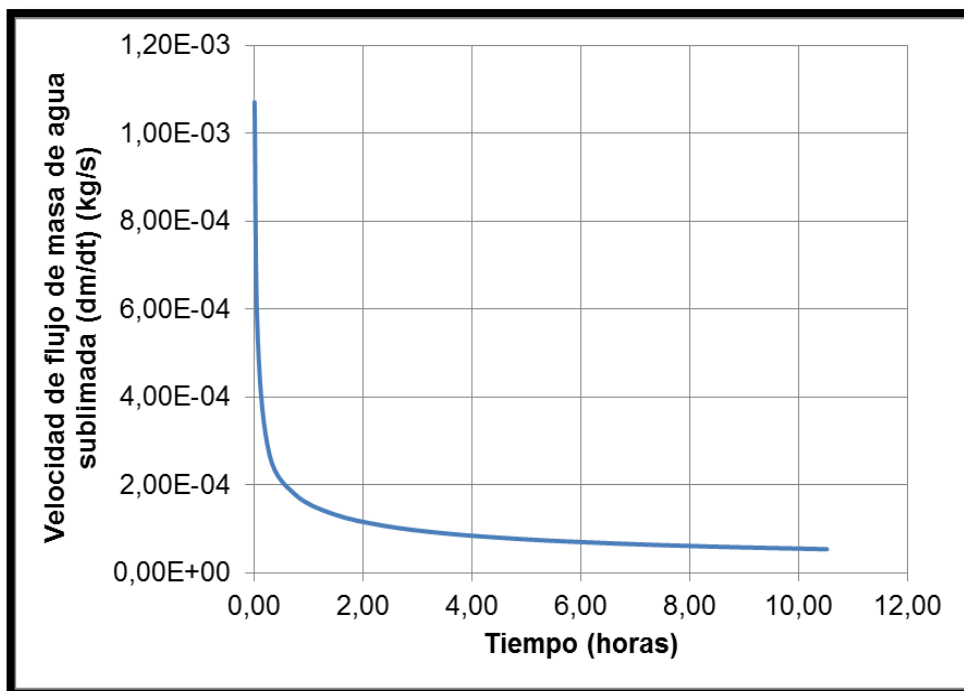
**TABLA N° 5.25**  
**ESQUEMA DE ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE LA LIOFILIZACIÓN PARA FRUTA PROMEDIO EN UN PLATO DEL LIOFILIZADOR**

<b>i</b>	<b>t<sub>i</sub> (s)</b>	<b>t<sub>i</sub> (h)</b>	<b><math>\bar{t}_i</math> (h)</b>	<b>z<sub>i</sub> (m)</b>	$\left[\frac{\Delta z}{\Delta t}\right]_i$	$\left[\frac{\Delta m}{\Delta t}\right]_i$	<b><math>\Delta m_i</math></b>	<b>m<sub>i</sub> (kg)</b>	<b>x<sub>i</sub></b>	<b><math>\Delta x_i</math></b>	<b><math>R_{v_i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}</math></b>
0	0,00	0,00	-	0	-	-	-	0	3,76	-	-
1	104,53	0,03	0,01	7,64E-04	7,31E-06	1,07E-03	1,12E-01	0,11	3,66	0,11	1,02E-03
2	418,12	0,12	0,07	1,53E-03	2,44E-06	5,36E-04	1,68E-01	0,28	3,50	0,16	5,10E-04
3	1672,47	0,46	0,29	3,06E-03	1,22E-06	2,68E-04	3,36E-01	0,62	3,18	0,32	2,55E-04
4	3763,07	1,05	0,75	4,59E-03	7,31E-07	1,79E-04	3,73E-01	0,99	2,82	0,36	1,70E-04
5	6689,90	1,86	1,45	6,11E-03	5,22E-07	1,34E-04	3,92E-01	1,38	2,45	0,37	1,28E-04
6	10452,96	2,90	2,38	7,64E-03	4,06E-07	1,07E-04	4,03E-01	1,78	2,06	0,38	1,02E-04
7	15052,27	4,18	3,54	9,17E-03	3,32E-07	8,93E-05	4,11E-01	2,19	1,67	0,39	8,50E-05
8	20487,81	5,69	4,94	1,07E-02	2,81E-07	7,65E-05	4,16E-01	2,61	1,28	0,40	7,29E-05
9	26759,59	7,43	6,56	1,22E-02	2,44E-07	6,69E-05	4,20E-01	3,03	0,88	0,40	6,38E-05
10	33867,60	9,41	8,42	1,38E-02	2,15E-07	5,95E-05	4,23E-01	3,45	0,47	0,40	5,67E-05
11	41811,85	11,61	10,51	1,53E-02	1,92E-07	5,36E-05	4,25E-01	3,88	0,07	0,41	5,10E-05

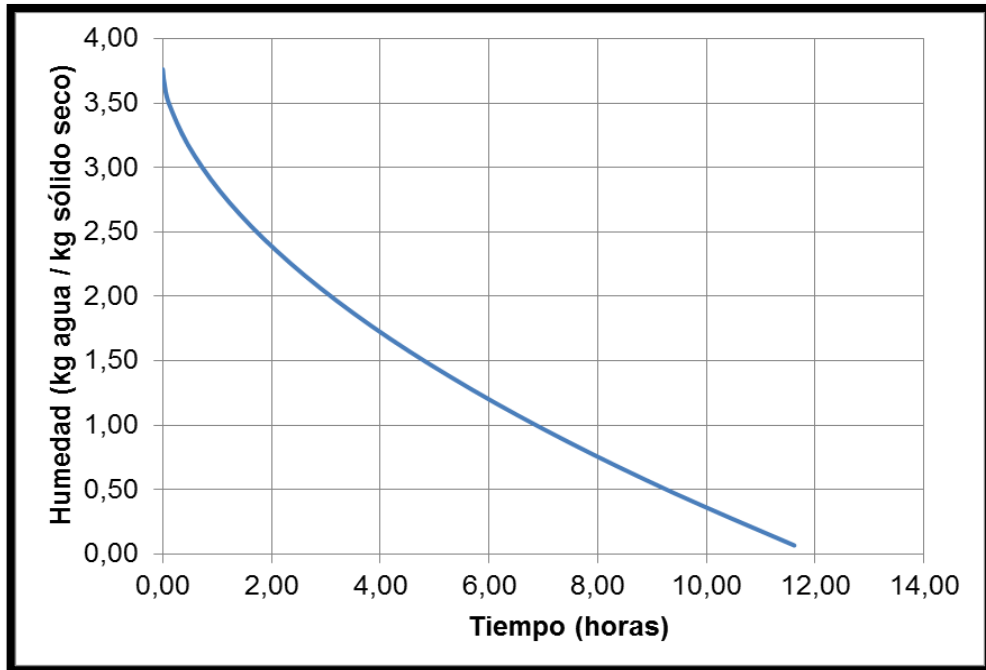
**GRÁFICO N° 5.38**  
**DESPLAZAMIENTO DEL FRENTE DE HIELO ( $z_i$ ) DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE LA FRUTA PROMEDIO POR PLATO**



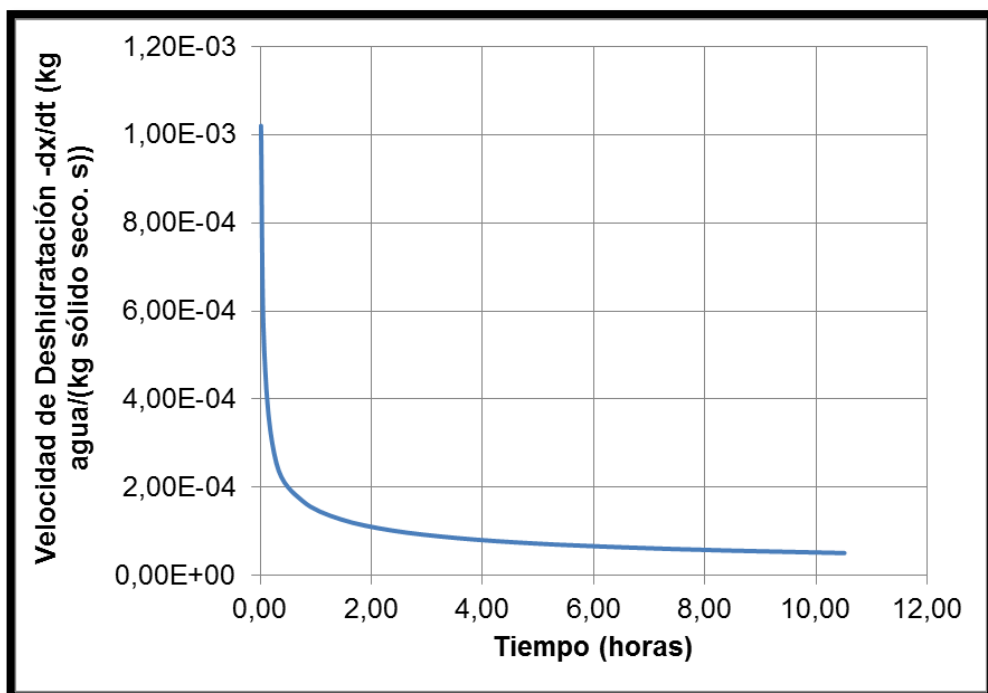
**GRÁFICO N° 5.39**  
**VELOCIDAD DE FLUJO DE MASA DE AGUA QUE SE VA SUBLIMANDO DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE LA FRUTA PROMEDIO POR PLATO**



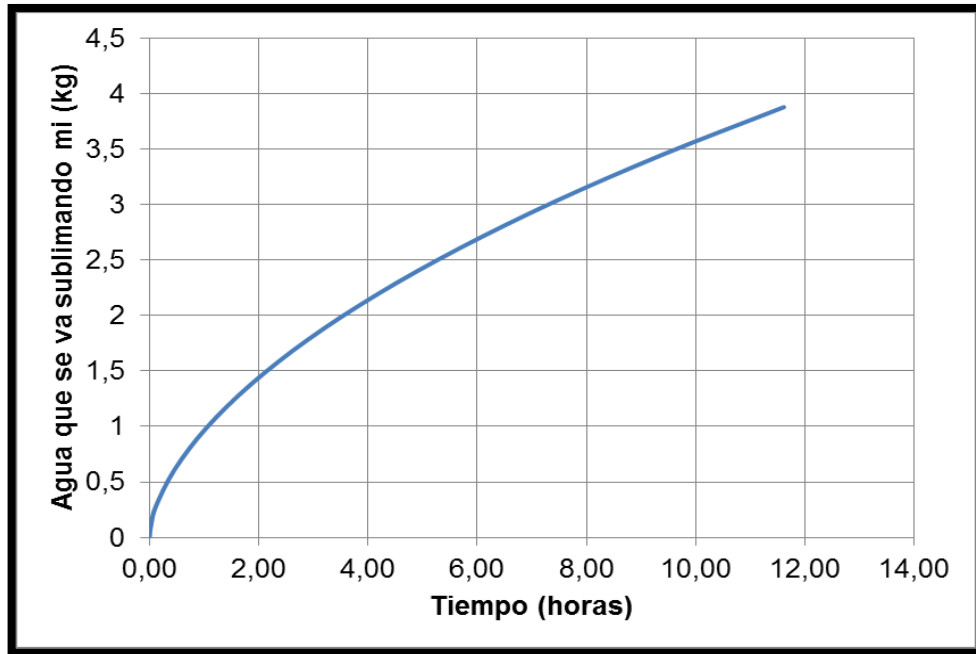
**GRÁFICO N° 5.40**  
**COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD DURANTE LA LIOFILIZACIÓN**  
**DE LA FRUTA PROMEDIO POR PLATO**



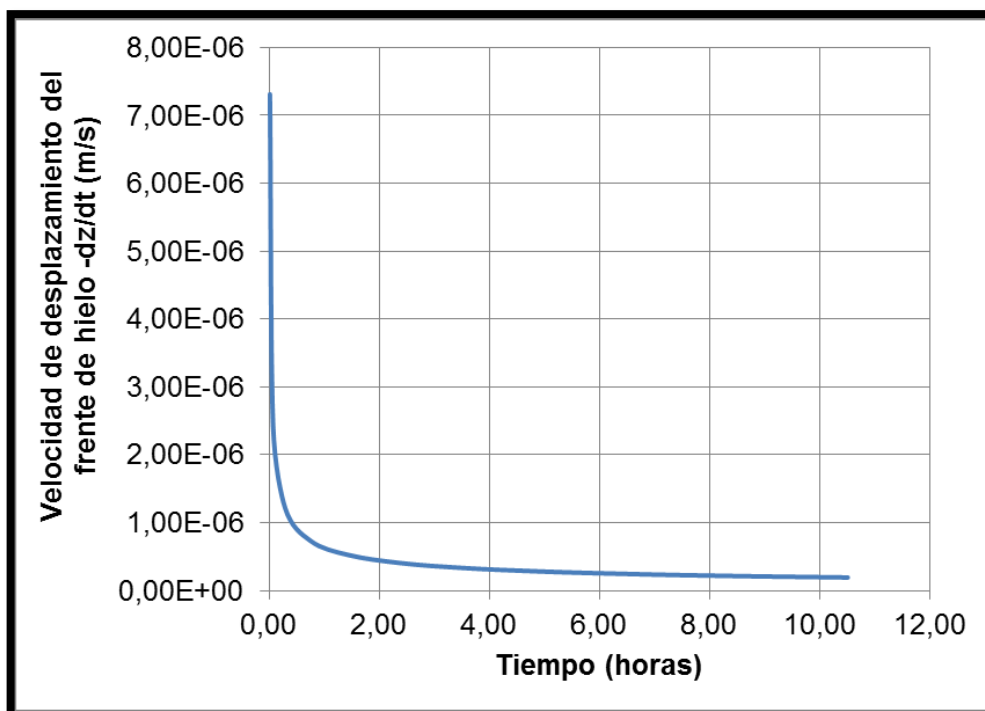
**GRÁFICO N° 5.41**  
**VELOCIDAD DE LIOFILIZACIÓN DE LA FRUTA PROMEDIO POR**  
**PLATO**



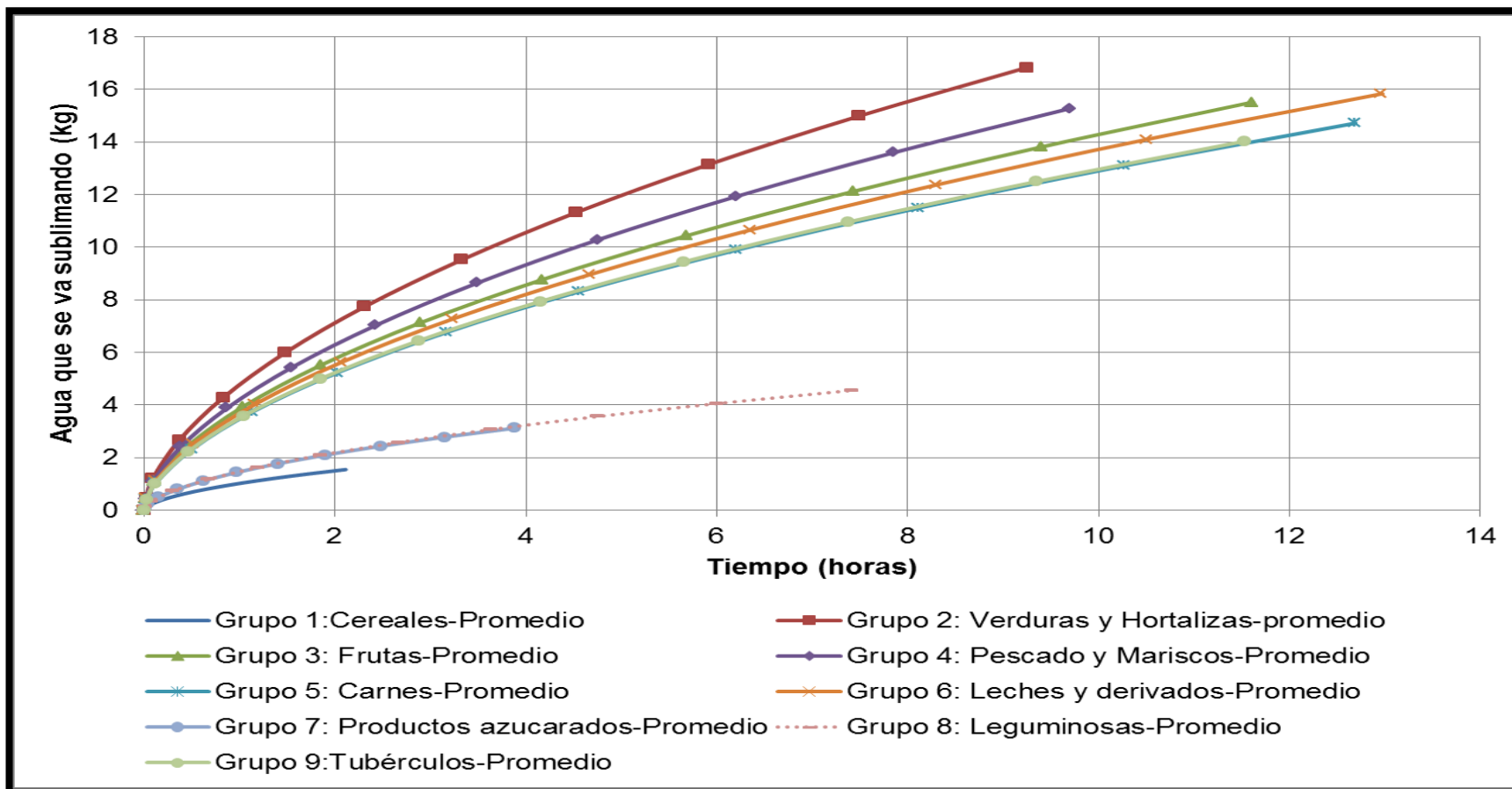
**GRÁFICO N° 5.42**  
**AGUA SUBLIMADA DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE LA FRUTA**  
**PROMEDIO POR PLATO**



**GRÁFICO N° 5.43**  
**VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO DEL FRENTE DE HIELO**  
**DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE LA FRUTA PROMEDIO POR PLATO**



**GRÁFICO N° 5.44**  
**AGUA QUE SE VA SUBLIMANDO PARA CADA GRUPO PROMEDIO DE LOS ALIMENTOS DURANTE LA LIOFILIZACIÓN EN LOS CUATRO PLATOS DENTRO DEL EQUIPO**



**TABLA N° 5.26**  
**CONSTANTES DE PROPORCIONALIDAD QUE RELACIONAN LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE MASA Y LA VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO DE LA INTERFASE DE HIELO**

<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	$C_N$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1: Cereales	Mínimo	6,61	6,79	289,92	162,55
	Máximo	395,87	406,14	318,13	159,23
	Promedio	44,99	46,16	364,42	159,23
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	113,95	116,91	327,38	64,07
	Máximo	520,74	534,26	150,42	166,16
	Promedio	361,81	371,20	167,64	124,81
3: Frutas	Mínimo	76,37	78,35	0,00	31,41
	Máximo	492,21	504,99	87,47	166,16
	Promedio	247,34	253,76	0,00	112,05
4: Pes y Mariscos	Mínimo	278,66	285,90	325,71	69,84
	Máximo	392,13	402,31	127,61	176,23
	Promedio	318,94	327,22	226,68	134,56
5: Carnes	Mínimo	219,30	224,99	159,71	72,25
	Máximo	375,76	385,52	0,00	177,96
	Promedio	313,58	321,72	77,47	139,85
6: Leches y derivados	Mínimo	177,61	182,22	179,97	167,90
	Máximo	396,99	407,29	185,16	131,71
	Promedio	332,20	340,82	185,08	141,90
7: Productos azucarados	Mínimo	59,41	60,96	323,82	59,93
	Máximo	138,33	141,92	356,96	112,65
	Promedio	92,22	94,61	343,57	87,45
8: Leguminosas	Mínimo	21,68	22,24	177,49	133,36
	Máximo	500,99	514,00	356,00	130,69
	Promedio	124,97	128,21	300,21	130,69
9: Tubérculos	Mínimo	224,33	230,16	386,86	231,94
	Máximo	469,83	482,02	228,61	166,16
	Promedio	317,59	325,84	320,68	166,16

La Tabla anterior mostrada indica que el modelo evaluado tiene mayor semejanza en resultados al modelo correspondiente a la constante de proporcionalidad  $C_1$  por lo que se recomienda el uso de este último.

**d) Resultados de la determinación de las dimensiones del condensador**

Según el Gráfico anterior se analizó la cinética de liofilización del Grupo N°2 por llegar a una máxima cantidad de agua, según se muestra en la siguiente Tabla, la cual muestra una masa de agua de 16,83 kg.

El espesor de hielo que puede ser formado a temperaturas menores a los 0°C varía entre los valores de 0,3mm y 10 mm. Asimismo, la densidad del hielo estimada con la ecuación de la Tabla N°3.7A del Anexo 3.7 es de 707,77 kg.m<sup>-3</sup>, y según los datos medidos experimentales varía entre 24 y 500 kg.m<sup>-3</sup> (ver Tabla N° 4.1 del Anexo N°4).

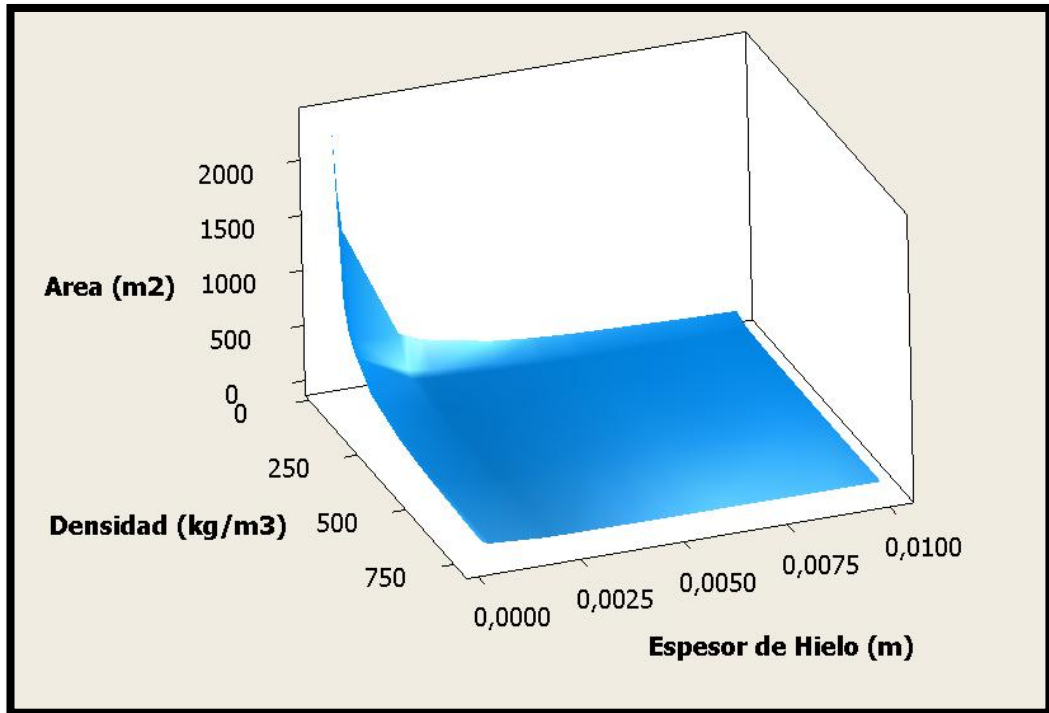
**TABLA N° 5.27  
CINÉTICA DE LIOFILIZACIÓN DE DATOS PROMEDIO DEL GRUPO  
N°2**

Tiempo (horas)	Tiempo (min.)	$\Delta m$ (kg)	$m$ (kg)	Entre los minutos	$\frac{dm}{dt}$ (kg/s)
0,00	0,00	-	0,00	-	-
0,02	1,39	0,49	0,49	0 y 1,39	5,84E-03
0,09	5,55	0,73	1,21	1,39 y 5,55	2,92E-03
0,37	22,19	1,46	2,67	5,55 y 22,19	1,46E-03
0,83	49,93	1,62	4,29	22,19 y 49,93	9,73E-04
1,48	88,76	1,70	5,99	49,93 y 88,76	7,30E-04
2,31	138,68	1,75	7,74	88,76 y 138,68	5,84E-04
3,33	199,70	1,78	9,52	138,68 y 199,70	4,86E-04
4,53	271,82	1,80	11,32	199,70 y 271,82	4,17E-04
5,92	355,02	1,82	13,15	271,82 y 355,02	3,65E-04
7,49	449,33	1,83	14,98	355,02 y 449,33	3,24E-04
9,25	554,72	1,85	16,83	449,33 y 554,72	2,92E-04

**Nota:**  $\Delta m$ : Cantidad de agua sublimada por intervalo de tiempo,  $m$ : Masa de agua sublimada acumulada,  $\frac{dm}{dt}$ : Flujo másico de agua sublimada por intervalo de tiempo.



**GRÁFICO N° 5.45**  
**AREA DEL CONDENSADOR EN FUNCIÓN DEL ESPESOR Y**  
**DENSIDAD DE LA ESCARCHA DE HIELO FORMADA**

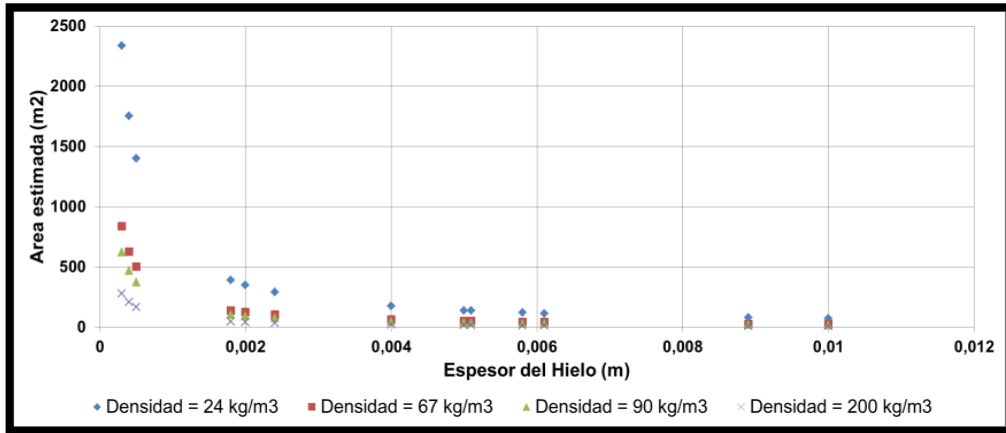


**Nota:** Elaborado en Minitab 16.0

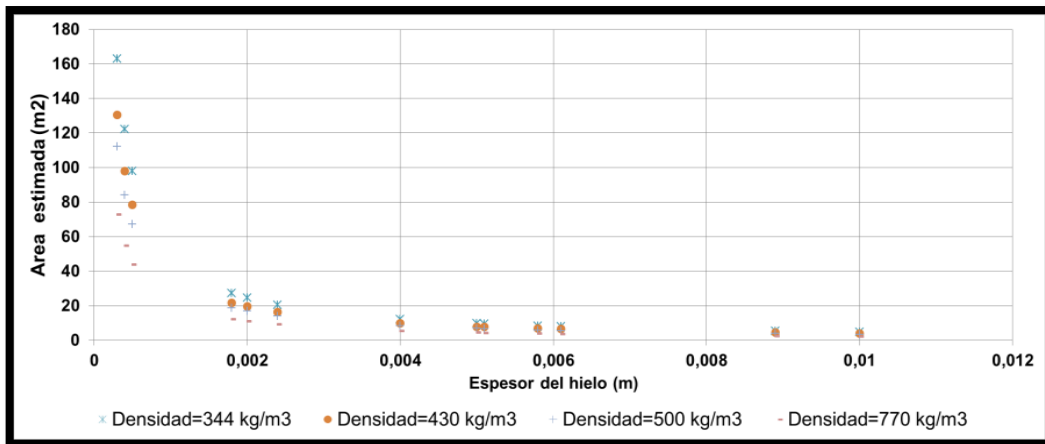
El análisis de las áreas en función del espesor de hielo formado para diversas densidades consideradas permitió obtener un valor de 0,7466 mm de espesor óptimo a partir de la intersección de rectas pendientes trazadas en los tres primeros puntos y en los siete últimos de Gráficos 5.45 y 5.46

Se encontró el mismo espesor óptimo pero con distintas áreas según la densidad de hielo considerado, de todas las áreas adecuada se estimó considerando el punto donde la gráfica empieza a elevarse incoherentemente mediante la intersección de rectas pendientes trazadas en los dos primeros puntos y en los cuatro últimos del Gráfico 5.47, el cual es 18,4 m<sup>2</sup>.

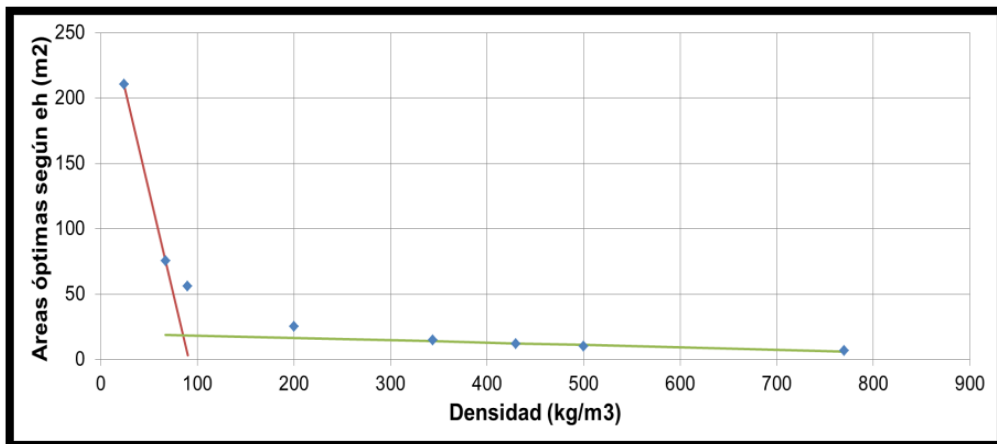
**GRÁFICO N° 5.46**  
**AREA DEL CONDENSADOR EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE HIELO**  
**DE BAJA DENSIDAD**



**GRÁFICO N° 5.47**  
**AREA DEL CONDENSADOR EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE HIELO**  
**DE ALTA DENSIDAD**



**GRÁFICO N° 5.48**  
**AREÁ ÓPTIMA SEGÚN ESPESOR DE HIELO EN FUNCIÓN DE LAS**  
**DENSIDADES DE HIELO**



Según los resultados del apartado 5.2.2., el ancho de la base del condensador debe ser de 0,90 m. para guardar simetría con la longitud de la altura del cilindro horizontal; la altura total del soporte es 1 m. y con la ecuación N° 136, el largo de la base del condensador ( $L_{oc}$ ) es:

$$L_{oc} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{1,32}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 0,86 \text{ m}$$

Para fines prácticos el largo de la base del condensador ( $L_{oc}$ ) puede ser considerado como 0,90 m; la altura final del condensador debe ser tal que la altura del equipo no sea mayor a 1,80 m; siendo la altura desde el borde superior hasta la base del soporte la distancia  $(D_i/2)+(H_t/2)$ , según la Figura N° 4.10 resultando 1,16 m, si es considerado una base hueca de altura de 0,20 m para la conexión de las bombas de vacío en la parte inferior de la cámara, el espacio remanente para llegar a 1,80 m sería:0,44 m, para fines prácticos es considerada una altura de 0,50 m.

A partir de las consideraciones anteriores se tiene una cámara de base cuadrada de 0,90 m x 0,90 m, con una altura de 0,50 m, se deduce un área lateral de congelación de  $2 \times (0,90 + 0,90) \times 0,50 = 1,8\text{m}^2$ .

El área calculada de congelación en el condensador es insuficiente por lo que fue considerado la presencia de aletas laterales de largo ( $L_a$ ) igual a 0,40 m, ancho ( $H$ ) igual a 0,90 y espesor de 3,430 mm (tomado de Tabla N° 7.6 A del Anexo N° 7), obteniendo un área adicional por placa colocada de  $0,72 \text{ m}^2$  y requiriéndose el uso de 23,06 aletas, para fines prácticos es considerado 24 aletas, distribuidas en las 4 superficies laterales internas de la cámara del condensador, 6 por cada cara cada 7

cm. Asimismo, las aletas deben ser agujereadas para permitir el paso de los distribuidores propuestos en el diseño.

#### **e) Resultados del diseño de los distribuidores del condensador**

Los diámetros de los distribuidores de vapor de agua dentro del condensador en función del diámetro de plato fueron estimados con las ecuaciones (142), (143), (144), lo que brinda:  $d_p = 73 \text{ cm} \cdot \frac{3 \text{ cm}}{18 \text{ cm}} = 12,17 \text{ cm}$ ;

$$d_{pi} = \frac{12,17 \text{ cm}}{5} = 2,43 \text{ cm}.$$

#### **5.2.4. Resultados del diseño de aislamiento de la cámara**

Se obtuvo considerando una superficie de poliuretano:  $L_x' = (0,022/25)[(298,65 - 213,15)/(300,47 - 298,65)] = 4,13 \text{ cm}$ . Asimismo, reemplazando los valores se obtiene considerando una superficie de acrílico:  $L_x'' = (0,186/25)[(298,65 - 213,15)/(300,47 - 298,65)] \cong 35 \text{ cm}$ , debido a que esta última es demasiado elevado para un sistema convencional, se considera un compuerta de acrílica cubierta por una capa de acrílico.

#### **5.2.5. Resultados del diseño del sistema de producción de vacío**

El rango de presiones de operación se encuentra entre 4,15 Pa y 18,38 Pa (0,04 y 0,18 mBar); para la elección de la bomba de vacío se considera como referencia el menor de dichos valores.

#### **a) Resultados de las características generales de la Bomba de Vacío**

Aunque la teoría menciona que basta el uso de una bomba de etapa simple para llegar a presiones de vacío de hasta 1,3 Pa (menor a 4,15 Pa

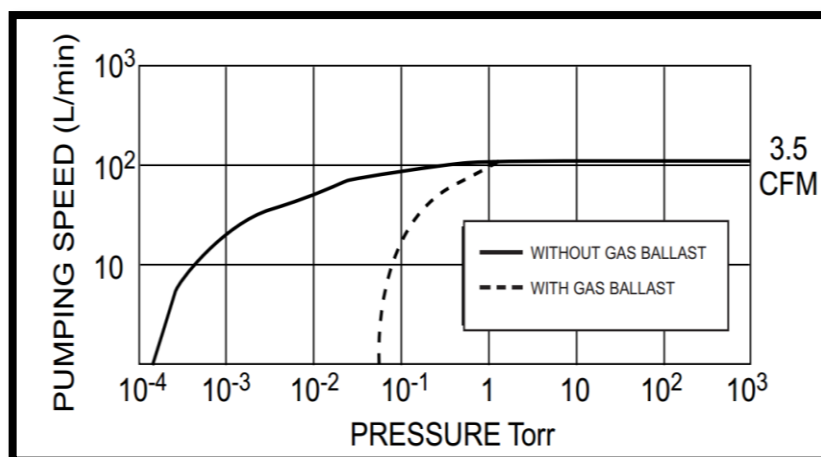
estimados), una bomba de doble etapa asegura la operación al actuar sobre un rango de presiones menores al mencionado.

El cálculo del volumen (V) ocupado por la cámara de secado y condensación, para facilitar el cálculo no se extrajo en el cálculo el área de intersección entre la cámara principal y la cámara de condensación, por lo que fue sumado directamente el volumen de la cámara principal y el volumen de la cámara de condensación directamente:  $V = V_{cámara} +$

$$V_{condensador} = \frac{\pi D_i^2}{4} h + l^2 \cdot h = \frac{\pi (1,32)^2}{4} 0,9 + (0,9)^2 \cdot 0,5 = 1,64 \text{ m}^3$$

El número de Knudsen estimado es  $5\text{cm}/1,5\text{cm}=3,33$ , por lo que se calculó la conductancia para un flujo molecular ( $C_2$ ) el cual resulta:  $340 \times (1.5^3)/150 = 7,65$ . Además, la presión efectiva ( $P_{eff}$ ) es considerada para todos los casos evaluados igual a 1 Torr (1,32 mBar) usando el Gas Ballast por defecto según lo mostrado en los Gráficos del Anexo 5.

**GRÁFICO N° 5.49**  
**CURVA DE VELOCIDAD DE SUCCIÓN DE LA BOMBA DE VACÍO**



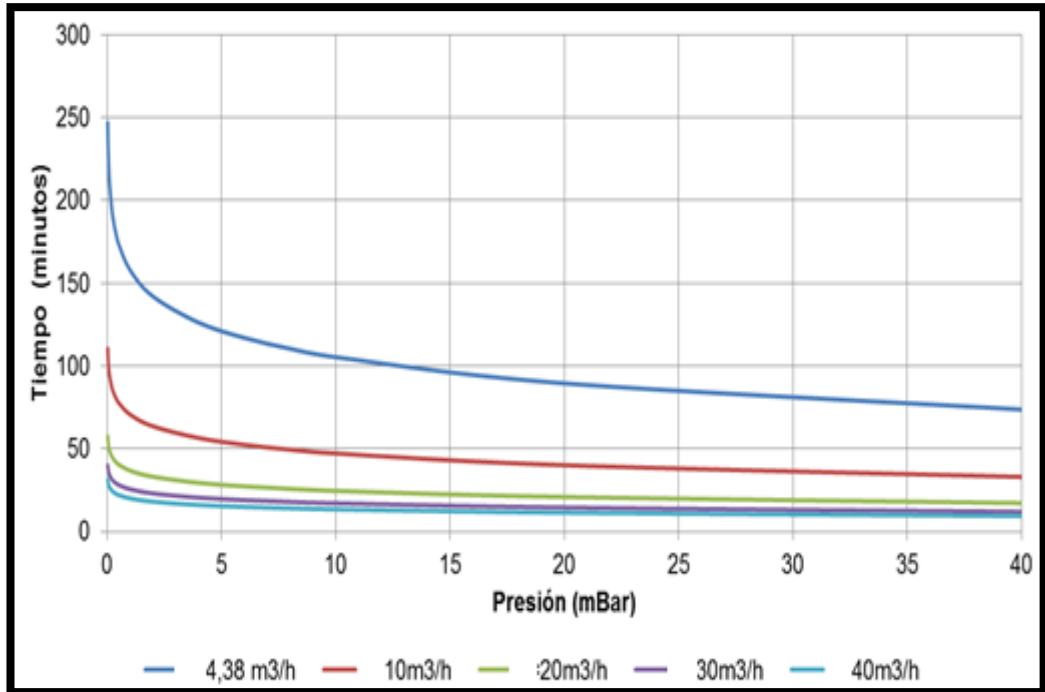
**Fuente:** Adaptado del Anexo N°5.

**Nota:** Pumping Speed (L/min) = Velocidad de bombeo; Without Gas Ballast= Sin Gas Ballast; With Gas Ballast= Con Gas Ballast; CFM= Metros cúbicos por minuto.

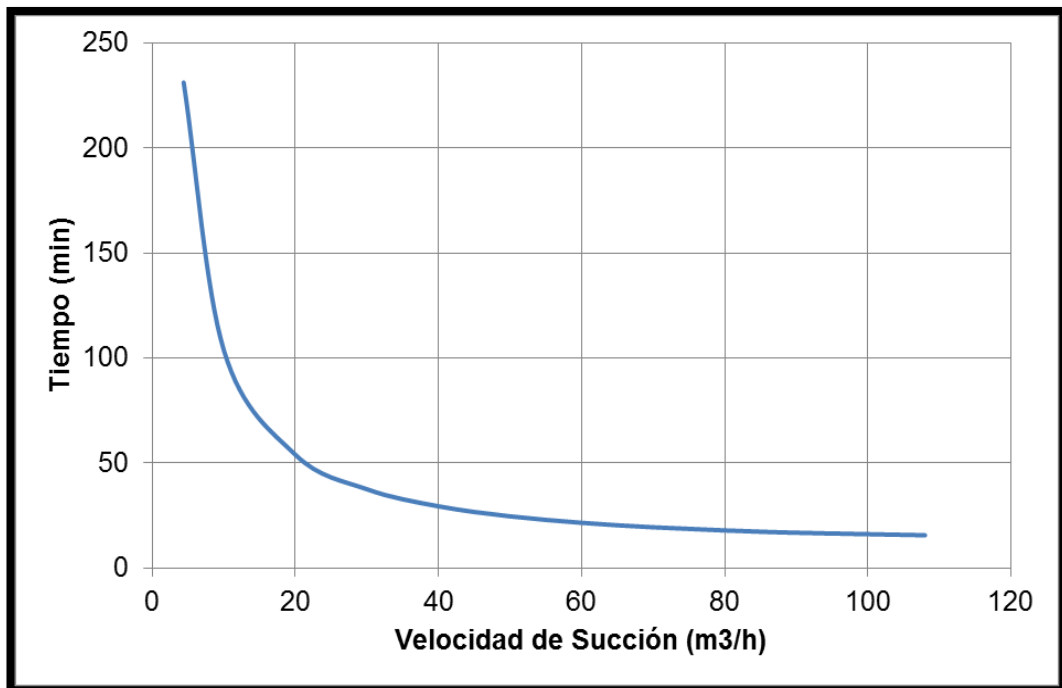
**TABLA N° 5.28**  
**DETERMINACIÓN DE LOS DIVERSOS TIEMPOS DE SUCCIÓN PARA DIVERSAS VELOCIDADES DE LA BOMBA**

<b>P<sub>1</sub>= 1013 mBar</b>		<b>TIEMPO DE SUCCIÓN (MINUTOS)</b>										
		<b>4,38</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>108</b>
<b>S (m<sup>3</sup>/hr)=</b>		<b>4,38</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>108</b>
<b>S<sub>eff</sub> (m<sup>3</sup>/hr)=</b>		<b>4,31</b>	<b>9,62</b>	<b>18,47</b>	<b>26,56</b>	<b>33,89</b>	<b>40,47</b>	<b>46,30</b>	<b>51,38</b>	<b>55,72</b>	<b>59,32</b>	<b>63,98</b>
<b>P<sub>2</sub> (mBar)</b>	<b>1013</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>100</b>	52,80	23,64	12,31	8,56	6,71	5,62	4,91	4,43	4,08	3,83	3,55
	<b>60</b>	64,45	28,86	15,03	10,45	8,19	6,86	5,99	5,40	4,98	4,68	4,34
	<b>40</b>	73,69	33,00	17,18	11,95	9,36	7,84	6,85	6,18	5,70	5,35	4,96
	<b>10</b>	105,30	47,15	24,55	17,07	13,38	11,20	9,79	8,83	8,14	7,64	7,09
	<b>6</b>	116,95	52,37	27,27	18,96	14,86	12,44	10,88	9,80	9,04	8,49	7,87
	<b>4</b>	126,20	56,51	29,42	20,46	16,03	13,43	11,74	10,58	9,75	9,16	8,49
	<b>2</b>	142,00	63,59	33,11	23,02	18,04	15,11	13,21	11,90	10,98	10,31	9,56
	<b>1</b>	157,81	70,66	36,79	25,59	20,05	16,79	14,68	13,23	12,20	11,46	10,62
	<b>0,5</b>	173,61	77,74	40,48	28,15	22,06	18,47	16,15	14,55	13,42	12,60	11,69
	<b>0,3</b>	185,26	82,96	43,19	30,04	23,54	19,71	17,23	15,53	14,32	13,45	12,47
	<b>0,1</b>	210,31	94,18	49,04	34,10	26,72	22,38	19,56	17,63	16,26	15,27	14,16
	<b>0,08</b>	215,40	96,45	50,22	34,92	27,37	22,92	20,04	18,06	16,65	15,64	14,50
	<b>0,06</b>	221,96	99,39	51,75	35,99	28,20	23,62	20,65	18,60	17,16	16,11	14,94
<b>0,04</b>	231,20	103,53	53,91	37,49	29,38	24,60	21,51	19,38	17,87	16,79	15,56	
<b>0,02</b>	247,01	110,61	57,59	40,05	31,38	26,28	22,98	20,70	19,09	17,93	16,63	

**GRÁFICO N° 5.50**  
**TIEMPO DE SUCCIÓN REQUERIDO PARA DIVERSAS PRESIONES**



**GRÁFICO N° 5.51**  
**TIEMPO NECESARIO PARA LLEGAR A 4 Pa ADISTINTAS VELOCIDADES DE SUCCIÓN**

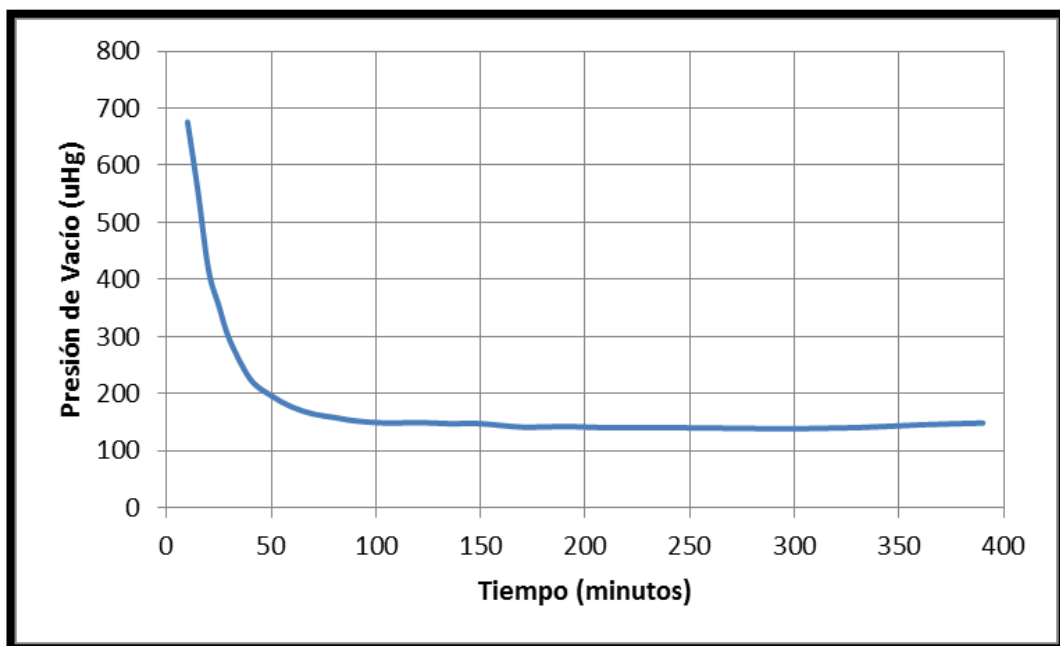


Del Gráfico anterior mostrado se deduce que la velocidad óptima de operación para el sistema evaluando en este trabajo es  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

**b) Resultados del análisis del funcionamiento de una Bomba de Vacío**

Con los datos mostrados en el apartado 5.4 del Anexo N°5, se tiene:

**GRÁFICO N° 5.52  
CAMBIO DE LA PRESIÓN DE VACÍO EN EL TIEMPO**



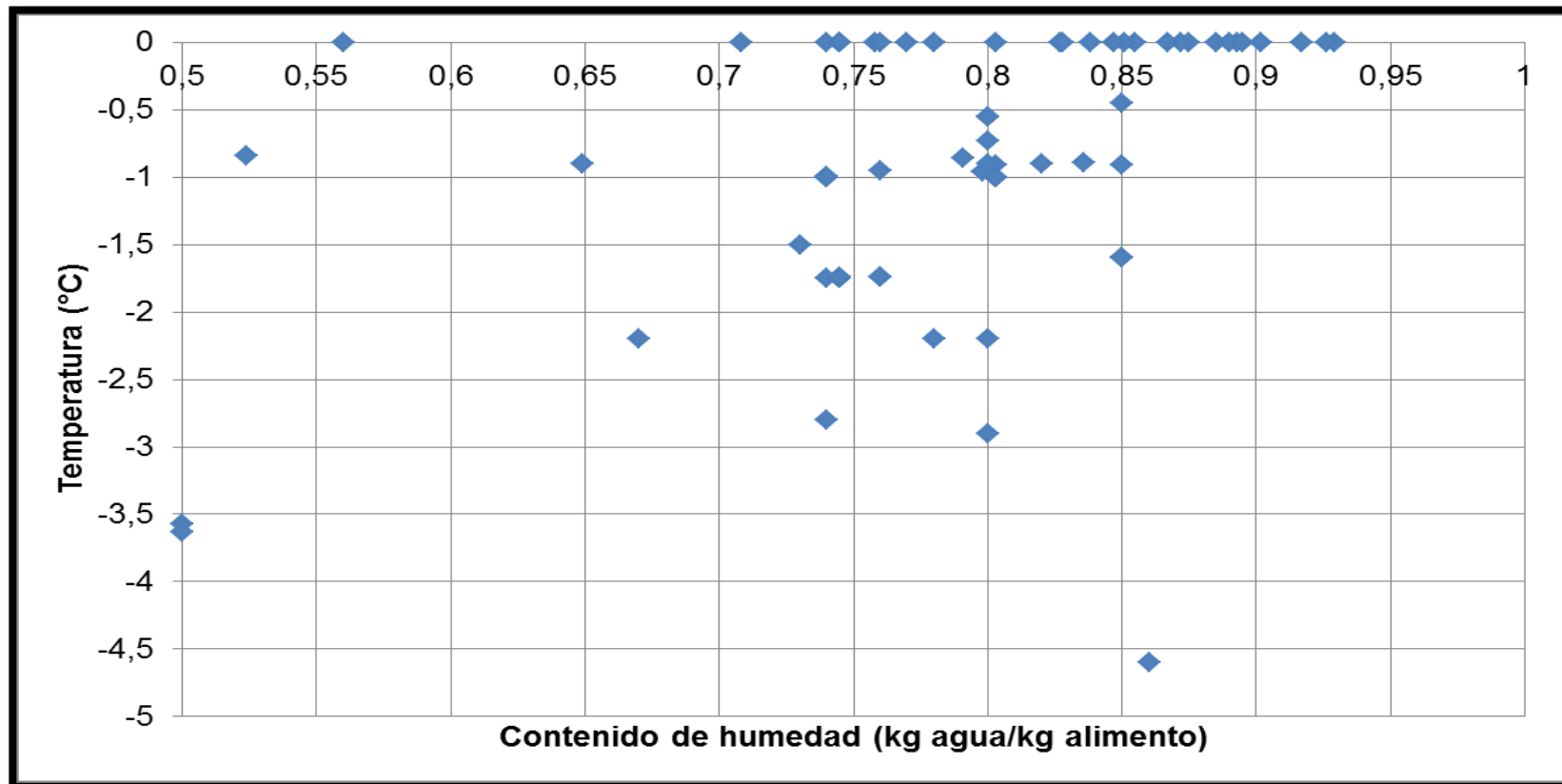
La gráfica anterior mostrada, muestra que en menos de 2 horas se alcanza la presión mínima de trabajo. Asimismo, el manual operativo de este equipo recomienda una baja de presión hasta por lo menos 500 uHg en una hora. Según los datos mostrados en la Tabla N° 5.29, efectivamente para presiones entre 1 mBar (760 uHg) y 0,5 mBar (380 uHg) el tiempo requerido que se necesitó fue de menos de 30 minutos al usarse una velocidad de bombeo de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$ .



### 5.2.6. Resultados del diseño del sistema mecánico de congelación

#### a) Cinética de congelación de los alimentos

GRÁFICO N° 5.53  
TEMPERATURA INICIAL DE CONGELACIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD



Debido a que no se cuentan con datos referidos a los Grupos 1, 6, 7, 8 y 9, se consideraron el mínimo, máximo y promedio de todo los datos.

**TABLA N° 5.29**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR LA CINÉTICA DE**  
**CONGELACIÓN DE LOS ALIMENTOS-PRIMERA PARTE**

Grupo	RANGO	$y_{a0}$	$T_c$	T	$\rho_c$	$y_{manc0}$
1: Cereales	Mínimo	0,07	-4,60	-20,0	1141,7	0,99995
	Máximo	0,66	-0,45	-20,0	1545,1	1,00000
	Promedio	0,14	-1,54	-20,0	1428,1	0,99999
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,30	-1,74	-46,0	1006,2	0,99998
	Máximo	0,96	-0,55	-17,0	1334,9	0,99999
	Promedio	0,85	-1,18	-31,5	1054,2	0,99999
3: Frutas	Mínimo	0,40	-4,60	-51,0	481,0	0,99995
	Máximo	0,96	-1,60	-17,0	1266,0	0,99998
	Promedio	0,79	-2,83	-34,0	781,6	0,99997
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,70	-3,57	-45,0	990,7	0,99996
	Máximo	0,92	-0,86	-11,3	1056,0	0,99999
	Promedio	0,78	-1,41	-28,2	1023,4	0,99999
5: Carnes	Mínimo	0,54	-3,63	-45,0	1021,6	0,99996
	Máximo	0,87	-0,73	-10,0	1073,5	0,99999
	Promedio	0,75	-1,52	-27,5	1045,1	0,99999
6: Leches y derivados	Mínimo	0,45	-4,60	-32,0	993,0	0,99995
	Máximo	0,93	-0,45	-29,0	1052,4	1,00000
	Promedio	0,80	-1,54	-30,5	1028,7	0,99999
7: Productos azucarados	Mínimo	0,14	-4,60	-45,8	1402,0	0,99995
	Máximo	0,26	-0,45	-36,7	1481,2	1,00000
	Promedio	0,19	-1,54	-41,3	1449,2	0,99999
8: Leguminosas	Mínimo	0,10	-4,60	-30,0	1052,4	0,99995
	Máximo	0,84	-0,45	-30,0	1478,9	1,00000
	Promedio	0,27	-1,54	-30,0	1345,6	0,99999
9: Tubérculos	Mínimo	0,55	-4,60	-17,0	1017,3	0,99995
	Máximo	0,96	-0,45	-17,0	1206,2	1,00000
	Promedio	0,72	-1,54	-17,0	1110,2	0,99999

**Nota:**  $y_{a0}$ : Fracción del agua antes del congelamiento (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>);  $T_c$  : Temperatura inicial de congelamiento (K); T: Temperatura de congelación final (K) o  $T_h$ (temperatura de frente de hielo);  $\rho_c$ :Densidad del alimento congelado;  $y_{manc0}$ : Fracción molar de agua no congelada al inicio.

**TABLA N° 5.30**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR LA CINÉTICA DE**  
**CONGELACIÓN DE LOS ALIMENTOS- SEGUNDA PARTE**

Grupo	RANGO	$y_{manc}$	$y_s$	$M_s$	$y_{anc}$	$y_H$
1: Cereales	Mínimo	0,9998	0,93	5281506,13	0,0152	0,0548
	Máximo	0,9998	0,34	2125798,25	0,0138	0,6462
	Promedio	0,9998	0,86	7377472,21	0,0100	0,1300
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,9995	0,70	2478363,98	0,0095	0,2905
	Máximo	0,9998	0,04	140626,17	0,0292	0,9308
	Promedio	0,9997	0,15	276964,57	0,0283	0,8217
3: Frutas	Mínimo	0,9994	0,60	596299,08	0,0298	0,3702
	Máximo	0,9998	0,04	48153,80	0,0852	0,8748
	Promedio	0,9996	0,21	172899,34	0,0582	0,7318
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,9995	0,30	220368,98	0,0470	0,6530
	Máximo	0,9999	0,08	187477,42	0,0673	0,8527
	Promedio	0,9997	0,22	370147,61	0,0352	0,7448
5: Carnes	Mínimo	0,9995	0,46	430681,38	0,0369	0,5031
	Máximo	0,9999	0,13	379711,79	0,0613	0,8087
	Promedio	0,9997	0,25	405625,33	0,0375	0,7125
6: Leches y derivados	Mínimo	0,9996	0,55	485873,32	0,0581	0,3919
	Máximo	0,9997	0,07	310600,50	0,0129	0,9171
	Promedio	0,9997	0,20	300245,96	0,0361	0,7639
7: Productos azucarados	Mínimo	0,9995	0,86	2441986,71	0,0119	0,1281
	Máximo	0,9996	0,74	11744794,86	0,0028	0,2572
	Promedio	0,9995	0,81	5119983,78	0,0060	0,1840
8: Leguminosas	Mínimo	0,9997	0,90	3577794,48	0,0139	0,0861
	Máximo	0,9997	0,16	786009,44	0,0112	0,8288
	Promedio	0,9997	0,73	3247104,48	0,0124	0,2576
9: Tubérculos	Mínimo	0,9998	0,45	325254,04	0,1419	0,4081
	Máximo	0,9998	0,04	171939,56	0,0239	0,9361
	Promedio	0,9998	0,28	467049,27	0,0615	0,6585

**Nota:**  $y_{manc}$  : Fracción molar del agua no congelada;  $y_s$ ; Fracción de los solutos (kg soluto.kg alimento<sup>-1</sup>);  $M_s$ : Peso molecular del soluto (kg.kmol<sup>-1</sup>);  $y_{anc}$  : Fracción del agua no congelable (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>);  $y_H$ : Fracción de Hielo a la Temperatura final de congelación

Debido a que la capacidad calorífica del alimento no congelado ( $C_{p_{NC}}$ ) y congelados ( $C_{p_C}$ ) puede ser estimado mediante correlaciones y también

con datos sacados de tablas, es comparada dicha data previamente. El cálculo la capacidad calorífica a la temperatura inicial de 19,61°C estimada con la Tabla N° 3.9A del Anexo N° 3.

**TABLA N° 5.31**  
**COMPARACIÓN DE CAPACIDADES CALORÍFICAS DE ALIMENTOS**  
**NO CONGELADOS DE TABLAS Y ESTIMADAS**

GRUPO	ALIMENTO		$C_{p_{NC}}$ (datos experimentales)	$C_{p_{NC}}$ (datos calculados)
2: Verduras y Hortalizas	Pepino	-	4103 <sup>(1)</sup>	3734,6
	Zanahoria	fresca	3810 a 3935 <sup>(1)</sup>	3868,4
3: Frutas	Manzana	cruda	3726 a 4019 <sup>(1)</sup>	3745,0
		-	3590 <sup>(2)</sup>	
4: Pescados Mariscos	Pescado	fresco	3600 <sup>(1)</sup>	3676,21 <sup>(3)</sup>
	Sardinias	-	3014 <sup>(1)</sup>	3616,3
	Bacalao	-	2050 <sup>(2)</sup>	3738,3
5: Carnes	Vaca	Ternera	3223 <sup>(1)</sup>	3652,3
6: Leches y derivados	Leche	Entera pasteurizada	3852 <sup>(1)</sup>	3929,9
	Queso	Fresco	3265 <sup>(1)</sup>	3357,9
9: Tubérculos	Papa	-	3517 <sup>(1)</sup>	3396,8
	Papa	-	3517 <sup>(1)</sup>	
	Papa	-	3430 <sup>(2)</sup>	

**Nota:**  $C_{p_{NC}}$  : Capacidad calorífica del alimento no congelado ( $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ); (1): Datos procedentes de la Tabla N° 3.9C; (2): Datos de la Tabla N° 3.9D; (3): Promedio de los valores calculados para todos los tipos de pescados presentes en la Tabla N°2.D1 del Anexo N° 2

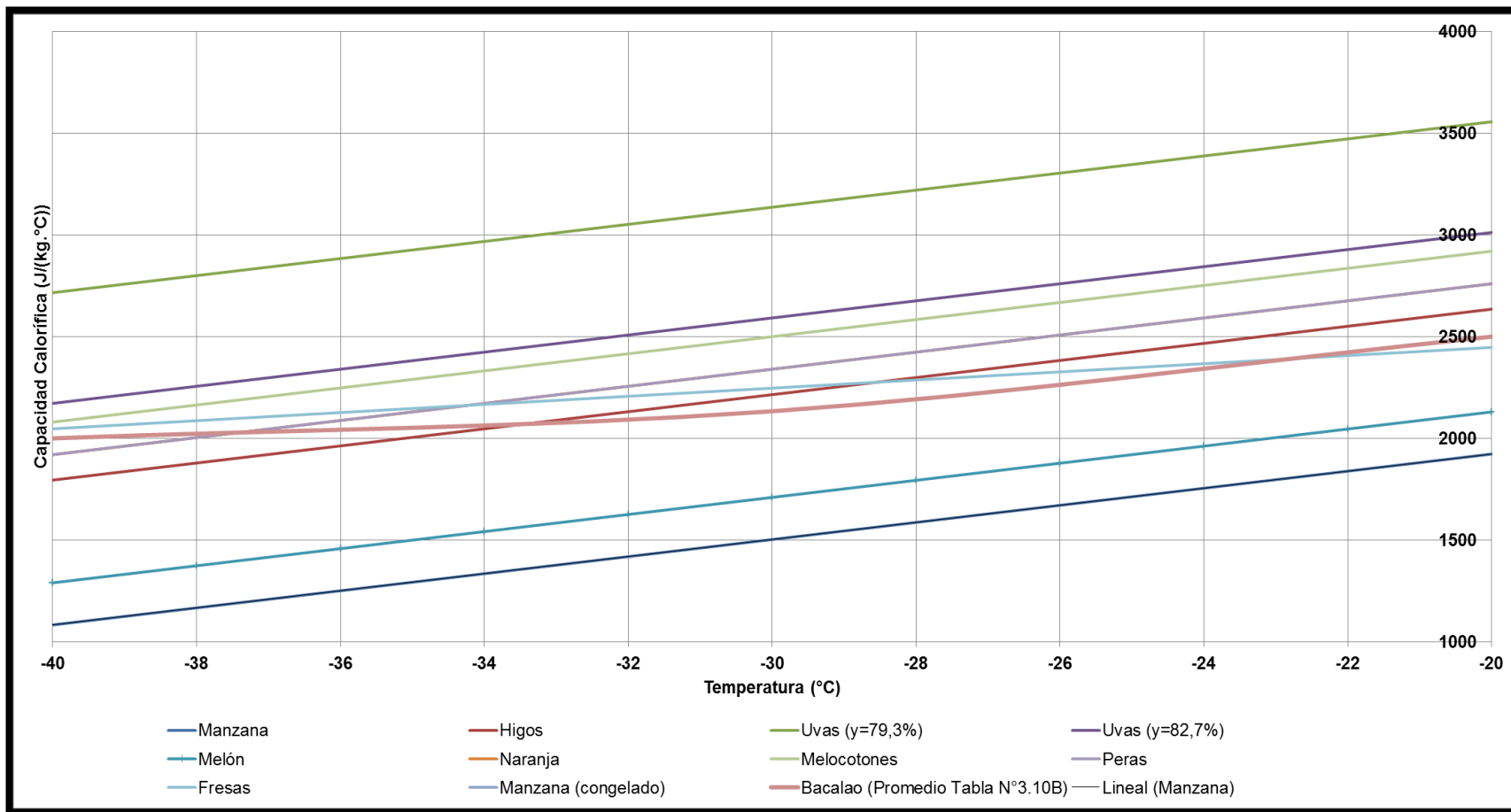
Asimismo, la gráfica de la capacidad calorífica del alimento congelado ( $C_{p_C}$ ) estimada mediante las correlaciones dadas en la Tabla N° 3.9A y los datos de la Tabla N°3.9B del Anexo N° 3, se encuentran en el mismo rango que los de la Tabla N° 3.9D del Anexo N°3. Adicionalmente, los valores estimados de  $C_{p_C}$  presentados en la Tabla anterior, se encuentran casi en el mismo rango del Gráfico N° 5.53 (entre 1000 y 2750  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$  para temperatura menores a -40°C).

**TABLA N° 5.32**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR LA CINÉTICA DE**  
**CONGELACIÓN DE LOS ALIMENTOS-TERCERA PARTE**

Grupo	RANGO	$C_{p_{NC}}$	$C_{p_C}$	$\Delta H$	$\Delta H^{(1)}$	$\Delta H^{(2)}$	$\Delta H''$
1: Cereales	Mín.	1776,47	1549,06	85124	101611	1337112	477572
	Máx.	3295,59	1817,75	316973	367841	1453359	504654
	Prom.	2002,66	1646,10	116062	135700	1356762	474652
2: Verduras y Hortalizas	Mín.	2391,11	1682,45	222316	260287	1533131	537087
	Máx.	4080,28	1933,95	424233	492653	1494885	519431
	Prom.	3791,61	1886,72	409840	478004	1568281	547299
3: Frutas	Mín.	2693,14	1836,21	273759	326781	1616300	577289
	Máx.	4088,61	1993,70	408923	478309	1506083	527107
	Prom.	3640,52	1926,66	385598	454820	1587379	560233
4: Pescados y Mariscos	Mín.	3509,59	1922,50	378594	448801	1651728	585870
	Máx.	3973,26	2011,84	386473	449762	1455664	506883
	Prom.	3680,95	1971,16	378363	441989	1548723	541326
5: Carnes	Mín.	3174,89	1965,92	322758	382765	1632053	579126
	Máx.	3888,22	2015,76	367248	427006	1440411	501124
	Prom.	3625,35	1987,28	365652	427462	1542213	539457
6: Leches y derivados	Mín.	2907,57	1136,36	232117	277074	1452964	518951
	Máx.	3994,81	1935,48	440990	511760	1566145	543817
	Prom.	3687,09	1770,26	383795	448734	1545607	540718
7: Productos azucarados	Mín.	1947,81	1521,83	152541	182086	1480795	528891
	Máx.	2238,38	1545,20	186620	216568	1450915	503805
	Prom.	2061,95	1531,98	165834	193893	1462968	511808
8: Leguminosas	Mín.	1926,68	1627,91	116684	139283	1407730	502795
	Máx.	3781,07	1883,50	407678	473103	1553150	539305
	Prom.	2356,36	1707,74	184277	215456	1442640	504696
9: Tubérculos	Mín.	3001,90	1886,27	232053	276997	1434707	512430
	Máx.	4059,86	2064,29	427532	496142	1500008	520852
	Prom.	3469,85	1980,88	323437	378163	1461263	511211

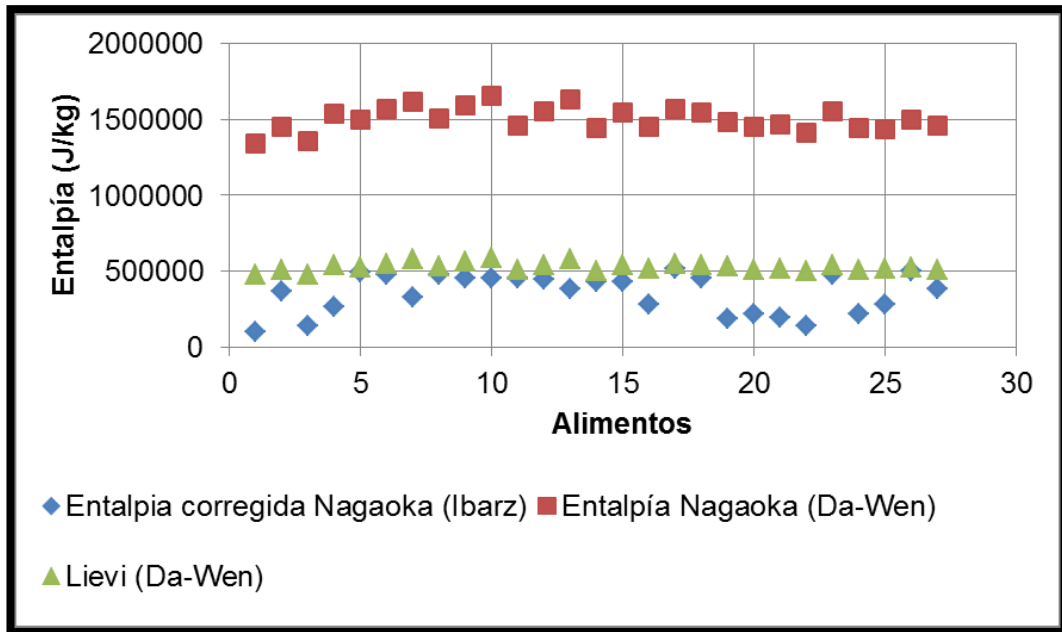
**Nota:**  $C_{p_{NC}}$  : calculado con la temperatura de 19,61°C;  $C_{p_C}$  : calculado a la temperatura de congelación promedio por cada grupo de alimentos calculada según las correlaciones de la Tabla N° 310A del Anexo N° 3 debido a que solo se tiene datos experimentales para el Grupo N° 3; (1) Nagaoka según Ibarz et al. (2005); (2) Nagaoka según Da-Wen

**GRÁFICO N° 5.54**  
**CAPACIDADES CALORÍFICAS ESTIMADAS DE ALIMENTOS CONGELADOS**



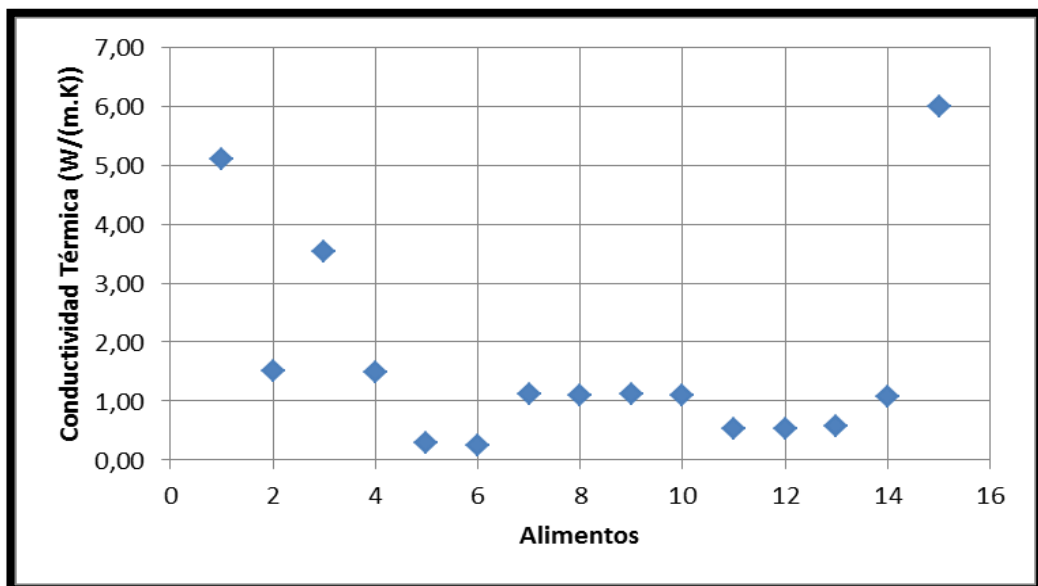
**NOTA:** Relaciones dadas por la Tabla N°3.9A

**GRÁFICO N° 5.55**  
**CÁLCULO DE ENTALPÍAS DE ALIMENTOS**



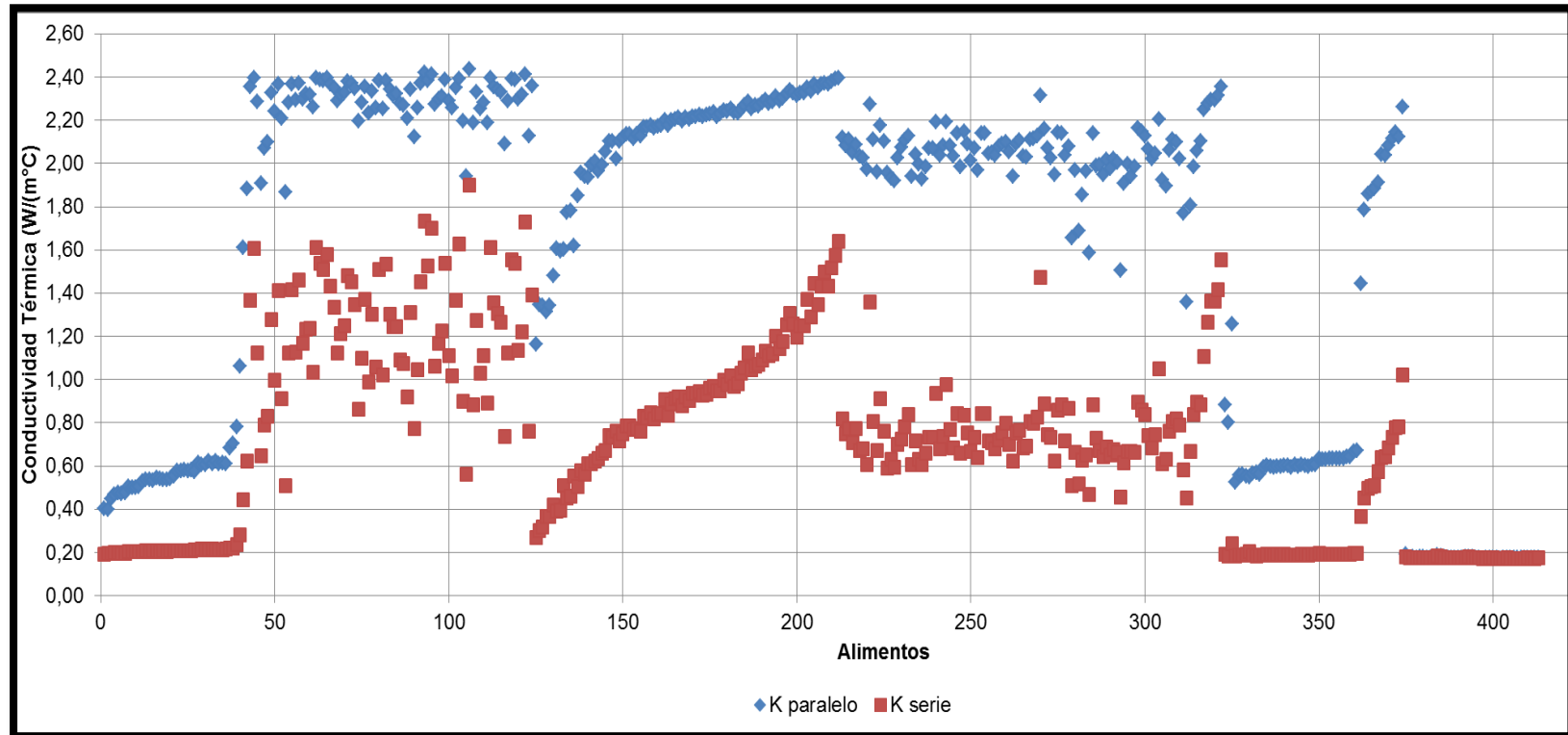
◆ Entalpia corregida Nagaoka (Ibarz)    ■ Entalpía Nagaoka (Da-Wen)  
▲ Lievi (Da-Wen)

**GRÁFICO N° 5.56**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS A TEMPERATURAS MENORES A LOS 0°C**



**Nota:** Los datos procedentes fueron estimados a la menor temperatura posible según el rango de las correlaciones para la manzana y el jugo de naranja, el valor de la carne fue estimada considerando su humedad y la temperatura de congelación promedio considerada para las carnes.

**GRÁFICO N° 5.57**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN SERIE Y EN PARALELO DE DIVERSOS ALIMENTOS A TEMPERATURAS DE CONGELACIÓN SEGÚN GRUPO DE ALIMENTOS**



**Nota:** Los datos presentados fueron estimados con las correlaciones dadas en la Tabla N° 3.9A, para todo los alimentos, utilizando como datos de entrada la temperatura de congelación ( $T_h$ ) y sus composiciones proximales. Debido a que los valores de K en paralelo se aproximan más a los valores experimentales del Gráfico N° 5.11, éstos serán considerados en los cálculos posteriores.



**TABLA N° 5.33**  
**VARIABLES INTERMEDIAS PARA DETERMINAR LA CINÉTICA DE**  
**CONGELACIÓN DE LOS ALIMENTOS-CUARTA PARTE**

Grupo	RANGO	$k_c$	$B_i$	Ste	Pk	$P_1$	$R_1$
1: Cereales	Mínimo	0,40	1,38	0,26	0,51	0,67	0,21
	Máximo	1,88	0,70	0,32	0,21	0,60	0,19
	Promedio	0,63	1,48	0,29	0,36	0,64	0,20
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	1,16	0,47	0,29	0,23	0,60	0,19
	Máximo	2,43	0,54	0,35	0,19	0,60	0,19
	Promedio	2,26	0,41	0,33	0,19	0,60	0,19
3: Frutas	Mínimo	1,31	0,42	0,31	0,24	0,61	0,19
	Máximo	2,40	0,55	0,35	0,21	0,60	0,19
	Promedio	2,14	0,44	0,33	0,21	0,60	0,19
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	1,92	0,29	0,33	0,21	0,61	0,19
	Máximo	2,32	0,57	0,36	0,21	0,60	0,19
	Promedio	2,07	0,45	0,35	0,20	0,60	0,19
5: Carnes	Mínimo	1,51	0,36	0,33	0,23	0,61	0,19
	Máximo	2,21	0,60	0,36	0,22	0,61	0,19
	Promedio	1,98	0,47	0,35	0,21	0,60	0,19
6: Leches y derivados	Mínimo	1,36	0,40	0,19	0,30	0,60	0,19
	Máximo	2,36	0,56	0,35	0,18	0,59	0,19
	Promedio	2,10	0,45	0,31	0,20	0,60	0,19
7: Productos azucarados	Mínimo	0,80	0,69	0,25	0,31	0,62	0,19
	Máximo	1,26	1,05	0,28	0,24	0,60	0,19
	Promedio	0,98	0,95	0,27	0,26	0,60	0,19
8: Leguminosas	Mínimo	0,53	1,04	0,27	0,40	0,64	0,20
	Máximo	2,26	0,58	0,34	0,19	0,59	0,19
	Promedio	0,97	0,96	0,30	0,27	0,61	0,19
9: Tubérculos	Mínimo	0,17	3,24	0,31	0,31	0,62	0,20
	Máximo	0,19	6,95	0,37	0,19	0,59	0,19
	Promedio	0,18	5,19	0,35	0,23	0,60	0,19

**Nota:** El uso de las relaciones de Choi y Okos citados en la Tabla N° 3.10A del Anexo N°3 para la determinación de la capacidad calorífica de alimentos congelados, requirió el uso de las composiciones de hielo y agua no congelada estimadas y presentadas en la Tabla N° 5.30, considerando el promedio de agua no congelable ( $y_{anc}$ ) estimado para cada grupo de alimentos. Debido a que solo se cuenta con datos experimentales del Grupo N°3, se tomarán en cuenta los valores estimados mostrados en el Gráfico N° 5.52;  $B_i$ : Constante de Biot; Ste: Constante de Stefan; Pk: Constante de Plank;

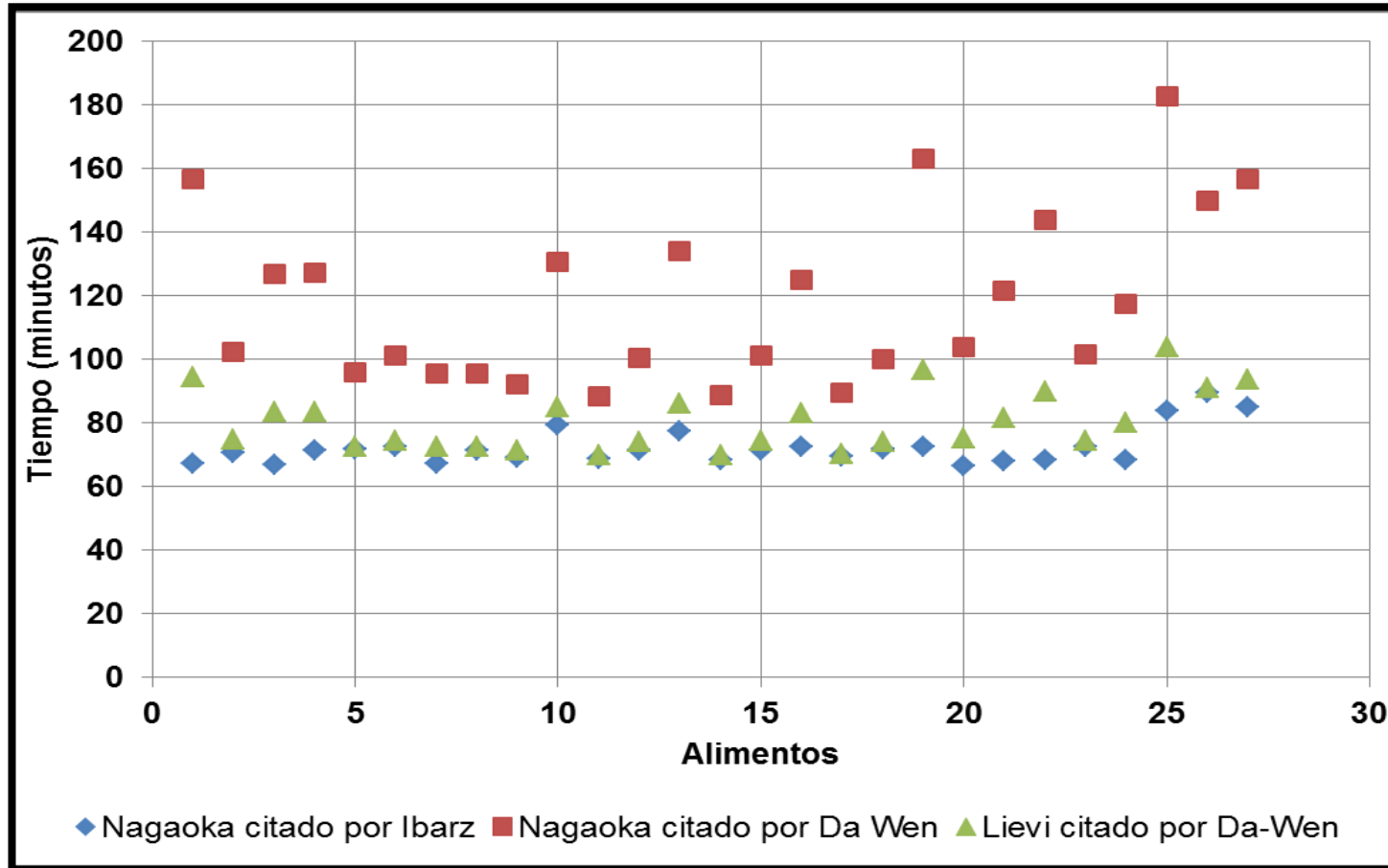
**TABLA N° 5.34**  
**TIEMPO DE CONGELACIÓN A PARTIR DE VARIAS CORRELACIONES**

<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	$t_1$	$t_2$	$t_3$
1: Cereales	Mínimo	7,34	96,59	34,50
	Máximo	10,68	42,20	14,65
	Promedio	6,69	66,85	23,39
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	11,41	67,22	23,55
	Máximo	11,86	36,00	12,51
	Promedio	12,50	41,02	14,31
3: Frutas	Mínimo	7,16	35,40	12,64
	Máximo	11,26	35,45	12,41
	Promedio	9,21	32,15	11,35
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	19,13	70,41	24,97
	Máximo	8,77	28,40	9,89
	Promedio	11,49	40,26	14,07
5: Carnes	Mínimo	17,31	73,82	26,19
	Máximo	8,54	28,79	10,02
	Promedio	11,46	41,36	14,47
6: Leches y derivados	Mínimo	12,38	64,95	23,20
	Máximo	9,68	29,63	10,29
	Promedio	11,61	39,98	13,99
7: Productos azucarados	Mínimo	12,65	102,88	36,75
	Máximo	6,57	44,01	15,28
	Promedio	8,16	61,55	21,53
8: Leguminosas	Mínimo	8,28	83,66	29,88
	Máximo	12,65	41,54	14,42
	Promedio	8,55	57,24	20,02
9: Tubérculos	Mínimo	23,69	122,68	43,82
	Máximo	29,67	89,69	31,14
	Promedio	25,00	96,61	33,80

**Nota:**  $t_1$ : Tiempo de congelación estimado con la ecuación de Nagaoka citada por Ibarz (min),  $t_2$ : Tiempo de congelación estimado con la ecuación de Nagaoka citada por Da-Wen (min) ,  $t_3$ : Tiempo de congelación estimado con la ecuación de Lievi citada por Da-Wen (min).

Se adicionó 60 minutos a los valores estimados en la Tabla anterior como tiempo aproximado en que la cámara alcance la temperatura de -60°C, mostrados en el siguiente gráfico.

**GRÁFICO N° 5.58**  
**TIEMPO DE CONGELACIÓN ESTIMADO ADICIONANDO 60 MINUTOS ADICIONALES PARA**  
**ACONDICIONAMIENTO DEL EQUIPO**



b) Carga calórica del producto principal

**TABLA N° 5.35  
CÁLCULO DE LA CARGA CALÓRICA PRINCIPAL DE LOS ALIMENTOS**

Grupo	RANGO	$\dot{m}$	$\Delta H$	$Q_{\text{alimento}}$
1: Cereales	Mínimo	2,13E-03	1,34E+06	2846,34
	Máximo	3,26E-03	1,45E+06	4740,33
	Promedio	2,63E-03	1,36E+06	3565,33
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	2,62E-03	1,53E+06	4017,00
	Máximo	3,47E-03	1,49E+06	5190,49
	Promedio	3,30E-03	1,57E+06	5174,95
3: Frutas	Mínimo	3,49E-03	1,62E+06	5647,61
	Máximo	3,49E-03	1,51E+06	5259,50
	Promedio	3,62E-03	1,59E+06	5741,87
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	2,56E-03	1,65E+06	4221,86
	Máximo	3,77E-03	1,46E+06	5489,19
	Promedio	3,32E-03	1,55E+06	5149,27
5: Carnes	Mínimo	2,49E-03	1,63E+06	4065,39
	Máximo	3,75E-03	1,44E+06	5407,40
	Promedio	3,29E-03	1,54E+06	5071,81
6: Leches y derivados	Mínimo	2,67E-03	1,45E+06	3876,24
	Máximo	3,72E-03	1,57E+06	5824,74
	Promedio	3,33E-03	1,55E+06	5152,98
7: Productos azucarados	Mínimo	2,05E-03	1,48E+06	3030,39
	Máximo	3,20E-03	1,45E+06	4650,08
	Promedio	2,74E-03	1,46E+06	4011,83
8: Leguminosas	Mínimo	2,32E-03	1,41E+06	3266,30
	Máximo	3,28E-03	1,55E+06	5098,56
	Promedio	2,84E-03	1,44E+06	4101,73
9: Tubérculos	Mínimo	1,82E-03	1,43E+06	2617,83
	Máximo	2,23E-03	1,50E+06	3340,17
	Promedio	2,13E-03	1,46E+06	3110,16

**Nota:**  $\dot{m}$ : Velocidad de producción de alimento congelado ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) calculado de la división de 20 kg de alimento considerado y el tiempo de congelación más elevado considerando el aumento de 60 minutos;  $\Delta H$ : Cambio de entalpía estimada ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) considerada como la de mayor magnitud calculada (Nagaoka, citado por Da-Wen de la Tabla N° 5.32);  $Q_{\text{alimento}}$  : Carga calórica del producto principal (W).

### c) Carga térmica adicional del sistema

La carga térmica adicional por conducción ( $q_k$ ) calculada para el condensador y la cámara principal de secado, fue estimada con el cálculo de las áreas transversales de transferencia de calor por conducción. Para el condensador, considerando las áreas laterales y la base aislada con poliuretano expandido se obtiene lo siguiente:

$$A_1 = 4 \times 0,9 \times 0,5 + 0,9 \times 0,9 = 2,61 \text{ m}^2$$
$$q_{k1} = kA_1 \frac{(T_{amb} - T_{sup})}{L} = 0,022 \times 2,61 \times \frac{(27,32 - 25,50)}{0,0413} = 2,53 \text{ W}$$

Para la cámara principal de secado, considerando la pared posterior cubierta completamente por poliuretano expandido.

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{1,32} = 0,76$$
$$\theta = 2 \cdot \arccos(0,76) = 1,41 = \frac{141\pi}{314}$$
$$A_{sc} = \frac{(1,32/2)^2}{2} \left( \frac{141\pi}{314} - \sin\left(\frac{141\pi}{314}\right) \right) = 0,09 \text{ m}^2$$
$$A_1' = \frac{\pi(1,32)^2}{4} - 0,09 = 1,28 \text{ m}^2$$

Por tanto el área plana total considerando la superficie posterior y la frontal (la puerta de acrílico será cubierta durante operación por una de poliuretano) es igual al doble:  $A_1'_{total} = 2 \cdot 1,28 = 2,56 \text{ m}^2$

$$q_{k2}' = kA_1 \frac{(T_{amb} - T_{sup})}{L} = 0,022 \times 2,56 \times \frac{(27,32 - 25,50)}{0,0413} = 2,48 \text{ W}$$

El área radial lateral de la cámara de secado, teniendo en cuenta que el diámetro externo es igual al diámetro interno más dos veces el espesor del aislamiento estimado previamente ( $1,32+2 \times 0,0413=1,4026 \text{ m}$ ); la longitud total del cilindro  $H_d$  (m) incluyendo el espesor de aislamiento en cada base ( $0,90+ 2 \times 0,0413=0,9826 \text{ m}$ ). Asimismo, el radio exterior:

$r_1 = D_{ext}/2 = 1,4026/2 = 0,7013 \text{ m}$ , y el radio interno:  $r_2 = \frac{D_i}{2} = 1,32/2 = 0,66 \text{ m}$

$$L_{arc} = \frac{1,4026}{2} \left( 2\pi - \frac{141\pi}{314} \right) = 3,417 \text{ m}$$

$$A_2 = L_{arc} \cdot H_d = 3,417 \cdot 0,9826 = 3,36 \text{ m}^2$$

$$q_{k2}'' = - \frac{kA_2(T_{amb} - T_{sup})}{\left[ r_2 \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right]} = - \frac{0,022 \times 3,36(27,32 - 25,50)}{\left[ 0,66 \cdot \ln \left( \frac{0,66}{0,7013} \right) \right]}$$

$$= 3,36 \text{ W}$$

El cálculo de la transferencia de calor como combinación de los fenómenos de transferencia de calor por convección y radiación, brinda los siguientes resultados:

$$h_r = \varepsilon \sigma \frac{(T_{sup0}^4 - T_{amb0}^4)}{(T_{sup0} - T_{amb0})} = 0,28 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot \frac{(300,47^4 - 213,15^4)}{(300,47 - 213,15)}$$

$$= 1,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$h_{cr} = h_c + h_r = 13,5 + 1,11 = 14,61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$A_{12} = A_1 + A_{1 \text{ total}} + A_2 = 2,61 + 2,56 + 3,36 = 8,53 \text{ m}^2$$

$$q_{cr} = h_{cr} A_{12} (T_{sup0} - T_{amb0}) = 14,61 \cdot 8,53 \cdot (300,47 - 213,15)$$

$$= 10882,11 \text{ W}$$

La carga calórica compuesta por los fenómenos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación resulta:

$$q_1 = q_{k1} + q_{k2}' + q_{k2}'' + q_{cr} = 2,53 + 2,48 + 3,36 + 10882 = 10890,37 \text{ W}$$

El cálculo de la carga calórica debido a la infiltración de aire de afuera, el flujo de aire ( $\dot{v}$ ) fue considerado como el correspondiente al sistema de vacío seleccionado igual  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 0,01111 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , y un tiempo  $\Delta t$  8880 segundos (tiempo promedio de congelación y el tiempo que se demora la bomba de vacío en llegar a la presión objetivo).

$$q_t = 1,2 \dot{v} \Delta h = 1,2 \cdot 0,01111 \cdot 141,06 \times 10^3 = 1880,61 \text{ W}$$

$$q_s = 1,2(0,24 + 0,45 Y_{aire}) \dot{v} \Delta t = 1,2(0,24 + 0,45 \times 0,02080) 0,01111 \times 8880$$

$$= 29,52 \text{ W}$$

$$q_l = 3010 \cdot \dot{v} \cdot \Delta Y_{aire} = 3010 \cdot 0,01111 \cdot 0,02080 = 0,69 \text{ W}$$

$$q_2 = q_t + q_s + q_l = 1880,61 + 29,52 + 0,69 = 1910,82 \text{ W}$$

El cálculo de la carga calórica debido a la aplicación de luz dentro del compartimiento, considerando solo el área de la cámara de secado mediante el uso de lámparas resulta:

$$q_3 = 15 \cdot (2,56 + 3,36) = 88,8 \text{ W}$$

**d) Carga térmica total**

**TABLA N° 5.36  
CARGA TÉRMICA TOTAL REQUERIDO**

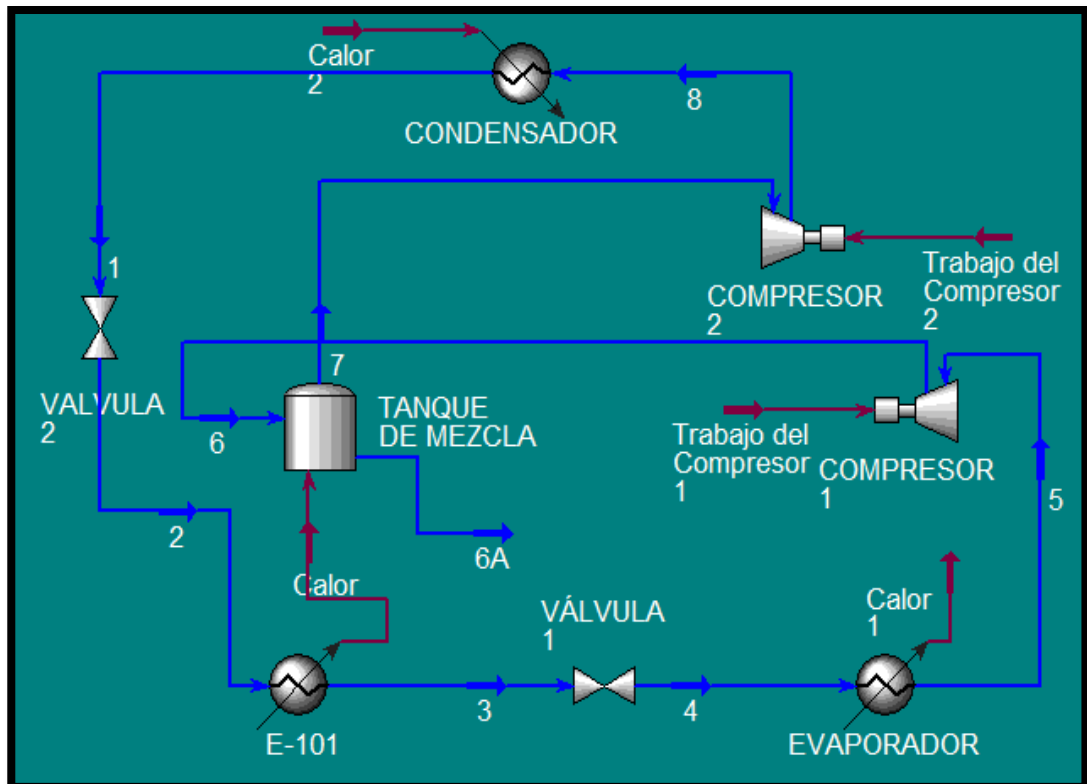
Grupo	RANGO	Q <sub>alimento</sub>	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	Q <sub>TOTAL</sub>
1: Cereales	Mínimo	2846,34	10890,37	1910,82	88,8	15736,33
	Máximo	4740,33	10890,37	1910,82	88,8	17630,32
	Promedio	3565,33	10890,37	1910,82	88,8	16455,32
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	4017,00	10890,37	1910,82	88,8	16906,99
	Máximo	5190,49	10890,37	1910,82	88,8	18080,48
	Promedio	5174,95	10890,37	1910,82	88,8	18064,94
3: Frutas	Mínimo	5647,61	10890,37	1910,82	88,8	18537,6
	Máximo	5259,50	10890,37	1910,82	88,8	18149,49
	Promedio	5741,87	10890,37	1910,82	88,8	18631,86
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	4221,86	10890,37	1910,82	88,8	17111,85
	Máximo	5489,19	10890,37	1910,82	88,8	18379,18
	Promedio	5149,27	10890,37	1910,82	88,8	18039,26
5: Carnes	Mínimo	4065,39	10890,37	1910,82	88,8	16955,38
	Máximo	5407,40	10890,37	1910,82	88,8	18297,39
	Promedio	5071,81	10890,37	1910,82	88,8	17961,8
6: Leches y derivados	Mínimo	3876,24	10890,37	1910,82	88,8	16766,23
	Máximo	5824,74	10890,37	1910,82	88,8	18714,73
	Promedio	5152,98	10890,37	1910,82	88,8	18042,97
7: Productos azucarados	Mínimo	3030,39	10890,37	1910,82	88,8	15920,38
	Máximo	4650,08	10890,37	1910,82	88,8	17540,07
	Promedio	4011,83	10890,37	1910,82	88,8	16901,82
8: Leguminosas	Mínimo	3266,30	10890,37	1910,82	88,8	16156,29
	Máximo	5098,56	10890,37	1910,82	88,8	17988,55
	Promedio	4101,73	10890,37	1910,82	88,8	16991,72
9: Tubérculos	Mínimo	2617,83	10890,37	1910,82	88,8	15507,82
	Máximo	3340,17	10890,37	1910,82	88,8	16230,16
	Promedio	3110,16	10890,37	1910,82	88,8	16000,15

**Nota:** Las cargas térmicas se encuentran expresada en  $J \cdot s^{-1} = W$ .

e) **Determinación de las condiciones de operación del sistema de congelación y balances de materia y energía**

La presentación del esquema

**FIGURA N° 5.1  
ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONGELACIÓN EN ASPEN HYSYS**



**FIGURA N° 5.2  
BALANCE ENERGÉTICO DE LOS COMPRESORES DEL SISTEMA DE CONGELACIÓN EN ASPEN HYSYS**

Energy Streams						
		Trabajo del Compresor 1	Calor 1	Trabajo del Compresor 2	Calor 2	Calor
Heat Flow	kW	1.898	-13.52	2.535	-17.95	3.850

Fuente: Hysys Versión 7.2



**FIGURA N° 5.3**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CONGELACIÓN ESTIMADO CONASPEN HYSYS**

Material Streams										
		1	2	6	7	6A	3	5	4	8
Vapour Fraction		0.0000	0.2448	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0750	1.0000
Temperature	C	-27.04	-55.59	-38.57	18.02	18.02	-80.00	-70.08	-70.40	52.99
Pressure	kPa	1013	354.0	429.0	429.0	429.0	354.0	182.0	182.0	1013
Molar Flow	kgmole/h	3.373	3.373	3.373	3.373	0.0000	3.373	3.373	3.373	3.373
Mass Flow	kg/s	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.0000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Liquid Volume Flow	m3/h	0.2819	0.2819	0.2819	0.2819	0.0000	0.2819	0.2819	0.2819	0.2819
Heat Flow	kW	-997.0	-997.0	-985.4	-981.5	0.0000	-1001	-987.3	-1001	-979.0

Fuente: Hysys Versión 7.2

**FIGURA N° 5.4**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CONDENSADOR,**  
**EVAPORADOR Y COMPRESORES CON ASPEN HYSYS**

CONDENSADOR		
DUTY	-17.95	kW
Feed Temperature	52.99	C
Product Temperature	-27.04	C
Mass Flow	0.1000	kg/s

EVAPORADOR		
Duty	-13.52	kW
Feed Temperature	-70.40	C
Product Temperature	-70.08	C
Mass Flow	0.1000	kg/s

COMPRESOR 2		
Power	2.535	kW
Feed Pressure	429.0	kPa
Product Pressure	1013	kPa
Product Temperature	52.99	C

COMPRESOR 1		
Power	1.898	kW
Feed Pressure	182.0	kPa
Product Pressure	429.0	kPa
Product Temperature	-36.57	C

**Nota:** Duty: requerimiento de energía, feed temperatura: temperatura de alimentación; product temperatura: temperatura del producto, mass flow: flujo másico; power: potencia

Coeficiente de Performance (COP), considerando que los flujos másicos en ambas corrientes son los mismos según las simulaciones realizadas.

$$COP = \frac{(H_5 - H_4)}{(H_6 - H_5) + (H_8 - H_7)} = 3,11$$

#### f) Flujo másico del refrigerante

Para una temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$  en el evaporador del refrigerante y para una carga térmica retirada total de 13.52 kW, se calculó el siguiente

$$\text{flujo másico de refrigerante. } m_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{total}}}{H_5 - H_4} = \frac{13.52}{(260 - 105)} = 0,09 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} =$$

$$5,4 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$$

#### 5.2.7. Diseño del sistema de calentamiento

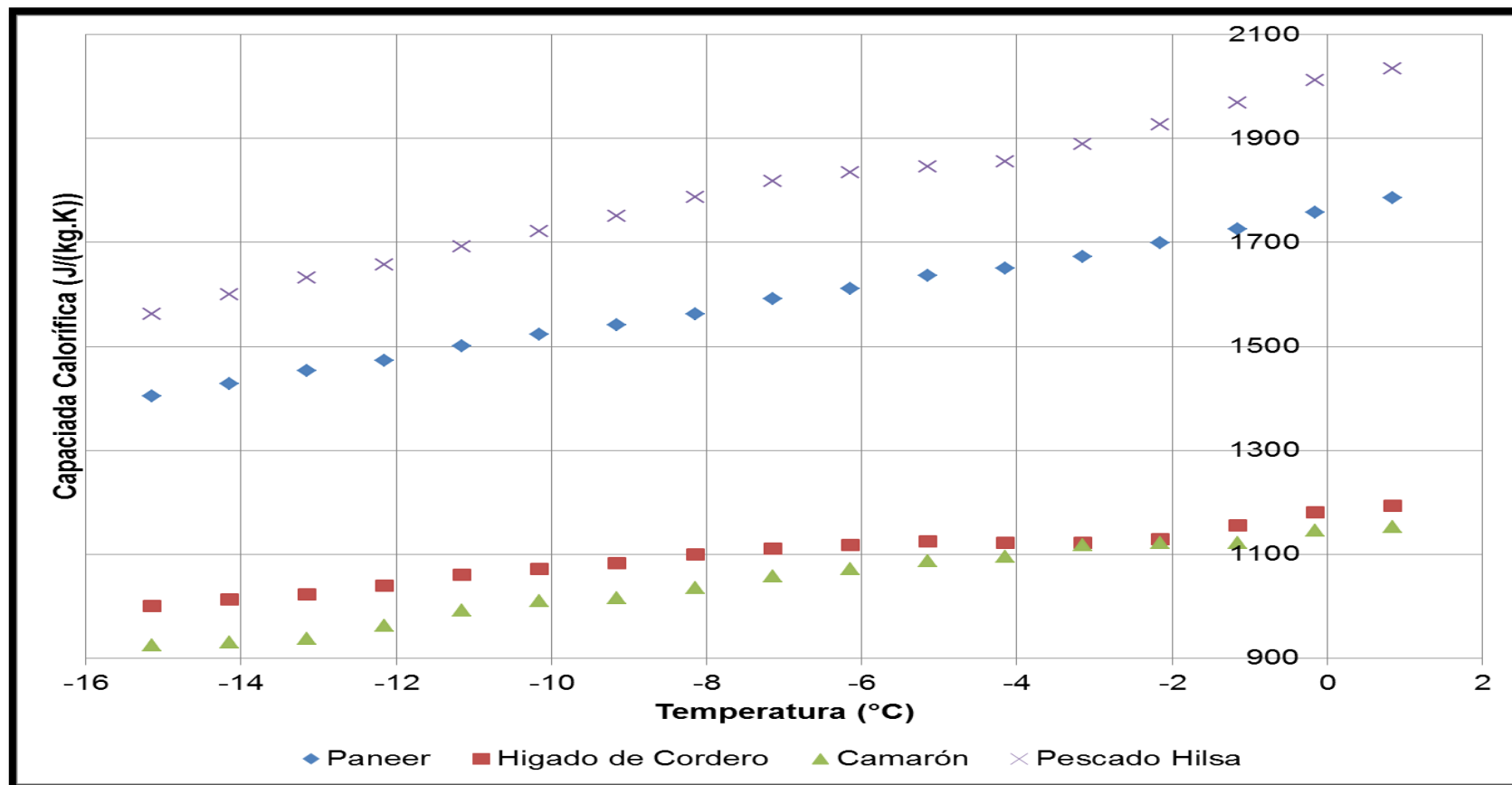
Según lo planteado en la metodología se reemplazan los valores correspondientes para obtener el calor de sublimación necesario y la

$$\text{generación de calor que conlleva: } Q_s = \Delta H_s \cdot m_s = 3092,3 \text{ J/s}, G = \frac{Q_s}{\pi R^2 L} =$$

$$2154030,7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 5.3. Resultados del tercer objetivo

GRÁFICO N° 5.59  
CAPACIDADES CALORIFICAS DE ALIMENTOS LIOFILIZADOS CONGELADOS



**TABLA N° 5.37**  
**ESTIMACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DE LA MEZCLA DE AIRE Y**  
**VAPOR DE AGUA EN LAS TEMPERATURAS EXTREMAS DE**  
**LIOFILIZACIÓN**

<b>T= -60°C</b>		
<b>y<sub>agua</sub></b>	<b>y<sub>inerte</sub></b>	<b>C<sub>pg</sub> mezcla</b>
0	1	975,0
0,1	0,9	1062,2
0,2	0,8	1149,4
0,3	0,7	1236,6
0,4	0,6	1323,8
0,5	0,5	1411,0
0,6	0,4	1498,2
0,7	0,3	1585,4
0,8	0,2	1672,6
0,9	0,1	1759,8
1	0	1847,0
<b>T=50°C</b>		
<b>y<sub>agua</sub></b>	<b>y<sub>inerte</sub></b>	<b>C<sub>pg</sub> mezcla</b>
0	1	995,5
0,1	0,9	1083,4
0,2	0,8	1171,2
0,3	0,7	1259,1
0,4	0,6	1346,9
0,5	0,5	1434,8
0,6	0,4	1522,6
0,7	0,3	1610,5
0,8	0,2	1698,3
0,9	0,1	1786,2
1	0	1874,0

**Nota:** y<sub>agua</sub> : Fracción molar del agua, y<sub>inerte</sub> : Fracción molar del aire  
C<sub>pg</sub>: Capacidad calorífica de la mezcla de gases de vapor de agua y aire (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 5.38**  
**DATOS ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA NATURALEZA DEL**  
**ALIMENTO (PRIMERA PARTE)**

Grupo	RANGO	$k_{II}$	$C_{ple}$	$C_{pg}$
1: Cereales	Mínimo	0,30	924,53	975,0
	Máximo	1,25	1562,19	1874,0
	Promedio	0,43	1222,845	1422,9
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,71	924,53	975,0
	Máximo	2,17	1562,19	1874,0
	Promedio	1,73	1222,845	1422,9
3: Frutas	Mínimo	0,84	924,53	975,0
	Máximo	2,02	1562,19	1874,0
	Promedio	1,54	1222,845	1422,9
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	1,26	924,53	975,0
	Máximo	1,89	1562,19	1874,0
	Promedio	1,41	1222,845	1422,9
5: Carnes	Mínimo	0,98	924,53	975,0
	Máximo	1,63	1562,19	1874,0
	Promedio	1,35	1222,845	1422,9
6: Leches y derivados	Mínimo	0,91	924,53	975,0
	Máximo	1,96	1562,19	1874,0
	Promedio	1,59	1222,845	1422,9
7: Productos azucarados	Mínimo	0,49	924,53	975,0
	Máximo	0,75	1562,19	1874,0
	Promedio	0,59	1222,845	1422,9
8: Leguminosas	Mínimo	0,35	924,53	975,0
	Máximo	1,64	1562,19	1874,0
	Promedio	0,64	1222,845	1422,9
9: Tubérculos	Mínimo	1,01	924,53	975,0
	Máximo	1,95	1562,19	1874,0
	Promedio	1,29	1222,845	1422,9

**Nota:**  $k_{II}$ : Conductividad térmica del capa congelada sólido seco ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ) (ver Tabla N° 5.17);  $C_{ple}$ : Capacidad calorífica de la capa seca ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ );  $C_{pg}$ : Capacidad calorífica de la mezcla de gases de vapor de agua y aire ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )

**TABLA N° 5.39**  
**DATOS UTILIZADOS Y ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA**  
**NATURALEZA DEL ALIMENTO (SEGUNDA PARTE)**

<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	$\bar{r}$	$T_I$	$D_{Kw}$	$D_{Kin}$	$T^*$
1: Cereales	Mínimo	3,75	-20,0	1,36E-03	1,08E-03	1,00
	Máximo	300,00	-20,0	1,09E-01	8,60E-02	1,00
	Promedio	151,88	-20,0	5,52E-02	4,35E-02	1,00
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	10,00	-46,0	3,44E-03	2,72E-03	0,90
	Máximo	300,00	-17,0	1,10E-01	8,65E-02	1,02
	Promedio	155,00	-31,5	5,51E-02	4,34E-02	0,96
3: Frutas	Mínimo	3,25	-51,0	1,11E-03	8,73E-04	0,88
	Máximo	84,80	-17,0	3,10E-02	2,45E-02	1,02
	Promedio	44,03	-34,0	1,56E-02	1,23E-02	0,95
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,40	-45,0	1,38E-04	1,09E-04	0,90
	Máximo	5,10	-11,3	1,89E-03	1,49E-03	1,04
	Promedio	2,75	-28,2	9,83E-04	7,76E-04	0,97
5: Carnes	Mínimo	10,00	-45,0	3,45E-03	2,72E-03	0,90
	Máximo	58,00	-10,0	2,15E-02	1,70E-02	1,04
	Promedio	34,00	-27,5	1,22E-02	9,60E-03	0,97
6: Leches y derivados	Mínimo	10,00	-32,0	3,55E-03	2,80E-03	0,96
	Máximo	300,00	-29,0	1,07E-01	8,45E-02	0,97
	Promedio	155,00	-30,5	5,52E-02	4,35E-02	0,96
7: Productos azucarados	Mínimo	10,00	-45,8	3,45E-03	2,72E-03	0,90
	Máximo	30,00	-36,7	1,05E-02	8,31E-03	0,94
	Promedio	155,00	-41,3	5,39E-02	4,25E-02	0,92
8: Leguminosas	Mínimo	10,00	-30,0	3,56E-03	2,81E-03	0,96
	Máximo	300,00	-30,0	1,07E-01	8,43E-02	0,96
	Promedio	155,00	-30,0	5,52E-02	4,36E-02	0,96
9: Tubérculos	Mínimo	25,00	-17,0	9,14E-03	7,21E-03	1,02
	Máximo	30,00	-17,0	1,10E-02	8,65E-03	1,02
	Promedio	162,50	-17	5,94E-02	4,69E-02	1,02

**Nota:**  $\bar{r}$ : Radio de poro de la capa seca (ver Tabla N° 5.15 de la página);  
 $T_I$ : Temperatura de la capa seca considerada como la temperatura de congelación (°C);  $D_{Kw}$ : Difusividad de Knudsen del vapor de agua ( $m^2.s^{-1}$ );  
 $D_{Kin}$ : Difusividad de Knudsen del aire (inerte) ( $m^2.s^{-1}$ );  $T^*$ : Variable representativa de las fuerzas de gases (-)

**TABLA N° 5.40**  
**DATOS UTILIZADOS Y ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA**  
**NATURALEZA DEL ALIMENTO (TERCERA PARTE)**

Grupo	RANGO	$\Omega$	$D_{win}$ ó $D_{inw}$	$\varepsilon$	$D_{win,e}$	$D_{inw,e}$
1: Cereales	Mínimo	1,44	3,89E-04	0,49	3,54E-05	1,24E-04
	Máximo	1,44	3,89E-04	0,48	4,85E-03	4,39E-03
	Promedio	1,44	3,89E-04	0,48	1,06E-05	3,06E-03
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	1,52	3,13E-04	0,59	4,84E-04	3,64E-04
	Máximo	1,43	3,98E-04	0,48	1,25E-02	4,46E-03
	Promedio	1,47	3,54E-04	0,49	1,10E-05	3,00E-03
3: Frutas	Mínimo	1,53	2,99E-04	0,69	1,64E-07	1,41E-04
	Máximo	1,43	3,98E-04	0,48	2,99E-07	2,08E-03
	Promedio	1,48	3,47E-04	0,48	3,96E-06	1,17E-03
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	1,51	3,16E-04	0,58	1,44E-07	1,50E-05
	Máximo	1,41	4,16E-04	0,48	3,06E-07	1,67E-04
	Promedio	1,46	3,64E-04	0,48	1,15E-05	8,76E-05
5: Carnes	Mínimo	1,51	3,16E-04	0,6	5,31E-07	3,71E-04
	Máximo	1,41	4,20E-04	0,48	1,09E-06	1,58E-03
	Promedio	1,46	3,66E-04	0,49	9,93E-05	9,77E-04
6: Leches y derivados	Mínimo	1,47	3,53E-04	0,67	1,08E-05	4,27E-04
	Máximo	1,46	3,62E-04	0,48	1,50E-05	4,18E-03
	Promedio	1,47	3,57E-04	0,54	4,59E-06	3,33E-03
7: Productos azucarados	Mínimo	1,52	3,13E-04	0,54	6,94E-07	3,33E-04
	Máximo	1,49	3,39E-04	0,54	1,28E-06	9,40E-04
	Promedio	1,50	3,26E-04	0,54	4,19E-06	3,16E-03
8: Leguminosas	Mínimo	1,47	3,59E-04	0,5	1,42E-07	3,20E-04
	Máximo	1,47	3,59E-04	0,49	2,70E-07	4,25E-03
	Promedio	1,47	3,59E-04	0,49	4,18E-06	3,02E-03
9: Tubérculos	Mínimo	1,43	3,98E-04	0,67	2,11E-06	1,04E-03
	Máximo	1,43	3,98E-04	0,48	2,93E-07	8,82E-04
	Promedio	1,43	3,98E-04	0,48	4,54E-06	3,23E-03

**Nota:**  $\Omega$ : Integral de colisión del vapor de agua y de inerte (-) para la difusividad, considerando que  $\Omega_{win} = \Omega_{inw}$ ;  $D_{win}$  ó  $D_{inw}$ : Difusividad molecular de una mezcla binaria de vapor de agua y gas inerte ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $\varepsilon$ : Fracción vacía en la capa seca tomada como la porosidad del alimento (ver Tabla 5.22 de la página);  $D_{win,e}$ : Difusividad efectiva de poro de vapor de agua en una mezcla de vapor de agua y de gas inerte en la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $D_{inw,e}$ : Difusividad efectiva de poro del inerte en una mezcla de vapor de agua y de gas inerte en la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

Se calculó el factor de Hottel como 0,8, teniendo en cuenta que:  $r_1 =$   
 $r_2 = 0,73/2m = 0,365$  m y  $L_{sep} = sp1 = 0,1$  m (ver Figura N° 4.9), obteniéndose:

$$\frac{L}{r_1} = \frac{0,1}{0,365} = 0,27 \qquad \frac{r_2}{L} = \frac{0,365}{0,1} = 3,65$$

**TABLA N° 5.41**  
**DATOS ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA NATURALEZA DEL**  
**ALIMENTO (CUARTA PARTE)**

Grupo	RANGO	$\frac{dm}{dt}$	$N_w$	$\rho_{Ie}$	$\rho_{II}$	V	$\alpha_{Ie}$
1: Cereales	Mínimo	1,56E-04	3.73E-04	449,00	1141,7	5.4E-07	8,83
	Máximo	3,35E-03	8.00E-03	785,00	1545,1	1.1E-05	4,83
	Promedio	5,87E-04	1.40E-03	557,40	1428,1	1.6E-06	0,01
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	1,55E-03	3.70E-03	224,00	1006,2	4.7E-06	3,79
	Máximo	5,23E-03	1.25E-02	975,50	1334,9	3.5E-05	4,34
	Promedio	1,46E-03	3.49E-03	653,67	1054,2	8.7E-06	0,00
3: Frutas	Mínimo	4,89E-04	1.17E-03	755,50	481,0	6.2E-05 <sup>(*)</sup>	51,07
	Máximo	5,40E-03	1.29E-02	1057,00	1266,0	6.2E-05	3,40
	Promedio	1,07E-03	2.56E-03	856,00	781,6	6.2E-05 <sup>(*)</sup>	0,01
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	5,01E-04	1.20E-03	212,49	990,7	1.5E-06	12,10
	Máximo	7,15E-04	1.71E-03	751,10	1056,0	5.6E-06	3,62
	Promedio	1,26E-03	3.01E-03	481,80	1023,4	5.6E-06	0,01
5: Carnes	Mínimo	3,81E-04	9.10E-04	640,00	1021,6	2.4E-06	49,45
	Máximo	3,62E-03	8.65E-03	1080,00	1073,5	1.2E-05 <sup>(*)</sup>	3,44
	Promedio	9,30E-04	2.22E-03	860,00	1045,1	1.2E-05	0,01
6: Leches y derivados	Mínimo	5,01E-04	1.20E-03	563,00	993,0	2.8E-06	27,68
	Máximo	2,17E-03	5.18E-03	610,00	1052,4	1.2E-05	4,82
	Promedio	9,79E-04	2.34E-03	586,50	1028,7	5.3E-06	0,01
7: Productos azucarados	Mínimo	1,92E-03	4.59E-03	628,32	1402,0	5.9E-06	13,59
	Máximo	6,42E-04	1.53E-03	628,32	1481,2	1.8E-06	6,93
	Promedio	6,44E-04	1.54E-03	628,32	1449,2	1.9E-06	0,01
8: Leguminosas	Mínimo	1,20E-04	2.87E-04	628,32	1052,4	6.8E-07	13,33
	Máximo	1,19E-03	2.84E-03	628,32	1478,9	3.3E-06	3,38
	Promedio	4,93E-04	1.18E-03	628,32	1345,6	1.6E-06	0,01
9: Tubérculos	Mínimo	3,13E-04	7.48E-04	93,00	1017,3	8.1E-07	11,18
	Máximo	1,73E-03	4.13E-03	660,00	1206,2	7.6E-06	10,06
	Promedio	9,75E-04	2.33E-03	344,00	1110,2	3.0E-06	0,01

**Nota:**  $\frac{dm}{dt}$ : Velocidad de sublimación del agua al inicio (kg.s<sup>-1</sup>) según cinética de liofilización;  $N_w = (dm/dt)/A$ , donde "A" representa el área del plato: 0,42m<sup>2</sup>; Flujo másico de agua sublimada por unidad de área (kg.m<sup>-2</sup>)



$^2 \cdot s^{-1}$ );  $\rho_{Ie}$ : Densidad del alimento seco ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $\rho_{II}$ : Densidad de la capa congelada ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $V$ : Velocidad de sublimación ( $m \cdot s^{-1}$ );  $\alpha_{Ie}$ : Difusividad térmica de la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

**TABLA N° 5.42**  
**DATOS ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA NATURALEZA DEL**  
**ALIMENTO (QUINTA PARTE)**

Grupo	RANGO	$\alpha_{II}$	$P_h = P_{wX}$	$P_{inX}$	$P_X$	$P_w^0$	$P_{in}^0$	$P^0 = P_s$
1: Cereales	Mínimo	1,84	48,67	6,0	54,7	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,45	48,67	6,0	54,7	1,1	0,14	1,24
	Promedio	1,38	48,67	6,0	54,7	1,1	0,14	1,24
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	0,52	2,78	0,3	3,1	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,28	65,22	8,1	73,3	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,25	14,81	1,8	16,6	1,1	0,14	1,24
3: Frutas	Mínimo	0,20	1,49	0,2	1,7	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,26	65,22	8,1	73,3	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,19	11,26	1,4	12,7	1,1	0,14	1,24
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	0,27	3,14	0,4	3,5	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,23	111,68	13,8	125,5	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,25	21,18	2,6	23,8	1,1	0,14	1,24
5: Carnes	Mínimo	0,34	3,14	0,4	3,5	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,24	125,84	15,6	141,4	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,27	22,68	2,8	25,5	1,1	0,14	1,24
6: Leches y derivados	Mínimo	0,64	14,03	1,7	15,8	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,23	19,36	2,4	21,8	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,28	16,50	2,0	18,5	1,1	0,14	1,24
7: Productos azucarados	Mínimo	1,15	2,85	0,4	3,2	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,76	8,32	1,0	9,3	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,97	4,92	0,6	5,5	1,1	0,14	1,24
8: Leguminosas	Mínimo	1,22	17,40	2,2	19,6	1,1	0,14	1,24
	Máximo	0,35	17,40	2,2	19,6	1,1	0,14	1,24
	Promedio	0,81	17,40	2,2	19,6	1,1	0,14	1,24
9: Tubérculos	Mínimo	3,17	65,22	8,1	73,3	1,1	0,14	1,24
	Máximo	3,08	65,22	8,1	73,3	1,1	0,14	1,24
	Promedio	3,11	65,22	8,1	73,3	1,1	0,14	1,24

**Nota:**  $\alpha_{II}$ : Difusividad térmica de la capa congelada ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $P_h$ : Presión de vapor absoluta en la interfase (Pa);  $P_{inX}$ : Presión del inerte en la interfase (Pa);  $P_X$ : Presión total en la interfase (Pa);  $P_w^0$ : Presión del agua en la superficie (Pa);  $P_{in}^0$ : Presión del inerte en la superficie (Pa);  $P^0 = P_s$ : Presión total en la superficie (Pa)

**TABLA N° 5.43**  
**DATOS ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA NATURALEZA DEL**  
**ALIMENTO (SEXTA PARTE)**

<b>Grupo</b>	<b>RANGO</b>	$T_I$	$C_w$	$C_{in}$
1: Cereales	Mínimo	-20,0	9,42E-06	1,87E-06
	Máximo	-20,0	9,42E-06	1,87E-06
	Promedio	-20,0	9,42E-06	1,87E-06
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	-46,0	1,05E-05	2,09E-06
	Máximo	-17,0	9,31E-06	1,85E-06
	Promedio	-31,5	9,87E-06	1,96E-06
3: Frutas	Mínimo	-51,0	1,07E-05	2,13E-06
	Máximo	-17,0	9,31E-06	1,85E-06
	Promedio	-34,0	9,97E-06	1,98E-06
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	-45,0	1,05E-05	2,08E-06
	Máximo	-11,3	9,11E-06	1,81E-06
	Promedio	-28,2	9,73E-06	1,93E-06
5: Carnes	Mínimo	-45,0	1,05E-05	2,08E-06
	Máximo	-10,0	9,06E-06	1,80E-06
	Promedio	-27,5	9,71E-06	1,93E-06
6: Leches y derivados	Mínimo	-32,0	9,89E-06	1,96E-06
	Máximo	-29,0	9,77E-06	1,94E-06
	Promedio	-30,5	9,83E-06	1,95E-06
7: Productos azucarados	Mínimo	-45,8	1,05E-05	2,08E-06
	Máximo	-36,7	1,01E-05	2,00E-06
	Promedio	-41,3	1,03E-05	2,04E-06
8: Leguminosas	Mínimo	-30,0	9,81E-06	1,95E-06
	Máximo	-30,0	9,81E-06	1,95E-06
	Promedio	-30,0	9,81E-06	1,95E-06
9: Tubérculos	Mínimo	-17,0	9,31E-06	1,85E-06
	Máximo	-17,0	9,31E-06	1,85E-06
	Promedio	-17	9,31E-06	1,85E-06

**Nota:**  $T_I$ : Temperatura de la Capa Seca (°C);  $C_w$ : Concentración del agua ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $C_{in}$ : Concentración del inerte ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

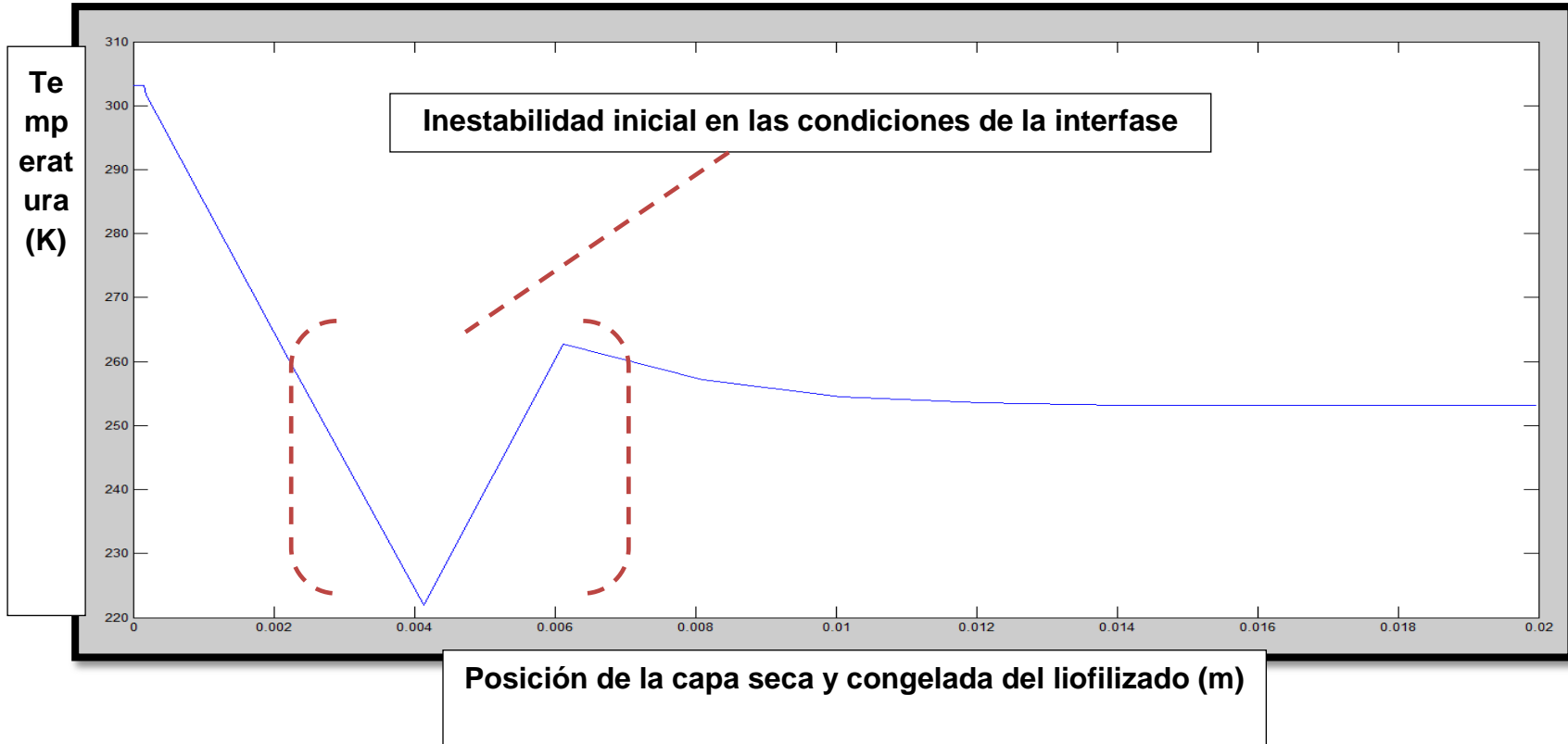
**TABLA N° 5.44**  
**DATOS ESTIMADOS DEPENDIENTES DE LA NATURALEZA DEL**  
**ALIMENTO (SÉPTIMA PARTE)**

Grupo	RANGO	X	$\frac{\partial P}{\partial x}$	K <sub>p1</sub>	V <sub>p</sub>
1: Cereales	Mínimo	5,23E-04	1,02E+05	1,07E-09	9,69
	Máximo	3,87E-04	1,38E+05	7,29E-08	891,85
	Promedio	4,18E-04	1,28E+05	3,75E-08	424,75
2: Verduras y Hortalizas	Mínimo	5,94E-04	3,18E+03	3,64E-09	0,92
	Máximo	4,47E-04	1,61E+05	7,24E-08	1045,88
	Promedio	5,67E-04	2,72E+04	3,99E-08	91,66
3: Frutas	Mínimo	4,97E-04	8,82E+02	1,41E-09	0,10
	Máximo	4,72E-04	1,53E+05	2,17E-08	296,87
	Promedio	7,64E-04	1,49E+04	1,20E-08	15,00
4: Pescados y Mariscos	Mínimo	6,03E-04	3,80E+03	1,43E-10	0,04
	Máximo	5,66E-04	2,20E+05	1,41E-09	28,36
	Promedio	5,84E-04	3,86E+04	7,90E-10	2,62
5: Carnes	Mínimo	5,85E-04	3,92E+03	3,71E-09	1,16
	Máximo	5,56E-04	2,52E+05	1,50E-08	348,17
	Promedio	5,72E-04	4,24E+04	9,52E-09	34,69
6: Leches y derivados	Mínimo	6,02E-04	2,41E+04	3,99E-09	8,13
	Máximo	5,68E-04	3,61E+04	7,45E-08	229,89
	Promedio	5,81E-04	2,98E+04	4,39E-08	111,01
7: Productos azucarados	Mínimo	4,26E-04	4,62E+03	3,32E-09	1,22
	Máximo	4,03E-04	2,01E+04	8,50E-08	141,56
	Promedio	4,12E-04	1,04E+04	4,48E-08	37,86
8: Leguminosas	Mínimo	5,68E-04	3,22E+04	2,95E-09	8,09
	Máximo	4,04E-04	4,53E+04	7,54E-08	290,81
	Promedio	4,44E-04	4,12E+04	3,97E-08	139,33
9: Tubérculos	Mínimo	5,87E-04	1,23E+05	9,48E-09	104,28
	Máximo	4,95E-04	1,46E+05	7,24E-08	944,46
	Promedio	5,38E-04	1,34E+05	3,97E-08	476,50

**Nota:** X: Ubicación de la interfase (m);  $\frac{\partial P}{\partial x}$ : Cambio de la presión con respecto a la interfase (Pa.m-1); K<sub>p1</sub>: Permeabilidad (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>); V<sub>p</sub>: v<sub>x</sub> Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)

Finalmente, se asumió para el inicio de los cálculos que la temperatura de la placa calefactora (T<sub>UP</sub>) llega aproximadamente a 50°C.

**GRÁFICO N° 5.60**  
**PERFIL DE TEMPERATURA (K) DESDE LA BASE DE LA CAPA CONGELADA HASTA SUPERFICIE CAPA SECA**



**Nota:** Elaborado en Matlab con datos aleatorios para evaluar correcta sintaxis del lenguaje de programación, se aprecia inestabilidad en la interfase como se esperaba

## **VI. DISCUSION DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1. Contrastación de la hipótesis general**

Se corroboró la hipótesis general, donde el diseño y simulación están relacionados con la cantidad de materia prima, disposición general del equipo, condiciones de operación y uso de principios de transferencia de masa y calor; todos ellos utilizados durante el cálculo y el análisis íntegro de la liofilización en cada una de sus etapas.

La cantidad de materia prima permitió estimar las características dimensionales de los platos contenedores del producto que se liofiliza, constituyendo el punto de partida para el análisis de la cinética de congelación y sublimación posteriores requeridas.

La disposición general del equipo, asumida al inicio permitió tener un dato inicial de área de transferencia requerido en los cálculos de balance de energía y establecer las características óptimas del sistema de congelación propuesto.

Las condiciones de operación analizadas en el primer objetivo ayudaron a la realización del cálculo del diseño mecánico del liofilizador piloto y realizar las simulaciones para obtener perfiles de temperatura brindados en el desarrollo del tercer objetivo. El uso de los principios de transferencia de calor y masa fueron el soporte para el cálculo de las características de dispositivos intermedios que conforman el equipo de

liofilización como lo son la cámara de secado, condensador, compresores en el sistema de congelación de doble etapa, características de los dispositivos de calentamiento, Asimismo, se brindó las bases para el análisis matemático adecuado de la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales que rigen dicha operación.

Adicionalmente, el cálculo de las características del diseño y de la simulación presentada se basó en las propiedades de los diversos alimentos y en las condiciones externas para realizar las pérdidas de calor adicionales al medio ambiente durante la congelación. Las propiedades de transporte de los diversos casos de alimentos permitieron brindar un valor más general para el desarrollo de un equipo de amplio rango de operación para el secado de diversos alimentos.

### **6.1.2. Contrastación de las hipótesis específicas**

#### **a) Discusión de la primera hipótesis específica**

Los parámetros de operación del equipo de liofilización están en función de la presión y la temperatura de trabajo, que fue analizada mediante el estudio de la temperatura óptima de congelamiento para evitar el colapso estructural en un alimento de poca rigidez. Asimismo, se agrega a las suposiciones planteadas las características presentes en el alimento como porosidad, conductividad térmica, densidad, calor específico, contenido vitamínico, para poder deducir la temperatura máxima de desorción o calentamiento final durante la liofilización.

#### **b) Discusión de la segunda hipótesis específica**

Se confirmó que las capacidades de los componentes del liofilizador a escala piloto pueden ser calculadas mediante la potencia del equipo de frío y el vacío necesario para causar la sublimación, debido a que la cinética de congelación para los diversos grupos de alimentos considerados que fue estimada previamente permite determinar las dimensiones y el tipo de sistema de congelación del equipo diseñado y simulado; el vacío considerado fue de gran ayuda para la estimación de la resistencia del material y cinética de liofilización por medio de la intensidad de fuerzas impulsoras de transferencia de masa de agua congelada que se va sublimando.

### **c) Discusión de la tercera hipótesis específica**

La validez de la suposición planteada referida a la simulación del proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado que cumpla con las especificaciones de calidad del mercado, fue analizada desde el punto de vista que un programa de simulación permite determinar los comportamientos de las diferentes capas infinitesimal del alimento que se va liofilizando y permite evitar un caso de subida brusca de temperatura por encima de la máxima permitida según el alimento a trabajar.

## **6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares**

### **6.2.1. Discusión de resultados del primer objetivo específico**

#### **a) Discusión del rango de temperatura de congelación de los alimentos durante la liofilización**

El rango de temperatura de congelación de los alimentos estimada se encuentra entre  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los cuales se encuentran conforme a la teoría dada en el capítulo II.

#### **b) Discusión del rango de presiones de vacío durante la liofilización**

El rango de presión de vacío estimada debe estar alrededor de los 4 Pa., siendo valores más bajos los más óptimos. Sin embargo, es bien entendido que permitiendo que la temperatura del condensado se eleve alimentándolo con aire o gas inerte dentro de la cámara de liofilización puede en realidad acelerar la sublimación (Rowe, 1976). La disminución del nivel de vacío en demasía puede causar una gran heterogeneidad en la transferencia de calor (Tang and Pikal, 2004 citados por Ahmed, et al., 2012: 634). Los liofilizadores tipo Atlas-Ray de la marca GEA, operan sólo hasta 0,2 mBar (20 Pa.)

#### **c) Discusión del rango de temperaturas del condensador de agua sublimada durante la liofilización**

La temperatura óptima para el condensador se determinó en  $-60^{\circ}\text{C}$ , para que exista la suficiente fuerza impulsora en la liofilización. Las temperatura del condensador en liofilizadores comerciales tienen un rango entre  $-45$  y  $-60^{\circ}\text{C}$ . Equipo especializado de liofilización tienen condensadores operando hasta  $-95^{\circ}\text{C}$  (Ahmed, et al., 2012: 635). Adicionalmente, los liofilizadores Lyotheta tipo LT3 proporcionan temperaturas menores a las propuestas llegando hasta  $-85^{\circ}\text{C}$ ; los liofilizadores tipo Epsilon pueden trabajar hasta  $-60^{\circ}\text{C}$ .



#### **d) Discusión del rango de temperaturas de los platos de calentamiento durante el secado secundario de la liofilización.**

El análisis realizado en función del contenido de sustancias volátiles expone que el alimento no debe calentarse a más de 54°C durante la etapa de desorción. Usando este método la temperatura óptima fue determinada como 54.6°C para el jugo de manzana y 45.9°C para el jugo de pera (Ahmed, et al (2012:635)). Asimismo, los liofilizadores tipo Epsilon funcionan a temperaturas de desorción de hasta 55°C.

#### **6.2.2. Discusión de resultados del segundo objetivo específico**

##### **a) Discusión del diseño del sistema de platos de liofilización**

Se diseñaron 4 platos circulares de diámetro de 0,73 m, que corresponde a 0,42 m<sup>2</sup> de área por cada plato (1,6 m<sup>2</sup> total), con una altura de 2 cm, considerando una producción de 20 kg/batch en el equipo propuesto. Erdogan (2009: 444) cita que el espesor del alimento debe ser lo más bajo posible, citando que la liofilización de una muestra entre 3,5 a 4 cm. de espesor puede durar hasta 50 horas de operación.

La compañía GEA brinda en el mercado liofilizador piloto de cuatro platos de aluminio rectangulares de 500x400x300 mm, lo cual corresponde a un área total de 0,8 m<sup>2</sup>, para cargas que alimentos que fluctúan entre 6 y 7,8 kg/batch. Los liofilizadores de la marca Lyotheta tipo LT 2 tienen entre 4 a 7 bandejas y entre 1,62 y 2,84 m<sup>2</sup> de área total, siendo el menor rango de éstos similar al estimado en esta investigación.

##### **b) Discusión de las dimensiones de la cámara de secado**

Se ha estimado una cámara cilíndrica horizontal de 1,32 m de diámetro, con un espesor de 13 mm. La compañía GEA brinda en el mercado liofilizador de 1,8 m en total de altura, 1,6 de ancho y de profundidad de 0,7m.

#### **c) Discusión del condensador de agua sublimada**

Una cámara de condensación de base cuadrada de 0,90 m x 0,90 m con una altura de 0,50 m., aleteada, tomando como referencia la distribución de un liofilizador de menor escala se dimensionó 5 tuberías de, una de diámetro de 1,2 cm. En el centro y en los alrededores 2,4 cm.

#### **d) Discusión del aislamiento de la cámara**

El aislamiento térmico de los liofilizadores comerciales no se encuentra reforzado por poliuretano.

#### **e) Discusión del sistema de producción de vacío**

Las bombas de paletas rotativas a velocidad de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , con una rápida bajada de vacío hasta 500 uHg en menos de 30 minutos; están conformes a los diversos manuales operativos consultados. Además, los liofilizadores tipo Atlas-Ray de la marca GEA funcionan con bombas de vacío rotativas de doble etapa tal como se propone en este trabajo de investigación, las cuales son controladas con un sistema de registro.

#### **f) Discusión del sistema mecánico de congelación**

Carga térmica total en el rango de los 18 kW de doble etapa, COP=3,11. La empresa GEA, menciona que mejorar el COP (aumentarlo) permite disminuir la factura eléctrica.

### **g) Discusión del sistema de calentamiento**

El cálculo realizado indica la necesidad de tener un flujo calórico para la sublimación de 3,1 kW, con una generación de calor de  $2,1 \cdot 10^6 \text{ MJ.m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ . La empresa Liobras comercializa dispositivos de calentamiento en liofilizadores de laboratorio que llegan hasta solo 30°C como máximo. El liofilizador modelo Kuenling KLCV-10 con un diámetro de 0,65 m debe tener un sistema de calentamiento de 4 KW para mantener la sublimación. Asimismo, los liofilizadores tipo Atlas-Ray de la marca GEA, tienen un sistema de calentamiento eléctrico en los platos a prueba de agua junto con un sensor de temperatura.

### **6.2.3. Discusión de resultados del tercer objetivo específico**

La elaboración de un algoritmo de cálculo basado en las ecuaciones generales de la conservación de la materia y energía requiere gran cantidad de data no disponible en bibliografía, pudiendo ser estimada de una evaluación en estado estacionario previo como se hizo. Sadikoglu et al. (1997: 791), y Mujumdar (2006: capítulo 11) mencionan solo correlaciones matemáticas específicas para un material sin la inclusión de grupos de sustancias como se ha realizado en este trabajo.

Liu et al. (2007: 6) concluyen en su trabajo de simulación que los datos encontrados demuestran que reduciendo el paso de tiempo e incrementando la red del tamaño del poro en la simulación se logra aumentar la precisión del modelo con mucho esfuerzo computacional requerido. Además, las simulaciones proveerán de información

relacionada a la cualidad y control teórico del producto reduciendo el riesgo de falla en el secado.

Figueiredo et al. (2012: 5) han observado que la velocidad de sublimación simulada mediante el programa Matlab con la relaciones de balance de materia y energía en estado no estacionario es influenciada en pequeña proporción por la presión de la cámara en la liofilización del pericardio bovino que fue ajustada a la data experimental

## VII. CONCLUSIONES

1. La estimación y el análisis de las condiciones de operación de la liofilización para diversos alimentos son de vital importancia para los cálculos dimensionales del liofilizador a escala piloto, cinética de secado y en la simulación del proceso.
2. La disminución del vacío originado en la cámara y la disminución de la temperatura de congelación y en el condensador, brindan un alimento liofilizado con menor tiempo de operación según el análisis de cinética de secado de este proceso en estado estacionario.
3. El adecuado diseño de un equipo de liofilización comprende platos contenedores de área extensa, sistema generador de vacío adecuado que cumpla con las condiciones de sublimación, sistema de congelación de doble etapa que permita llegar a una temperatura por debajo de los congeladores convencionales, platos calefactores y un óptimo sistema de aislamiento externo.
4. El uso de las propiedades de transporte de los alimentos en estado congelado y liofilizado son necesarias para el análisis del proceso de liofilización y el diseño de un equipo de amplia aplicabilidad.
5. La simulación del sistema de liofilización en estado no estacionario, permite la evaluación del comportamiento de las temperaturas en la capa del alimento que se va liofilizando mediante el uso de las relaciones matemáticas derivadas de las leyes de la conservación de la materia y energía.

## VIII. RECOMENDACIONES

- Estudiar la sensibilidad de las propiedades de transferencia de alimentos u otros sustratos en el tiempo de liofilización estimado.
- Estudiar la permeabilidad de diversos alimentos, para aumentar la precisión en la evaluación de la simulación y diseño de la liofilización.
- Realizar un estudio de diseño y simulación de un liofilizador a presión atmosférica.
- Evaluar diversos sistemas de congelación para llegar a la temperatura requerida de liofilización y de la cámara de condensación de vapor de agua.
- Evaluar una propuesta económica de diseño fundamentada en la parte técnica dada en este trabajo con los costos de la tecnología aplicable.
- Desarrollar un estudio de automatización del equipo de liofilización propuesto, así como su posible interfaz de control durante la operación.
- Diseñar y simular un equipo destinado a liofilizar compuestos químicos que requieran tratamiento a temperaturas bajas.
- Diseñar y simular un equipo destinado a liofilizar microorganismos.
- Diseñar y simular un equipo de liofilización continuo.
- Realizar un diseño mecánico basado en Dinámica de Fluidos Computacional para evaluar las estimaciones realizadas en este trabajo.
- Desarrollar software para la simulación de un proceso de liofilización para diversas sustancias con data de las propiedades de los alimentos.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMED, Jasim y RAHMAN, Mohammad. **Handbook of Food Process Design**. USA. Primera Edición. Editorial Wiley-Blackwell. 2012.
2. ASHRAE. **ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI)**. Comité ASHRAE. 2009.
3. ASME. **The America Society of Mechanical Engineers**. Sección VIII - División 1, SECCIÓN II-Sub parte 3, Apéndice L. 2010.
4. BACAOANU, Ana y PICOS, María. **Lyophilization-Freeze-Drying**. Iasi, Department of Chemical Engineering. Technical University of Iasi. Rumania. Información consultada y brindada por correo electrónico. E-mail: abacaoan@ch.tuiasi.ro
5. BAÉZ, Radamés. ROJAS, Guadalupe, VALDIVIDA, Ángeles. **Effect of Storage Temperature on the Chemical Stability of Enteral Formula**. Journal of Food Science and Technology, Vol. 4(5): 235-242. 2012.
6. BAI, Yan. RAHMAN, Shafiur, PERERA, Conrad, SMITH, Bronwen, MELTON, Laurence. **State diagram of Apple slices: glass transition and freezing curves**. *Food Research International*, Vol. 34: 89-95. 2001.
7. BARBOSA, G. Y VEGA, H. **Deshidratación de Alimentos**. España. Primera Edición. Editorial Acribia S.A. 2000.
8. BEJAN, Adrian y KRAUS, Allan. **Heat Transfer Handbook**. USA. Primera Edición. Editorial Wiley John Wiley & Sons, INC. 2003.
9. BENAVENTE, Luis y GARCÍA, José. **Industrias agroalimentarias**. Editorial Servicios de Publicaciones Reproval, S.L.1998.

10. BIKOV A.B .**Aparatos cambiadores de calor, instrumentos y enfriadores de prueba de automatización**. Editorial: La luz y la Industria Alimentaria. 1984.
11. BIRD, Byron, STEWART, Warren, LIGHTFOOT, Edwin. **Fenómenos de Transporte**. EEUU (traducción). Segunda Edición. Editorial Limusa Wiew.2006
12. BRAKES, N., FENNEMA, O. **Glass Transition Values of Muscle Tissue**. *Journal of Food Science*, Vol. 64(1): 4. 1999.
13. BRENNAN, James. **Food Processing Handbook**.Primera edición. Alemania. Editorial Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA. 2006.
14. BRENNAN, J.G., BUTTERS J.R., COWELL N.D., Y LILLEY A.E.V. **Las operaciones de la Ingeniería de los alimentos**. Tercera Edición. USA. Editorial Aspen Publishers Inc.1998
15. BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. **Comparison of 304 or 316 type compositions and effect on corrosion resistance**. Disponible en: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=110> artículo web. Consultado el 07 de noviembre del 2012.
16. CABEZAS SÁNCHEZ, César. **Tablas Peruanas de Composición de Alimentos**. Centro Nacional de Alimentación y Nutrición Instituto Nacional de Salud. Ministerio de Salud. 2009.
17. CALLEJO PARDO, Guillermo. **Ingeniería de la Industria Alimentaria-Volumen 3**. España. Primera Edición. Proyecto Editorial Sinteus. 2002.



18. CARRASCO VENEGAS, Luis. **Fenómenos de Transporte-Aplicaciones con métodos numéricos.** Perú. Primera edición. Editorial Macro E.I.R.L. 2011.
19. CARTIER, Raymond, DASHIELL, Thomas, CLANCY, Jackson. **Freeze Drying-Theoretical Considerations and Application.** USA. Armed Services Technical Information Agency-Arlington Hall Station-Arlington 12, Virginia. Project 4B92-02-034.1961
20. CEBALLOS PEÑALOZA, Adela. **Estudio Comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta.** Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. (2008).
21. CENGEL, Yunus. **Transferencia de Calor.** USA. Segunda edición. Editorial Mc. Graw-Hill. 2004.
22. CHAKRABORTY, R., SAHA, A. K., & BHATTACHARYA, P. **Determination of thermo-physical properties of Freeze-dried foodstuffs.** *Indian Journal of Chemical Technology*, Vol.13: 597- 604. Noviembre, 2006.
23. CHOE, Eunok. HUANG, Rongmin, MIN, David. **Chemical Reactions and Stability of Riboflavin in Foods.** *Journal of Food Science*, Vol. 70(1): 28-36. 2005.
24. CIURZYNSKA, Agnieszka., LENART, Andrzej. **Freeze-Drying-Application in Food Processing and Biotechnology- A Review.** *Food Technology*, Vol.61(3): 165-171. 2011.

25. CONSTANTINIDES, Alkis; MOSTOUFI, Navid. **Numerical Methods for Chemical Engineers with MATLAB Applications**. USA. Primera Edición. Prentice Hall PTR. 2000.
26. DA-WEN, Sun. **Frozen Food Processing and Packaging**. USA. Taylor & Francis-CRC. 2006.
27. DEVATEC. **Tablas de contenido de humedad**. Disponible en: [www.devatec.com/.../pdf/Learn\\_more\\_on\\_Humidification-esp.pdf](http://www.devatec.com/.../pdf/Learn_more_on_Humidification-esp.pdf) artículo web. Consultado el 04 de abril del 2013.
28. DISTRIBUIDORA DE ACEROS Y MATERIALES, S.A. DE C.V. **Aceros inoxidables austeníticos AISI 304 316**. Disponible en: <http://www.distribuidoradeaceros.com.mx/pub/gallery/15/Specs.pdf> artículo web. Consultado el 07 de mayo de 2013.
29. DOMINGOS FELIPE, Antonio. **Memoria Descriptiva para solicitar Patente de Invención por 20 años**. Disponible en: Artículo web. Consultado el 08 de diciembre del 2011.
30. DUAN, XU, ZHANG, Min, MUJUMDAR, Arum, WANG, Shaojin. **Microwave freeze drying of sea cucumber (Stichopus japonicas)**. Journal of Food Engineering, Vol.96: 491-497. 2010.
31. DUPONT. **Suva** ® **95**. Disponible en: [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh) artículo web. Consultado el 20 de abril de 2013.

32. ERDOGDU, Ferruh. **Optimization in Food Engineering**. USA. Editorial CRC Press Taylor & Francis Group. 2009.
33. FELLOWS, P. **Food Processing Technology**. USA. Editorial CRC Press. 2000.
34. FENNEMA, Owen. KAREL, Marcus. LEND, Daryl. **Principles of Food Preservation**. New York-USA. Editorial Dekker. 1975
35. FONTANA, Anthony. **Fundamental of Water Activity**. Disponible en: <http://www.decagon.com/aqualab/>. Consultado el 15 de Febrero de 2013.
36. GEA. **Atlas Freeze Drying**. Disponible en: [http://www.niroinc.com/food\\_chemical/freeze\\_dryers.asp](http://www.niroinc.com/food_chemical/freeze_dryers.asp) artículo web. Consultado el 09 de diciembre del 2011.
37. GOLDBLITH, S. A., REY, L., & ROTHMARY, W. W. **Freeze Drying and Advanced Technology**. Londres. Primera Edición. Academic Press. 1975.
38. GOULA, Athanasia, ADAMOPOULOS, Konstantinos. **Kinetic Models of b- Carotene Degradation During Air Drying of Carrots**. *Drying Technology*, Vol. 28:752-761. 2010.
39. HELDMAN, Dennis y LUND, Daryl. **Handbook of Food Engineering**. United States of America. CRC Press. 2007.
40. HIMMELBLAU, David. **Principios Básicos de Cálculos en Ingeniería Química**. EEUU (traducción). Sexta Edición. Editorial Prenntice-Hall Hispanoamericana, S.A.1997.

41. HOFFMAN, Dorothy; SINGH, Bawa; THOMAS, John. **Handbook of Vacuum Science and Technology**. USA. Academic Press.1998
42. IBARZ, Albert. BARBOSA, Gustavo. **Operaciones unitarias en la Ingeniería de Alimentos**. Ediciones Mundi-Prensa. Impreso en España. 2005
43. IBARZ, A., BARBOSA, G., GARZA, S., GIMENO, V. **Métodos experimentales en la Ingeniería de Alimentos**. Editorial Acribia. S.A. Impreso en España. 2000.
44. KARHAN, Mustafa, AKSU, Mehmet, TETIK, Nedim, Turhan, Irfan. **Kinetic Modelling of Anaerobic Thermal Degradation of Ascorbic Acid in Rose Hip (Rosa Canina L) Pulp**. *Journal of Food Quality*, Vol. 27:311-319. 2004.
45. KHWANRUTHAI, Miss. **Prediction of Temperature and Time used in Freeze Dry Process of Shrimp**. Tesis para obtener el título de Master of Science en Ingeniería Mecánica. Bangkok. Universidad de Tecnología del Norte de Bangkok. 2007.
46. KROKIDA, M., OIKONOMOPOULOU, V., KARATHANOS, V. **Evaluation of Structural Properties of Freeze-Dried Food Products**. European Drying Conference-EuroDrying. 2011
47. LIENHARD, JOHN. **A Heat Transfer Textbook**. USA- Cambridge Massachusetts. Tercera Edición. Editorial Phlogiston Press. 2000.
48. LIOBRAS. **Equipamiento de liofilizadores y líneas de producción**. Disponible en:<http://www.liobras.com.br/catalogo/index.html> artículo web.

Consultado el 09 de diciembre del 2011.

49. LYOTETHA. **Freeze-Drying Equipment.** Disponible en:  
[www.swissvacuum.com/.../Freeze\\_Drying/Cat\\_L...](http://www.swissvacuum.com/.../Freeze_Drying/Cat_L...)Artículo web.

Consultado el 09 de diciembre del 2011.

50. MAO, Yanhui. **The measurement and Analysis of Frost Accumulation on a Flat Plate with Forced Convection.** Tesis para obtener el grado de Master of Science en Ingeniería Mecánica. Canadá. University of Saskatchewan. 1991.

51. MAROULIS, Zacharias, SARAVACOS, G. **Food Process Design.** USA. Primera edición. Marcel Dekker, Inc. 2003.

52. MAYER, LEONARDO. BERTOLUZZO, STELLA. BERTOLUZZO, GUADALUPE. **Conservación de alimentos, Diseño y Construcción de un Liofilizador.**Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Vol.9:147. Noviembre 2006.

53. MEGYESY, Eugene. **Manual de Recipientes a Presión.** Traducción- México. Primera reimpression. Editorial Limusa S.A. de C.V. 1992.

54. MILLMAN, M. J., LIAPIS, A. I., & MARCHELLO, J.M. **Guidelines for the desirable of batch freeze driers during the removal of free water.** Journal of Food Technology, Vol.19 (6): 725- 732. Diciembre 1984.

55. MILLROCK TECHNOLOGY. **Freeze Dryers-For the Laboratory, Development, and Production.** Disponible en:  
<http://www.millrocktech.com/> artículo web. Consultado el 09 de diciembre del 2011.

56. MUJUMDAR, Arum. **Handbook of Industrial Drying**.USA. Tercera Edición. Taylor & Francis Group. 2006.
57. NATIVIDAD, Leynard. **Rehidratación de un Liofilizado de Jugo de Cocona (Solanum sessiliflorum Dunal) encapsulado con Carboximetilcelulosa, pectina y dextrina**. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Callao. Universidad Nacional del Callao. 2011
58. NIEVES, Antonio, DOMÍNGUEZ, Federico. **Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería**. México. Primera Reimpresión. Compañía Editorial Continental, S.A de C.V. 1996.
59. NJOKU, P.C., AYUK, A., OKOYE, C.V. **Temperature Effects on Vitamin C Content in Citrus Fruits**. *Pakistan Journal of Nutrition*, Vol.10 (12): 1168- 1169. 2011.
60. OETJEN, Georg. **Freeze-Drying**. USA. Primera Edición. Proyecto Editorial Wiley-VCH. 1999.
61. ORREGO, Carlos. **Congelación y Liofilización de Alimentos**.Colombia. Primera Edición. Artes Gráficas Tizán Ltda. 2008.
62. ORREGO, Carlos. **Procesamiento de alimentos**.Colombia. Primera Edición. Centro de Publicaciones de la Universidad de Manizales. 2003.
63. OZILGEN, Mustafa. **Food Process Modeling and Control: Chemical Engineering Applications**.Holanda. Primera Edición. British Library. 1998.
64. PASSEY, A. **Apparatus for Freeze-Drying**. United States Patent 1975

65. POTTER, N. **La Ciencia de los Alimentos**. Primera Edición. Editorial Harla. Traducción México 1978
66. RAHMAN, S. **Food Properties Handbook**.USA. Segunda Edición. Editorial CRC Press Taylor & Francis Group., 2008.
67. RAO, M., RIZVI, Syed, DATTA, Ashim.**Engineering Properties of Foods**.USA. Tercera Edición. Editorial CRC Press Taylor & Francis Group., 2005.
68. REYES, Alejandro, PÉREZ,Natalia, y Mahn, Andrea. **Theoretical and Experimental Study of Freeze-Drying of “loco” (Concholepas concholepas)**. *Drying Technology*, Vol. 29: 1386-1395. 2011.
69. SAGARA, Yasuyuki. **Advances in Transport Phenomena during Freeze-Drying of Food Materials: Fundamentals and Applications**. *Food Science and Technology*, Vol. 7(3): 183-190. 2001.
70. SAHIN, Serpil, GULUM, Servet. **Physical Properties of Foods**.USA. Primera Edición. Editorial Springer. 2006.
71. SENNHENN, B., GEHRMANN, D., Firus, A. **UNITED STATES PATENT 6,931,754 B2. Freeze-Drying Apparatus**. 2005.
72. SERTH, Robert W. **Process Heat Transfer-Principles and Applications**. USA. Elsevier Science and Technology Books. 2007.
73. SINHA, Nirmal, ERANAUZ, Ozgul, SIDDIQ, Muhammad, AHMED, Jasim. **Handbook of Vegetables & Vegetables Processing**. USA. Primera edición. Blackwell Publishing Ltd. 2011.
74. SMITH, Scott, HUI, Y.**Food Processing Principles and**

- Applications**.USA. Primera Edición. Blackwell Publishing. 2004
75. TANG, XIAOLIN. NAIL, STEVEN. PIKAL, MICHAEL. **Freeze-Drying Process Design by Manometric Temperature Measurement: Design of a Smart Freeze-Dryer**. Pharmaceutical Research, Vol.2: 685-686. Abril 2005.
  76. TCHESSALOV, S. Williams, N. **Lyophilization Methods and Apparatuses**. 2008. Patente US 2008/0098614 A1
  77. TIASA. **Thermal Insulation Handbook**. Disponible en [www.tiasa.org.za](http://www.tiasa.org.za) artículo web. Consultado el 05 de enero de 2013.
  78. TREYBAL, Robert. **Operaciones de Transferencia de masa**. USA. Segunda edición. Mc Graw Hill. 1988.
  79. TURNER, Ian; MUJUMDAR, Arun. **Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology**. USA. Marcel DEKKER. 1997.
  80. TUTIEMPO. **Valores climáticos medios anuales en Lima-Callao/Aeropuerto. Internacional Jorge Chávez**. Disponible en: [http://www.tutiempo.net/clima/Lima-Callao\\_Aerop\\_Internacional\\_Jorgechavez/846280.htm](http://www.tutiempo.net/clima/Lima-Callao_Aerop_Internacional_Jorgechavez/846280.htm) artículo web. Consultado el 07 de mayo de 2013.
  81. WANG, Shan. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. USA. Segunda edición.2001.



82. WELTI, J., VERGARA, F., PÉREZ, E., y REYES, A. **Fundamentals and new tendencies of freeze-drying of foods.** Segundo Simposio Internacional de Innovación y Desarrollo de Alimentos. 2005
83. ZHANG, S.W., ZHANG, Z.J., XU, C.H. y D.M.E. **Study on the Freeze-drying Experiment of Kuala Fragrant Pear Slice.** International Journal of Engineering and Technology, Vol.1 (4): 274-277. Octubre 2009.
84. ZHENGYONG, M., SOUSA, J., & OLIVEIRA, Fernanda. **Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying.** Journal of Food Engineering, Vol.8 (3): 430-440. Febrero 2008.

# **ANEXOS**

## ANEXO N°1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Será posible diseñar un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y simular el proceso?	Diseñar un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y simular el proceso.	El diseño de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y la simulación del proceso se realizan definiendo previamente el intervalo de la cantidad de materia prima, la disposición general del equipo, las condiciones de operación, así como el uso de principios de transferencia de calor y masa.	Y: Diseño de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos y la simulación del proceso.	Procedimiento de cálculo para diseñar un liofilizador a escala piloto y el análisis del producto deshidratado que se obtendría realizando una simulación.	Comparación de las características principales con otros liofilizadores del mercado y artículos científicos.	Relacionando las variables independientes X1, X2 y X3.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos?	Identificar las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos.	Las condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos están en función de la presión y la temperatura de trabajo.	X1: Condiciones de operación de un liofilizador a escala piloto para la deshidratación de alimentos	Temperatura de congelación. Temperatura del condensador. Presión de vacío Temperatura de desorción	Análisis y comparación con datos reportados en artículos científicos	Entrevistas.  Revisión Bibliográfica
¿Cómo se determina los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos?	Determinar los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos.	Los parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos pueden ser calculados mediante la potencia del equipo de frío y el vacío necesario para causar la sublimación.	X2: Parámetros de diseño que componen a un liofilizador a escala piloto para deshidratar alimentos	Capacidad del condensador. Capacidad de la bomba de vacío Capacidad de los platos de calentamiento.	Cálculos relacionados de dimensionamiento. Comparación con artículos científicos.	Revisión de Bibliografía. Cálculo numérico. Simulación de variables.
¿Cómo se simula el proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado?	Simular el proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado.	La simulación del proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado debe dar como resultado un producto que cumpla con las especificaciones de calidad del mercado. calidad del mercado.	X3: Simulación del proceso de liofilización a escala piloto para obtener un alimento deshidratado.	Comportamiento de la cantidad de agua que se va sublimando. Comportamiento de la temperatura en el alimento.	Cálculo de los perfiles de temperatura y concentración de agua. Comparación	Revisión de Bibliografía. Simulación de variables. Uso de un programa.

**ANEXO N°2**  
**COMPOSICIÓN FRACCIONAL PROXIMAL DE LOS ALIMENTOS**  
**TABLA N° 2.A1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE CEREALES**

Nombre del alimento	Y <sub>a</sub>	Y <sub>p</sub>	Y <sub>g</sub>	Y <sub>c</sub>	Y <sub>ce</sub>	Y <sub>f</sub>
Quinoa, hojuelas de	0,07	0,08	0,04	0,76	0,02	0,04
Cañihua, hojuelas de	0,07	0,16	0,08	0,55	0,05	0,09
Maíz, maicena	0,08	0,00	0,00	0,91	0,00	0,00
Avena, hojuela cruda	0,09	0,13	0,04	0,71	0,02	0,02
Achita, kiwicha o achis	0,09	0,12	0,06	0,67	0,02	0,02
Cebada con cáscara	0,09	0,08	0,02	0,72	0,02	0,07
Cebada, mashka o machica	0,09	0,08	0,01	0,73	0,03	0,06
Quinoa rosada (Puno)	0,10	0,12	0,06	0,66	0,03	0,03
Quinoa dulce, rosada (Junín)	0,10	0,11	0,07	0,63	0,02	0,07
Quinoa dulce, blanca (Junín)	0,10	0,10	0,07	0,64	0,03	0,06
Quinoa dulce, blanca (Puno)	0,10	0,11	0,05	0,65	0,03	0,06
Quinoa blanca (Puno)	0,11	0,13	0,06	0,64	0,02	0,05
Cañihua amarilla	0,11	0,13	0,05	0,57	0,05	0,09
Cañihua parda	0,11	0,12	0,03	0,60	0,04	0,10
Quinoa blanca (Junín)	0,11	0,12	0,06	0,64	0,02	0,05
Maíz, morado sin coronta	0,11	0,07	0,03	0,75	0,02	0,02
Trigo	0,11	0,10	0,02	0,73	0,01	0,03
Quinoa	0,11	0,13	0,06	0,65	0,02	0,02
Cañihua gris	0,11	0,13	0,04	0,58	0,05	0,09
Sorgo	0,11	0,07	0,04	0,68	0,03	0,07
Quinoa, sémola de	0,12	0,18	0,10	0,50	0,03	0,08
Trigo, sémola de	0,12	0,08	0,01	0,78	0,01	0,01
Maíz, para mote pelado	0,12	0,06	0,02	0,77	0,01	0,02
Trigo, pelado	0,12	0,08	0,01	0,75	0,01	0,02
Trigo para mote pelado crudo	0,12	0,10	0,01	0,74	0,02	0,01
Maíz, para mote sin pelar	0,12	0,06	0,01	0,76	0,01	0,03
Maíz, blanco crudo	0,12	0,06	0,04	0,75	0,01	0,02
Maíz (chochoca)	0,13	0,05	0,02	0,75	0,01	0,03
Maíz amarillo	0,13	0,06	0,05	0,71	0,01	0,04
Quinoa, afrecho de	0,13	0,10	0,04	0,61	0,04	0,08
Maíz, polenta cruda de	0,13	0,08	0,01	0,73	0,03	0,01
Maíz, pachuco de	0,13	0,07	0,04	0,72	0,02	0,02
Cebada perlada o resbalada cruda	0,13	0,05	0,01	0,79	0,01	0,00
Trigo resbalado crudo	0,13	0,11	0,02	0,71	0,01	0,01
Arroz blanco corriente	0,13	0,08	0,01	0,77	0,00	0,00
Maíz alazán	0,13	0,08	0,04	0,71	0,02	0,02
Cebada para mote, pelada	0,15	0,08	0,01	0,72	0,02	0,01
Trigo, llunka de	0,16	0,09	0,01	0,70	0,02	0,03
Cebada, llunka (morón americano)	0,18	0,02	0,01	0,76	0,02	0,01
Maíz alazán (jora fresca)	0,28	0,05	0,03	0,62	0,01	0,00
Maíz, tocosh crudo	0,52	0,03	0,02	0,41	0,01	0,01
Maíz, grano fresco (choclo)	0,66	0,03	0,01	0,27	0,01	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.B1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE VERDURAS, HORTALIZAS**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>	y <sub>f</sub>
Acelga, hojas de (sin tallo)	0,90	0,02	0,00	0,05	0,01	0,01
Acelga, tallos de	0,93	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
Ají amarillo fresco P.C.	0,87	0,01	0,01	0,09	0,01	0,02
Ají amarillo molido fresco sin sal	0,58	0,02	0,02	0,09	0,26	0,04
Ají colorado no picante (molido con sal)	0,68	0,02	0,01	0,09	0,17	0,03
Ají colorado molido	0,70	0,02	0,01	0,08	0,16	0,03
Ají de mesa P.C.	0,89	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00
Ají de vaina P.C.	0,83	0,03	0,01	0,12	0,01	0,00
Ají dulce P.C.	0,91	0,01	0,00	0,06	0,00	0,01
Ají verde P.C.	0,81	0,02	0,01	0,12	0,01	0,03
Ajo sin cáscara	0,61	0,06	0,01	0,30	0,02	0,01
Albahaca sin tallo	0,85	0,03	0,01	0,07	0,02	0,01
Alcachofa	0,92	0,03	0,00	0,03	0,01	0,01
Alfalfa	0,88	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03
Apio sin hojas	0,92	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01
Berenjena P.C.	0,88	0,01	0,01	0,08	0,01	0,02
Berenjena costeña	0,88	0,01	0,00	0,10	0,01	0,00
Berro	0,88	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01
Brócoli	0,86	0,05	0,01	0,06	0,01	0,02
Caigua P.C.	0,94	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02
Caigua serrana P.C.	0,94	0,02	0,00	0,04	0,01	0,00
Calabaza china P.C.	0,93	0,01	0,00	0,06	0,00	0,00
Calabaza italiana P.C.	0,93	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01
Cebolla blanca P.C.	0,91	0,01	0,00	0,07	0,00	0,00
Cebolla chilena P.C.	0,91	0,01	0,00	0,06	0,00	0,02
Cebolla de cabeza P.C.	0,86	0,01	0,00	0,11	0,01	0,01
Cebolla de cola P.C.	0,89	0,01	0,00	0,08	0,01	0,02
Cebollita china	0,88	0,02	0,00	0,07	0,01	0,01
Col blanca P.C.	0,92	0,01	0,00	0,05	0,00	0,01
Col crespita o repollo, sin cogollo	0,91	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01
Col china sin tallo	0,90	0,02	0,00	0,05	0,02	0,01
Col de "Bruselas" P.C.	0,80	0,05	0,00	0,12	0,01	0,02
Col, hojas de P.C.	0,87	0,03	0,01	0,07	0,01	0,02
Col negra P.C.	0,91	0,02	0,00	0,05	0,01	0,01
Col silvestre P.C.	0,83	0,03	0,01	0,12	0,02	0,00
Coliflor sin tallo ni flores	0,90	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02
Culantro sin tallo	0,84	0,03	0,01	0,07	0,03	0,02
Chiclayo, calabaza	0,93	0,01	0,00	0,06	0,00	0,00
Chonta	0,84	0,03	0,01	0,10	0,01	0,01
Escarola	0,93	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01
Espárragos	0,91	0,02	0,00	0,05	0,01	0,02
Espinaca blanca P.C.	0,89	0,02	0,01	0,06	0,02	0,01
Espinaca negra sin tronco	0,89	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.B1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE VERDURAS, HORTALIZAS**  
**(CONTINUACIÓN)**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>	y <sub>f</sub>
Frijolito chino germinado	0,86	0,04	0,01	0,07	0,01	0,01
Hierbabuena	0,85	0,03	0,01	0,07	0,02	0,02
Huacatay sin tallo	0,82	0,05	0,01	0,09	0,02	0,02
Hojas de janchoy	0,90	0,02	0,00	0,06	0,01	0,01
Hojas de jetka	0,76	0,07	0,02	0,09	0,03	0,03
Hojas de kaitán	0,84	0,03	0,01	0,09	0,02	0,01
Tallos de kaitan	0,91	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01
Lechuga americana P.C.	0,96	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01
Lechuga larga P.C.	0,92	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01
Lechuga redonda P.C.	0,95	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
Manchay	0,84	0,00	0,00	0,14	0,00	0,01
Hojas de mastuerzo	0,86	0,02	0,01	0,09	0,01	0,00
Hojas de mostaza	0,88	0,03	0,01	0,05	0,02	0,01
Nabo	0,94	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01
Nabo, hojas de	0,86	0,03	0,00	0,07	0,02	0,02
Orégano fresco	0,84	0,02	0,00	0,11	0,01	0,02
Pacchoy, hojas de	0,90	0,01	0,00	0,06	0,02	0,01
Pacchoy, tallos de	0,92	0,00	0,00	0,05	0,02	0,00
Paico	0,80	0,05	0,01	0,09	0,03	0,02
Pajuro	0,63	0,02	0,00	0,31	0,02	0,01
Pepinillo sin cáscara	0,96	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Perejil sin tallo	0,81	0,05	0,01	0,10	0,03	0,02
Pimiento	0,89	0,01	0,00	0,08	0,01	0,01
Pirca	0,85	0,04	0,01	0,07	0,02	0,02
Poró sin hojas	0,87	0,03	0,01	0,08	0,01	0,01
Hojas de quinua	0,80	0,05	0,01	0,09	0,04	0,02
Rabanitos	0,94	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
Rabicol	0,91	0,02	0,00	0,04	0,01	0,02
Radicheta o achicoria	0,89	0,02	0,00	0,06	0,01	0,01
Rocoto fresco	0,88	0,01	0,00	0,08	0,01	0,01
Ruda	0,74	0,04	0,02	0,16	0,03	0,02
Siuca culantro	0,86	0,02	0,00	0,08	0,02	0,02
Tomate P.C.	0,93	0,01	0,00	0,04	0,00	0,01
Tomate italiano P.C.	0,94	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01
Vainitas	0,86	0,02	0,00	0,08	0,01	0,02
Zanahoria	0,88	0,01	0,00	0,09	0,01	0,01
Zapallo italiano P.C.	0,95	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00
Zapallo loche P.C.	0,75	0,02	0,00	0,21	0,01	0,01
Zapallo macre P.C.	0,91	0,01	0,00	0,06	0,01	0,01
Tamarindo	0,30	0,03	0,01	0,61	0,03	0,03
Dátiles P.C.	0,36	0,01	0,00	0,58	0,01	0,03
Shiwawaco (semilla)	0,38	0,06	0,07	0,44	0,01	0,04

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.C1  
ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE FRUTAS**

<b>Nombre del alimento</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>c</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>	<b>y<sub>f</sub></b>
Aceitunas negras preparadas P.C.	0,40	0,02	0,22	0,30	0,04	0,01
Ungurauy P.C.	0,42	0,03	0,21	0,34	0,01	0,00
Aguaje P.C.	0,49	0,02	0,23	0,16	0,01	0,09
Pijuayo P.C.	0,50	0,03	0,03	0,39	0,01	0,04
Macambo, pulpa y semilla	0,52	0,06	0,08	0,18	0,01	0,15
Coco P.C.	0,55	0,03	0,27	0,11	0,01	0,02
Plátano verde P.C.	0,57	0,01	0,00	0,41	0,01	0,01
Purunkari P.C.	0,57	0,03	0,01	0,35	0,01	0,02
Aceituna de botija P.C.	0,57	0,01	0,32	0,07	0,02	0,01
Pan de árbol con semilla	0,61	0,04	0,02	0,28	0,01	0,03
Plátano guineo P.C.	0,66	0,01	0,00	0,32	0,01	0,00
Kumuvi P.C.	0,67	0,01	0,01	0,24	0,01	0,07
Nuzive P.C.	0,68	0,03	0,07	0,17	0,01	0,04
Plátano maduro P.C.	0,68	0,01	0,00	0,30	0,01	0,00
Plátano morado P.C.	0,69	0,01	0,00	0,28	0,01	0,01
Chambiro P.C.	0,70	0,01	0,07	0,13	0,01	0,08
Humarí P.C.	0,70	0,02	0,05	0,22	0,01	0,00
Lúcuma P.C.	0,71	0,01	0,00	0,25	0,01	0,01
Plátano de isla P.C.	0,74	0,01	0,00	0,23	0,01	0,00
Chirimoya P.C.	0,74	0,01	0,00	0,22	0,01	0,01
Palta P.C.	0,75	0,02	0,12	0,05	0,01	0,05
Guayaba amarilla P.C.	0,75	0,01	0,00	0,17	0,00	0,06
Pan-Meo P.C.	0,76	0,01	0,00	0,19	0,01	0,03
Plátano de seda P.C.	0,76	0,01	0,00	0,21	0,01	0,00
Ciruela P.C.	0,76	0,01	0,00	0,21	0,01	0,00
Granadilla P.C.	0,76	0,02	0,02	0,15	0,01	0,03
Uva borgoña P.C.	0,77	0,01	0,00	0,21	0,00	0,01
Higo negro P.C.	0,77	0,01	0,00	0,20	0,01	0,02
Kaki P.C.	0,78	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00
Zapote P.C.	0,79	0,01	0,00	0,19	0,00	0,01
Tumbo serrano P.C.	0,79	0,01	0,00	0,15	0,01	0,03
Tuna P.C.	0,79	0,01	0,00	0,15	0,01	0,04
Guayaba P.C.	0,79	0,00	0,00	0,14	0,01	0,05
Guayaba rosada P.C.	0,80	0,00	0,00	0,14	0,01	0,05
Granada P.C.	0,80	0,00	0,00	0,18	0,01	0,00
Tuna colorada P.C.	0,81	0,01	0,00	0,15	0,00	0,04
Guayaba verde P.C.	0,81	0,00	0,00	0,14	0,00	0,04
Uva italia P.C.	0,81	0,00	0,00	0,18	0,01	0,00
Uva negra P.C.	0,81	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00
Melocotón-duraznoo P.C.	0,81	0,01	0,00	0,17	0,00	0,01
Uvilla P.C.	0,82	0,00	0,00	0,17	0,00	0,01
Capulí P.C.	0,82	0,01	0,00	0,16	0,01	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carb. ce: ceniza;f: fibra

**TABLA N° 2.C1  
ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE FRUTAS (CONTINUACIÓN)**

<b>Nombre del alimento</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>c</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>	<b>y<sub>f</sub></b>
Granadilla, jugo enlatado de	0,82	0,01	0,00	0,16	0,01	0,00
Maracuyá, jugo puro de	0,82	0,01	0,00	0,16	0,01	0,00
Mango P.C.	0,82	0,00	0,00	0,16	0,00	0,01
Huito P.C.	0,83	0,01	0,00	0,14	0,01	0,02
Pera perilla P.C.	0,83	0,01	0,00	0,14	0,00	0,02
Guanábana P.C.	0,83	0,01	0,00	0,14	0,01	0,01
Pera nacional P.C.	0,83	0,00	0,00	0,14	0,00	0,02
Caimito	0,84	0,02	0,01	0,14	0,01	0,00
Pacae o guaba P.C.	0,84	0,01	0,00	0,15	0,00	0,01
Anona P.C.	0,84	0,01	0,00	0,13	0,01	0,01
Mango ciruelo (taperibá) P.C.	0,84	0,01	0,00	0,14	0,00	0,01
Manzana nacional P.C.	0,84	0,00	0,00	0,14	0,00	0,01
Pan de árbol sin semilla	0,84	0,02	0,00	0,10	0,01	0,03
Pera de agua P.C.	0,84	0,00	0,01	0,13	0,00	0,02
Peros P.C.	0,85	0,00	0,01	0,13	0,00	0,01
Pera chilena P.C.	0,85	0,00	0,00	0,13	0,00	0,01
Membrillo P.C.	0,86	0,00	0,00	0,11	0,01	0,01
Airampo P.C.	0,86	0,02	0,01	0,11	0,01	0,00
Níspero P.C.	0,86	0,00	0,00	0,13	0,00	0,01
Cocona P.C.	0,86	0,01	0,01	0,09	0,01	0,02
Naranja de Huando P.C.	0,87	0,01	0,00	0,11	0,00	0,01
Marañón P.C.	0,87	0,01	0,00	0,10	0,00	0,01
Macambo, pulpa de	0,87	0,02	0,01	0,08	0,01	0,01
Mamey maduro P.C.	0,87	0,00	0,00	0,10	0,01	0,02
Uva blanca P.C.	0,87	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00
Fresa P.C.	0,88	0,01	0,01	0,09	0,00	0,01
Naranja P.C.	0,88	0,01	0,00	0,10	0,01	0,00
Naranja de Guayaquil P.C.	0,88	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
Naranja agria, jugo de	0,91	0,01	0,00	0,08	0,00	0,00
Piña P.C.	0,89	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
Limón, jugo de	0,89	0,01	0,00	0,10	0,00	0,00
Toronja P.C.	0,90	0,01	0,00	0,09	0,00	0,00
Mandarina P.C.	0,90	0,01	0,00	0,09	0,00	0,00
Papaya P.C.	0,90	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
Pomarosa	0,91	0,01	0,00	0,08	0,01	0,00
Pepino dulce P.C.	0,92	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Lima P.C.	0,92	0,01	0,00	0,06	0,00	0,01
Tumbo costeño P.C.	0,93	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01
Melón P.C.	0,93	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00
Sandía P.C.	0,93	0,01	0,00	0,06	0,00	0,00
Camu-camu P.C.	0,93	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
Melón enano P.C.	0,94	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00
Coco, agua de	0,96	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra



**TABLA N° 2.D1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE PESCADOS Y MARISCOS**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>
Almeja blanca P.C.	0,80	0,14	0,01	0,03	0,02
Barquillos P.C.	0,79	0,19	0,01	0,00	0,02
Camarones frescos P.C.	0,79	0,18	0,00	0,01	0,01
Cangrejo	0,76	0,20	0,01	0,00	0,03
Cangrejos frescos P.C.	0,78	0,17	0,02	0,00	0,02
Caracol P.C.	0,74	0,22	0,00	0,00	0,03
Caracoles P.C.	0,74	0,16	0,01	0,07	0,02
Chanque, loco o tolina P.C.	0,71	0,21	0,00	0,06	0,02
Choros sin concha	0,89	0,01	0,03	0,04	0,02
Conchas de abanico	0,80	0,16	0,02	0,00	0,02
Erizo P.C.	0,73	0,17	0,08	0,00	0,02
Langostino blanco	0,84	0,14	0,01	0,00	0,01
Lapas P.C.	0,79	0,19	0,00	0,00	0,02
Machas	0,71	0,24	0,01	0,03	0,01
Pescado anchoveta P.C.	0,71	0,19	0,08	0,00	0,01
Pescado atún, fresco crudo	0,70	0,23	0,05	0,00	0,02
Pescado ayanque	0,76	0,19	0,04	0,00	0,01
Pescado ayanque o cachema P.C.	0,78	0,20	0,01	0,00	0,01
Pescado bacalao fresco	0,80	0,18	0,01	0,00	0,01
Pescado bagre P.C.	0,81	0,15	0,02	0,00	0,02
Pescado bonito P.C.	0,71	0,23	0,04	0,00	0,02
Pescado bonito, huevera de	0,76	0,17	0,03	0,02	0,02
Pescado bonito, músculo claro	0,73	0,24	0,01	0,00	0,01
Pescado bonito, músculo oscuro	0,71	0,22	0,06	0,00	0,01
Pescado caballa, fresco crudo	0,74	0,20	0,05	0,00	0,01
Pescado cabinza	0,78	0,19	0,02	0,00	0,01
Pescado cabrilla	0,78	0,19	0,02	0,00	0,01
Pescado carachama P.C.	0,84	0,14	0,00	0,00	0,01
Pescado cazón P.C.	0,76	0,22	0,01	0,00	0,01
Pescado chita P.C.	0,78	0,20	0,00	0,00	0,02
Pescado chita, huevera de	0,84	0,12	0,01	0,00	0,02
Pescado coco	0,79	0,17	0,03	0,00	0,01
Pescado cojinova	0,76	0,21	0,02	0,00	0,01
Pescado congrio	0,82	0,16	0,01	0,00	0,01
Pescado corvina P.C.	0,74	0,20	0,05	0,00	0,01
Pescado fuasaco, con espinas	0,82	0,17	0,00	0,00	0,01
Pescado lenguado	0,79	0,19	0,01	0,00	0,01
Pescado lisa	0,75	0,21	0,03	0,00	0,01
Pescado lorna, fresco crudo	0,78	0,19	0,02	0,00	0,01
Pescado machete	0,73	0,21	0,05	0,00	0,01
Pescado maparate, con espinas	0,82	0,16	0,01	0,00	0,01
Pescado merluza, fresco crudo	0,82	0,16	0,01	0,00	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.D1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE PESCADOS Y MARISCOS**  
**(CONTINUACIÓN)**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>
Pescado pampanito P.C.	0,77	0,19	0,03	0,00	0,01
Pescado pejerrey	0,77	0,20	0,02	0,00	0,01
Pescado pejesapo P.C.	0,76	0,22	0,01	0,00	0,01
Pescado perico	0,78	0,21	0,00	0,00	0,01
Pescado pintadilla P.C.	0,79	0,19	0,01	0,00	0,01
Pescado ractacara, con espinas	0,79	0,16	0,02	0,00	0,03
Pescado róbalo P.C.	0,77	0,21	0,01	0,00	0,01
Pescado sardina, fresco crudo	0,73	0,21	0,07	0,00	0,00
Pescado toyo, fresco	0,79	0,19	0,01	0,00	0,01
Pescado tramboyo P.C.	0,79	0,19	0,00	0,00	0,01
Pescado trucha rosada P.C.	0,76	0,21	0,02	0,00	0,01
Pescado trucha, fresca	0,76	0,20	0,03	0,00	0,01
Pescado yahuarachi, con espinas	0,80	0,16	0,02	0,00	0,02
Pescado yuliya, con espinas	0,80	0,17	0,01	0,00	0,02
Pique P.C.	0,80	0,16	0,01	0,00	0,02
Pota	0,92	0,02	0,01	0,03	0,02
Pulpo P.C.	0,82	0,13	0,01	0,02	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.E1  
ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE CARNES**

<b>Nombre del alimento</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>c</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>
Ballena, pulpa de carne de	0,79	0,19	0,01	0,00	0,02
Carnero, corazón de	0,77	0,16	0,05	0,01	0,01
Carnero, hígado de	0,72	0,20	0,04	0,03	0,01
Carnero, panza de (mondongo)	0,84	0,16	0,01	0,00	0,00
Carnero, pulmón de (bofe)	0,83	0,14	0,02	0,00	0,01
Carnero, riñón	0,77	0,18	0,03	0,01	0,01
Carnero, sesos de	0,81	0,10	0,08	0,00	0,01
Carnero, pulpa gorda	0,61	0,17	0,22	0,00	0,01
Carnero, pulpa muy magra	0,74	0,19	0,06	0,00	0,01
Carnero pulpa semigorda	0,61	0,18	0,19	0,00	0,01
Cerdo, carne sin hueso	0,69	0,14	0,15	0,00	0,01
Cerdo, hígado de	0,74	0,19	0,05	0,02	0,01
Cerdo, patas semigordas	0,57	0,20	0,22	0,00	0,01
Cerdo, pulmón de (bofe)	0,83	0,14	0,02	0,00	0,01
Cerdo, riñón de	0,76	0,14	0,09	0,00	0,01
Chivo, pulpa de carne de	0,75	0,20	0,04	0,00	0,01
Conejo, pulpa de carne de	0,73	0,20	0,06	0,00	0,01
Gallina, pechuga de (sin piel)	0,76	0,20	0,03	0,00	0,01
Gallina, pierna de (sin piel)	0,74	0,21	0,04	0,00	0,01
Majaz, pulpa de carne	0,75	0,21	0,01	0,01	0,01
Motelo, pulpa de carne de	0,75	0,21	0,02	0,01	0,01
Pato, carne de	0,54	0,16	0,29	0,00	0,01
Pavo, carne de	0,71	0,20	0,08	0,00	0,01
Pollo, pulpa de carne de	0,75	0,21	0,03	0,00	0,01
Pollo, corazón de	0,73	0,15	0,09	0,02	0,01
Pollo, hígado de	0,74	0,18	0,04	0,03	0,01
Pollo, sangre cruda de	0,83	0,15	0,00	0,00	0,01
Rana, carne de	0,82	0,16	0,00	0,00	0,01
Tortuga charapa, carne de	0,82	0,16	0,01	0,00	0,01
Res, bazo de	0,78	0,19	0,01	0,00	0,02
Res, pulpa de carne de	0,76	0,21	0,02	0,00	0,01
Res, corazón de	0,78	0,17	0,04	0,00	0,01
Res, criadillas de	0,87	0,10	0,02	0,00	0,01
Res, hígado de	0,71	0,20	0,05	0,03	0,01
Res, lengua de	0,71	0,17	0,11	0,00	0,01
Res, panza de (mondongo)	0,80	0,17	0,04	0,00	0,00
Res, pulmón de (bofe)	0,81	0,17	0,01	0,00	0,01
Res, riñón de	0,80	0,15	0,03	0,00	0,01
Res, sesos de	0,78	0,11	0,10	0,00	0,01
Res, ubre de	0,66	0,14	0,19	0,00	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.F1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE LECHE Y DERIVADOS**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>
Queso mantecoso	0,45	0,04	0,40	0,04	0,07
Queso fresco de vaca	0,65	0,02	0,24	0,04	0,05
Crema de leche, rala	0,76	0,00	0,20	0,04	0,01
Queso fresco de cabra	0,76	0,02	0,12	0,04	0,06
Leche evaporada entera	0,78	0,01	0,08	0,11	0,02
Leche evaporada descremada	0,85	0,01	0,01	0,11	0,02
Leche materna	0,88	0,00	0,04	0,07	0,00
Leche fresca de cabra	0,90	0,00	0,04	0,05	0,01
Leche fresca de vaca	0,90	0,00	0,04	0,05	0,01
Leche fresca caja entera Plusa	0,90	0,00	0,03	0,05	0,01
Leche fresca c/menos de 1% grasa	0,93	0,00	0,01	0,05	0,01

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.G1**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE PRODUCTOS AZUCARADOS**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>	y <sub>f</sub>
Chancaca	0,16	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00
Miel de abeja	0,14	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00
Miel de caña	0,26	0,00	0,00	0,72	0,01	0,00

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.H1  
ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE LEGUMINOSAS**

<b>Nombre del alimento</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>c</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>	<b>y<sub>f</sub></b>
Frijol palo	0,10	0,17	0,01	0,61	0,04	0,07
Frijol terciopelo	0,11	0,20	0,05	0,55	0,03	0,06
Arveja, seca sin cáscara	0,11	0,21	0,03	0,58	0,02	0,04
Garbanzos	0,11	0,19	0,06	0,59	0,03	0,03
Frijol soya	0,11	0,27	0,18	0,34	0,05	0,04
Frijol canario	0,11	0,21	0,02	0,58	0,04	0,03
Frijol bocón o chileno	0,11	0,21	0,00	0,59	0,03	0,04
Arvejón	0,11	0,20	0,02	0,59	0,03	0,05
Frijol panamito	0,12	0,20	0,02	0,57	0,04	0,06
Pallar morado	0,12	0,19	0,01	0,60	0,04	0,04
Frijol canario serranito	0,12	0,19	0,02	0,61	0,03	0,03
Lentejas grandes	0,12	0,22	0,01	0,59	0,02	0,04
Frijol dulce (Ancash)	0,12	0,19	0,02	0,60	0,04	0,04
Frijol plomo	0,12	0,19	0,02	0,58	0,03	0,06
Frijol nucya blanco	0,12	0,19	0,02	0,59	0,03	0,04
Frijol caballero	0,12	0,22	0,01	0,56	0,05	0,04
Frijol aguisho	0,12	0,22	0,02	0,57	0,04	0,04
Pallar sin cáscara	0,12	0,21	0,01	0,61	0,03	0,01
Frijol chavín	0,12	0,19	0,01	0,61	0,04	0,04
Frijol amarillo común	0,12	0,20	0,01	0,59	0,04	0,03
Frijol california	0,12	0,19	0,02	0,56	0,04	0,06
Frijol white kidney	0,12	0,21	0,01	0,57	0,04	0,05
Frijol bayo	0,12	0,18	0,01	0,61	0,04	0,03
Frijol bountiful bean	0,12	0,17	0,01	0,63	0,04	0,03
Frijol nucya plomo	0,13	0,19	0,02	0,60	0,04	0,03
Lentejas chicas	0,13	0,22	0,01	0,59	0,02	0,03
Frijol cocacho	0,13	0,21	0,01	0,59	0,03	0,04
Frijol pole bean	0,13	0,22	0,01	0,57	0,03	0,04
Frijol bush bean	0,13	0,23	0,02	0,55	0,04	0,03
Frijol bayo americano	0,13	0,20	0,01	0,59	0,03	0,04
Frijol red kidney	0,13	0,18	0,01	0,60	0,03	0,05
Frijol castilla	0,13	0,21	0,02	0,56	0,04	0,04
Frijol caraotas	0,13	0,20	0,01	0,58	0,04	0,03
Frijol negro	0,13	0,18	0,01	0,61	0,03	0,03
Frijol vacapaleta	0,14	0,20	0,02	0,57	0,04	0,04
Frijol chiclayo	0,14	0,20	0,02	0,55	0,04	0,05
Frijol tarhui o chocho, seco	0,45	0,17	0,17	0,17	0,02	0,04
Frijol canario fresco	0,55	0,09	0,00	0,31	0,02	0,02
Habas frescas, sin cáscara y sin vaina	0,60	0,11	0,01	0,26	0,01	0,01
Frijol palo fresco sin vaina	0,61	0,09	0,01	0,25	0,02	0,03
Guaba fresco	0,62	0,11	0,01	0,24	0,01	0,02
Frijol tarhui o chocho cocido con cáscara	0,66	0,11	0,08	0,09	0,01	0,05

**Fuente: Cabezas (2009)**

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.H1  
ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE LEGUMINOSAS (CONT.)**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>	y <sub>f</sub>
Pallar con cáscara cocida	0,70	0,06	0,00	0,19	0,01	0,04
Arveja, fresca sin vaina	0,70	0,07	0,01	0,18	0,01	0,03
Frijol chiclayo dosmesino fresco	0,71	0,08	0,00	0,16	0,01	0,02
Lentejas chicas cocidas	0,74	0,06	0,00	0,18	0,01	0,01
Frijol caballero o blanco cocido	0,75	0,05	0,00	0,17	0,01	0,01
Garbanzo cocido	0,75	0,02	0,02	0,19	0,01	0,01
Frijol shimpe fresco	0,84	0,04	0,00	0,09	0,01	0,02

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.I1  
ANÁLISIS PROXIMAL GRUPO TUBÉRCULOS, RAÍCES**

Nombre del alimento	y <sub>a</sub>	y <sub>p</sub>	y <sub>g</sub>	y <sub>c</sub>	y <sub>ce</sub>	y <sub>f</sub>
Arracacha o racacha	0,96	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Ashipa	0,55	0,01	0,00	0,42	0,00	0,01
Camote amarillo sin cáscara	0,69	0,01	0,00	0,27	0,01	0,01
Camote blanco	0,68	0,02	0,00	0,28	0,01	0,01
Camote morado sin cáscara	0,71	0,01	0,00	0,25	0,01	0,01
Curao	0,82	0,02	0,00	0,15	0,01	0,01
Koshñipa	0,62	0,02	0,00	0,33	0,01	0,01
Kuros	0,74	0,02	0,00	0,22	0,01	0,01
Llacón	0,86	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00
Maca silvestre	0,80	0,04	0,01	0,13	0,03	0,00
Mashua P.C.	0,87	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01
Olluco sin cáscara	0,83	0,01	0,00	0,14	0,01	0,01
Papa amarilla sin cáscara	0,73	0,02	0,00	0,23	0,01	0,01
Papa blanca	0,74	0,02	0,00	0,22	0,01	0,01
Papa huayro con cáscara	0,80	0,02	0,00	0,16	0,01	0,02
Pituca o taro	0,73	0,02	0,00	0,23	0,01	0,01
Radiche	0,77	0,02	0,00	0,18	0,01	0,01
Remolacha raíz	0,87	0,02	0,00	0,09	0,01	0,01
Sachapapa	0,72	0,02	0,01	0,23	0,01	0,00
Sachapapa, tubérculo	0,63	0,03	0,00	0,33	0,02	0,00
Yuca amarilla fresca sin cáscara	0,58	0,01	0,00	0,39	0,01	0,01
Yuca blanca fresca sin cáscara	0,58	0,01	0,00	0,39	0,01	0,01
Oca variedad nativa oga con cáscara	0,76	0,01	0,00	0,14	0,01	0,08
Oca variedad nativa garwuaricra con cáscara	0,79	0,01	0,00	0,13	0,01	0,07

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**TABLA N° 2.11**  
**ANÁLISIS PROXIMAL DEL GRUPO DE TUBÉRCULOS, RAÍCES**  
**(CONTINUACIÓN)**

<b>NOMBRE DEL ALIMENTO</b>	<b>y<sub>a</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>	<b>y<sub>g</sub></b>	<b>y<sub>c</sub></b>	<b>y<sub>ce</sub></b>	<b>y<sub>f</sub></b>
Papa variedad nativa capulí con cáscara	0,63	0,01	0,00	0,30	0,01	0,04
Papa variedad nativa caramarquina con cáscara	0,66	0,02	0,00	0,26	0,01	0,05
Papa variedad nativa chimbina amarilla con cáscara	0,71	0,02	0,00	0,20	0,01	0,06
Papa variedad nativa huagalina con cáscara	0,73	0,02	0,00	0,17	0,01	0,07
Papa variedad nativa hualash con cáscara	0,74	0,02	0,00	0,17	0,01	0,06
Papa variedad nativa huayro con cáscara	0,72	0,02	0,00	0,21	0,01	0,04
Papa variedad nativa huevo de toro con cáscara	0,69	0,02	0,00	0,21	0,01	0,06
Papa variedad nativa limeña con cáscara	0,71	0,02	0,00	0,20	0,01	0,06
Papa variedad nativa maga blanca con cáscara	0,73	0,03	0,00	0,18	0,01	0,05
Papa variedad nativa peruanita con cáscara	0,71	0,02	0,00	0,21	0,01	0,05
Papa variedad nativa puca pampamachay con cáscara	0,68	0,02	0,00	0,23	0,01	0,06
Papa variedad nativa Puca pishgosh con cáscara	0,65	0,02	0,00	0,26	0,01	0,05
Papa variedad nativa quinuapa tulum con cáscara	0,70	0,02	0,00	0,20	0,01	0,06
Papa variedad nativa sapa negra con cáscara	0,69	0,02	0,00	0,21	0,01	0,06
papa variedad nativa yana shaque con cáscara	0,65	0,02	0,00	0,28	0,01	0,04

**Fuente:** Cabezas (2009)

**Nota:** Subíndices: a: agua, p: proteína, g: grasa; c: carbohidratos ce: ceniza; f: fibra

**ANEXO N°3**  
**CORRELACIONES MATEMÁTICAS Y DATOS EXPERIMENTALES DE**  
**LAS PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS**  
**3.1 TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA DE ALIMENTOS**  
**TABLA N° 3.1A**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA PIÑA, MIEL Y**  
**MANZANA A DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD**

<b>Muestra</b>	<b>y</b> <b>(kg<sub>agua</sub> · kg<sub>alimento</sub><sup>-1</sup>)</b>	<b>T<sub>g</sub></b> <b>(transición 1) °C</b>	<b>T<sub>g</sub>(transición 2, con</b> <b>formación de hielo) °C</b>
Piña (Telis y Sobral, 2001; sin recocido, método DSC, velocidad de congelamiento: 10°C/min, tamaño de la muestra: 10 mg)	0,355	-75,49	-24,56
	0,358		-25,00
	0,365	-79,24	-30,17
	0,365	-80,24	-31,91
	0,393	-79,98	-32,41
	0,422	-83,42	-34,12
	0,43	-87,46	-40,04
	0,484	-49,26	-33,21
	0,549	-48,35	-30,97
	0,597	-	-30,97
	0,700	-	-27,06
	0,801	-	-25,56
	0,902	-	-22,76
Piña (Telis y Sobral, 2001; sin recocido, método DSC, velocidad de congelamiento: 10°C/min, tamaño de la muestra: 10 mg)	0,355	-63,53	-31,735
	0,358	-63,81	-34,405
	0,365	-65,20	-31,505
	0,393	-54,72	-40,26
	0,422	-85,52	-32,405
	0,430	-65,92	-39,155
Miel (Kantor et al. 1999; DSC, velocidad de congelamiento: 10°C/min)	0,445	-72,03	-40,90
	0,524	-57,73	-40,70
	0,603	-57,70	-38,60
	0,762	-60,77	-31,70
Manzana (Del Valle et al.,1998; velocidad de calentamiento:10°C/min)	0,331	-73,73	-26,40
	0,386	-80,53	-35,85
	0,42	-84,10	-38,15
	0,482	-55,70	-35,75
	0,561	-57,57	-34,55

**Fuente:** Citado por Rahman (2009:276). **Nota:** T<sub>g</sub> reportado es el promedio de los tres valores reportados por el análisis DSC; en muestras complejas se presentan 2 resultados en la medición.



**TABLA N° 3.1B**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE LA FRESA, UVA, AJO**  
**Y GROSELLA A DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD**

<b>Muestra</b>	<b>y</b> <b>(kg<sub>agua</sub> · kg<sub>alimento</sub><sup>-1</sup>)</b>	<b>T<sub>g</sub></b> <b>(transición 1) °C</b>	<b>T<sub>g</sub></b> <b>(transición 2, con</b> <b>formación de hielo)</b> <b>°C</b>
Fresa (Sa et al., 1999; velocidad de calentamiento: 5°C/min)	Fresco	-52,30	-19,60
Uva (Sa y Sereno, 1994; velocidad de calentamiento:5°C/min)	0,618	-64,60	-53,05
Ajo (Rahman et al., 2005; velocidad de calentamiento: 5°C	0,400	-38,87	-22,55
	0,350	-39,13	-24,10
	0,300	-41,23	-23,90
	0,280	-43,10	-24,30
	0,260	-42,53	-24,40
	0,240	-43,50	-23,75
	0,220	-44,17	-24,10
Grosella (Wang et al., 2008; velocidad de calentamiento: 10°C/min	0,800		-29,60
	0,700		-33,20
	0,470	-55,97	-39,60
	0,350	-55,57	-33,60
	0,330	-42,93	-41,30
	0,310	-55,60	-41,80

**Fuente:** Citado por Rahman (2009:276)

**Nota:**T<sub>g</sub> reportado es el promedio de los tres valores reportados por el análisis DSC; en muestras complejas se presentan 2 resultados en la medición.

**TABLA N° 3.1C**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE RES, LOMO DE CERDO, PAVO, BACALAO, CABALLA Y ATÚN**

GRUPO	ALIMENTO	OBSERVADAS POR EL AUTOR (T <sub>g</sub> ) °C	POR OTROS AUTORES °C
4: Pescados y Mariscos	Bacalao	-11,7±0,6 (músculo completo)	-77 (Nesvadba, 1993)
		-6,3±0,1 (fracción de proteínas insolubles sin sal)	-40 (Simatos y Blond, 1993)
			-15 (Levine y Slade, 1989 <sup>a</sup> )
	Caballa	-13,3±0,5 (músculo completo)	-
		-8,3±0,6 (Fracción de proteínas solubles sin sal)	-
		-7,5±0,4 (Fracción de proteínas insolubles sin sal)	-
	Atún	-	-68 a-71 (Inoue e Ishikawa, 1997)
-		-11,5 a -18 (Levine y Slade, 1989 <sup>a</sup> )	
5: Carnes	Res	-12,0±0,3	-40 (Simatos et al., 1975)
			-6 (Rasmussen, 1969)
			>-5 (Levine y Slade, 1989 <sup>a</sup> )
	Lomo de Cerdo	-	-20 (Levine y Slade, 1989)
	Pavo	-20	-13,5 (Levine y Slade, 1989)

**Fuente:** Citados por Brakes y Fennema (1999:4).

**Nota:** Lo autores mencionan que el procedimiento DSC conllevó que el recocido de las muestras sea por 1 hora a -15°C. Desde que el procedimiento de recocido no fue optimizado para cada tipo de muestra, los valores de T<sub>g</sub> son probablemente ligeramente inferiores a los valores reportados en esta Tabla.

**TABLA N° 3.1D**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA DE DIVERSOS ALIMENTOS**

GRUPO	ALIMENTO	TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA $T_g$ (°C)
1: Cereales	Maíz tierno, fresco	-15,0
2: Verduras y Hortalizas	Tomate	-41,0
	Espinaca, congelada	-17,0
	Cabeza de brócoli, congelada	-12,0
3: Frutas	Manzana	-41,0 a -42,0
	Plátano	-35,0
	Durazno	-36,0
	Fresa	-33,0 a -41,0
	Jugo de uva	-42,0
	Jugo de piña	-37,0
4: Pescados y Mariscos	Músculo de Bacalao	-11,7
	Músculo de Caballa	-12,4
5: Carnes	Músculo de res	-12,0
6: Leches y derivados	Queso Cheddar	-24,0
	Crema de queso	-33,0
8: Leguminosas	Arveja, congelada	-25,0
9: Tubérculos	Papa, fresca	-12,0

**Fuente:** Citado por Fellows (2000: 441)

**Nota:** El autor indica que si el alimento es reducido a temperaturas bajas, llega a ser más concentrado y forma un vidrio que va sustituyendo los cristales de hielo, la cual protege la textura de los alimentos y le da buena estabilidad durante su almacenamiento.

**TABLA N° 3.1E**  
**TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VÍTREA ( $T_g$ ) PARA ALIMENTOS DEL GRUPO N° 2 Y 3 DE BAJJO CONTENIDO DE HUMEDAD ( $y_a$ )**

GRUPO	ALIMENTOS	$y_a$	$T_g$ (°C)
2: Verduras y Hortalizas	Ajo	0,005	46,50
		0,050	12,47
	Repollo	0,043	55,65
		0,049	20,90
3: Frutas	Kiwi	0,000	65,31
		0,031	21,67
		0,035	17,06
		0,042	12,43
		0,044	9,05
		0,051	1,97
	Manzana	0,010	34,05
		0,022	29,43
		0,026	22,15
		0,036	9,70

**Fuente:** Rahman (2009:276). **Nota:**  $y_a$  : Humedad ( $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ )

**3.2 TEMPERATURAS INICIAL DE CONGELAMIENTO DE LOS ALIMENTOS**  
**TABLA N° 3.2A**  
**TEMPERATURA INICIAL DE CONGELAMIENTO DE FRUTAS, VEGETALES Y JUGOS**

<b>GRUPO</b>	<b>ALIMENTOS</b>	<b>% <math>y_a</math></b> ( $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ )	<b>TEMPERATURA INICIAL DE CONGELAMIENTO (°C)</b>
2: Verduras y Hortalizas	Arvejas	75,8	-1.83
	Pulpa de tomate	92,9	-0.72
	Espinaca	90,2	-0.56
	Espárrago	92,6	-0.67
	Cebolla	85,5	-1.44
	Zanahoria	87,5	-1.11
3: Frutas	Peras	83,8	-1.61
	Melocotón	85,1	-1.56
	Fresa	89,3	-0.89
	Ciruelas	80,3	-2.28
	Frambuesas	82,7	-1.22
	Jugo de frambuesas	88,5	-1.22
	Jugo de fresa	91,7	-0.89
	Cerezas dulces	77,0	-2.61
	Jugo de naranja	89,0	-1.17
	Jugo de manzana	87,2	-1.44
	Jugo de uva	84,7	-1.78
	Jugo concentrado de manzana	49,8	-11.33
	Jugo de arándano	89,5	-1.11
	Puré de manzana	82,8	-1.67
Jugo de cereza	86,7	-1.44	
4: Pescados y Mariscos	Bacalao	78,0	-2.20
	Camarón	70,8	-2.20
5: Carnes	Tenera	74,5	-1.75
	Músculo de res	74,0	-1.75
	Músculo de cordero	74,5	-1.74
	Músculo de puerco	74,5	-1.75
	Pollo	76,0	-0.79
	Jamón	56,0	-1.70

**Fuente:** Citado por Rao (2005:207)

**Nota:**  $y_a$ : humedad ( $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ )

**TABLA N° 3.2B**  
**TEMPERATURA INICIAL DE CONGELAMIENTO DE CORTES**  
**SELECTOS DE CARNES, PESCADO, VEGETALES, Y FRUTAS**

PRODUCTO	$y_a$	$T_{c,0} (^{\circ}\text{C})$
<b>GRUPO 2: VERDURAS Y HORTALIZAS</b>		
Arveja verde	0,760	-1,74
Espinaca	0,800	-0,55
<b>GRUPO 3: FRUTAS</b>		
Jugo de uva	0,800	-2,90
Jugo de tomate	0,850	-1,60
<b>GRUPO 4: PESCADO</b>		
Eglefino	0,836	-0,89
Eglefino	0,803	-1,00
Bacalao	0,820	-0,9
Bacalao	0,780	-2,20
Bacalao	0,803	-0,91
Bacalao	0,500	-3,57
Pez gato	0,803	-1,00
Pez rojo	0,803	-1,00
Salmón	0,670	-2,20
Perca	0,791	-0,86
<b>GRUPO 5: CARNES</b>		
Músculo de res	0,800	-0,73
Músculo de res	0,740	-0,99
Músculo de res	0,500	-3,63
Músculo de res	0,261	-13,46
Músculo de res	0,740	-1,75
Costado de la res	0,745	-1,75
Flanco de la res	0,745	-1,75
Ternera	0,745	-1,75
Músculo de cordero	0,745	-1,74
Músculo de cordero	0,740	-1,00
Lomo de cordero	0,649	-0,90
Lomo de cordero	0,524	-0,84
Riñón de cordero	0,798	-0,96
Músculo de puerco	0,745	-1,75
Músculo de puerco	0,740	-1,00
Pavo	0,740	-2,80

**Fuente:** Citado por Da-Wen (2006:106).

**Nota:**  $y_a$ : Contenido de humedad inicial ( $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ );  $T_{c,0}$ : Temperatura inicial de congelamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )

**TABLA N° 3.2C**  
**CONTENIDO DE AGUA TOTAL, TEMPERATURA DE**  
**CONGELAMIENTO INICIAL Y AGUA INCONGELABLE DE DIVERSOS**  
**ALIMENTOS**

GRUPO	ALIMENTO	$y_{a,0}$	$T_{c,0}$ (°C)	$x_{inc}$	$y_{inc}$	Ref.
2: Verduras y Hortalizas	Jugo de tomate	0,850	-1,60	0,180	—	a
	Arveja verde	0,760	-1,74	0,080	—	a
	Espinaca	0,800	-0,55	0,117	—	a
	Vegetales	—	—	0,18 a 0,250	—	a
	Ajo	0,200- 0,800	-0,90a-15,90	—	0,190(*)	a
		—	—	0,220	—	b
3: Frutas	Manzana	0,580- 0,860	-4,60a -22,00	—	0,264(*)	a
		—	—	0,359	—	b
	Grosella	0,310- 0,800	-2,20a -19,70	—	0,144(*)	a
		—	—	0,181	—	b
4: Pescados y Mariscos	Tuna	0,370- 0,730	-1,40a -15,30	—	0,336(*)	a
		—	—	0,639	—	a
	Pez real	0,500- 0,700	-1,50a -6,30	—	0,250(*)	a
		—	—	0,453	—	b
Bacalao	0,803	0,910	0,278	—	a	
5: Carnes	Carne de res	0,740	-0,950	0,257	—	a
	Carne y pescado	—	—	0,240 a 0,270	—	a
		—	—	0,140 a 0,320	—	a
Otros	Huevo blanco	0,864	-0,450	0,275	—	a
	Huevo	—	—	0,103 a 0,109	—	a

**Fuente:** (a) Rahman (2008:196,198); (b) Ahmed (2012: 447)

**Nota:**  $y_{a,0}$  (kg agua.kg alimento<sup>-1</sup>);  $T_{c,0}$ : Temperatura inicial de congelamiento;  $x_{inc}$  (kg<sub>agua</sub> · kg<sub>sólido seco</sub><sup>-1</sup>);  $y_{inc}$  (kg<sub>agua</sub> · kg<sub>alimento</sub><sup>-1</sup>); (\*): Datos promedios de los reportados por el autor de la Tabla 6,4 de su libro.

### 3.3 VALORES DE HUMEDAD EN LA MONOCAPA PARA ALIMENTOS DESHIDRATADOS ENTRE 20 Y 30°C

TABLA N° 3.3A

#### DATOS DEL AGUA EN LA MONOCAPA DE DIVERSOS ALIMENTOS

GRUPO	PRODUCTO ALIMENTARIO	$x_m$	REFERENCIA
1: Cereales	Trigo	7,0	Lomauro et al. 1985
3: Frutas	Manzana	8,0	Iglesias y Chirife, 1982
	Albaricoques	15,0	Maroulis et al., 1988
	Bananas	4,0-7,0	Lomauro et al., 1985; Iglesias y Chirife, 1982
	Higos	12,0	Maroulis et al., 1988
5: Carnes	Res, seca	2,0-4,0	Karel, 1975; Iglesias y Chirife, 1982
6: Leches y derivados	Queso	3,0-5,0	Iglesias y Chirife, 1982
	Leche, seca no grasa	3,0-7,0	Salvin, 1959; Karel, 1975; Iglesias y Chirife, 1982
	Leche, atomizada	4,3	Lomauro et al. 1985
8: Leguminosas	Lenteja	6,0	Kumar y Balasubrahmanyam, 1986
	Arvejas	4,0-7,0	Iglesias y Chirife, 1982; Kumar Balasubrahmanyam, 1986
9: Tubérculos	Papa	5,0-7,0	Salwin, 1959; Karel, 1975; Iglesias y Chirife, 1982
	Almidón	7,0-11,0	Karel, 1975; Labuza, 1975; Iglesias y Chirife, 1982
Otros	Café	2,0-5,0	Iglesias y Chirife, 1982

**Fuente:** Citado por Fontana (2010:62)

**Nota:**  $x_m$ : Humedad en la monocapa (g agua.100g sólido seco<sup>-1</sup>)

### 3.4 POROSIDAD DE LOS ALIMENTOS

**TABLA N° 3.4A**  
**POROSIDAD DE LOS ALIMENTOS**

ALIMENTO	CORRELACIONES	Referencias
Calamar secado con aire	$\varepsilon_a = 0,109 - 0,219\gamma + 0,099\gamma^2$	(a)
Modelo general secado con aire	$\varepsilon_a = 0,5y_a^2 - 0,8y_a - 0,002t^2 + 0,02t - 0,05(1 - \varepsilon_a^0)F$	(b)

**Fuente:** Rao et al. (2005:49)

**Nota:** (a) Rahman et al. (1996) hasta humedad de cero; (b) Hussain et al. (2002).  $\gamma = y_a/y_{a0}$ : Relación entre la humedad final y la humedad inicial ambas expresadas en  $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}_{\text{alimento}}^{-1}$ ;  $y_a$ : Fracción másica del agua en base húmeda ( $\text{kg.kg alimento}^{-1}$ );  $t$ : Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $F$  puede ser: -1 para alimentos azucarados, 2 para alimentos con almidón, y 3 para otros productos;  $\varepsilon_a^0$ : Porosidad aparente inicial.

**TABLA N° 3.4B**  
**POROSIDAD DE ALIMENTOS LIOFILIZADOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

MANZANA LIOFILIZADA		PLÁTANO LIOFILIZADO		PAPA LIOFILIZADA		ZANAHORIA LIOFILIZADA	
$x_w$	$\varepsilon$	$x_w$	$\varepsilon$	$x_w$	$\varepsilon$	$x_w$	$\varepsilon$
0,09	0,920	0,48	0,78	0,02	0,89	0,48	0,78
0,39	0,912	1,01	0,67	0,48	0,78	1,01	0,67
0,70	0,843	1,43	0,57	1,01	0,67	1,43	0,57
0,98	0,874	1,99	0,47	1,43	0,57	1,99	0,47
1,58	0,852	2,50	0,42	1,99	0,47	2,50	0,42
2,00	0,741	2,62	0,42	2,50	0,42	2,62	0,42
2,39	0,739	3,21	0,29	2,62	0,42	3,21	0,29
2,78	0,792	4,02	0,19	3,21	0,29	4,02	0,19
3,00	0,708	4,52	0,13	4,02	0,19	4,52	0,13
3,3	0,730			4,52	0,13		

**Fuente:** Adaptado de Rahman (2008, 484)

**Nota:**  $x_w$ (kg agua.kg sólido seco);  $\varepsilon$  : Porosidad del alimento. Los datos fueron obtenidos a partir de la gráfica brindada, siendo extraídos con ayuda del software OriginPro 9.0



**TABLA N° 3.4C**  
**DENSIDAD A GRANEL, DENSIDAD VERDADERA Y POROSIDAD DE ALIMENTOS VS. HUMEDAD Y**  
**TEMPERATURA (RANGO DE VARIACIÓN DE LA DATA DISPONIBLE)**

Grupo	Alimentos	Densidad granel (kg.m <sup>-3</sup> )		Densidad verdadera (kg.m <sup>-3</sup> )		Porosidad		T(°C)		y <sub>w</sub>	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2: Verduras y Hortalizas	Palta	1054	1060	-	-	0,090	0,734	28	70	0,012	0,750
2: Verduras y Hortalizas	Algarrobo	559	1150	1147	1147	0,514	0,514	-	-	0,060	0,093
2: Verduras y Hortalizas	Vegetales	75	1560	1013	2182	0,000	0,967	-50	190	0,000	0,955
2: Verduras y Hortalizas	Espárrago	577	577	-	-	-	-	-	-	-	-
2: Verduras y Hortalizas	Remolacha	833	1530	-	-	-	-	28	28	0,895	0,895
2: Verduras y Hortalizas	Repollo	449	449	-	-	0,050	0,920	-	-		
2: Verduras y Hortalizas	Calabaza	429	429	-	-	0,484	0,484	-	-	0,077	0,077
2: Verduras y Hortalizas	Zanahoria	110	1560	1036	1889	0,010	0,940	-50	70	0,000	0,920
2: Verduras y Hortalizas	Coliflor	320	320	-	-	-	-	-	-	-	-
2: Verduras y Hortalizas	Pepino	769	959	-	-	-	-	28	28	0,954	0,954
2: Verduras y Hortalizas	Berenjena	417	417	-	-	0,641	0,641	-	-	0,910	0,910
2: Verduras y Hortalizas	Ajo	230	1280	1064	1528	0,010	0,750	60	70	0,000	0,700
2: Verduras y Hortalizas	Cebolla	102	1229	1025	1489	0,018	0,910	28	70	0,000	0,920
2: Verduras y Hortalizas	Arveja	741	1210	1373	1429	0,440	0,460	30	65	0,049	0,750
2: Verduras y Hortalizas	Rábano	942	942	-	-	-	-	40	45	0,050	0,946
2: Verduras y Hortalizas	Espinaca	224	224	-	-	-	-	-	-	-	-
2: Verduras y Hortalizas	Tomate	302	1010	1490	1490	0,403	0,403	28	70	0,178	0,923
2: Verduras y Hortalizas	Tomate en polvo	890	890	1490	1490	0,403	0,403	-	-	0,178	0,178
2: Verduras y Hortalizas	Nabo	952	1000	-	-	-	-	24	45	0,898	0,923
2: Verduras y Hortalizas	Leche de soya	1010	1050	-	-	-	-	-	-	0,884	0,980

**Fuente:** Adaptado de la data citada por Rahman (2008, 426). **Nota:** Fueron seleccionados los datos de los alimentos más representativos; y<sub>w</sub> (fracción de humedad en kg agua. kg alimento<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 3.4C**  
**DENSIDAD A GRANEL, DENSIDAD VERDADERA Y POROSIDAD DE ALIMENTOS VS. HUMEDAD Y**  
**TEMPERATURA (RANGO DE VARIACIÓN DE LA DATA DISPONIBLE)-(CONTINUACIÓN)**

Grupo	Alimentos	Densidad granel (kg.m <sup>-3</sup> )		Densidad verdadera (kg.m <sup>-3</sup> )		Porosidad		T(°C)		y <sub>w</sub>	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
3: Frutas	Frutas	80	1620	1000	2029	0,000	0,950	-50	165	0,000	0,944
3: Frutas	Manzana	80	1466	1000	1714	0,020	0,950	-50	165	0,000	0,900
3: Frutas	Plátano	260	1620	1044	2029	0,016	0,870	50	80	0,000	0,900
3: Frutas	Arándano	190	442	-	-	-	-	-40	70	0,200	0,200
3: Frutas	Melón	930	930	-	-	-	-	28	28	0,928	0,928
3: Frutas	Cereza	450	1071	1049	1049	0,414	0,527	20	20	0,09	0,867
3: Frutas	Jugo	1053	1053	-	-	-	-	-	-	0,867	0,867
3: Frutas	Uva	368	1483	1076	1434	0,370	0,491	2	60	0,000	0,896
3: Frutas	Toronja	714	950	-	-	0,330	0,360	26	26	0,793	0,904
3: Frutas	Guaba	1005	1103	-	-	-	-	65	85	0,724	0,939
3: Frutas	Jugo	1005	1103	-	-	-	-	65	85	0,724	0,939
3: Frutas	Kiwi	1051	1051	1076	1076	0,007	0,007	-	-	0,815	0,815
3: Frutas	Albaricoque	463	1048	1003	1161	0,022	0,557	2	2	0,064	0,854
3: Frutas	Limón	716	1035	-	-	0,370	0,420	28	28	0,804	0,918
3: Frutas	Mandarina	849	894	1103	1103	0,240	0,330	-	-	0,724	0,75
3: Frutas	Papaya	968	968	1028	1028	0,058	0,058	-	-	0,928	0,928
3: Frutas	Durazno	545	1303	1044	1070	0,046	0,091	2	70	0,820	0,885
3: Frutas	Piña	1010	1010	-	-	-	-	27	27	0,849	0,849
3: Frutas	Frambuesa	496	1046	-	-	-	-	2	50	0,885	0,885
3: Frutas	Fresa	498	1033	1050	1050	0,064	0,471	2	70	0,055	0,920
3: Frutas	Mango	918	1079	1082	1130	0,059	0,152	-	-	0,786	0,841

**Fuente:** Adaptado de la data citada por Rahman (2008, 426)

**Nota:** Fueron seleccionados los datos de los alimentos más representativos; y<sub>w</sub> (fracción de humedad en kg agua. kg alimento<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 3.4C**  
**DENSIDAD A GRANEL, DENSIDAD VERDADERA Y POROSIDAD DE ALIMENTOS VS. HUMEDAD Y**  
**TEMPERATURA (RANGO DE VARIACIÓN DE LA DATA DISPONIBLE)-(CONTINUACIÓN)**

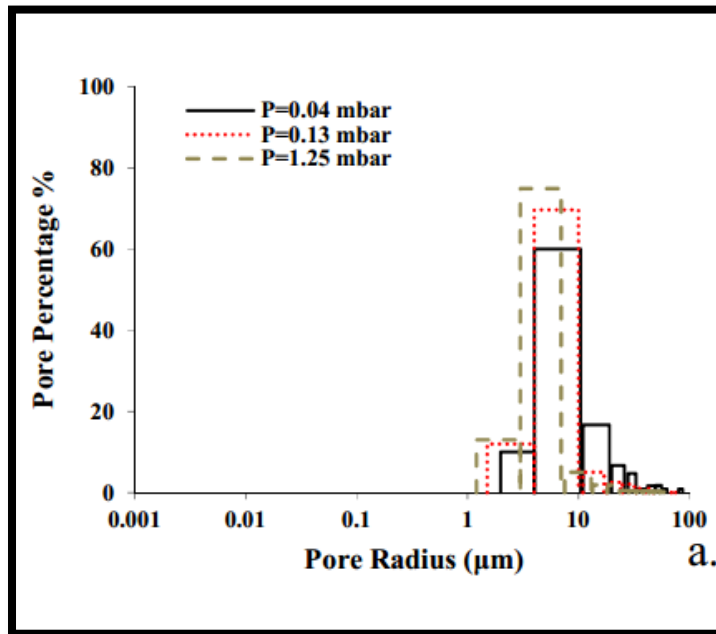
Grupo	Alimentos	Densidad granel (kg.m <sup>-3</sup> )		Densidad verdadera (kg.m <sup>-3</sup> )		Porosidad		T(°C)		y <sub>w</sub>	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
4: Pescados y Mariscos	Pescado	317	1400	1055	1451	0,000	0,760	-40	70	0,000	0,922
4: Pescados y Mariscos	Calamares	947	1246	1074	1339	0,011	0,079	-30	70	0,000	0,845
4: Pescados y Mariscos	Pulpo	1042	1075	-	-	-	-	20	20	0,774	0,853
4: Pescados y Mariscos	Camarón	1017	1093	-	-	-	-	-30	20	0,739	0,773
4: Pescados y Mariscos	Calamar	975	1275	1055	1451	0,000	0,125	-40	70	0,000	0,922
5: Carnes	Res	920	1092	1100	1117	0,023	0,075	-20	75	0,535	0,743
5: Carnes	Pollo	440	840	1210	1320	0,331	0,647	-19,6	74	-	-
5: Carnes	Puerco	1070	1090	-	-	-	-	-	-	-	-
5: Carnes	Ave de corral	1070	1100	-	-	-	-	15	23	0,720	0,720
6: Leches y derivados	Leche	593	1020	1133	1133	0,477	0,477	-	-	0,046	0,98
9: Tubérculos	Almidón de papa	98	458	-	-	-	-	-	-	0,033	0,075
9: Tubérculos	Almidón	560	760	1510	1510	0,497	0,497	-	-	0,100	0,100
9: Tubérculos	Almidón de tapioca	93	93	-	-	-	-	-	-	0,001	0,001
9: Tubérculos	Papa	180	1379	1020	2182	0,000	0,880	-50	190	0,000	0,880
Otros	Nueces	57	792	1015	1470	0,339	0,644	20	30	0,027	0,350
Otros	Canola	616	700	1050	1126	0,340	0,440	26	40	0,050	0,190
Otros	Cocoa	360	560	1440	1450	0,200	0,752	-	-	0,044	0,238
Otros	Café	330	514	-	-	0,450	0,540	-	-	0,099	0,306
Otros	Huevo	340	340	-	-	-	-	-	-	-	-
Otros	Champiñones	200	1100	1250	1250	0,018	0,840	60	90	0,020	0,930

**Fuente:** Adaptado de la data citada por Rahman (2008, 426)

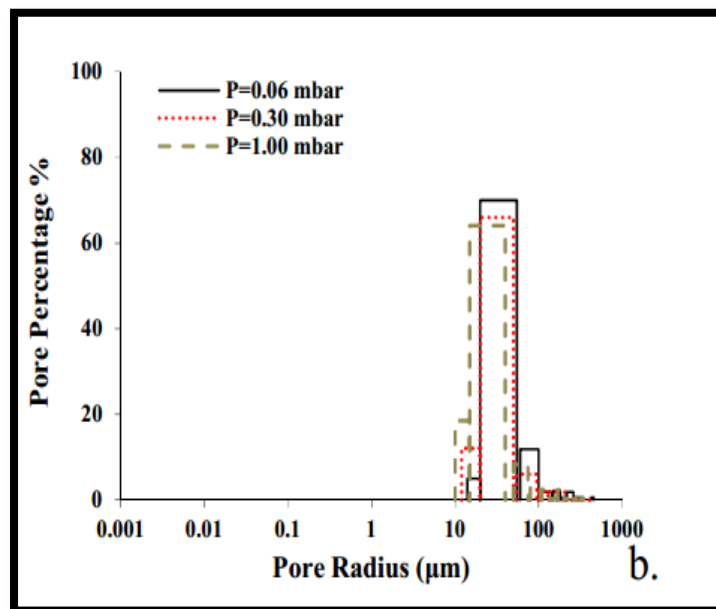
**Nota:** Fueron seleccionados los datos de los alimentos más representativos; y<sub>w</sub> (fracción de humedad en kg agua. kg alimento<sup>-1</sup>)

### 3.5 DIÁMETRO DE PORO DE UN ALIMENTO LIOFILIZADO

FIGURA N° 3.5A  
MICROESTRUCTURA DE PRODUCTOS LIOFILIZADOS COMO  
FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO



(a)

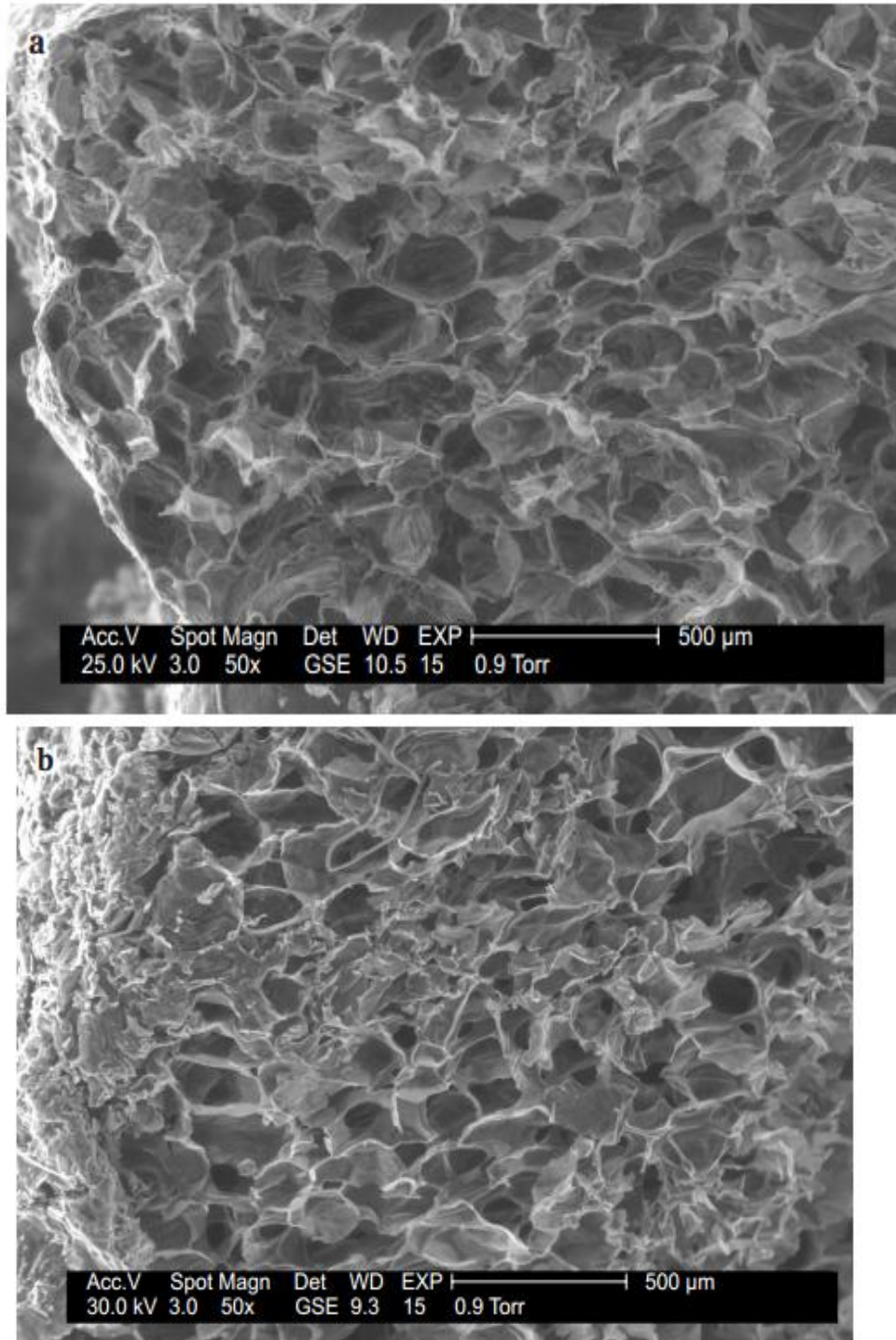


(b)

Fuente: Krokida, et al. (2011, 3)

Nota: (a) Arroz, (b) Papa

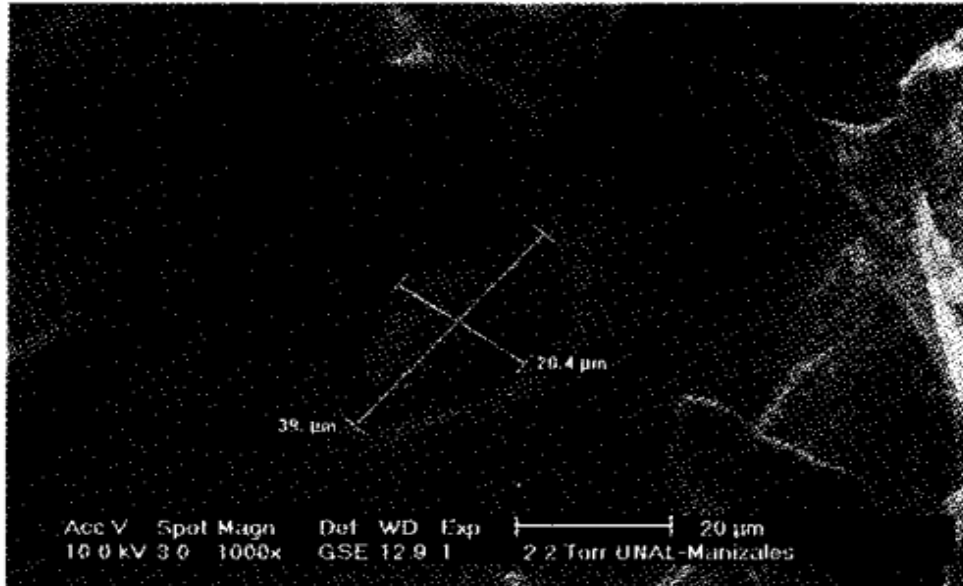
**FIGURA N° 3.5B**  
**MICROESTRUCTURA DE LA FRESA LIOFILIZADA**



**Fuente:** Ciurzynska, et al. (2011: 167)

**Nota:** Temperatura de proceso a) -30°C; b) -70°C. Zoom 50x. Scanning microscope FEI.

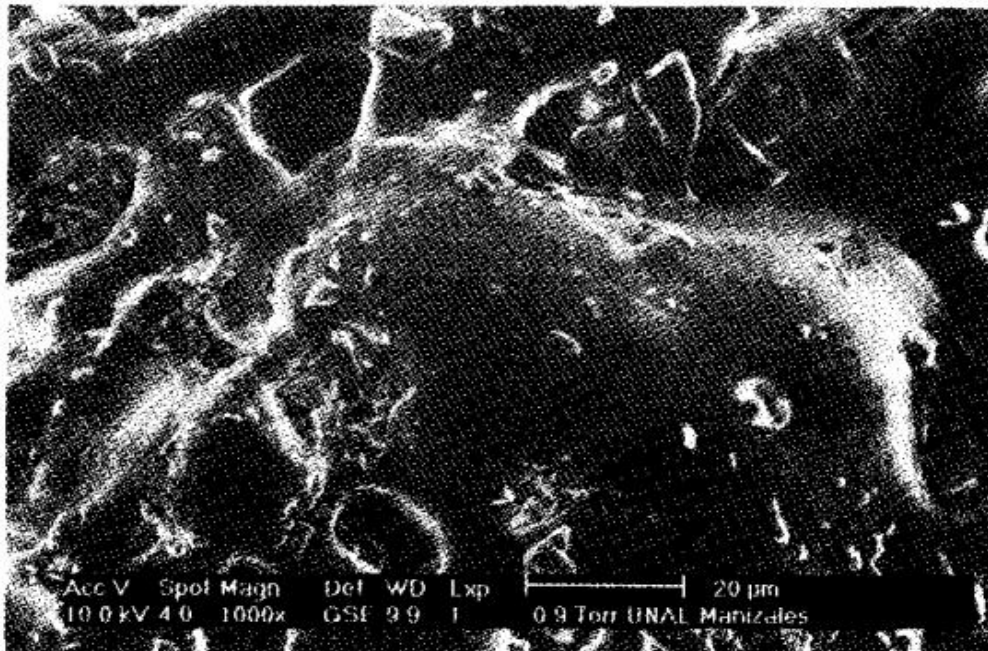
**FIGURA N° 3.5C**  
**MICROESTRUCTURA DEL MANGO LIOFILIZADO**



**Fuente:** Citado por Orrego (2008: 86)

**Nota:** Magnificación 1000X (mayo 2002, ESEM Universidad Nacional Tomada por C.E. Orrego y M. Arroyave.

**FIGURA N° 3.5D**  
**MICROESTRUCTURA DE PRODUCTO LIOFILIZADO DE CAFÉ**

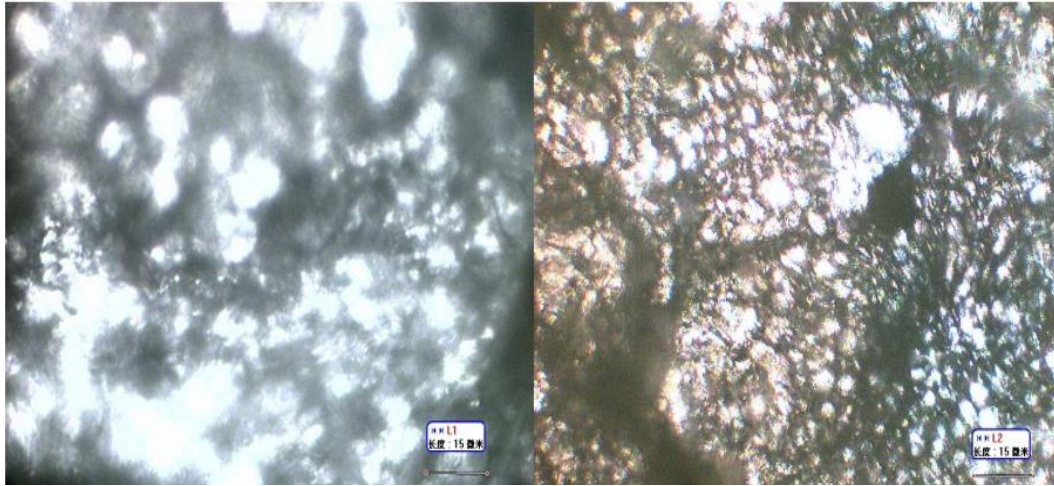


**Fuente:** Citado por Orrego (2008: 87)

**Nota:** Magnificación 1000X (mayo 2002, ESEM Universidad Nacional Tomada por C.E. Orrego y M. Arroyave.



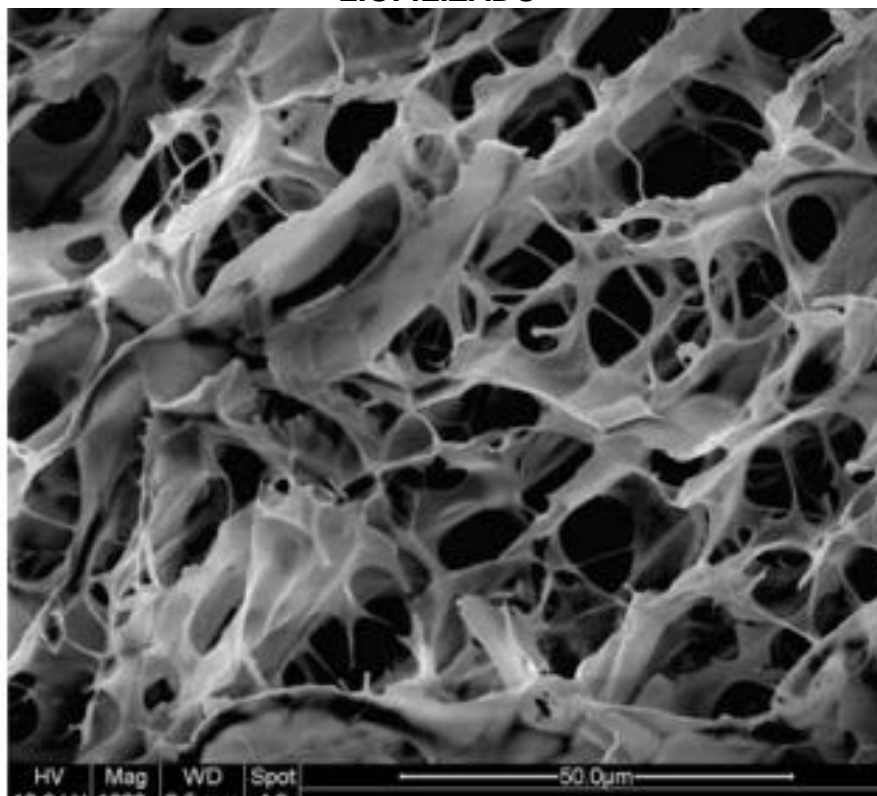
**FIGURA N° 3.5E**  
**MICROESTRUCTURA DE RODAJAS DE PERA LIOFILIZADA**



**Fuente:** Zhang, et al. (2009: 276)

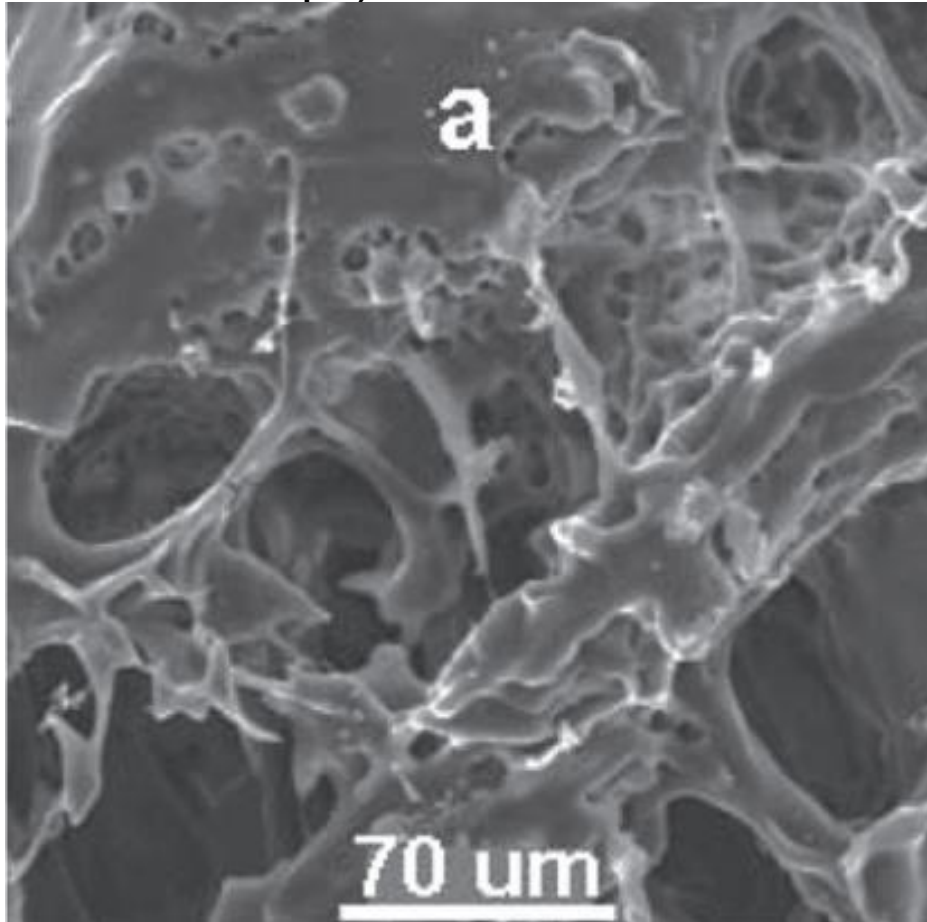
**Nota:** En el lado izquierdo: liofilizado bajo congelamiento rápido, con un espacio vacío de 5-8 $\mu\text{m}$ ; en el lado derecho: liofilizado bajo congelamiento lento, con un espacio vacío entre 9-12  $\mu\text{m}$

**FIGURA N° 3.5F**  
**MICROESTRUCTURA DE STICHOPUS JAPONICUS (PEPINO DE MAR) LIOFILIZADO**



**Fuente:** Duan, et al. (2010: 495)

**FIGURA N° 3.5G**  
**MICROESTRUCTURA DE CUBOS DE “LOCO” (Concholepas concholepas) SUJETO A LIOFILIZACIÓN**



**Fuente:** Reyes, et al (2011: 1393)

**Nota:** Escaneo mediante microscopio electrónico; el diámetro de poro máximo en liofilización al vacío era de 0,70 μm

**TABLA N° 3.5A**  
**Tamaño y número de poros en la carne de pollo como función de la velocidad de congelamiento**

VELOCIDAD DE CONGELAMIENTO (°C.min <sup>-1</sup> )	TAMAÑO DE PORO (μ)	RAZÓN DE POROS (%)
0,5	>10	95
9,0	>10	65
230,0	>10	25
0,5	>30	85
9,0	>30	22
230,0	>30	12

**Fuente:** Oetjen (1999:21)



### 3.6 PERMEABILIDAD DE LOS ALIMENTOS

TABLA N° 3.6A

#### PERMEABILIDAD DE ALIMENTOS LIOFILIZADOS $K_{p1}$

GRUPOS	ALIMENTOS	Permeabilidad ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\mu\text{Hg}^{-1}$ )		$K_{p1}$	
2: Verduras y Hortalizas	Tomate 22°Brix	2,1E-09		1,58E-08	
	Zanahoria	2,0E-09	5,6E-09	1,50E-08	4,20E-08
3: Frutas	Manzana	3,3E-09	6,0E-09	2,48E-08	4,50E-08
	Plátano	1,1E-09		8,25E-09	
4: Pescados y Mariscos	Pescado	8,7E-09		6,53E-08	
5: Carnes	Ternera	7,0E-10	4,4E-09	5,25E-09	3,30E-08
6: Leches y derivados	Leche entera	2,7E-09	3,0E-07	2,03E-08	2,27E-06
9: Tubérculos	Patata	1,3E-09		9,75E-09	

**Nota:** Grupo (2): verduras y hortalizas, (3): Frutas, (4) Pescados y mariscos, (5): Carnes (6): Leches y derivados, (9): Tubérculos y raíces. Adaptado de Schwartzberg (1982), citado por Ibarz y Barbosa (2005:619);  $K_{p1}$ : Permeabilidad expresada en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$

FIGURA N° 3.6A  
PERMEABILIDADES  $K_{p2}$  DE LA RES

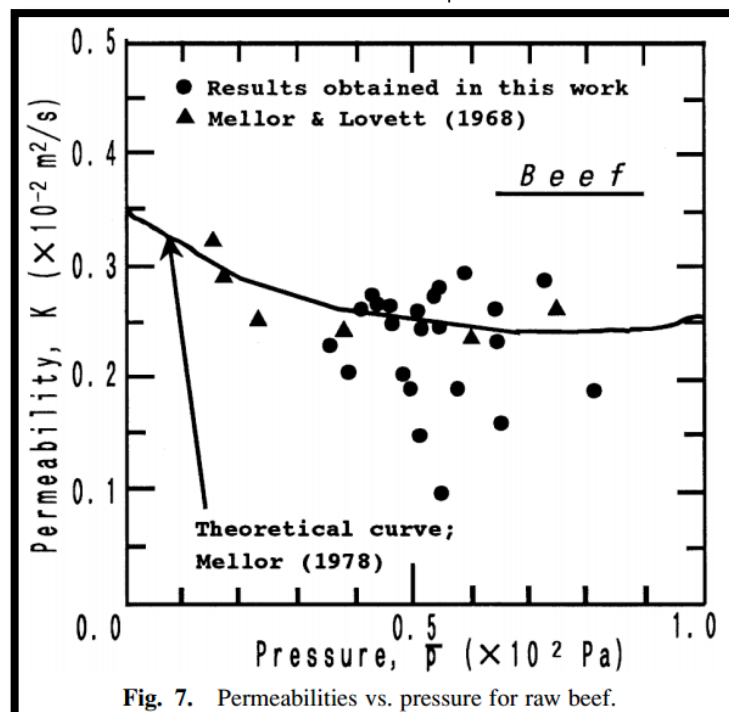


Fig. 7. Permeabilities vs. pressure for raw beef.

Fuente: Sagara (2001: 187)

**TABLA N° 3.6B**  
**PERMEABILIDADES TÍPICAS  $K_{p2}$**

GRUPO	ALIMENTO	Temperatura <sup>a)</sup> (°C)	Presión en la cámara (Pa)	Permeabilidad $K_{p2}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )		Referencias
3	Manzana rebanada	-17,7 a - 3,4	20–30	6,30x10 <sup>-4</sup>	1,20x10 <sup>-3</sup>	Araki et al. (1998)
	Manzana estrujada A)	-13,6 a 8,5	20–30	4,00 x10 <sup>-3</sup>	5,00x10 <sup>-3</sup>	Araki et al. (1998)
	Manzana estrujada B)	-11,8 a 19,7	20–30	1,30 x10 <sup>-2</sup>	1,6 x10 <sup>-2</sup>	Araki et al. (1998)
4	Camarones	4,2 a 21,2	7–133	3,10 x10 <sup>-4</sup>	1,20 x10 <sup>-3</sup>	Wenur (1997)
5	Res	3,0 a 40,8	7–30	9,00 x10 <sup>-4</sup>	4,05 x10 <sup>-3</sup>	Sagara et al. (1982)
	Res picada	7,3 a 10,3	2,7–13,3	1,30 x10 <sup>-3</sup>	2,40 x10 <sup>-3</sup>	Widodo and Tambunan (1966)
Otros	Solución de café (6–30%)	5,3–14,8	10–95	3,40 x10 <sup>-3</sup>	1,22 x10 <sup>-2</sup>	Sagara y Hosokawa (1982)
	Solución de café (29–45%)	-14,1 a 26,1	7–12	2,13 x10 <sup>-3</sup>	6,49 x10 <sup>-3</sup>	Sagara e Ichiba (1994)
	Solución de café (10–36%)	12,9–20,2	22–34	5,08 x10 <sup>-3</sup>	4,24 x10 <sup>-3</sup>	Ichiba (1994)

**Fuente:** Sagara (2001: 187); **Nota:** a) Valor promedio de la capa seca, A) Congelamiento rápido, B) Congelamiento lento

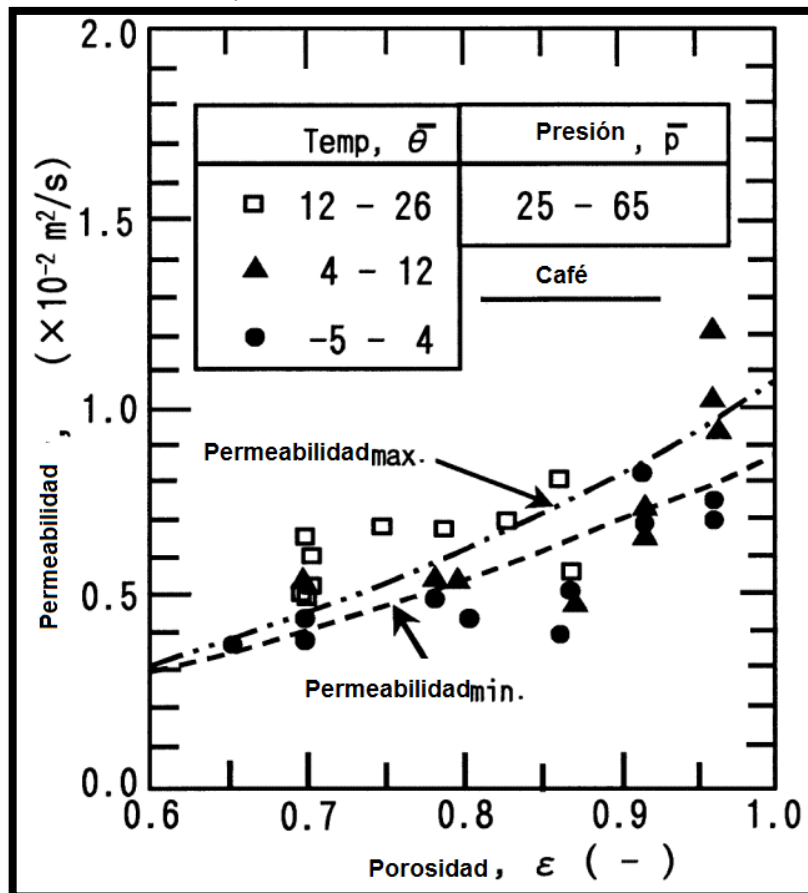
**TABLA N° 3.6C**  
**VALORES NUMÉRICO DE LAS CONSTANTES USADAS PARA**  
**CALCULAR LA PERMEABILIDAD  $K_{p2}$  DE LA RES MEDIANTE LA**  
**ECUACIÓN MELLOR Y LOVETT (1964) DERIVADA DE LA TEORÍA DE**  
**COLISIÓN**

CONSTANTES	VALORES NUMÉRICOS USADOS	ORIGEN
$r$	$58 \times 10^{-6}$ , m	Mellor (1978)
$k'$	2,5	Mellor y Lovett (1964)
$\tau$	4,2	Mellor (1978)
$\delta_1$	$3\pi/16$	Mellor y Lovett (1964)
$d_m$	$4,6 \times 10^{-10}$ , m	Kennard (1938)
$\varepsilon$	0,64	Harper (1962)

**Fuente:** Sagara (2001: 186)

**Nota:**  $r$ : Radio de poro equivalente (m);  $k'$ : Constante estructural;  
 $\tau$ : Tortuosidad;  $\delta_1$ : Factor de fricción del poro;  $d_m$ : Diámetro de una molécula de agua=  $4,6 \times 10^{-10}$  m (ver Anexo 3.7);  $\varepsilon$ : Porosidad

**FIGURA N° 3.6B**  
**PERMEABILIDADES  $K_{p2}$  VS. POROSIDAD DE SOLUCIONES DE CAFÉ**



**Fuente:** Sagara (2001: 186)

### 3.7 DENSIDAD DE LOS ALIMENTOS

TABLA N° 3.7A

#### DENSIDAD VERDADERA DE COMPONENTES ALIMENTARIOS

COMPONENTE	CORRELACIONES
Agua	$\rho_T = 997.18 + 3,1439.10^{-3}t - 3,7574.10^{-3}t^2$
Hielo	$\rho_T = 916.89 - 0,1307t^2$
Aire	$\rho_T = 12,847 - 3,2358.10^{-3}t$
Carbohidrato	$\rho_T = 1,5991.10^3 - 0,31046t$
Ceniza	$\rho_T = 2,4238.10^3 - 0,28063t$
Fibra	$\rho_T = 1,3115.10^3 - 0,36589t$
Grasa	$\rho_T = 9,2559.10^2 - 0,41757t$
Proteína	$\rho_T = 1,3299.10^3 - 0,5184t$

**Fuente:** Choi y Okos (1986) citado por Barbosa et al. (2005: 345)

**Nota:** Rao et al.(2005: 45) menciona que el rango de temperatura se encuentra entre -40 y 150°C, t: Temperatura (°C);  $\rho_T$ : Densidad verdadera ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

TABLA N° 3.7B

#### DENSIDAD VERDADERA DE ALIMENTOS LÍQUIDOS ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

ALIMENTO	CORRELACIONES	Ref.
Leche	$\rho_a = 1035 - 0,358t + 0,0049t^2 - 0,00010t^3$	(a)
Jugo de frutas/tomate	$\rho_a = \rho_w Y_w + \rho_s Y_s$ $\rho_w = 9,9989 \times 10^2 - 6,0334 \times 10^{-2}t - 3,6710 \times 10^{-3}t^2$ $\rho_s = 1,4693 \times 10^3 + 5,4667 \times 10^{-1}t - 6,9643 \times 10^{-3}t^2$	(b)
Jugo de manzana	$\rho_a = 830 + 350[\exp(-0,01B)] - 0,564t$	(c)
Jugo de Melocotón	$\rho_a = 1006,6 - 0,5155t + 4,1951B + 0,0135B^2$	(d)
Jugo de naranja	$\rho_a = 1025,46 - 0,3289t + 3,2819B + 0,0178B^2$	(e)
Jugo de naranja brasileño	$\rho_a = 1428,5 - 454,9Y_w - 0,231t$	

**Fuente:** Rao et al. (2005:43)

**Nota:** (a) Riedel (1949); (b) Choi y Okos (1983); (c) Bayindirli (1992); (d) y (e) Ramos e Ibarz (1998);  $\rho_a$ : Densidad aparente de los alimentos ( $\text{kg.m}^{-3}$ ); t: Temperatura en °C, entre 20 y 80°C para el jugo de manzana, 0 a 80°C para el jugo melocotón y naranja; 0,5 a 62°C para el jugo de naranja brasileño;  $\rho_w$ : Densidad de la parte acuosa ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $\rho_s$ : Densidad de la parte sólida ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $Y_w$ : Fracción másica del agua ( $\text{kg agua.kg alimento}^{-1}$ ); contenido entre 0,34 y 0,73 para el jugo de naranja brasileño; B: 14 a 39°Brix para el jugo de manzana; 10 a 60°Brix para el melocotón y la naranja; Ref.:Referencia.

**TABLA N° 3.7C**  
**DENSIDAD APARENTE DE ALIMENTOS SÓLIDOS (kg.m<sup>-3</sup>)**

ALIMENTO	CORRELACIONES	Ref.
Manzana	$\rho_a = 636 + 102[\ln x_w]$	(a)
Tajadas de cebollas	$\rho_B = 200,6 + 280y_w + 1,24 \times 10^4 l + 2,0 \times 10^4 y_w l$	(b)
Uvas	$\rho_B = 775,99 - 228,1x_w + 133,6x_w^2 - 22,19 \times x_w^3$	(c)
Comida marina fresca	$\rho_a = 2684 - 3693y_w + 2085y_w^2$	(d)
Comida marina congelada	$\rho_a = 1390 - 520y_w + 31,56y_w^2$	(e)
Calamar congelado	$\rho_a = 1047 + 3,603t + 0,057t^2$	(f)
Carne fresca	$\rho_a = \frac{1053 (t \geq t_F)}{0,9822 + 0,1131y_w + \frac{[0,2575(1 - y_w)]}{t}} (t \geq t_F)$	(g)

**Fuente:** Rao et al. (2005:45)

**Nota:** (a) Lozano (1979) por encima de la temperatura de congelación; (b) Madamba, et al. (1994) para un contenido de agua  $y_w$  entre 0,03 a 0,65 y espesor de tajadas “l” entre 2 a  $5 \times 10^{-3}$  m; (c) Ghiaus et al. (1997) para  $x_w$  entre 0,176 a 4,0; (d) Rahman y Driscoll (1994) para  $y_w$  entre 0,739 a 0,856 y t: 20°C; (e) Rahman y Driscoll (1994) para t= -30°C; (f) Rahman y Driscoll (1994) por debajo de su temperatura de congelamiento hasta -40°C; (g) Sanz et al. (1989) productos por encima y por debajo del congelamiento;  $\rho_a$ : Densidad aparente de los alimentos (kg.m<sup>-3</sup>);  $\rho_b$ : Densidad a granel (kg.m<sup>-3</sup>);  $x_w$ : Fracción másica del agua en base seca (kg.kg sólido seco<sup>-1</sup>); contenido entre t: Temperatura en °C y  $t_F$ : Temperatura de congelamiento del alimento °C; Ref.: Referencia.

**TABLA N° 3.7D**  
**VALORES TÍPICOS DE LA DENSIDAD VERDADERA, A GRANEL (kg.m<sup>-3</sup>) Y ALIMENTOS LIOFILIZADOS**

MUESTRA	DENSIDAD VERDADERA	DENSIDAD A GRANEL
Paneer	1 893	563,0
Camarón	343,77	212,49
Pescado “Hilsa”	1 139,3	751,37

**Fuente:** Chakraborty et al. (2006:601)

**Nota:** Paneer: es un queso fresco originario de la India, se trata de un queso cuajado, no curado, ácido, que no se funde. Ha sido cuajado calentando la leche con limón u otro alimento ácido; Pescado “Hilsa”: Tipo de pescado originario de Bangladesh; el contenido de humedad de los alimentos liofilizados fueron: Paneer (5,01% a 378K), Camarón (4,95%, 378K), Pescado “Hilsa” (5,01%, 378K)

**TABLA N° 3.7E**  
**DENSIDAD DE ALIMENTOS**

GRUPO	ALIMENTO	Y <sub>w</sub> (%)	T (°C)	DENSIDAD	Ref.
3: Frutas	Peras	83,0–85,0	20	1000	a
	Manzana	49,8	-	1227	b
	Manzana	87,2	-	1051	b
	Manzana	87,0	-	1061	b
	Arándano	89,5	-	1041	b
	Grosella negra	86,5	-	1055	b
	Cereza	86,7	-	1053	b
	Uvas	89,6	-	1040	b
	Uvas	84,7	-	1062	b
	Limón	90,0	-	1035	b
	Lima Naranja	90,7	-	1035	b
	Naranja	89,2	-	1042	b
	Naranja	89,0	-	1043	b
	Frambuesa	88,5	-	1046	b
	Fresa	91,7	-	1033	b
4: Pescados y Mariscos	Anchoveta, xg = 10% xp = 14%	76,0	21	930	a
	Pescado cobia xf = 0.65%, xp = 24.6%		15	1055	a
5: Carnes	Res, contenido de grasa (xg)		5–20	1076 – 1.37xg	a
6: Leches y derivados	Leche, contenido de grasa xf 3-6%		0-10	1028,9-0,195t	a
	Queso xf=24,6	19,0	20	1,432x <sub>f</sub>	a
	Queso xf=22,0	65,0	20	1230	a

**Fuente:** (a) Citado por Rao et al. (2005:175); (b) Citado por Rahman (2008:438).  
**Nota:** Y<sub>w</sub>(%) Porcentaje de humedad en base húmeda (kg agua. kg alimento<sup>-1</sup>); t: temperatura en °C;

**TABLA N° 3.7F**  
**DENSIDAD A GRANEL DE ALGUNOS ALIMENTOS EN POLVO**

GRUPO	POLVO	DENSIDAD A GRANEL (kg.m <sup>-3</sup> )
1: Cereales	Trigo	785
	Almidón de maíz	560
6: Leches y derivados	Leche	610
Otros	Cocoa	480
	Café (instantáneo)	330
	Café (tostado)	330

**Fuente:** Citado por Rahman (2008: 421)

**TABLA N° 3.7G  
DENSIDAD DE LOS ALIMENTOS**

<b>GRUPO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>DENSIDAD (kg.m-3)</b>	<b>DENSIDAD A GRANEL (kg.m-3)</b>
1: Cereales	Trigo	1409–1430	790–819
	Harina de trigo	–	480
	Cebada	1374–1415	564–650
	Avena	1350–1378	358–511
3: Frutas	Uvas	1067	368
	Tomates	–	672
	Limones/naranjas	–	768
	Fruta fresca	865–1067	–
	Fruta congelada	625–801	–
4: Pescados y Mariscos	Pescado fresco	967	–
	Pescado congelado	1056	–
9: Tubérculos	Almidón	1500	–

**Fuente:** Citado por Fellows (2000:37)

**TABLA N° 3.7H  
DENSIDAD APARENTE DE FRUTAS Y VEGETALES**

<b>GRUPO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>%Y<sub>w</sub> AGUA</b>	<b>T(°C)</b>	<b>DENSIDAD APARENTE (kg.m<sup>-3</sup>)</b>
2: Verduras y Hortalizas	Remolacha	89,5	28,0	1530
	Tomate de árbol	84,5	20,0	1031
	Cebolla	87,3	28,0	970
	Pepino	95,4	28,0	950
	Zanahoria	90,0	28,0	1040
	Aguacate	64,7	28,0	1060
3: Frutas	Plátano	75,7	27,0	980
	Fresa	88,8	28,0	900
	Limón	91,8	28,0	930
	Lulo o cocona	89,3	20,0	1046
	Manzana	87,3	25,0	843
	Naranja	85,9	28,0	1030
	Pera	86,8	28,0	1000
	Piña	84,9	27,0	1010
	Papa	81,4	25,5	1040

**Fuente:** Citado por Orrego (2003: 64)

### 3.8 CONDUCTIVIDAD DE LOS ALIMENTOS

**TABLA N° 3.8A**  
**CONDUCTIVIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

COMPONENTE	ECUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA $T$ (°C)
Agua	$k = 0,57109 + 1,7625 \cdot 10^{-3}T - 6,7036 \cdot 10^{-6}T^2$
Proteína	$k = 0,17881 + 1,1958 \cdot 10^{-3}T - 2,7178 \cdot 10^{-6}T^2$
Grasa	$k = 0,18071 - 2,7604 \cdot 10^{-3}T - 1,7749 \cdot 10^{-7}T^2$
Carbohidrato	$k = 0,20141 + 1,3874 \cdot 10^{-3}T - 4,3312 \cdot 10^{-6}T^2$
Ceniza	$k = 0,32962 + 1,4011 \cdot 10^{-3}T - 2,9069 \cdot 10^{-6}T^2$
Fibra	$k = 0,18331 + 1,2497 \cdot 10^{-3}T - 3,1683 \cdot 10^{-6}T^2$
Hielo	$k = 2,21960 - 6,2489 \cdot 10^{-3}T + 1,0154 \cdot 10^{-4}T^2$

**Fuente:** Choi y Okos (1986) citado por Barbosa et al. (2005: 345)

**Nota:**  $k$ : Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ); Temperatura entre  $-40$  y  $150^\circ C$  (Ahmed, et al. 2006: 449)

**TABLA N° 3.8B**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA CARNE**

ALIMENTO	CORRELACIONES	Nota
Carne	$k = 0,080 + 0,52x$	(a)
	$k = -0,28 + 1,9x - 0,0092t$	(b)

**Fuente:** Pham y Willix (1989) citados por Ozilgen (1998:81)

**Nota:** (a) Válido para el rango de temperaturas entre  $0$  y  $60^\circ C$ ; (b) Válido para el rango de temperaturas entre  $-40$  y  $-5^\circ C$ ;  $k$ : Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $x$ : Contenido de humedad ( $kg$  agua. $kg$  sólido seco $^{-1}$ );  $t$ : Temperatura en  $^\circ C$ .

**TABLA N° 3.8C**  
**DATA PARA LA ESTIMACIÓN DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICA DE FRUTA SELECCIONADA USANDO LA ECUACIÓN N° 9**

Material	$k_1$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$k_0$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$E_1$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )	$E_0$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )
Maíz	1,580	0,070	7,2	
Tomate	0,680	0,220	0,2	5,0
Manzana	0,589	0,287	2,4	11,7
Naranja	0,642	0,106	1,3	0,0
Pera	0,658	0,270	2,4	1,9
Carne de Res	0,568	0,280	2,2	3,2
Leche	0,665	0,212	1,7	1,9
Papa	0,611	0,049	0,0	47,0

**Fuente:** Maroulis, et al. (2003: Apéndice III)



**TABLA N° 3.8D**  
**VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA REPRESENTATIVA**

GRUPOS	ALIMENTO O COMPONENTE DEL ALIMENTO	% $y_w$	T (°C)	Conductividad (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
2: Verduras y Hortalizas 3: Frutas	Frutas y vegetales	80	20	0,400 ± 0,200
5: Carnes	Carnes	74–84	10	0,400 ± 0,150
	Res (4–9% grasa)	75–79	0	0,470
			20	0,500
Otros	Aire	0	0	0,023
	Agua	100	0	0,554
			80	0,686
	Hielo	100	0	2,240
Materiales porosos (granos y harinas)	5	20	0,100 ± 0,010	

**Fuente:** Citado por Rao (2005:180)

**Nota:**  $y_w$ : Humedad (kg agua. kg alimento<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 3.8E**  
**VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS A DIVERSAS TEMPERATURAS Y CONTENIDOS DE HUMEDAD**

GRUPO	Producto	Característica adicional	% $y_w$	Temp mín (°C)	Temp máx(°C)	K (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )
4: Pescados y Mariscos	Bacalao		83	2,8	2,8	0,544
5: Carnes	Cerdo	Perpendicular a las fibras	75,1	6	6	0,488
	Cerdo	Perpendicular a las fibras	75,1	60	60	0,54
	Cerdo	paralelas a las fibras	75,9	4	4	0,443
	Cerdo	paralelas a las fibras	75,9	61	61	0,489
	Cordero	Perpendicular a las fibras	71,8	5	5	0,45
	Cordero	Perpendicular a las fibras	71,8	61	61	0,478
	Cordero	paralelas a las fibras	71	5	5	0,415
	Cordero	paralelas a las fibras	71	61	61	0,422
	Ternera	Perpendicular a las fibras	75	6	6	0,476
	Ternera	Perpendicular a las fibras	75	62	62	0,489
	Ternera	paralelas a las fibras	75	5	5	0,441
	Ternera	paralelas a las fibras	75	60	60	0,452

**Fuente:** Reidy (1968) citado por Barbosa, et al. (2005:341)

**TABLA N° 3.8F**  
**VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS A**  
**DIVERSAS TEMPERATURAS Y CONTENIDOS DE HUMEDAD (CONT.)**

GRUPO	PRODUCTO	CARACTERÍSTICA ADICIONAL	Y <sub>w</sub> (%)	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	k
3: Frutas	Fresas	-	-	-14	25	0,675
	Manzana	-	85,60	2	36	0,393
	Manzana	Zumo	87,40	20	20	0,559
	Manzana	Zumo	87,40	80	80	0,632
	Manzana	Zumo	36,00	20	20	0,389
	Manzana	Zumo	36,00	80	80	0,436
	Naranja	-	-	30	30	0,431
	Pomelo	entero	-	30	30	0,45
4: Pescados	Pescado	músculo	-	0	10	0,557
5: Carnes	Salmón	Perpendicular a las fibras	73,00	4	4	0,502
	Vaca	Magra,perpend.fibras	78,90	7	7	0,476
	Vaca	Magra, perpend.fibras	78,90	62	62	0,485
	Vaca	Magra, paralela fibras	78,70	8	8	0,431
	Vaca	Magra, paralela fibras	78,70	61	61	0,447
	Vaca	Grasas	-	24	38	0,19
	Pava	Pechuga perpendicular	74,0	3	3	0,502
		Pechuga perpendicular	74	3	3	0,523
	Pollo	músculo	69,10 a 74.90	4	27	0,412
Salchicha	-	64,72	24	24	0,407	
6: Leches y derivados	Leche	-	-	37	37	0,53
	Leche	Condensada	90,00	24	24	0,571
		Condensada	50,00	26	26	0,329
		Condensada	-	78	78	0,364
	Leche	Desnatada	-	1,5	1,5	0,538
7: Productos azucarados	Miel	-	12,60	2	2	0,502
	Miel	-	80,00	2	2	0,344
	Miel	-	14,80	69	69	0,623
8: Leguminosas	Guisantes	-	-	3	17	0,312
9: Tubérculos	Papa	Almidón gel	-	1	67	0,04
Otros	Huevo	Clara	-	36	36	0,577
	Huevo	Yema	-	33	33	0,45

**Fuente:** Reidy (1968) citado por Barbosa, et al. (2005:341)

**Nota:**k: Conductividad térmica ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )

**TABLA N° 3.8G  
CONDUCTIVIDAD DE PRODUCTOS LIOFILIZADOS**

<b>Grupo</b>	<b>Producto</b>	<b>k (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>)</b>
3: Frutas	Melocotón	0,016
	Manzana	0,016-0,035
5: Carnes	Pavo	0,014
	Ternera	0,035-0,038
6: Leches y derivados	Leche	0,022
Otros	Setas	0,010
Otros	Extracto de café	0,033
Otros	Gelatina	0,016

**Fuente:** Schwartzberg (1982) citado por Ibarz y Barbosa (2005:616)

**TABLA N° 3.8H  
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PANEER LIOFILIZADO A  
DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN**

<b>TEMPERATURA DE LA PLACA SUPERIOR DE CALENTAMIENTO(K)</b>	<b>PRESIÓN DE LA CÁMARA (mbar)</b>	<b>TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CAPA SECA (K)</b>	<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>
308	0,00572	290,98	0,03826
308	0,0043	292,38	0,02634
314	0,0045	288	0,0426
300,51	0,026	278,83	0,04646

**Fuente:** Chakraborty et al. (2006:600)

**Nota:** Paneer: es un queso fresco originario de la India, se trata de un queso cuajado, no curado, ácido, que no se funde. Ha sido cuajado calentando la leche con limón u otro alimento ácido.

**TABLA N° 3.8I  
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MANGO LIOFILIZADO A  
DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN**

<b>TEMPERATURA DE LA PLACA SUPERIOR DE CALENTAMIENTO(K)</b>	<b>PRESIÓN DE LA CÁMARA (mbar)</b>	<b>TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CAPA SECA (K)</b>	<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>
315	0,0207	279,45	3.91 E-02
308	0,05	285,7	3.82 E-02
309	0,0207	295,1	4.1 E-02

**Fuente:** Chakraborty et al. (2006:600)

**TABLA N° 3.8J**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS SELECCIONADOS**

GRUPO	ALIMENTO	K	T
General	Alimentos liofilizados	0,01–0,04	0,0
2: Verduras y Hortalizas	Coliflor	0,80	-6,6
3: Frutas	Jugo de manzana	0,56	20,0
	Naranja	0,41	0,0-15,0
6: Leches y derivados	Leche entera <sup>a</sup>	0,56	20,0
4: Pescados y Mariscos	Bacalao congelado	1,66	-10,0
5: Carnes	Carne de res congelada <sup>b</sup>	1,30	-10,0
	Puerco (costado) <sup>b</sup>	0,48	3,8
8: Leguminosas	Arvejas verdes	0,80	-12,1
Otros	Huevo	0,96	-8,0
Otros	Hielo	2,25	0,0
Otros	Agua	0,57	0,0

**Fuente:** Citado por Fellows (2000: 55)

**Nota:** (a) Asumiendo que la corriente de convección están ausentes, b) Flujo de calor paralelo a las fibras; K: Conductividad térmica ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ); T: Temperatura de medición ( $^{\circ}C$ )

**TABLA N° 3.8K**  
**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SUSTANCIAS LIOFILIZADAS**

GRUPO	SUSTANCIA ALIMENTARIA	PRESIONES (mmHg)	CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	
3: Frutas	Manzana	0.001–760	0,016	0,042
	Durazno	0.001–760	0,016	0,043
	Pera	0.02–760	0,023	0,187
	Manzana	0,02-760	0,023	0,199
	Manzana	0.01–0.3	0,035	0,116
4: Pescados y Mariscos	Salmon	0,15	0,042	0,133
	Pescadilla	0,08	0,019	0,026
5: Carnes	Carne de res	0.5–2.4	0,035	0,055
	Carne de res	0.001–760	0,038	0,066
	Carne de res	0.02–760	0,038	0,201
	Carne de res	0.007–80	0,035	0,064
	Carne de res	0.2–3.0	0,052	0,073
6: Leches y derivados	Leche	0.01–0.3	0,023	0,081
9: Tubérculos	Almidón de papa	0.03–760	0,009	0,042
Otros	Albúmina de huevo	0.03–760	0,014	0,042
Otros	Champiñones	0.3–760	0,010	0,036

**Fuente:** Adaptado de lo citado por Mujumdar (2006:276)

**TABLA N° 3.8L**  
**CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE VARIOS ALIMENTOS**  
**LIOFILIZADOS**

GRUPO	Material	Temp. superficie muestra (°C)	Presión en la cámara (Pa)	Temp. <sup>a)</sup> (°C)	Presión <sup>a)</sup> (Pa)	Conductividad térmica (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
3: Frutas	Manzana rebanada	-10-10	20-30	17,7- 3,4	38,4-80,0	0,056-0,123
	Manzana estrujada (A) <sup>b)</sup>	0-40	20-30	13,6-8,5	33,5-46,2	0,110-0,130
	Manzana estrujada (B) <sup>b)</sup>	10-70	20-30	11,8-19,7	23,7-29,0	0,068-0,073
4: Pescados y Mariscos	Camarones	30-50	7-133	4,2-21,2	53,6-263	0,038-0,086
5: Carnes	Res	30-100	7-30	3,0-40,8	38,2-78,5	0,036-0,084
	Res picada	40	2,7-13,3	7,3-10,3	—	0,050-0,069
Otros	Solución de café (6-30%)	20-53	10-95	5,3-14,8	—	0,0062-0,172
	Solución de café (29-45%)	-7-71	7-12	14,1-26,1	47,1-66,8	0,153-0,277
	Solución de café (10-36%)	60	22-34	12,9-20,2	24,9-64,9	0,063-0,144

**Fuente:** Sagara (2001: 187); Nota: a) Valor promedio de la capa seca, b) Congelamiento rápido, b) congelamiento lento

### 3.9 CALOR ESPECÍFICO DE LOS ALIMENTOS

**TABLA N° 3.9A**  
**CALOR ESPECÍFICO (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

COMPONENTE	ECUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA (°C)
Agua	$C_{PA1} = 4081,7 - 5,3062t + 9,9516 \cdot 10^{-1}t$
	$C_{PA2} = 4176,2 - 9,0864 \cdot 10^{-2}t + 5,4731 \cdot 10^{-3}t^2$
Hielo	$C_p = 2062,3 + 6,0769t$
Carbohidrato	$C_p = 1548,8 + 1,9625t - 5,9399 \cdot 10^{-3}t^2$
Ceniza	$C_p = 1092,6 + 1,8896t - 3,6817 \cdot 10^{-3}t^2$
Fibra	$C_p = 1845,9 + 1,8306t - 4,6509 \cdot 10^{-3}t^2$
Grasa	$C_p = 1984,2 + 1,4733t - 4,8008 \cdot 10^{-3}t^2$
Proteína	$C_p = 2008,2 + 1,2089t - 1,3129 \cdot 10^{-3}t^2$

**Fuente:** Choi y Okos (1986) citado por Barbosa et al. (2005: 345)

**Nota:** t: Temperatura en °C, C<sub>PA1</sub>= Para el intervalo de temperaturas -40 a 0°C; C<sub>PA2</sub>= Para el intervalo de temperaturas de 0 a 150°C.

**TABLA N° 3.9B**  
**CALORES ESPECÍFICOS APARENTES DEL BACALAO**

TEMPERATURA (°C)	CALOR ESPECÍFICO APARENTE (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		
	EXPERIMENTAL (a)	PREDICHA (b)	PREDICHA (c)
-40	1800	2300	1900
-30	2000	2400	2000
-20	2500	2700	2300
-18	2700	2800	2500
-16	2900	3000	2600
-14	3200	3200	2900
-12	3600	3600	3300
-10	4100	4300	4000
-9	4600	4800	5100
-7	6200	6500	6400
-5	6200	10800	10800
-3	26800	26100	26900
-1	108600	217400	227500
0	4100	3800	3800
10	3700	3800	3800
20	3700	3800	3800

**Fuente:** Riedel, Schwartzberg y Chen citados por Rao (2005: 218)

**Nota:** (a) Riedel (1956), Schwartzberg (1976), Chen (1985).

**TABLA N° 3.9C**  
**CALORES ESPECÍFICOS DE DIVERSOS ALIMENTOS**

<b>GRUPO</b>	<b>ALIMENTO</b>		<b>AGUA (%)</b>	<b>CALOR ESPECÍFICO (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>
2: Verduras y Hortalizas	Pepino		96,1	4103
	Zanahoria	fresca	88,2	3810 a 3935
3: Frutas	Manzana	cruda	84,4	3726 a 4019
4: Pescados y Mariscos	Pescado		80,0	3600
	Pescado	fresco	76,0	3600
	Sardinias		57,4	3014
5: Carnes	Tocino		49,9	2010
	Vaca	carne magra	71,7	3433
		Carne asada	60,0	3056
		Hamburguesa	68,3	3520
	Ternera	68,0	3223	
6: Leches y derivados	Leche	Entera pasteurizada	87,0	3852
		Desnatada	90,5	3977 a 4019
	Queso	fresco	65,0	3265
9: Tubérculos	Papa		79,8	3517
	Papa		75,0	3517
Otros	Huevo	Yema	49,0	2810

**Fuente:** Reidy (1968) citado por Barbosa, et al. (2005: 344)

**TABLA N° 3.9D**  
**CALOR ESPECÍFICO DEL ALIMENTO SELECCIONADO**

<b>GRUPO</b>	<b>ALIMENTO</b>	<b>CALOR ESPECÍFICO (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
3: Frutas	Manzanas	3590	ambiente
	Manzanas	1880	congelado
4: Pescados y Mariscos	Bacalao	3760	ambiente
	Bacalao	2050	congelado
5: Carnes	Cordero	2800	Ambiente
	Cordero	1250	Congelado
9: Tubérculos	Papas	3430	Ambiente
	Papas	1800	Congelado
Otros	Hielo	2040	0
	Agua	4180	15
	Vapor de agua	2050	100

**Fuente:** Citado por Fellows (2000: 56)

**TABLA N° 3.9E**  
**CAPACIDAD CALORÍFICA DE DIFERENTES ALIMENTOS**  
**LIOFILIZADOS A DIVERSAS TEMPERATURAS**

TEMP (K)	CAPACIDAD CALORÍFICA (J.kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )			
	PANEER	HÍGADO DE CORDERO	CAMARÓN	PESCADO "HILSA"
258	1404,14	1000,52	924,53	1562,19
259	1428,13	1013,06	930,61	1600,60
260	1453,13	1022,50	938,08	1632,25
261	1472,52	1040,17	963,24	1656,89
262	1500,16	1060,57	992,36	1692,19
263	1522,72	1071,85	1009,88	1721,28
264	1541,37	1082,59	1016,04	1750,65
265	1562,67	1099,70	1035,17	1787,04
266	1591,56	1111,33	1057,87	1818,18
267	1611,04	1118,00	1071,88	1834,68
268	1635,91	1124,95	1087,34	1845,97
269	1650,66	1122,32	1095,36	1855,55
270	1673,02	1122,19	1117,65	1889,14
271	1699,41	1128,51	1121,96	1927,55
272	1726,23	1155,43	1121,76	1968,55
273	1758,02	1180,93	1145,31	2012,43
274	1785,61	1193,53	1152,89	2034,89
275	1822,46	1203,70	1156,26	2068,85
276	1870,35	1231,91	1161,31	2123,73
277	1928,83	1266,18	1181,99	2192,44
278	1971,55	1283,47	1187,63	2242,96
279	1985,70	1296,62	1185,20	2286,46
280	2004,53	1313,64	1201,78	2339,34
281	2045,46	1331,53	1215,65	2373,79
282	2103,94	1351,71	1223,96	2411,27
283	2177,71	1374,66	1261,05	2467,11
284	2254,86	1401,15	1233,06	2512,38
285	2324,63	1425,95	1175,13	2526,98
286	2375,28	1424,22	1194,69	2509,09
287	2442,12	1462,59	1240,38	2470,91
288	2494,71	1532,36	1278,25	2436,14

**Fuente:** Chakraborty et al. (2006:602)

**Nota:** Paneer: es un queso fresco originario de la India, se trata de un queso cuajado, no curado, ácido, que no se funde. Ha sido cuajado calentando la leche con limón u otro alimento ácido; Pescado "Hilsa": Tipo de pescado originario de Bangladesh.



**TABLA N° 3.9E**  
**CAPACIDAD CALORÍFICA DE DIFERENTES ALIMENTOS**  
**LIOFILIZADOS A DIVERSAS TEMPERATURAS (CONT.)**

TEMPERATURA (K)	CAPACIDAD CALORÍFICA (J.kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )			
	PANEER	HÍGADO DE CORDERO	CAMARÓN	PESCADO "HILSA"
290	2345,64	1492,72	1241,52	2320,50
291	2207,28	1479,85	1246,97	2260,19
292	2101,74	1506,85	1257,18	2199,25
293	1996,96	1540,57	1271,65	2141,90
294	1867,70	1599,58	1279,06	2111,08
295	1748,86	1656,70	1321,10	2093,40
296	1646,37	1691,32	1313,38	2079,95
297	1546,90	1714,86	1282,79	2057,27
298	1479,46	1749,21	1338,87	2060,49
299	1440,24	1783,86	1377,95	2082,81
300	1425,05	1808,72	1353,13	2098,43
301	1447,83	1832,46	1352,96	2112,21
302	1528,11	1865,46	1361,46	2181,13
303	1640,92	1909,68	1360,13	2257,30
304	1756,12	1949,28	1422,81	2297,69
305	1855,76	1981,71	1443,56	2321,73
306	1947,57	2030,10	1419,93	2350,24
307	2002,49	2060,70	1433,37	2337,35
308	2036,74	2091,48	1469,33	2276,84
309	2073,83	2123,39	1499,34	2225,33
310	2112,23	2177,35	1498,57	2205,35
311	2081,60	2228,34	1489,75	2171,83
312	1994,85	2259,28	1489,31	2131,63
313	1899,78	2307,05	1504,36	2104,15
314	1831,24	2362,36	1519,05	2092,30
315	1781,15	2405,36	1549,86	2079,63
316	1750,55	2466,04	1589,18	2074,03
317	1729,25	2513,11	1604,78	2104,47
318	1736,74	2574,07	1635,29	2205,18
319	1764,87	2636,77	1641,44	2315,72

**Fuente:** Chakraborty et al. (2006:602)

**Nota:** Paneer: es un queso fresco originario de la India, se trata de un queso cuajado, no curado, ácido, que no se funde. Ha sido cuajado calentando la leche con limón u otro alimento ácido; Pescado "Hilsa": Tipo de pescado originario de Bangladesh.

**3.10 DIFUSIVIDAD DE LA HUMEDAD DE LOS ALIMENTOS**  
**TABLA N° 3.10A**  
**DATA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD DE FRUTA**  
**SELECCIONADA USANDO LA ECUACIÓN N° 15**

<b>Material</b>	$D_1$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	$D_0$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	$E_1$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$E_0$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )
Maíz	4,4x10 <sup>-9</sup>	0	0	10,4
Manzana	7,97x10 <sup>-10</sup>	1,16x10 <sup>-10</sup>	16,7	56,6
Plátano	2,03x10 <sup>-9</sup>	4,66x10 <sup>-10</sup>	9,9	4,6
Uvas	5,35x10 <sup>-9</sup>	0	34	10,4
Zanahoria	2,47x10 <sup>-9</sup>	1,54x10 <sup>-9</sup>	13,9	11,3
Ajo	5,33x10 <sup>-10</sup>	1,68x10 <sup>-11</sup>	15,4	7,1
Cebolla	1,45x10 <sup>-8</sup>	0	70,2	10,4
Papa	1,57x10 <sup>-9</sup>	4,31x10 <sup>-10</sup>	44,7	76,9

**Fuente:** Maroulis, et al. (2003: Apéndice III)

**TABLA N° 3.10B**  
**DIFUSIVIDAD EFECTIVA TÍPICA DE LOS ALIMENTOS A 30°C**

<b>GRUPO</b>	<b>ALIMENTO</b>	<b>Humedad, kg/kg sólido seco</b>	$D_{eff}$ , x 10 <sup>10</sup> m <sup>2</sup> /s
1: Cereales	Grano de maíz	0,2	0,4
	Grano de trigo	0,2	0,3
	Arroz	0,2	0,4
2: Verduras y Hortalizas	Zanahoria	0,3	2
3: Frutas	Manzana	0,5	2
	Fruta liofilizada	0,08	50
4: Pescados y Mariscos	Bacalao	0,5	2
	Pez caballa	0,4	0,5
5: Carnes	Carne picada	0,6	1
9: Tubérculos	Papa	0,3	5

**Fuente:** Saravacos y Maroulis (2001) citado por Rao, et al. (2005: 377)

**TABLA N° 3.10C**  
**DIFUSIVIDADES EFECTIVAS PARA PRODUCTOS ALIMENTARIOS**

GRUPO	ALIMENTO	T(°C)	Xw	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
2: Verduras y Hortalizas	Zanahoria	30 a 70	0,01 – 5,00	$8,00 \times 10^{-10}$ – $8,00 \times 10^{-9}$
	Ajo	22 a 58	0,20-1,60	$1,10 \times 10^{-11}$ – $2,00 \times 10^{-10}$
	Porro	38 a 64		$1,10 \times 10^{-9}$ – $6,60 \times 10^{-9}$
	Cebolla	62	6,00	$1,60 \times 10^{-10}$
	limón	30		$2,63 \times 10^{-11}$
3: Frutas	Manzana	66		$6,40 \times 10^{-9}$
		30 a 70	0,10–1,50	$1,00 \times 10^{-11}$ – $3,30 \times 10^{-9}$
		30	0,13–0,15	$4,90 \times 10^{-11}$
	Liofilizada	30		$9,00 \times 10^{-11}$ – $7,00 \times 10^{-10}$
	Higo	55 a 85		$1,13 \times 10^{-10}$ – $6,48 \times 10^{-10}$
	Palta	58	(aprox.5 a 9 % aceite)	$1,20 \times 10^{-9}$ – $1,80 \times 10^{-9}$
	Plátano	20 a 4	0,01-3,50	$3,00 \times 10^{-13}$ – $2,10 \times 10^{-10}$
	liofilizada	25	0,13	$3,10 \times 10^{-11}$
	liofilizada	25	0,127	$3,07 \times 10^{-11}$
	Pera	65	6,50	$9,60 \times 10^{-10}$
	Piña	20 a 60	0,20-2,00	$1,62 \times 10^{-10}$ – $1,20 \times 10^{-9}$
Coco	45	0,20	$1,00 \times 10^{-10}$	
4: Pescados y Mariscos	Pescado (varios)	30	0,05-0,30	$1,30 \times 10^{-11}$ – $3,10 \times 10^{-10}$
	Pescadilla	30	(0,105% grasa)	$3,25 \times 10^{-11}$
	Pescado (arenque)	30	(2% grasa)	$1,90 \times 10^{-11}$
	Pez espada	40 a 55	1,00-5,00	$2,50 \times 10^{-10}$ – $8,90 \times 10^{-10}$
	Pez	30		$3,61 \times 10^{-11}$
	Bacalao	30	(0,05% grasa)	$3,40 \times 10^{-11}$
	Salmón	30	(4% grasa)	$2,20 \times 10^{-11}$
	Calamar	34.3	0,15-2,74	$8,23 \times 10^{-11}$
5: Carnes	Pavo	22	0,04	$8,00 \times 10^{-14}$
	Cerdo (músculo)	1 a 33		$1,20 \times 10^{-11}$ – $8,60 \times 10^{-11}$
6: Leches	Leche seca	25	0,13	$2,1 \times 10^{-11}$
8: Legum.	Haba de Soja	25	0,14	$4,3 \times 10^{-10}$
9: Tubérc.	Papa	30	3,39-4,96	$1,3 \times 10^{-10}$ – $3,2 \times 10^{-10}$
		30	0,01-0,10	$8,3 \times 10^{-12}$
	Raíz de tapioca	55		$3,5 \times 10^{-11}$
Otros	Café extra	30 a 70	0,08-1,50	$1,0 \times 10^{-11}$ – $3,3 \times 10^{-10}$

**Fuente:** Adaptado de lo citado por Heldman et al. (2007:648)

**Nota:** Los valores han sido seleccionados considerando aquellos de menor temperatura de trabajo y en especial los obtenidos por liofilización; Xw (kg agua. kg sólido seco<sup>-1</sup>)

**TABLA N° 3.10D**  
**DIFUSIVIDAD DE LA HUMEDAD DE LA PAPA LIOFILIZADA A 30°C**

ACTIVIDAD DE AGUA	$D_{eff} (m^2 \cdot s^{-1}) \times 10^{12}$
0,09	302,85
0,26	236,61
0,38	198,10
0,50	167,73
0,62	131,05
0,78	105,89

**Fuente:** Rao, et al. (2005: 375)

**Nota:** Los datos fueron obtenidos a partir de la gráfica brindada siendo extraídos con ayuda del software OriginPro 9

**TABLA N° 3.10E**  
**DIFUSIVIDAD DE LA HUMEDAD COMO FUNCIÓN DE LA POROSIDAD EN VARIOS MATERIALES AMILÁCEOS**

POROSIDAD	$D_e (m^2 \cdot s^{-1}) \times 10^{10}$
0,24	3,49
0,26	5,04
0,31	9,28
0,40	15,39
0,42	17,34
0,50	23,85
0,53	25,81
0,59	29,65
0,60	31,20
0,65	34,82

**Fuente:** Rao, et al. (2005: 375)

**Nota:** Los datos fueron obtenidos a partir de la gráfica brindada, siendo extraídos con ayuda del software OriginPro 9

**TABLA N° 3.10F**  
**PARÁMETROS DE LOS MODELOS DE LA DIFUSIVIDAD CONSTANTE SIMPLIFICADA PARA LA LIOFILIZACIÓN DE LOCO (Concholepas concholepas)**

Corrida	$D_{eff} (m^2 \cdot s^{-1})$
1	7,84E-11
2	7,66E-11
3	2,093E-11
4	2,49E-11

**Fuente:** Reyes, et al. (2011: 1392)

**ANEXO N°4  
PROPIEDADES DEL AGUA**

**TABLA N° 4.A  
DATOS DE CRECIMIENTO DE HIELO A DIFERENTES CONDICIONES**

<b>Autor primario</b>	<b>Fecha</b>	<b>Geom.</b>	<b>Aire</b>	$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$W \times 10^3$ (kg/kg)	$V_a$ (m/s)	$e_h$ (mm)	$\rho_h$ (kg/m <sup>3</sup> )
Abdel-wahed	1984	F.P.	F.C.	-18,0	14,0a18,0	5,6a7,6	3,5a6,0	2,0 a10,0	N/A
Brian	1970	P.P.	F.C.	-24,0a-9,4	1,0a 34,0	3,0a3,4	2,6a11,0	1,8a 8,9	67a 90
Hosoda	1967	F.P.	F.C.	-23,0a-13,0	0,0 a 2,0	4,7a5,8	0,5a5,0	0,5a5,0	200 a500
Jones	1975	F.P.	F.C.	-34,0a-15,0	23,0	6,0a14,1	1,3a7,6	0,5a5,0	N/A
Q'Neal	1984	P.P.	F.C.	-12,0a -5,0	5,0a12,0	3,8a5,1	2,2a 16,4	0,5a 4,0	200 a430
Schulte	1982	F.P.	F.C.	-30,6	-18,0a29,0	10,2a24,0	1,0 a5,1	2,4a5,8	N/A
Thigpen	1964	F.P.	F.C.	-54,0a -5,0	18,0a34,0	2,3a 19,9	1,5 a 12,0	0,3 a 6,1	24a344
Tokura	1988	F.P.	F.C.	-16,0a -11,0	20,0	6,8a9,6	2,0a 4,0	0,4a4,0	N/A
Yonko	1967	F.P.	F.C.	-28,0a -5,0	21,0a23,0	7,5a16,1	1,3a5,25	5,1	N/A

**Fuente:** Mao (1991:10).

**Nota:** Geom.: Geometría del Intercambiador de Calor;  $T_p$ : Temperatura de la pared;  $T_a$ : Temperatura del aire;  $W$ : Razón de humedad;  $V_a$ : Velocidad de aire;  $e_h$ : Espesor de hielo;  $\rho_h$ : Densidad del hielo (kg/m<sup>3</sup>); F.P. = Plato Plano; P.P.= Platos Paralelos; A.= Anular; C.= Cilindro; F.C.= Aire Forzado por convección; N.C.= Convección natural de Aire

**TABLA N° 4.B**  
**PRESIÓN DE VAPOR DEL HIELO (MBAR) A DIFERENTES**  
**TEMPERATURAS (°C)**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión de vapor (mbar)</b>	<b>Presión de vapor (Pa)</b>
-98	0,00002	0,0020
-90	0,00009	0,0091
-80	0,00053	0,0537
-76	0,00103	0,1044
-70	0,00259	0,2624
-60	0,01077	1,0913
-55	0,02106	2,1339
-50	0,03939	3,9912
-40	0,12876	13,0466
-36	0,20088	20,3542
-30	0,38110	38,6150
-25	0,63451	64,2917
-20	1,03441	104,8116
-15	1,65425	167,6169
-10	2,59935	263,3791
-5	4,01633	406,9546
0	6,10381	618,4685

Fuente: Heldman et al. (2007:308).

**TABLA N° 4.C**  
**CONTENIDO DE HUMEDAD ABSOLUTA DEL VAPOR SATURADO A LA**  
**PRESIÓN ATMOSFÉRICA**

<b>TEMPERATURA ABSOLUTA DE BULBO SECO (°C)</b>	<b>HUMEDAD ABSOLUTA DEL VAPOR SATURADO (kg/kg)</b>
-20	0,0006
-10	0,0016
-5	0,0025
0	0,0038
5	0,0054
20	0,0147
30	0,0272
35	0,0366
45	0,0643
50	0,0863

Fuente: [www.devatec.com/.../pdf/Learn\\_more\\_on\\_Humidification-esp.pdf](http://www.devatec.com/.../pdf/Learn_more_on_Humidification-esp.pdf)

## ANEXO N°5

### INFORMACIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE VACÍO

#### 5.1. BOMBAS DE VACÍO DE DOBLE ETAPA-VARIAN, INC. VACUUM TECHNOLOGIES



Technical Specifications								
	Hz	Units	DS 102	DS 202	DS 302	DS 402	DS 602	DS 1002
Free air displacement	60 50	l/min (cfm) l/min (m <sup>3</sup> /h)	114 (4) 95 (5.7)	192 (6.8) 160 (9.6)	285 (10) 237 (14.2)	410 (14.5) 342 (20.5)	605 (21.4) 504 (30.2)	1010 (35.7) 842 (50.5)
Pumping speed*	60 50	cfm m <sup>3</sup> /h	3.5 5	5.8 8.3	8.2 11.6	12.3 17.4	18.3 26	31 44
Ultimate partial pressure*			10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
Ultimate total pressure*		mbar	2 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>
Ultimate total pressure with gas ballast*		mbar	2 x 10 <sup>-2</sup>	2 x 10 <sup>-2</sup>	2 x 10 <sup>-2</sup>	1 x 10 <sup>-2</sup>	1 x 10 <sup>-2</sup>	1 x 10 <sup>-2</sup>
Water vapor tolerance		mbar	15	15	20	30	30	20
Water vapor capacity		g/h	60	100	160	350	550	650
Oil capacity min/max		l	0.2/0.5	0.25/0.6	0.25/0.6	0.5/1	0.5/1	2.3/3.1
Motor rating 1ph	50/60	kW	0.45/0.55	0.45/0.55	0.45/0.55	0.75/0.90	0.75/0.90	
Motor rating 3ph	50/60	kW				0.75/0.90	0.75/0.90	1.10/1.30
Nominal rotation speed	60 50	rpm rpm	1800 1500	1800 1500	1800 1500	1800 1500	1800 1500	1800 1500
Weight		kg lb	22 48	25 55	25 55	35 77	35 77	62 136
Inlet flange		DN	25KF	25KF	25KF	25KF	25KF	40KF
Exhaust flange		DN	25KF	25KF	25KF	25KF	25KF	40KF

\* According to PNEUROP 6602

**Fuente:** <http://accms04.physik.rwth-aachen.de/~chchung/ams/trd/tvt/rotaryvane.pdf>

#### 5.2. BOMBAS DE VACÍO DE DOBLE ETAPA-WELCH-ILMVAC

- High vacuum to < 0.003torr
- Isolation device protects samples & system
- Portable, compact pump

**DIRECT DRIVE HIGH VACUUM PUMP** is effective for roughing vacuum chambers to < 0.003torr. The pump is also effective for roughing annular spaces and transfer lines to a deep vacuum. Various models have flow from 73 to 320 l/min. Pumps are compact and transportable. The optional exhaust filter is recommended for elimination of oil mist during high vacuum roughing applications. See p. 43 for the correct exhaust filter for your model.



8912

For Specifications & Ordering Information, See p. 30

**Fuente:** [http://www.welchvacuum.com/pdfs/2012%20catalogs%20and%20prices/2010\\_Catalog\\_Assembly\\_2011-2012\\_V032712%20to%20sub.pdf](http://www.welchvacuum.com/pdfs/2012%20catalogs%20and%20prices/2010_Catalog_Assembly_2011-2012_V032712%20to%20sub.pdf)

### 5.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE BOMBAS DE VACÍO DE DOBLE ETAPA



#### Model 350

100 l/min. • 3.5 CFM • 6 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 2800

800 l/min. • 28 CFM • 48 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 700

200 l/min. • 7 CFM • 12 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 3500

1000 l/min. • 35 CFM • 60 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 1400

400 l/min. • 14 CFM • 24 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 5300

1500 l/min. • 53 CFM • 90 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 2100

600 l/min. • 21 CFM • 36 m<sup>3</sup>/hr.

#### Model 6400

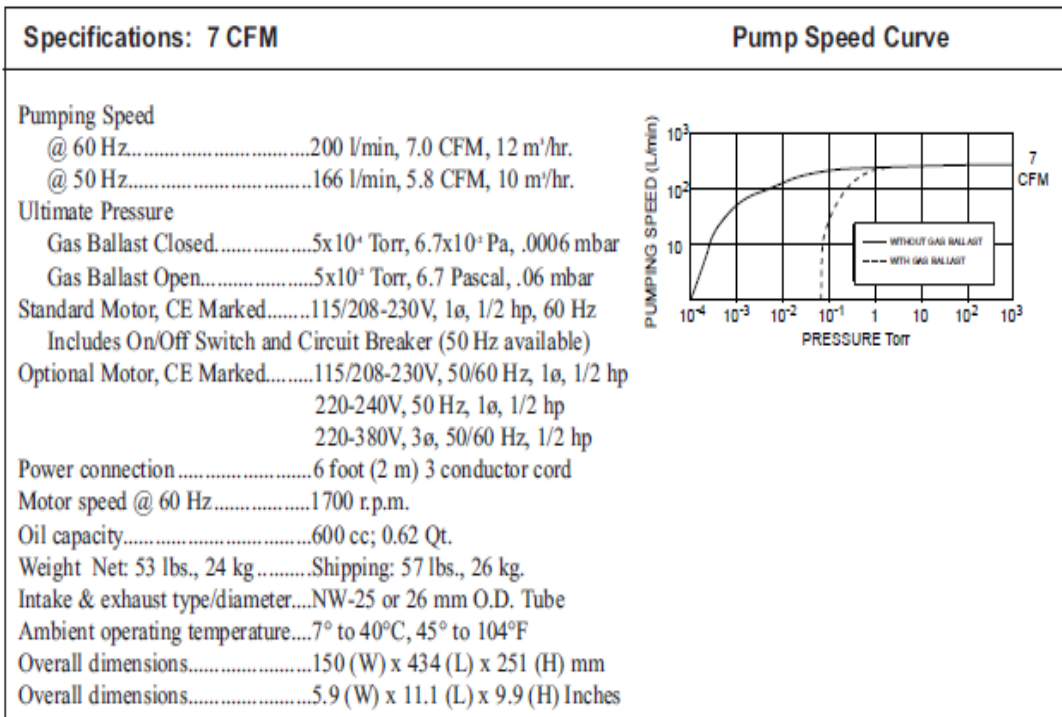
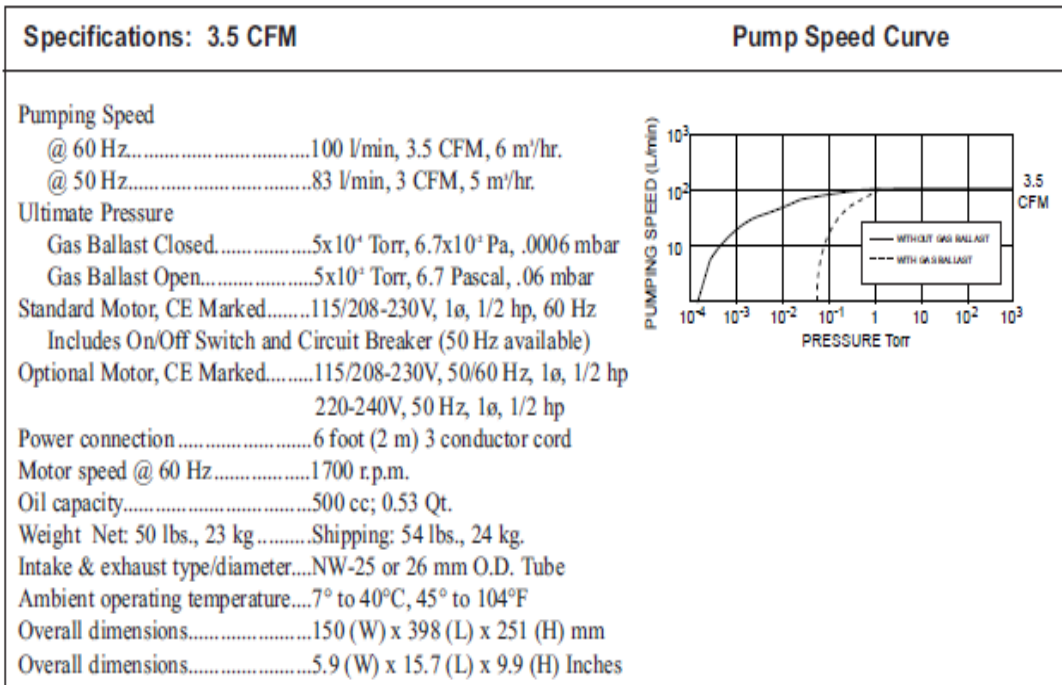
1800 l/min. • 64 CFM • 108 m<sup>3</sup>/hr.



**Fuente:** <http://www.vacuumresearchcorp.com/pdfs/partsnman/rotvanopmanv acresnonam2009vrsConsecPages.pdf>



## PUMP SPECIFICATIONS AND PUMP SPEED CURVES



**Fuente:** <http://www.vacuumresearchcorp.com/pdfs/partsnman/rotvanopmanv acresnonam2009vrsConsecPages.pdf>

#### 5.4. BOMBAS DE VACÍO DE ALTO RENDIMIENTO- LIOFILIZADOR LIOBRAS

Bomba de vacuo a aceite	Bomba de vacuo de doble etapa con paletas rotativas bañadas a aceite, velocidad de 10,2 m <sup>3</sup> /h (170 lpm o 6 cfm), vacuo final de 3,7 x 10 <sup>-3</sup> mmHg (3,7 μHg), válvula electromagnética para retención de vapores de aceite, dispositivo gas ballast para retirada de vapores de agua. Ruido máximo de 55 dB. Peso 13,5 Kg. Alimentación 220 V/60 Hz.
-------------------------	---

**Fuente:** Ficha técnica del proveedor LABTOP, del Liofilizador L-101

**TABLA N° 5.A**

#### PRESIÓN DE VACÍO VS. TIEMPO A CONDICIONES DE LABORATORIO: LIOFILIZADOR L-101 –MARCA LIOTOP.

Tiempo (min)	Presión (uHg)	Presión (mmHg)	Presión (Bar)	Presión (Pa)
0	760000	760	1	101325
5	9211	9.21	1.21E-02	1228.03
10	676	0.68	8.89E-04	90.13
15	553	0.55	7.28E-04	73.73
<b>20</b>	<b>417</b>	<b>0.42</b>	<b>5.49E-04</b>	<b>55.60</b>
25	353	0.35	4.64E-04	47.06
30	295	0.30	3.88E-04	39.33
40	225	0.23	2.96E-04	30.00
50	196	0.20	2.58E-04	26.13
60	176	0.18	2.32E-04	23.46
70	164	0.16	2.16E-04	21.86
80	158	0.16	2.08E-04	21.06
90	152	0.15	2.00E-04	20.27
105	148	0.15	1.95E-04	19.73
135	147	0.15	1.93E-04	19.60
150	147	0.15	1.93E-04	19.60
190	142	0.14	1.87E-04	18.93
210	140	0.14	1.84E-04	18.67
270	139	0.14	1.83E-04	18.53
300	138	0.14	1.82E-04	18.40
330	140	0.14	1.84E-04	18.67
360	145	0.15	1.91E-04	19.33
390	148	0.15	1.95E-04	19.73

**Fuente:** Datos de tesis no publicados por el autor: Natividad (2011)

**ANEXO N°6**  
**INFORMACIÓN TÉCNICA DEL REFRIGERANTE**

**TABLA N° 6.1A**  
**REFRIGERANTES <sup>TM</sup> SUVA <sup>(R)</sup>**

<b>PRODUCTO</b>	<b>REEMPLAZA</b>
<b>Suva® 95</b>	<b>R-13, R-23, and R-503</b>
Suva® 123	R-11
Suva® 124	R-114
Suva® 134a	R-12
Suva® 134a Mobile	R-12
Suva® 236fa	R-114
Suva® 404A	R-502
Suva® 407A	R-22
Suva® 408A	R-22
Suva® 409A	R-502
Suva® 410A	R-12
Suva® 507	R-22 and R-502
Suva® HP80	R-502
Suva® HP81	R-502
Suva® MP39	R-12
Suva® MP66	R-12 and R-500

**Fuente:** <http://www2.dupont.com>

**PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE SUVA (R) 95**


DuPont ha desarrollado Suva (R) 95 como un refrigerante que no daña la capa de ozono para reemplazar a R-503 y R-13 en aplicaciones de temperaturas bastante bajas usando compresores en cascada. Ambos R-503 y R-13 son refrigerantes que dañan la capa de ozono y serán sacados de circulación según el Protocolo de Montreal y otras legislaciones. Suva (R) es un sustituto excelente del R-503 y puede reemplazar a R-13 en la mayoría de sistemas.

Suva (R) 95 es una mezcla azeotrópica de refrigerantes que no dañan la capa de ozono. No es inflamable y tiene cero potenciales de daño a la capa de ozono. Debido a estas propiedades, Suva (R) 95 es un excelente refrigerante para aplicaciones donde la seguridad y el desempeño son requeridos.

DuPont recomienda el uso de un lubricante de poliéster con Suva (R) 95; sin embargo, el fabricante original del equipo siempre debe ser consultado para recomendaciones del lubricante específico.

Dentro de las características de operación, se menciona que mientras más baja sea la temperatura de descarga conlleva a una vida más larga de compresor y mejor estabilidad del lubricante.

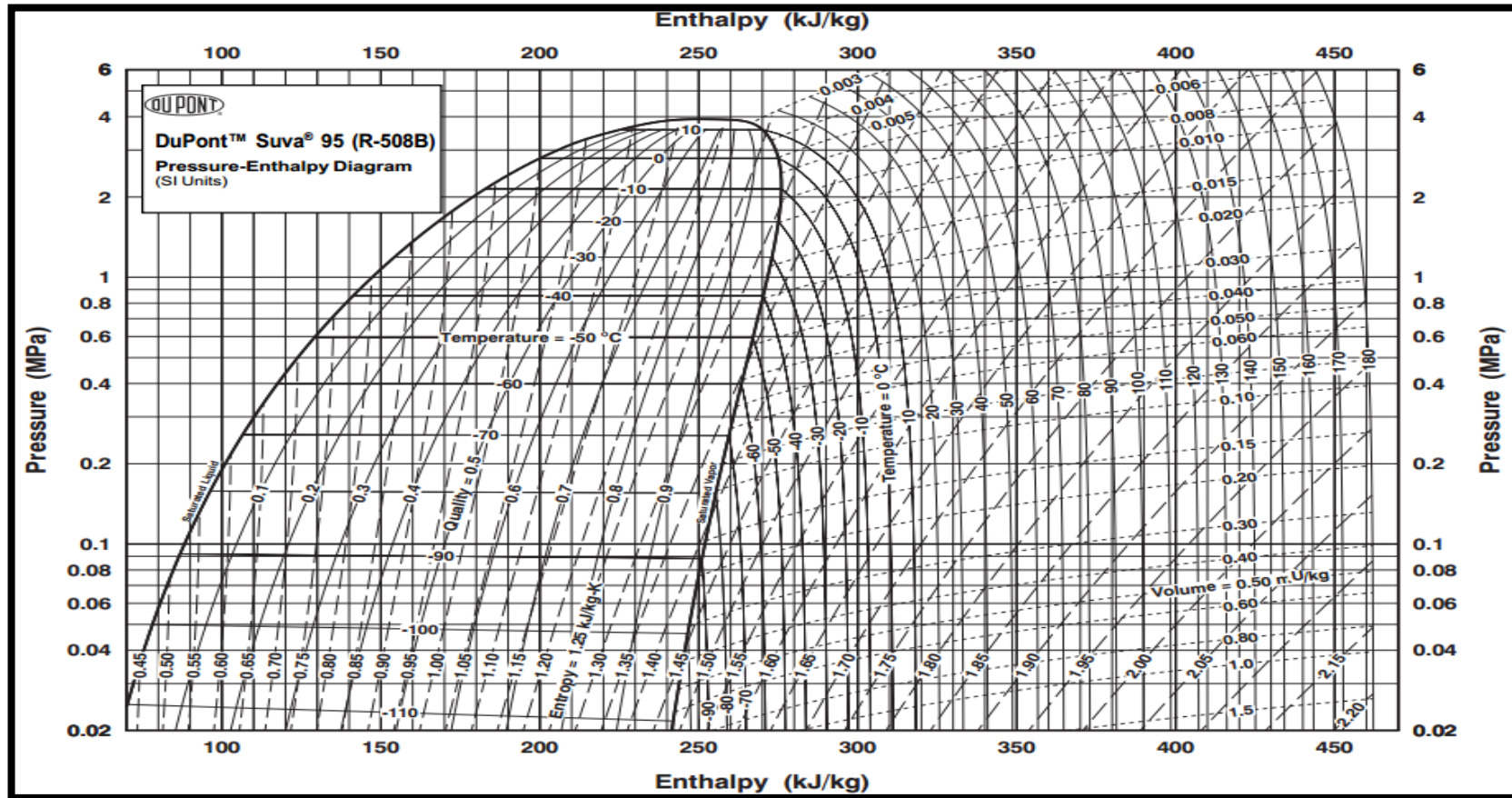
## HOJA DE SEGURIDAD DE REFRIGERANTE SUVA<sup>(R)</sup> 95

Material Safety Data Sheet											
<b>DuPont™ SUVA® 95 refrigerant</b>											
Version 2.3											
Revision Date 08/30/2011	Ref. 130000000550										
Inhalation	: Misuse or intentional inhalation abuse may cause death without warning symptoms, due to cardiac effects. Other symptoms potentially related to misuse or inhalation abuse are: Anaesthetic effects, Light-headedness, dizziness, confusion, incoordination, drowsiness, or unconsciousness, irregular heartbeat with a strange sensation in the chest, heart thumping, apprehension, feeling of fainting, dizziness or weakness. Vapours are heavier than air and can cause suffocation by reducing oxygen available for breathing.										
Repeated exposure Perfluoroethane (FC-116)	: Adverse effects from repeated inhalation may include: altered blood chemistry lung effects Liver effects										
Carcinogenicity	None of the components present in this material at concentrations equal to or greater than 0.1% are listed by IARC, NTP, or OSHA, as a carcinogen.										
<b>SECTION 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS</b>											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;">Component</th> <th style="width: 20%;">CAS-No.</th> <th style="width: 20%;">Concentration</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Perfluoroethane (FC-116)</td> <td>76-16-4</td> <td>54 %</td> </tr> <tr> <td>Trifluoromethane (HFC-23)</td> <td>75-46-7</td> <td>46 %</td> </tr> </tbody> </table>			Component	CAS-No.	Concentration	Perfluoroethane (FC-116)	76-16-4	54 %	Trifluoromethane (HFC-23)	75-46-7	46 %
Component	CAS-No.	Concentration									
Perfluoroethane (FC-116)	76-16-4	54 %									
Trifluoromethane (HFC-23)	75-46-7	46 %									
<b>SECTION 4. FIRST AID MEASURES</b>											
Skin contact	: In case of contact, immediately flush skin with plenty of water for at least 15 minutes. Take off all contaminated clothing immediately. Consult a physician. Wash contaminated clothing before re-use. Treat for frostbite if necessary by gently warming affected area.										

**Fuente:**

[http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh)

GRÁFICO N° 6.1A  
 GRÁFICA PRESIÓN – ENTALPÍA DEL REFRIGERANTE <sup>TM</sup> SUVA (R) 95



Fuente: [http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/products/Suva/Suva95.html#.UXLwzz6Lpwh)

**ANEXO N° 7**  
**DATOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN Y ACCESORIOS**  
**TABLA N° 7.1A**  
**DIMENSIONES DE LAS TUBERÍAS DE COBRE SEGÚN ASTM B88**

Nominal diameter, in.	Type	Wall thickness <i>t</i> , in.	Outside diameter <i>D</i> , in.	Inside diameter <i>d</i> , in.	Surface area		Cross-sectional		Weight of		Working pressure* ASTMB 888 to 250°F	
					Outside, ft <sup>2</sup> /ft	Inside, ft <sup>2</sup> /ft	Metal area, in. <sup>2</sup>	Flow area, in. <sup>2</sup>	Tube, lb/ft	Water, lb/ft	Annealed, psig	Drawn, psig
1/4	K	0.035	0.375	0.305	0.098	0.080	0.037	0.073	0.145	0.032	851	1596
	L	0.030	0.375	0.315	0.098	0.082	0.033	0.078	0.126	0.034	730	1368
3/8	K	0.049	0.500	0.402	0.131	0.105	0.069	0.127	0.269	0.055	894	1676
	L	0.035	0.500	0.430	0.131	0.113	0.051	0.145	0.198	0.063	638	1197
	M	0.025	0.500	0.450	0.131	0.008	0.037	0.159	0.145	0.069	456	855
1/2	K	0.049	0.625	0.527	0.164	0.138	0.089	0.218	0.344	0.094	715	1341
	L	0.040	0.625	0.545	0.164	0.143	0.074	0.233	0.285	0.101	584	1094
	M	0.028	0.625	0.569	0.164	0.149	0.053	0.254	0.203	0.110	409	766
5/8	K	0.049	0.750	0.652	0.196	0.171	0.108	0.334	0.418	0.144	596	1117
	L	0.042	0.750	0.666	0.196	0.174	0.093	0.348	0.362	0.151	511	958
3/4	K	0.065	0.875	0.745	0.229	0.195	0.165	0.436	0.641	0.189	677	1270
	L	0.045	0.875	0.785	0.229	0.206	0.117	0.484	0.455	0.209	469	879
	M	0.032	0.875	0.811	0.229	0.212	0.085	0.517	0.328	0.224	334	625
1	K	0.065	1.125	0.995	0.295	0.260	0.216	0.778	0.839	0.336	527	988
	L	0.050	1.125	1.025	0.295	0.268	0.169	0.825	0.654	0.357	405	760
	M	0.035	1.125	1.055	0.295	0.276	0.120	0.874	0.464	0.378	284	532
1 1/4	K	0.065	1.375	1.245	0.360	0.326	0.268	1.217	1.037	0.527	431	808
	L	0.055	1.375	1.265	0.360	0.331	0.228	1.257	0.884	0.544	365	684
	M	0.042	1.375	1.291	0.360	0.338	0.176	1.309	0.682	0.566	279	522
	DWV	0.040	1.375	1.295	0.360	0.339	0.168	1.317	0.650	0.570	265	497
1 1/2	K	0.072	1.625	1.481	0.425	0.388	0.351	1.723	1.361	0.745	404	758
	L	0.060	1.625	1.505	0.425	0.394	0.295	1.779	1.143	0.770	337	631
	M	0.049	1.625	1.527	0.425	0.400	0.243	1.831	0.940	0.792	275	516
	DWV	0.042	1.625	1.541	0.425	0.403	0.209	1.865	0.809	0.807	236	442
2	K	0.083	2.125	1.959	0.556	0.513	0.532	3.014	2.063	1.304	356	668
	L	0.070	2.125	1.985	0.556	0.520	0.452	3.095	1.751	1.339	300	573
	M	0.058	2.125	2.009	0.556	0.526	0.377	3.170	1.459	1.372	249	467
	DWV	0.042	2.125	2.041	0.556	0.534	0.275	3.272	1.065	1.416	180	338

Fuente: Wang (2001: 7.10)



**TABLA N° 7.1A**  
**DIMENSIONES DE LAS TUBERÍAS DE COBRE SEGÚN ASTM B88 (CONTINUACIÓN)**

Nominal diameter, in.	Type	Wall thickness <i>t</i> , in.	Outside diameter <i>D</i> , in.	Inside diameter <i>d</i> , in.	Surface area		Cross-sectional		Weight of		ASTMB 888 to 250°F	
					Outside, ft <sup>2</sup> /ft	Inside, ft <sup>2</sup> /ft	Metal area, in. <sup>2</sup>	Flow area, in. <sup>2</sup>	Tube, lb/ft	Water, lb/ft	Annealed, psig	Drawn, psig
2½	K	0.095	2.625	2.435	0.687	0.637	0.755	4.657	2.926	2.015	330	619
	L	0.080	2.625	2.465	0.687	0.645	0.640	4.772	2.479	2.065	278	521
	M	0.065	2.625	2.495	0.687	0.653	0.523	4.889	2.026	2.116	226	423
3	K	0.109	3.125	2.907	0.818	0.761	1.033	6.637	4.002	2.872	318	596
	L	0.090	3.125	2.945	0.818	0.771	0.858	6.812	3.325	2.947	263	492
	M	0.072	3.125	2.981	0.818	0.780	0.691	6.979	2.676	3.020	210	394
	DWV	0.045	3.125	3.035	0.818	0.795	0.435	7.234	1.687	3.130	131	246
3½	K	0.120	3.625	3.385	0.949	0.886	1.321	8.999	5.120	3.894	302	566
	L	0.100	3.625	3.425	0.949	0.897	1.107	9.213	4.291	3.987	252	472
	M	0.083	3.625	3.459	0.949	0.906	0.924	9.397	3.579	4.066	209	392
4	K	0.134	4.125	3.857	1.080	1.010	1.680	11.684	6.510	5.056	296	555
	L	0.110	4.125	3.905	1.080	1.022	1.387	11.977	5.377	5.182	243	456
	M	0.095	4.125	3.935	1.080	1.030	1.203	12.161	4.661	5.262	210	394
	DWV	0.058	4.125	4.009	1.080	1.050	0.741	12.623	2.872	5.462	128	240
5	K	0.160	5.125	4.805	1.342	1.258	2.496	18.133	9.671	7.846	285	534
	L	0.125	5.125	4.875	1.342	1.276	1.963	18.665	7.609	8.077	222	417
	M	0.109	5.125	4.907	1.342	1.285	1.718	18.911	6.656	8.183	194	364
	DWV	0.072	5.125	4.981	1.342	1.304	1.143	19.486	4.429	8.432	128	240
6	K	0.192	6.125	5.741	1.603	1.503	3.579	25.886	13.867	11.201	286	536
	L	0.140	6.125	5.845	1.603	1.530	2.632	26.832	10.200	11.610	208	391
	M	0.122	6.125	5.881	1.603	1.540	2.301	27.164	8.916	11.754	182	341
	DWV	0.083	6.125	5.959	1.603	1.560	1.575	27.889	6.105	12.068	124	232
8	K	0.271	8.125	7.583	2.127	1.985	6.687	45.162	25.911	19.542	304	570
	L	0.200	8.125	7.725	2.127	2.022	4.979	46.869	19.295	20.280	224	421
	M	0.170	8.125	7.785	2.127	2.038	4.249	47.600	16.463	20.597	191	358
	DWV	0.109	8.125	7.907	2.127	2.070	2.745	49.104	10.637	21.247	122	229
10	K	0.338	10.125	9.449	2.651	2.474	10.392	70.123	40.271	30.342	304	571
	L	0.250	10.125	9.625	2.651	2.520	7.756	72.760	30.054	31.483	225	422
	M	0.212	10.125	9.701	2.651	2.540	6.602	73.913	25.584	31.982	191	358
12	K	0.405	12.125	11.315	3.174	2.962	14.912	100.554	57.784	43.510	305	571
	L	0.280	12.125	11.565	3.174	3.028	10.419	105.046	40.375	45.454	211	395
	M	0.254	12.125	11.617	3.174	3.041	9.473	105.993	36.706	45.863	191	358

Fuente: Wang (2001: 7.11)

**TABLA N° 7.2A**  
**PRESIONES MÁXIMAS PERMITIDAS A DISTINTAS TEMPERATURAS**

Application	Pipe material	Weight	Joint type	Fitting		System	
				Class	Material	Temperature, °F	Maximum allowable pressure at temperature, psig
Recirculating water 2 in. and smaller	Steel (CW)	Standard	Thread	125	Cast iron	250	125
	Copper, hard	Type L	95-5 solder	—	Wrought copper	250	150
	PVC	Sch. 80	Solvent	Sch. 80	PVC	75	350
	CPVC	Sch. 80	Solvent	Sch. 80	CPVC	150	150
	PB	SDR-11	Heat fusion	—	PB	160	115
				Insert crimp	—	Metal	160
2.5–12 in.	A53 B ERW steel	Standard	Weld	Standard	Wrought steel	250	400
			Flange	150	Wrought steel	250	250
			Flange	125	Cast iron	250	175
			Flange	250	Cast iron	250	400
		SDR-11	Groove	—	MI or ductile iron	230	300
	PB		Heat fusion	—	PB	160	115
Refrigerant	Copper, hard	Type L or K	Braze	—	Wrought copper	—	—
	A53 B SML steel	Standard	Weld	—	Wrought steel	—	—

*Note:* Maximum allowable working pressures have been derated in this table. Higher system pressures can be used for lower temperatures and smaller pipe sizes. Pipe, fittings, joints, and valves must all be considered.

*Note:* A53     ASTM Standard A53  
PVC     Polyvinyl chloride  
CPVC    Chlorinated polyvinyl chloride  
PB     Polybutylene

*Source:* Abridged with permission from ASHRAE Handbook 1988, Equipment.

Fuente: Wang (2001: 7.12)



**TABLA N° 7.3A**  
**VALORES CLIMÁTICO MEDIOS ANUALES EN LIMA-**  
**CALLAO/AEROPUERTO JORGE CHÁVEZ**

Año	T	TM	Tm	Año	T	TM	Tm
1963	-	-	-	1990	19.0	23.0	16.8
1964	-	-	-	1991	19.5	23.4	17.3
1965	-	-	-	1992	20.6	24.3	18.3
1966	-	-	-	1993	20.0	24.0	17.7
1967	-	-	-	1994	19.6	23.3	17.4
1968	-	-	-	1995	19.3	23.0	17.0
1969	-	-	-	1996	18.4	22.0	16.3
1973	18.7	21.5	16.6	1997	22.2	26.0	19.9
1974	18.7	21.5	16.5	1998	20.8	24.7	18.9
1975	-	-	-	1999	19.3	22.9	17.2
1976	20.1	23.7	17.8	2000	18.7	21.9	16.8
1977	19.7	23.0	17.5	2001	18.4	21.4	16.6
1978	19.0	22.5	16.7	2002	-	-	-
1979	19.6	22.9	17.5	2003	18.7	21.7	17.0
1980	19.6	22.9	17.5	2004	19.2	22.5	17.3
1981	-	-	-	2005	-	-	-
1982	20.0	23.4	17.7	2006	19.7	22.9	17.8
1983	22.9	26.6	20.7	2007	18.6	22.0	16.7
1984	19.7	23.4	17.4	2008	19.7	23.0	17.8
1985	-	-	-	2009	19.9	23.2	18.0
1986	19.2	22.7	17.0	2010	19.3	22.4	17.5
1987	20.6	24.4	18.3	2011	19.4	22.8	17.5
1988	19.0	22.8	16.6	2012	20.3	23.7	18.3
1989	19.1	22.9	16.8	2013	-	-	-

**Fuente:** <http://www.tutiempo.net/clima/Lima->

[Callao\\_Aerop\\_Internacional\\_Jorgechavez/846280.htm](http://www.tutiempo.net/clima/Lima-Callao_Aerop_Internacional_Jorgechavez/846280.htm)

**Nota:** T: Temperatura media anual (°C); TM: Temperatura máxima media anual (°C); Tm: Temperatura mínima media anual (°C). El día más caluroso del año 2013 fue registrado el 09 de febrero entre 01:00 p.m. y 02:00 p.m. llegando a 32°C; según Senamhi (<http://laprensa.pe/actualidad/noticia-limenos-experimentaron-dia-mas-caluroso-ano-32-grados-2446>)

**TABLA N° 7.4A**  
**VALORES DE EMISIVIDAD DE MATERIALES COMUNES**

Material	Emisividad*
Acero, galvanizado	0,28
Acero, muy oxidado	0,88
Acero, recién laminado	0,24
Acero, superficie rugosa	0,96
Acero, rojo oxidado	0,69
Acero, chapa, niquelado	0,11
Acero, chapa, laminado	0,56
Cobre, pulido,	0,01
Cobre, bruñido comercial	0,07
Cobre, oxidado	0,65
Cobre, negro oxidado	0,88

**Fuente:**

[http://www.fluke.eu/comx/show\\_product.aspx?locale=eses&pid=37822](http://www.fluke.eu/comx/show_product.aspx?locale=eses&pid=37822)

**TABLA N° 7.5A**  
**ESPEJOR MÍMINO DE AISLAMIENTO DE TUBERÍA, in (pulgadas)**

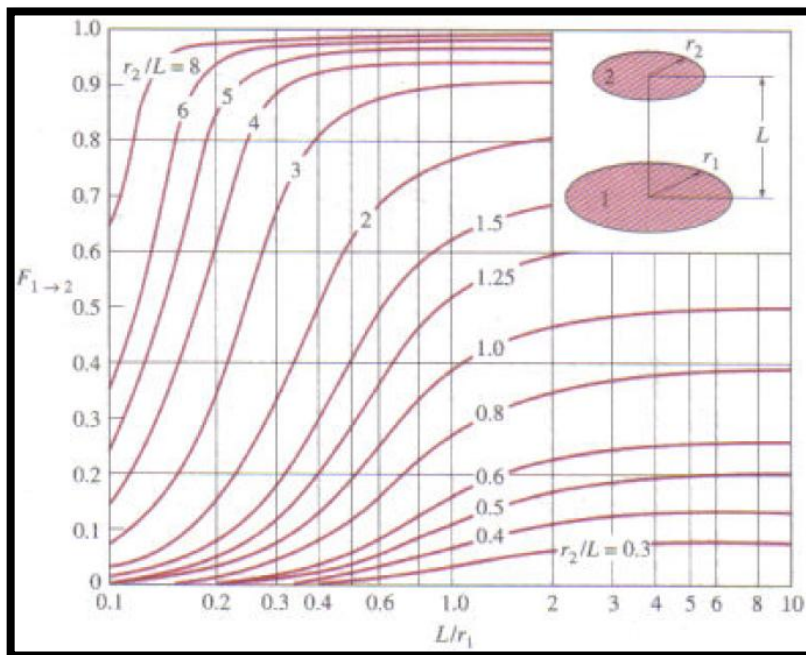
Fluid design operating temperature range, °F	Insulation conductivity		Nominal pipe or tube size, in.				
	Conductivity, Btu·in./h·ft <sup>2</sup> ·°F	Mean rating temp. °F	<1	1 to <1½	1½ to <4	4 to <8	≥8
Heating systems (steam, steam condensate, and hot water) <sup>†‡</sup>							
>350	0.32–0.34	250	2.5	3.0	3.0	4.0	4.0
251–350	0.29–0.32	200	1.5	2.5	3.0	3.0	3.0
201–250	0.27–0.30	150	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0
141–200	0.25–0.29	125	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5
105–140	0.22–0.28	100	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
Domestic and service hot water systems							
105+	0.22–0.28	100	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
Cooling systems (chilled water, brine, and refrigerant) <sup>§</sup>							
40–60	0.22–0.28	100	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
<40	0.22–0.28	100	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5

\*For insulation outside the stated conductivity range, the minimum thickness  $T$  shall be determined as follows:  

$$T = r[(1 + tr)^{Kk} - 1]$$
where  $T$  = minimum insulation thickness (in.),  $r$  = actual outside radius of pipe (in.),  $t$  = insulation thickness listed in this table for applicable fluid temperature and pipe size,  $K$  = conductivity of alternate material at mean rating temperature indicated for the applicable fluid temperature (Btu·in./h·ft<sup>2</sup>·°F); and  $k$  = the upper value of the conductivity range listed in this table for the applicable fluid temperature.  
<sup>†</sup>These thicknesses are based on energy efficiency considerations only. Additional insulation is sometimes required relative to safety issues/surface temperature.  
<sup>‡</sup>Piping insulation is not required between the control valve and coil on run-outs when the control valve is located within 4 ft of the coil and the pipe size is 1 in. or less.  
<sup>§</sup>These thicknesses are based on energy efficiency considerations only. Issues such as water vapor permeability or surface condensation sometimes require vapor retarders or additional insulation.  
Source: ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1999. Reprinted with permission.

Fuente: Wang (2001: 7.15)

**GRÁFICO N° 7.1A**  
**FACTOR DE VISIÓN ENTRE DOS DISCOS PARALELOS COAXIALES**



Fuente: Cengel (2004:602)

**TABLA N° 7.6A**  
**CARACTERÍSTICAS DE LÁMINAS DE ACERO COMERCIALES**

Los aceros mas comunes de acuerdo con la norma AISI son: 301, 304,304L, 316, 316L

CALIBRE	ESPESOR	PESO	PESO POR HOJA			
			kg			
	mm	kg/m <sup>2</sup>	914 x 2438 mm	914 x 3048 mm	1219 x 3048 mm	1219 x 3048 mm
<b>10</b>	3.430	27.783	61.910	77.400	82.569	103.228
<b>11</b>	3.050	24.705	55.051	68.825	73.421	91.792
<b>12</b>	2.670	21.627	48.192	60.250	64.274	80.355
<b>14</b>	1.900	15.390	34.294	42.875	45.738	57.182
<b>16</b>	1.520	12.312	27.435	34.300	36.590	45.745
<b>18</b>	1.220	9.882	22.020	27.530	29.369	36.717
<b>20</b>	0.892	7.225	16.100	20.128	21.473	26.845
<b>22</b>	0.740	5.994	13.357	16.699	17.814	22.271
<b>24</b>	0.610	4.941	11.010	13.765	14.684	18.358
<b>26</b>	0.455	3.686	8.213	10.267	10.953	13.694
<b>28</b>	0.385	3.119	6.949	8.688	9.268	11.587
<b>29</b>	0.330	2.673	5.958	7.447	7.944	9.932

Fuente: <http://www.distribuidoradeaceros.com.mx/pub/gallery/15/Specs.pdf>

**TABLA N° 7.7A**  
**GUÍA DE SELECCIÓN PARA BARRERAS DE VAPOR EN SISTEMAS**  
**ASLANTES**

TYPE	PRODUCT NAME	TEMP RANGE °C	REC D.F.T (mm) **	WET FLAMABLE	EXPOSURE RESISTANCE	NON-SUITABLE SUBSTRATE	WATER VAPOUR PERMEANCE g/s MN *	METHOD OF APPLICATION
Bituminous	BE2 Bitumen Emulsion	-5/55	1,5	No	Internal	None	0,0083	Brush
	BE Emulsion	-5/55	1,5	No	Internal	None	0,0022	Trowel
	570 Rubberised Emulsion	-30/60	1,5	No	Internal	None	-	Brush
Epoxy	769 Epoxy Paint	-10/8	0,3	Yes	External	EPS	-	Brush/Spray
	304 Epoxy Coating	-10/120	0,3	No	External	None	-	Brush
	Abecote SF322	Dry 120	±1,0	Flash 0°C			0,005	Brush
	Flintoat 390	-10/50	±0,5	Flash 0°C			0,058	Brush
	Ivory 340	-10/90	0,8	No	Internal	None	0,003	Brush
	1 C KL		Film	N/A	Internal	None	0,001	N/A
	1 C KH		Film	N/A	Internal	None	<0,001	N/A
	1 C RH		Film	N/A	Internal	None	Neg.	N/A
Electrometric	Foster Monolar	-30/120	0,76	Yes	External	EPS	0,006	Brush/spray trowel
	Foster 95-44	-73/121	Seal't	Yes	External	EPS		Trowel/glove
	Foster 30-45	-60/149	Seal't	Yes	External	None		Trowel/glove
	800 Hypalon	-40/120	0,3	Yes	External	EPS	0,000	Brush/spray
	795 PU Coating	-20/180	0,3	Yes	External	EPS	0,000	Brush/spray
	696 Elastothane	-30/120	1,0	No	External	None	-	Brush
	153 FR Mastic	-30/80	1,9	Yes	External	EPS	N/A	Trowel
	625 Non-slump Mastic	-40/120	Bead	Yes	External	EPS	N/A	Gun
	151 Oleo Mastic	-70/150	Bead	No	Internal	None	N/A	Gun/trowel
Synthetic Emulsions	Foster 30-36	-18/82	0,9	No	Internal	None	0,083	Brush/spray
	Foster 30-70 (Iagtone)	-46/82	0,4	No	External	None	0,180	Brush/spray
	Foster 35-00	-29/93	1,0	No	External	None	0,090	Trowel/glove
	2415 Plustex	-20/120	0,45	No	External	None	0,057	Brush/trowel
	2191 Plustex	-20/80	0,45	No	External	None	0,072	Brush/trowel
	249 Plustex	-20/90	0,45	No	External	None	0,05	Brush/trowel
	835 Acryl seal	-20/80	0,5	No	External	None	-	Brush
	147 Acryl Coat	-20/80	0,2	No	External	None	-	Brush
	158 Vapour seal	-30/85	1,3	No	External	None	-	Brush/trowel
Other	Foster 65-05	-29/93	2,0	Yes	External	EPS	0,007	Brush/spray
	Foil-Mylar	-70/100	Film	N/A	Internal	None	0,001	N/A

\* Tested in acceptance with ASTM E96 Desiccant method.

\*\* Recommended Dry Film Thickness

Note: It is recommended that the users contact the manufacturer for fore information.

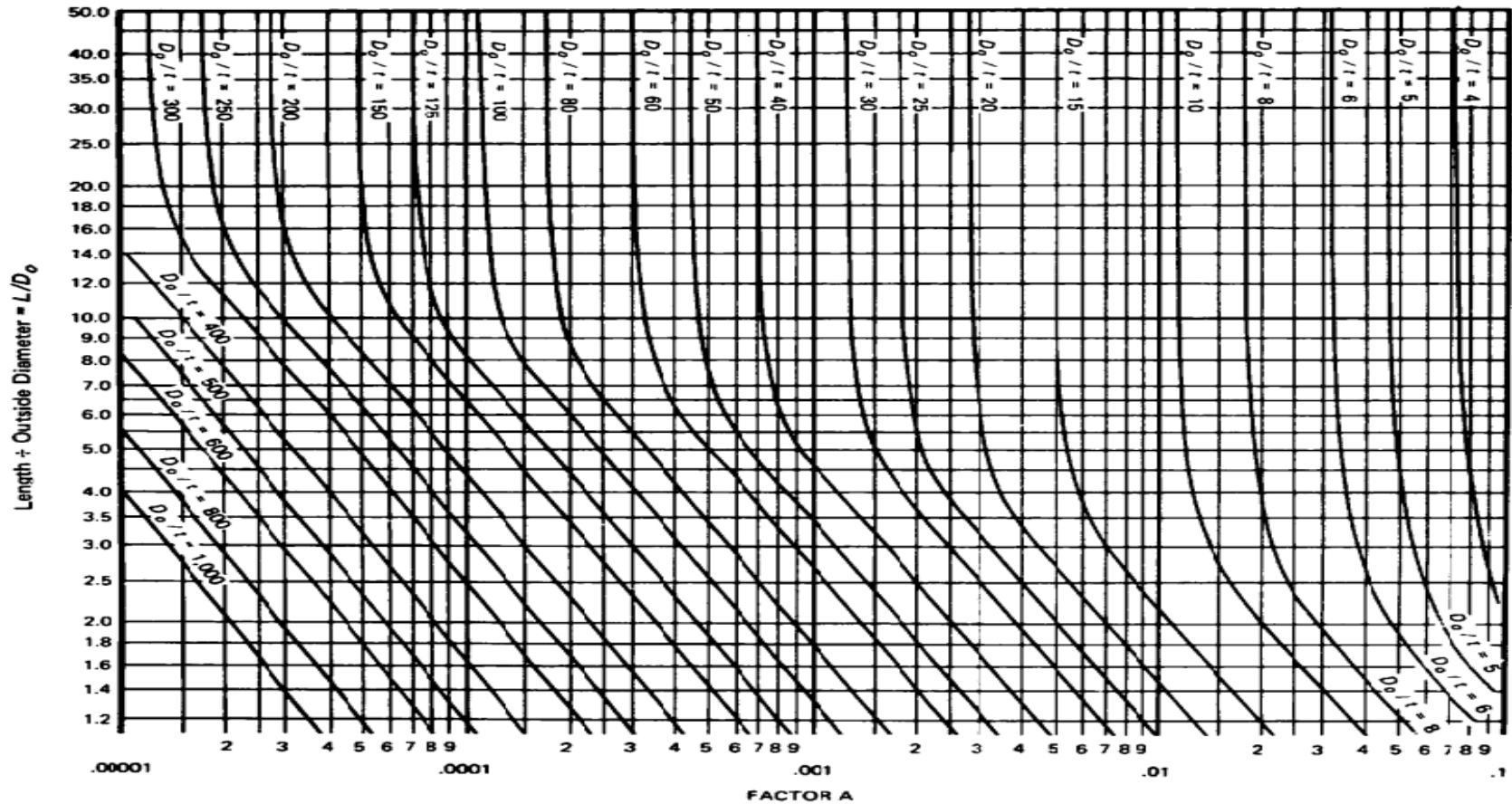
**Fuente: [www.tiasa.org.za](http://www.tiasa.org.za)**

**TABLA N° 7.8A**  
**GUÍA DE SELECCIÓN DEL PRODUCTO -AISLAMIENTO DE FRÍO**

<b>RIGID POLYURETHANE FOAM (PUR)</b>						
1	<b>Density (and range, if applicable)</b>					
2	<b>Thermal Conductivity</b>					
		Thermal conductivity (W/mK) at density indicated below				
	Mean temp °C	35 kg/m <sup>3</sup>		40 kg/m <sup>3</sup>		50 kg/m <sup>3</sup>
	-150	0,016		0,016		0,016
	-50	0,022		0,022		0,022
	0	0,021		0,021		0,021
	10	0,023		0,023		0,023
	50	0,026		0,026		0,026
	100	0,032		0,032		0,032
3	<b>Service Temperature range</b>					-180 to 110°C
4	<b>Reaction to Fire Characteristics</b>					
	a.	Combustibility to BS476 part 4				Combustible
	b.	Surface spread to flame to BS476 part 7				
		Insulant (if appropriate)				Class 4
		Composite finish (if appropriate)				Class 1
		Foil faced products (if appropriate)				Class 1
	c.	Building Regulations				
		Insulate (if appropriate)				N/a
		Composite finish (if appropriate)				Class 0
		Foil faced products (if appropriate)				N/a
5	<b>Water Vapour Transmission</b>					
		Insulant (if appropriate)				20 µgm/Nh
		Composite finish/foil faced product (if appropriate)				0,001g/(s.MN)
6	<b>Mechanical Properties</b>					
		35 kg/m <sup>3</sup>		40 kg/m <sup>3</sup>		50 kg/m <sup>3</sup>
		para	perp	para	perp	para
	a.	172	100	260	200	350
		Compressive strength at 10% Deformation (in kN/m <sup>2</sup> )				
	b.	300	250	415	380	550
	c.	250	200	540	390	650
		Tensile strength				
7	<b>Thickness Range</b>					Available from 15 to 150 mm
8	<b>Forms available</b> HD Mouldings, Moulded, Pipe Insulation, Sections, Slabs					
<b>TYPICAL USES AND APPLICATIONS</b>						
Used in medium to heavy-duty refrigeration to reduce heat gain and provide condensation control. Low temperature tankage of carbon dioxide, propane, etc. Laminated panels used in cold stores and refrigerated vehicles. Foam in-site and spray systems available.						

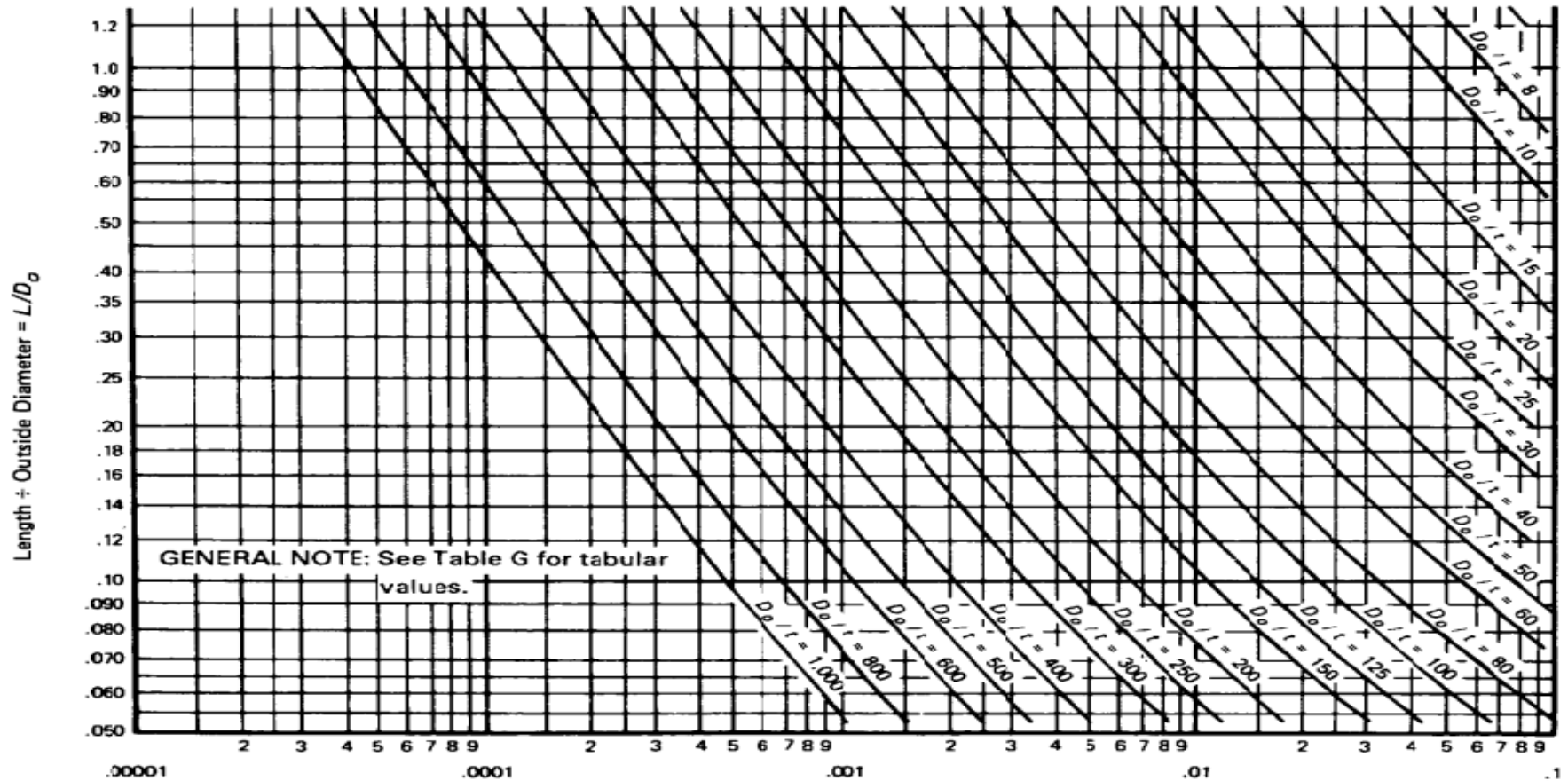
Fuente: [www.tiasa.org.za](http://www.tiasa.org.za)

**GRÁFICO N° 7.2A**  
**CARTAS Y TABLAS PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE LA CÁMARA DE LOS COMPONENTES BAJO PRESIÓN EXTERNA**



Fuente: Figura G en Subparte 3 de la Sección II, Parte D ASME (2010:613-614)

**GRÁFICO N° 7.2A**  
**CARTAS Y TABLAS PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE LA CÁMARA DE LOS COMPONENTES BAJO PRESIÓN**  
**EXTERNA (CONTINUACIÓN)**

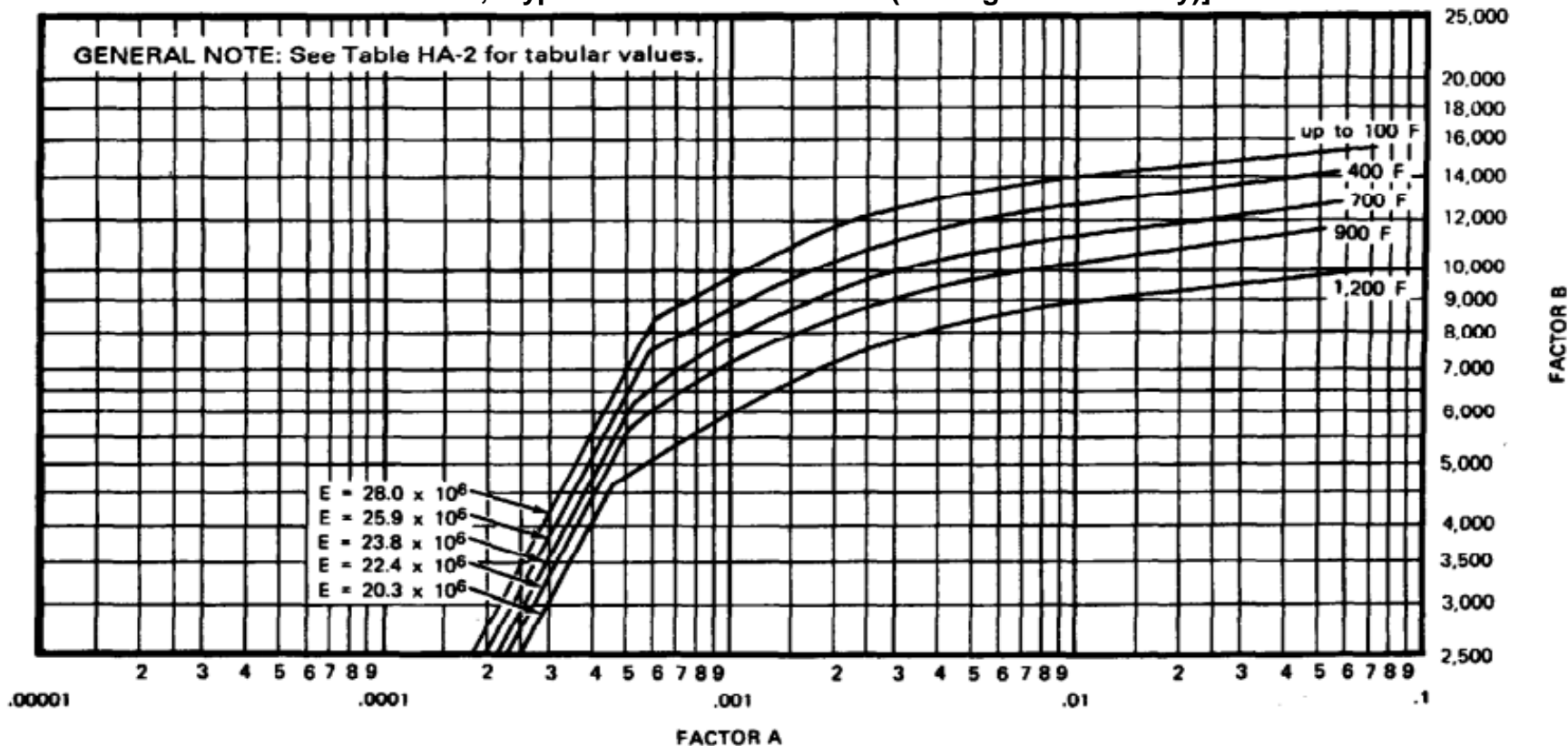


Fuente: Figura G en Subparte 3 de la Sección II, Parte D ASME (2010:613-614)



GRÁFICO N° 7.3A

GRÁFICO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE LA CÁMARA DE COMPONENTE SOMETIDOS A UNA PRESIÓN EXTERNA CUANDO SON CONSTRUIO CON ACERO AUSTENÍTICO [C16Cr-12Ni-2Mo, Type 316; 18Cr-10Ni-Ti, Type 321; ISCr-10Ni-Cb, Type 347; 25Cr-12Ni, Type 309 (Through 1100°F Only); 25Cr-20Ni, Type 310; and 17Cr, Type 4308 Stainless Steel (Through 700°F Only)]



Fuente: Tabla de Subparte 3 de la Sección II, Parte D de ASME (2010:620)



**TABLA N° 7.9A**  
**APÉNDICES L DEL ASME PARA DISEÑAR CABINAS A PRESIÓN EXTERNA**

<p><b>L-3.1 Cylindrical Shell Under External Pressure</b></p> <p>[An example of the use of the rules in UG-28(c)]</p> <p><b>L-3.1.1 Given.</b> Fractionating tower 14 ft I.D. by 21 ft long, bend line to bend line, fitted with fractionating trays, and designed for an external design pressure of 15 psi at 700°F. The tower to be constructed of SA-285 Gr. C Carbon Steel. Design length is 39 in.</p> <p><b>L-3.1.2 Required.</b> Shell thickness <math>t</math></p> <p><b>L-3.1.3 Solution</b></p> <p><i>Step 1.</i> Assume a thickness <math>t = 0.3125</math> in. Assumed outside diameter <math>D_o = 168.625</math> in.</p> $\frac{L}{D_o} = \frac{39}{168.625} = 0.231$ $\frac{D_o}{t} = \frac{168.625}{0.3125} = 540$ <p><i>Steps 2, 3.</i> Enter Fig. G at the value of <math>L/D_o = 0.231</math>; move horizontally to the <math>D_o/t</math> line of 540 and read the value <math>A</math> of 0.0005.</p> <p><i>Step 4, 5.</i> Enter Fig. CS-2 at the value of <math>A = 0.0005</math> and move vertically to the material line for</p>	<p>700°F. Move horizontally and read <math>B</math> value of 6100 on ordinate.</p> <p><i>Step 6.</i> The maximum allowable external working pressure for the assumed shell thickness of 0.3125 in. is</p> $P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} = \frac{4(6100)}{3(540)} = 15.1 \text{ psi}$ <p>Since <math>P_a</math> is greater than the external design pressure <math>P</math> of 15 psi, the assumed thickness is satisfactory.</p>
---	---

**Fuente:** ASME-Apéndice L (2010: 538-539)

**TABLA N° 7.10A**  
**VALORES DEL MÁXIMO ESFUERZO PERMITIDO (S) REQUERIDOS**  
**PARA LOS CÁLCULOS EN LA SECCIÓN I, SECCIÓN II, SECCIÓN VIII,**  
**SECCIÓN XII DEL ASME (2010)**

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy	Class/	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
					Designation/ UNS No.	Condition/ Temper			
1	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Smls. tube	SA-213	...	S31277	...	...	45	...
2	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Smls. tube	SA-213	...	S31277	...	...	45	...
3	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Plate	SA-240	...	S31277	...	...	45	...
4	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Plate	SA-240	...	S31277	...	...	45	...
5	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Wld. tube	SA-249	...	S31277	...	...	45	...
6	27Ni-22Cr-7Mo-Mn-Cu-N	Wld. tube	SA-249	...	S31277	...	...	45	...
(10) 7	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 8	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 9	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 10	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 11	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 12	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	29Ni-20Cr-3Cu-2Mo	Castings	SA-351	CN7M	J95150	...	...	45	...
14	29Ni-20Cr-3Cu-2Mo	Castings	SA-351	CN7M	J95150	...	...	45	...
15	16Cr-4Ni-6Mn	Plate	SA-240	201LN	S20153	...	...	8	3
16	16Cr-4Ni-6Mn	Plate	SA-240	201LN	S20153	...	...	8	3
17	16Cr-9Mn-2Ni-N	Plate	SA-240	204	S20400	...	...	8	3
18	16Cr-9Mn-2Ni-N	Plate	SA-240	204	S20400	...	...	8	3
19	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	> 5	8	1
20	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	> 5	8	1
21	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-965	F316L	S31603	...	...	8	1
22	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-965	F316L	S31603	...	...	8	1
23	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	≤ 5	8	1
24	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	...	≤ 5	8	1
25	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. tube	SA-213	TP316L	S31603	...	...	8	1
26	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. tube	SA-213	TP316L	S31603	...	...	8	1
27	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316L	S31603	...	...	8	1
28	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316L	S31603	...	...	8	1
29	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	...	...	8	1
30	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	...	...	8	1
31	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	...	...	8	1
32	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. & wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	...	...	8	1
33	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. pipe	SA-312	TP316L	S31603	...	...	8	1
34	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	...	...	8	1
35	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	...	...	8	1
36	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-358	316L	S31603	1	...	8	1
37	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. & wld. fittings	SA-403	316L	S31603	...	...	8	1
38	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-409	TP316L	S31603	...	...	8	1
39	16Cr-12Ni-2Mo	Bar	SA-479	316L	S31603	...	...	8	1
40	16Cr-12Ni-2Mo	Bar	SA-479	316L	S31603	...	...	8	1

**Fuente:** Tabla 1.A del ASME, Sección II, Parte D (2010: 66)

**TABLA N° 7.10A**  
**VALORES DEL MÁXIMO ESFUERZO PERMITIDO (S) REQUERIDOS**  
**PARA LOS CÁLCULOS EN LA SECCIÓN I, SECCIÓN II, SECCIÓN VIII,**  
**SECCIÓN XII DEL ASME (2010)-CONTINUACIÓN**

Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.	Notes	
			I	III	VIII-1	XII			
1	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	G5	
2	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	...	
3	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	G5	
4	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	...	
5	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	G3, G5	
6	112	52	NP	NP	800	NP	NFN-26	...	
7	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
8	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
9	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
10	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
11	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
12	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
13	62	25	600	600 (Cl. 3 only)	600	NP	NFN-9	G1, G5	
14	62	25	600	NP	600	NP	NFN-9	G1	
15	95	45	NP	NP	800	650	HA-6	G5	
16	95	45	NP	NP	800	650	HA-6	...	
17	95	48	NP	NP	900	650	HA-6	G5	
18	95	48	NP	NP	900	650	HA-6	...	
19	65	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G34	
20	65	25	850	NP	850	650	HA-4	G34	
21	65	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G34	
22	65	25	850	NP	850	650	HA-4	G34	
23	70	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G34	
24	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G34	
25	70	25	850	800	850	NP	HA-4	G5, G34	
26	70	25	850	NP	850	NP	HA-4	G34	
27	70	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G34	
28	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G34	
29	70	25	NP	800	NP	NP	HA-4	G5, W12	
30	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G5, G24, G34	
31	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G24, G34	
32	70	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G34, W12, W14	
33	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G34	
34	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G5, G24, G34	
35	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G24, G34	
36	70	25	NP	800	NP	NP	HA-4	G5	
37	70	25	NP	800	850	650	HA-4	G5, W12, W14	
38	70	25	NP	800	NP	NP	HA-4	G5	
39	70	25	850	800	850	650	HA-4	G5, G22, G34	
40	70	25	850	NP	850	650	HA-4	G22, G34	

**Fuente:** Tabla 1.A del ASME, Sección II, Parte D (2010: 66)

**TABLA N° 7.10A**  
**VALORES DEL MÁXIMO ESFUERZO PERMITIDO (S) REQUERIDOS**  
**PARA LOS CÁLCULOS EN LA SECCIÓN I, SECCIÓN II, SECCIÓN VIII,**  
**SECCIÓN XII DEL ASME (2010)-CONTINUACIÓN**

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	32.0	32.0	32.0	31.5	30.7	29.4	28.4	27.5	27.1	26.8	26.5	26.3	...	...
2	32.0	32.0	32.0	30.4	28.8	26.5	25.5	25.4	25.4	25.3	25.1	24.9	...	...
3	32.0	32.0	32.0	31.5	30.7	29.4	28.4	27.5	27.1	26.8	26.5	26.3	...	...
4	32.0	32.0	32.0	30.4	28.8	26.5	25.5	25.4	25.4	25.3	25.1	24.9	...	...
5	27.2	27.2	27.2	26.8	26.1	24.9	24.1	23.4	23.1	22.7	22.5	22.3	...	...
6	27.2	27.2	27.2	25.8	24.5	22.5	21.7	21.6	21.6	21.5	21.3	21.2	...	...
(10) 7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
(10) 12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	16.7	...	16.0	...	13.6	12.8	12.1	11.6	...	...	...	...	...	...
14	16.7	...	14.4	...	12.9	11.8	10.8	10.0	...	...	...	...	...	...
15	27.1	...	23.7	...	21.2	20.1	20.0	19.6	19.6	19.4	19.2	18.8	...	...
16	27.1	...	23.7	...	21.2	20.1	19.7	19.2	18.6	18.0	17.4	16.7	...	...
17	27.1	...	23.6	...	20.6	18.9	18.1	17.9	17.9	17.9	17.8	17.7	17.4	16.9
18	27.1	...	23.6	...	20.3	17.9	16.5	15.8	15.6	15.5	15.3	15.1	14.8	14.3
19	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
20	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
21	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
22	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
23	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
24	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
25	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
26	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
27	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
28	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
29	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	...	...
30	14.2	...	14.2	...	14.2	13.4	12.5	11.9	11.7	11.4	11.2	11.0	10.8	...
31	14.2	...	12.1	...	10.8	9.9	9.3	8.8	8.7	8.5	8.3	8.1	8.0	...
32	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
33	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...
34	14.2	...	14.2	...	14.2	13.4	12.5	11.9	11.7	11.4	11.2	11.0	10.8	...
35	14.2	...	12.1	...	10.8	9.9	9.3	8.8	8.7	8.5	8.3	8.1	8.0	...
36	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	...	...
37	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
38	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	...	...
39	16.7	...	16.7	...	16.7	15.7	14.8	14.0	13.7	13.5	13.2	12.9	12.7	...
40	16.7	...	14.2	...	12.7	11.7	10.9	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	...

Fuente: Tabla 1.A del ASME, Sección II, Parte D (2010: 66)

**TABLA N° 7.10A**  
**VALORES DEL MÁXIMO ESFUERZO PERMITIDO (S) REQUERIDOS**  
**PARA LOS CÁLCULOS EN LA SECCIÓN I, SECCIÓN II, SECCIÓN VIII,**  
**SECCIÓN XII DEL ASME (2010)-CONTINUACIÓN**

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding														
	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650
1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	(10)
13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
38	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
40	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Fuente:** Tabla 1.A del ASME, Sección II, Parte D (2010: 66)

## ANEXO N° 8

### USO DEL SOFTWARE ASPEN HYSYS VERSIÓN 7.2

Este software rinda una data extensiva de propiedades de distintos compuestos químicos, propiedades termodinámicas e información de equipos industriales para poder simular y diseñar procesos de una manera rápida.

#### FIGURA 8.1A

### INGRESO DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS EN EL SOFTWARE ASPEN HYSYS 7.2

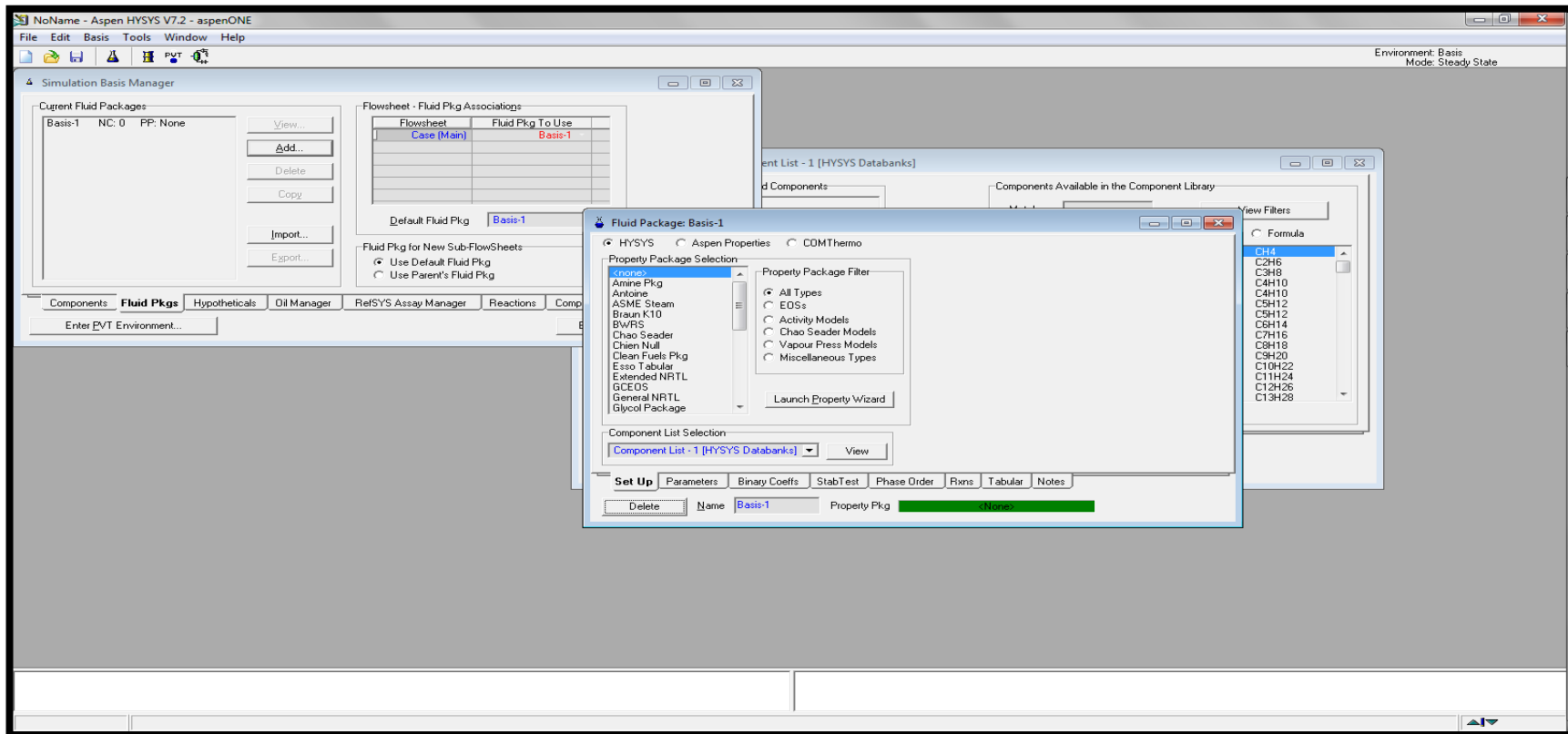
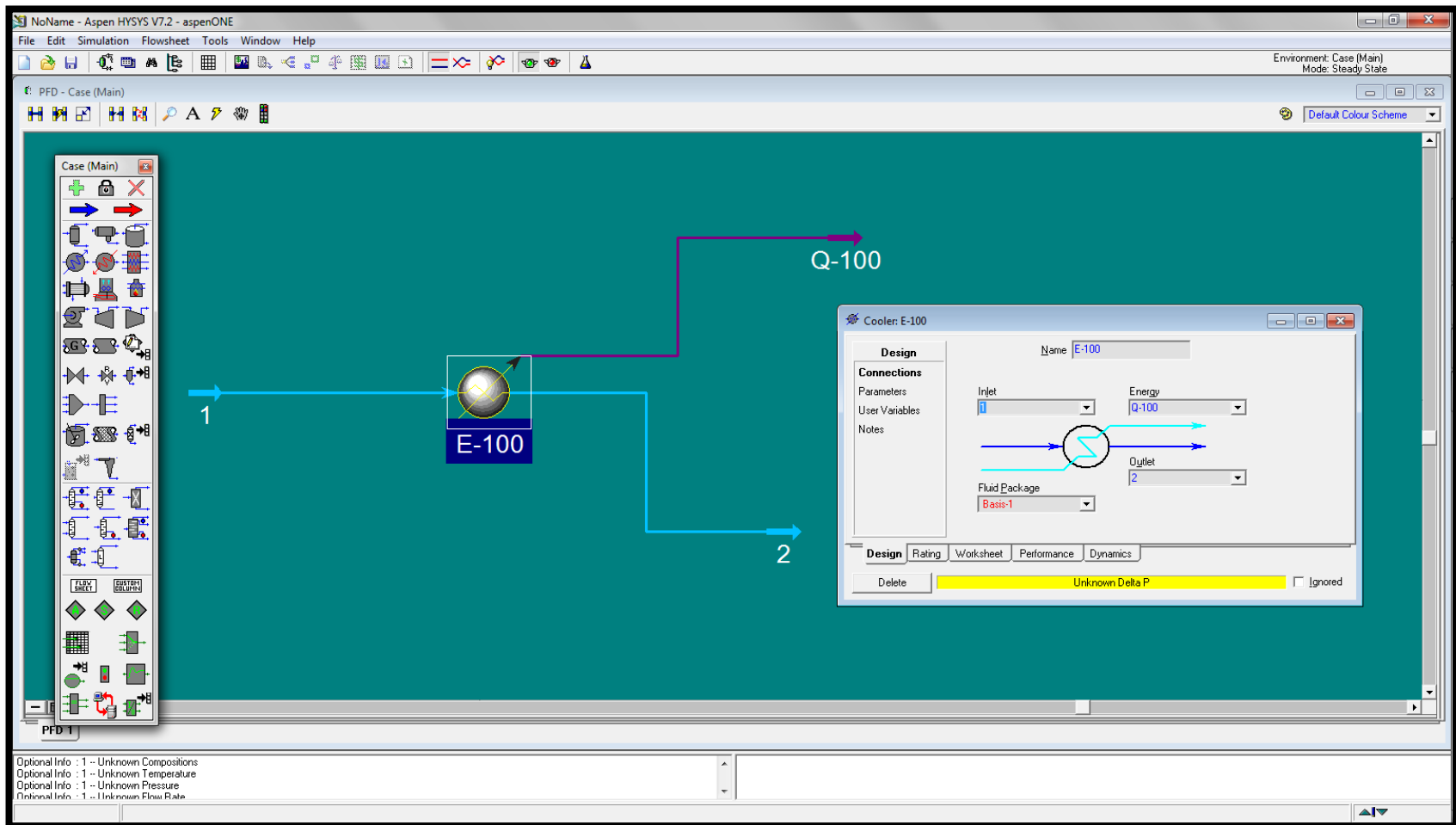


FIGURA 8.2A  
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO EN EL SOFTWARE ASPEN HYSYS 7.2



**ANEXO N°9**  
**ANÁLISIS DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN LIOFILIZACIÓN EN**  
**ESTADO NO ESTACIONARIO, A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE**  
**CONSERVACIÓN DE MATERIA Y ENERGÍA**

**9.1 Balance de Energía**

Bird, et al. (2006: 998), brinda la Ecuación de la Energía para Fluidos Newtonianos puros.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \mu \phi \quad (9A.1)$$

En coordenadas cartesianas (x, y, z):

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \phi \quad (9A.2)$$

Donde:

$\rho$  : Densidad (kg.m<sup>-3</sup>)

$C_p$  : Capacidad calorífica a presión constante (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$T$  : Temperatura (K)

$k$  : Conductividad térmica (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$\rho_{le}$  : Densidad efectiva de la capa seca (kg.m<sup>-3</sup>)

$\mu \phi$  : Función de disipación viscosa

Se tienen dos casos: el análisis en la capa que se va secando (I) y el segundo referido a la capa congelada (II); para el segundo caso, se cumple la ecuación 10A.2; sin embargo, en el primero se realizó un análisis de balance global de energía, puesto que esta fase se va calentando por el efecto de la sublimación. Nieves et al. (1996) presenta la siguiente ecuación general de calor:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de calor} \left( \frac{J}{s} \right) \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Calor que entra} \\ \text{alelemento} \left( \frac{J}{s} \right) \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Calor que sale} \\ \text{delelemento} \left( \frac{J}{s} \right) \end{array} \right] + Q \quad (9A.3)$$

Donde:

$Q$  : Puede ser positivo o negativo dependiendo de si el calor es generado o absorbido por unidad de tiempo (J/s)

Nieves et al. (1996), deduce la siguiente expresión:

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \frac{k_{le}}{\rho_{le} C_{ple}} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho_{le} C_{ple}} \quad (9A.4)$$

Donde:

$t$  : Tiempo transcurrido en segundos (s)

$x$  : Desplazamiento del vapor de agua (m)

$T_I$  : Temperatura de la capa seca (K)

$\rho_{le}$  : Densidad efectiva de a capa seca (kg.m<sup>-3</sup>)

$k_{le}$  : Conductividad térmica efectiva de la capa seca (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$C_{ple}$  : Capacidad calorífica efectiva de la capa seca (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)



$q$  : Puede ser positivo o negativo dependiendo de si el calor es generado o absorbido por unidad de tiempo ( $J.m^{-3}.s^{-1}$ )

Debido a que durante la liofilización de la capa seca, ocurre un incremento de temperatura por el paso del agua sublimada de la interfase, la entrada del aire como inerte en los poros de la capa seca y la vaporización del agua adsorbida; el calor “ $q$ ” se representa:

$$q = -C_{pg} N_t \left[ \frac{\partial T_I}{\partial x} \right] + H_v \frac{\partial C_{bw}}{\partial t} \quad (9A.5)$$

Donde:

- $x$  : Desplazamiento (m)
- $t$  : Tiempo transcurrido en segundos (s)
- $T_I$  : Temperatura de la capa seca (K)
- $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo ( $kg.m^{-3}.s^{-1}$ )
- $C_{pg}$  : Capacidad calórica del gas ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $N_t$  : Flux másico total en la capa seca  
 $N_{in}(inerte) + N_w(agua)$  ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
- $H_v$  : Calor latente de vaporización ( $J.kg^{-1}$ )

Finalmente la ecuación que representa el perfil de la temperatura en la capa seca (I) resulta:

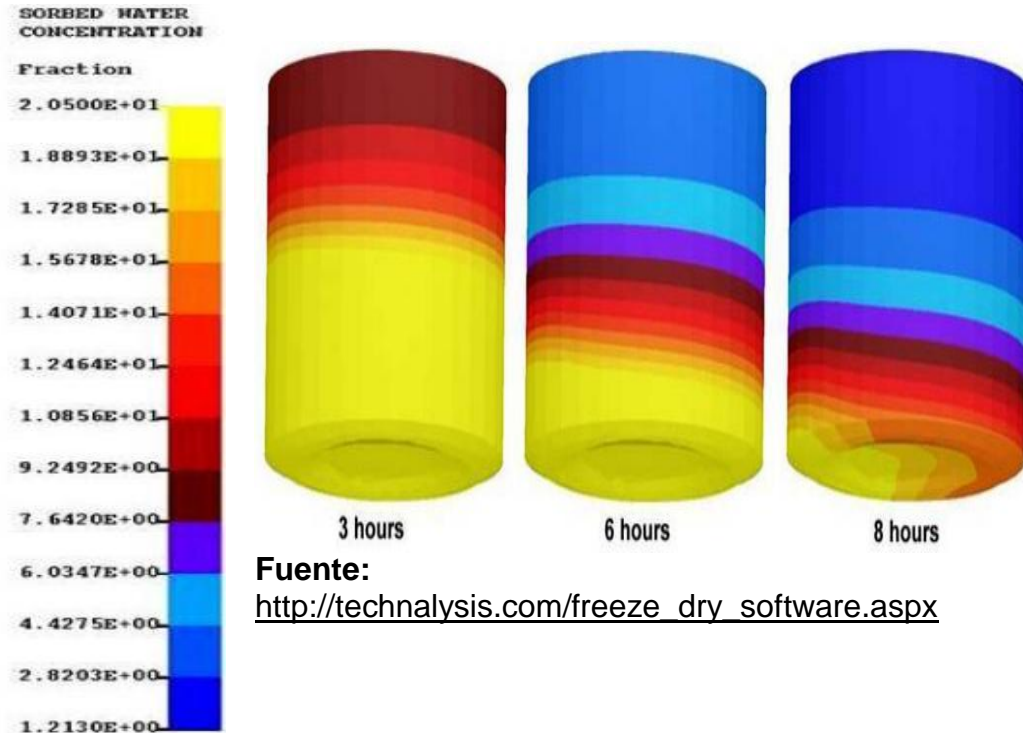
$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \frac{k_{Ie}}{\rho_{Ie} C_{ple}} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial T_I}{\partial x} \right] + \frac{H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \frac{\partial C_{bw}}{\partial t} \quad (9A.6)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo transcurrido en segundos (s)
- $x$  : Desplazamiento (m)
- $T_I$  : Temperatura de la capa seca (K)
- $k_{Ie}$  : Conductividad térmica efectiva de la capa seca ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- $\rho_{Ie}$  : Densidad efectiva de la capa seca ( $kg.m^{-3}$ )
- $C_{ple}$  : Capacidad calórica efectiva de la capa seca ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $C_{pg}$  : Capacidad calórica del gas ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- $N_t$  : Flux másico total en la capa seca =  $N_{in}(inerte) + N_w(agua)$  ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
- $H_v$  : Calor latente de vaporización ( $J.kg^{-1}$ )
- $q$  : Puede ser positivo o negativo dependiendo de si el calor es generado o absorbido por unidad de tiempo ( $J.m^{-3}.s^{-1}$ )
- $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo ( $kg.m^{-3}.s^{-1}$ )

Millman, Liapis y Marchello (1984: 729), en su modelo propuesto no consideran el segundo término del lado derecho de la ecuación 10.A.5. Sin embargo, simulaciones mostradas en la web usando el software PASSAGE®/Freeze lo indican, tal y como se muestra a continuación.

**FIGURA 9.A.1.  
CONCENTRACIÓN DEL AGUA ADSORBIDA DURANTE EL SECADO  
PRIMARIO**



En la capa congelada (II) se realizan las siguientes simplificaciones para la deducción del modelo matemático a partir de la ecuación 10.A.2.

La transferencia de calor por conducción será en un solo eje (x).

El flujo de calor, se conduce por convección solo en un solo eje (consideramos por comodidad al eje x como el vertical), por lo que:

$$v_y = v_z = 0$$

Se considera la disipación viscosa como despreciable

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \frac{k_{II}}{\rho_{II} C_{pII}} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} \quad (9A.7)$$

Donde:

$x$  : Distancia (m)

$t$  : tiempo transcurrido (s)

$T_{II}$  : Temperatura en la capa congelada (II)

$k_{II}$  : Conductividad térmica de la capa congelada ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$\rho_{II}$  : Densidad efectiva de la capa congelada ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$C_{pII}$  : Capacidad calórica efectiva de la capa congelada ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

### **9.2 Balance de Masa**

Bird, et al. (2006: 999), brinda la Ecuación de la Continuidad para la Especie en términos de una determinada especie química

$$\rho \frac{D_{WA}}{Dt} = \rho D_{ifAB} \nabla^2 W + r_A \quad (9A.8)$$

En coordenadas cartesianas (x, y, z):

$$\rho \left( \frac{\partial W_A}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial W_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial W_A}{\partial z} \right) = \rho D_{ifAB} \left[ \frac{\partial^2 W_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_A}{\partial z^2} \right] + r_A \quad (9A.9)$$

Donde:

- $t$  : tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $y$  : Distancia recorrida en el eje y (m)
- $z$  : Distancia recorrida en el eje z (m)
- $\rho$  : Densidad (Kg.m<sup>-3</sup>)
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_y$  : Velocidad convectiva en la dirección y (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_z$  : Velocidad convectiva en la dirección z (m.s<sup>-1</sup>)
- $D_{ifAB}$  : Difusividad del componente A en estudio sobre B (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $W_A$  : Masa del compuesto (Kg)
- $r_A$  : Velocidad molar de producción de material por reacción (moles/s.m<sup>3</sup>).

Se realiza un análisis por especie, en este caso agua (w) e inerte (in) (aire), en la capa que se va secando.

#### Primer caso, análisis para el agua (w):

Se brinda la ecuación de continuidad para el caso del agua.

$$\rho \left( \frac{\partial W_w}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_w}{\partial x} + v_y \frac{\partial W_w}{\partial y} + v_z \frac{\partial W_w}{\partial z} \right) = \rho D_{ifwin} \left[ \frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_w}{\partial z^2} \right] + r_w \quad (9A.10)$$

Donde:

- $t$  : tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $y$  : Distancia recorrida en el eje y (m)
- $z$  : Distancia recorrida en el eje z (m)
- $W_w$  : Velocidad de flujo de materia o másico del agua a través de una superficie (kg.s<sup>-1</sup>)
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_y$  : Velocidad convectiva en la dirección y (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_z$  : Velocidad convectiva en la dirección z (m.s<sup>-1</sup>)
- $\rho$  : Densidad (kg.m<sup>-3</sup>)
- $D_{ifwin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $r_w$  : Velocidad de producción de materia de la especie por una reacción química (kg.s<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>)

Se realizan las siguientes simplificaciones y aclaraciones:

Se considera un fenómeno en estado no estacionario.

La velocidad de flujo másico de agua, relacionada al movimiento convectivo se realiza en un solo eje (se considerará al eje x en la posición vertical), por lo que:  $v_y = v_z = 0$

La velocidad de flujo másico del vapor de agua, relacionada al movimiento difusivo, se hará en un solo eje:  $\frac{\partial^2 W_w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 W_w}{\partial z^2} = 0$

No existe generación de materia por reacción química, es decir,  $r_w = 0$   
Después de realizadas las simplificaciones, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial W_w}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_w}{\partial x} = D_{ifwin} \left[ \frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right] \quad (9A.11)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo (s)
- $x$  : Distancia (m)
- $\rho$  : Densidad (kg.m<sup>-3</sup>)
- $W_w$  : Velocidad de flujo de materia o másico del agua a través de una superficie (kg.s<sup>-1</sup>)
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)
- $D_{ifwin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

Cambio de variables, expresando la masa en función de las concentraciones, mediante el uso del volumen

$$W_w = C_w \times V \quad (9A.12)$$

Donde:

- $C_w$  : Concentración de la especie por unidad de tiempo (Kg.m<sup>-3</sup>)
- $V$  : Volumen total (m<sup>3</sup>)
- $W_w$  : Velocidad de flujo de materia o másico del agua a través de una superficie (kg.s<sup>-1</sup>)

Asimismo, el volumen efectivo para el espacio que ocupa el vapor de agua sublimado, está relacionado con la porosidad del material en la capa seca.

$$V_{fw} = \varepsilon_p \times V \quad (9A.13)$$

Donde:

- $V$  : Volumen total (m<sup>3</sup>)
- $V_{fw}$  : Volumen del agua que se va sublimando (m<sup>3</sup>)
- $\varepsilon_p$  = Porosidad del medio

Además, se debe tener en cuenta que el agua en un alimento o se encuentra como agua libre que se va sublimando (fw) y agua ligada (bw); haciendo un balance de masa simple en la capa que se va secando, con ayuda de la Ecuación 9.A.12 y 9.A.13, se obtiene:

$$W_w = W_{fw} + W_{bw}$$

$$C_w V = C_{fw} V_{fw} + C_{bw} V_{bw}$$

$$C_w V = C_{fw} (\varepsilon_p V) + C_{bw} (1 - \varepsilon_p) V$$

$$C_w V = C_{fw} (\varepsilon_p V) + C_{bw} V - C_{bw} (\varepsilon_p V)$$

$$C_w V = C_{fw} (\varepsilon_p V) + C_{bw} V$$

Se considera despreciable

(9A.14)

Reemplazando la Ecuación 11A.12 y 11.A.14 en la Ecuación 11.A.11:

$$\frac{\partial W_w}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_w}{\partial x} = D_{ifWin} \left[ \frac{\partial^2 W_w}{\partial x^2} \right]$$

Se considera despreciable

$$\frac{\partial [C_{fw}(\varepsilon_p V) + C_{bw} V]}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{fw}(\varepsilon_p V) + C_{bw} V]}{\partial x} = D_{ifWin} \left[ \frac{\partial^2 [C_{fw}(\varepsilon_p V) + C_{bw} V]}{\partial x^2} \right]$$

$\varepsilon_p$  se considera 1 para evaluar el fenómeno convectivo en todo el volumen

Se considera despreciable

$$\frac{\partial C_{fw}(\varepsilon_p V)}{\partial t} + \frac{\partial C_{bw} V}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{fw}(\varepsilon_p V) + C_{bw} V]}{\partial x} = D_{ifWin} \left[ \frac{\partial^2 [C_{fw}(\varepsilon_p V)]}{\partial x^2} \right]$$

$$\frac{\partial C_{fw}(\varepsilon_p V)}{\partial t} + \frac{\partial C_{bw} V}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{fw}(V)]}{\partial x} = D_{ifWin} \left[ \frac{\partial^2 [C_{fw}(\varepsilon_p V)]}{\partial x^2} \right]$$

(9.A.15)

Como la porosidad es una constante, sale del análisis diferencial; y dividiendo todos los términos por el Volumen total, resulta lo siguiente:

$$\varepsilon_p \frac{\partial C_{fw}}{\partial t} + \frac{\partial C_{bw}}{\partial t} + v_x \frac{\partial C_{fw}}{\partial x} = \varepsilon_p D_{ifWin} \left[ \frac{\partial^2 C_{fw}}{\partial x^2} \right] \quad (9.A.16)$$

Donde:

- $x$  : Distancia recorrida (m)
- $t$  : Tiempo (s)
- $C_{fw}$  : Concentración de agua libre (kg.m<sup>-3</sup>)
- $C_{sw}$  : Concentración del agua ligada (kg.m<sup>-3</sup>)
- $\varepsilon_p$  : Porosidad
- $D_{ifWin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)

### Segundo caso, análisis para el aire (inerte-in):

Se brinda la ecuación de continuidad para el caso del aire

$$\rho \left( \frac{\partial W_{in}}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_{in}}{\partial x} + v_y \frac{\partial W_{in}}{\partial y} + v_z \frac{\partial W_{in}}{\partial z} \right) = \rho D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 W_{in}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_{in}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_{in}}{\partial z^2} \right] + r_{in} \quad (9.A.17)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $y$  : Distancia recorrida en el eje y (m)
- $z$  : Distancia recorrida en el eje z (m)
- $W_{in}$  : Velocidad de flujo de materia o másico del inerte a través de una superficie (kg.s<sup>-1</sup>)
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_y$  : Velocidad convectiva en la dirección y (m.s<sup>-1</sup>)
- $v_z$  : Velocidad convectiva en la dirección z (m.s<sup>-1</sup>)

$D_{ifWin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )  
 $\rho$  : Densidad ( $kg \cdot m^{-3}$ )  
 $r_{in}$  : Velocidad molar de producción de inerte por reacción (moles/s.m<sup>3</sup>).

Se realizan las siguientes simplificaciones y aclaraciones:

Se considera un fenómeno en estado no estacionario.

La velocidad de flujo másico de aire, relacionada al movimiento convectivo se realiza en un solo eje (se considerará al eje x en la posición vertical), por lo que:  $v_y = v_z = 0$

El término  $D_{ifinW}$ , representa a la Difusividad del inerte (aire) en el vapor de agua que se va originando por sublimación.

La velocidad de flujo másico del aire, relacionada al movimiento difusivo, se hará en un solo eje:  $\frac{\partial^2 W_{in}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 W_{in}}{\partial z^2} = 0$

No existe generación de materia por reacción química, es decir,  $r_{in} = 0$

Después de realizadas las simplificaciones, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial W_{in}}{\partial t} + v_x \frac{\partial W_{in}}{\partial x} = D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 W_{in}}{\partial x^2} \right] \quad (9A.18)$$

Donde:

$t$  : Tiempo (s)  
 $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)  
 $W_{in}$  : Velocidad de flujo de materia o másico del inerte a través de una superficie ( $kg \cdot s^{-1}$ )  
 $D_{ifWin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )  
 $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x ( $m \cdot s^{-1}$ )

Se realiza el cambio de variables, expresando la masa en función de las concentraciones, mediante el uso del volumen.

$$W_{in} = C_{in} \times V_{in} \quad (9A.19)$$

Donde:

$W_{in}$  : Velocidad de flujo de materia o másico del inerte a través de una superficie ( $kg \cdot s^{-1}$ )  
 $C_{in}$  : Concentración de la especie por unidad de tiempo ( $Kg \cdot m^{-3}$ )  
 $V_{in}$  : Volumen efectivo ( $m^3$ )

Asimismo, el volumen efectivo está relacionado con la porosidad del material en la capa seca.

$$V_{in} = \varepsilon_p \times V \quad (9A.20)$$

Donde:

$V_{in}$  : Volumen efectivo ( $m^3$ )  
 $\varepsilon_p$  : Porosidad del medio  
 $V$  : Volumen total ( $m^3$ )

Reemplazando la Ecuación 9.A.19 y 9.A.20 en la Ecuación 9.A.18

$$\frac{\partial [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial x} = D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial x^2} \right]$$

$\varepsilon_n$  se considera 1 para evaluar el fenómeno convectivo en todo el volumen

$$\frac{\partial C_{in}(\varepsilon_p V)}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial x} = D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial x^2} \right]$$

$$\frac{\partial C_{in}(\varepsilon_p V)}{\partial t} + v_x \frac{\partial [C_{in}(V)]}{\partial x} = D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 [C_{in}(\varepsilon_p V)]}{\partial x^2} \right]$$

(9A.21)

Como la porosidad es una constante, sale del análisis diferencial; y dividiendo todos los términos por el Volumen total, resulta:

$$\varepsilon_p \frac{\partial C_{in}}{\partial t} + v_x \frac{\partial C_{in}}{\partial x} = \varepsilon_p D_{ifinW} \left[ \frac{\partial^2 C_{in}}{\partial x^2} \right] \quad (9A.22)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $C_{in}$  : Concentración de la especie por unidad de tiempo ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $\varepsilon_p$  : Porosidad del medio
- $v_x$  : Velocidad convectiva en la dirección x ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $D_{ifinW}$  : Difusividad del inerte en el vapor de agua ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

## ANEXO Nº10

### MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS EN EL RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DE TRANSFERENCIA EN LA LIOFILIZACIÓN

Ecuaciones de Transferencia de Calor en la capa seca (I) y congelada (II), de las relaciones 59 y 60.

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial T_I}{\partial x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right] \quad (10A.1)$$

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} \quad (10A.2)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $T_I$  : Temperatura de la capa seca (K)
- $T_{II}$  : Temperatura en la capa congelada (II)
- $\alpha_{Ie}$  : Difusividad térmica efectiva de la capa seca ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\alpha_{II}$  : Difusividad térmica de la capa congelada ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\rho_{Ie}$  : Densidad efectiva de la capa seca ( $kg \cdot m^{-3}$ )
- $C_{ple}$  : Capacidad calorífica efectiva de la capa seca ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $C_{pg}$  : Capacidad calorífica del gas ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
- $N_t$  : Flux másico total en la capa seca =  $N_{in} (inerte) + N_w (agua)$  ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )
- $H_v$  : Calor latente de vaporización ( $J \cdot kg^{-1}$ )
- $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo ( $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ )

Ecuaciones de Transferencia de Masa en la capa seca (I)

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = D_{ifwin,e} \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_w}{\partial x} - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \quad (10A.3)$$

$$\frac{\partial C_{in}}{\partial t} = D_{ifinw,e} \frac{\partial^2 C_{in}}{\partial x^2} - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{in}}{\partial x} \quad (10A.4)$$

Donde:

- $t$  : Tiempo (s)
- $x$  : Distancia recorrida en el eje x (m)
- $C_{in}$  : Concentración de la especie por unidad de tiempo ( $Kg \cdot m^{-3}$ )
- $C_w$  : Concentración de la especie por unidad de tiempo ( $Kg \cdot m^{-3}$ )
- $D_{ifwin}$  : Difusividad del agua en el medio inerte ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $D_{ifinw}$  : Difusividad del inerte en el vapor de agua ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\varepsilon_p$  : Porosidad del medio
- $V_p$  :  $v_x$  Velocidad convectiva en la dirección x ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  : Cambio en la concentración del agua adsorbida (ligada) con el tiempo ( $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ )

La elección del método numérico de resolución fue realizado, considerando lo citado por Constantinides et al. (2000:369) quien clasifica previamente a las ecuaciones diferenciales parciales en tres tipos: elípticas, parabólicas, e hiperbólicas. Se presenta el esquema general de una ecuación diferencial parcial de segundo orden con dos variables independientes:



$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2b \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + d \frac{\partial u}{\partial x} + e \frac{\partial u}{\partial y} + fu + g = 0 \quad (10A.5)$$

Donde:  $b^2 - ac < 0$  : elíptico;  $b^2 - ac = 0$  : parabólico;  $b^2 - ac > 0$  : hiperbólico

Observando, las ecuaciones: 10.A.1, 10.A.2, 10.A.3, y 10.A.4; y comparando con la ecuación anterior, se deduce lo siguiente:

**TABLA N° 10.A.1**

**ANÁLISIS DE LAS ECUACIONES DE TRANSFERENCIA CON MODELOS DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES TÍPICAS**

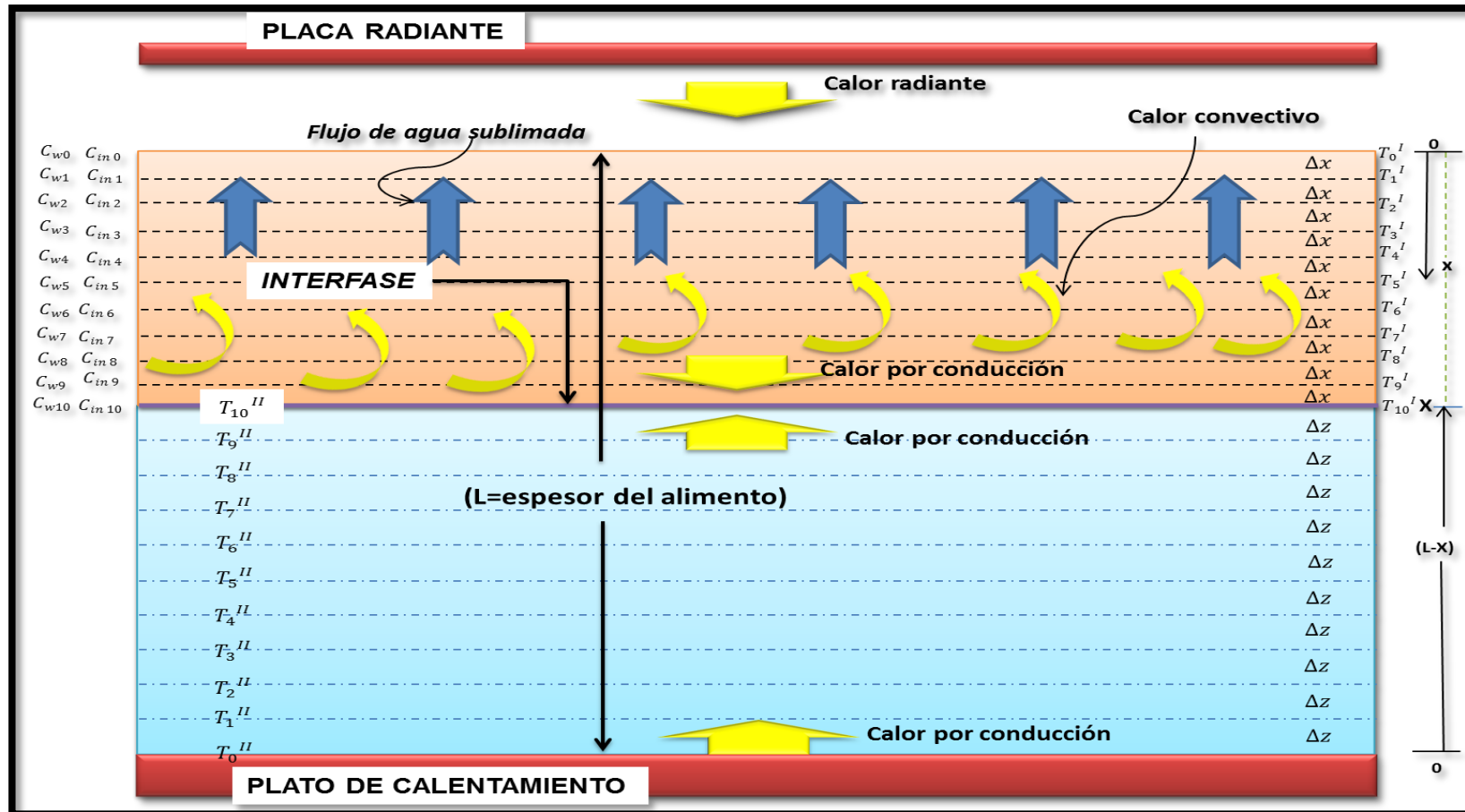
Ecuaciones de Transferencia	Relación de variables EDP y Ecuaciones	Tipo de Ecuación Diferencial Parcial.
11A.1	$u = T_I; x = x; y = t$	$b^2 = 0, c = 0$ $b^2 - ac = 0$ : PARABÓLICO
11A.2	$u = T_{II}; x = x; y = t$	$b^2 = 0, c = 0$ $b^2 - ac = 0$ : PARABÓLICO
11A.3	$u = C_w; x = x; y = t$	$b^2 = 0, c = 0$ $b^2 - ac = 0$ : PARABÓLICO
11A.4	$u = C_{in}; x = x; y = t$	$b^2 = 0, c = 0$ $b^2 - ac = 0$ : PARABÓLICO

**Nota:** EDP=Ecuación Diferencial Parcial; las variables no consideradas se consideran como constantes.

Constantinides et al. (2000:369) mencionan que el desarrollo puede hacerse con un Método implícito, donde es escrita una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas; o con el Método de Lines, basado en el concepto de convertir la ecuación diferencial parcial en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales por medio de la discretización solo de la derivadas espaciales, usando diferencias finitas y dejando incambiable las derivadas del tiempo. Se utilizó el Método de Lines para la resolución de las EDP. Asimismo, deben existir tantas EDP como puntos de malla en la dirección x; por esta razón para incrementar la posibilidad de convergencia se consideró  $0 \leq i \leq 10$ , para disminuir el tamaño del paso en la coordenada x; y se considera  $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  casi constante.

Las EDP mostradas en el Anexo anterior, fueron convertidas a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, discretizando las variables para evaluar los perfiles de concentración y temperatura mediante el esquema de la Figura 10.A.1. Haciendo uso de las ecuaciones 10.A.1, 10.A.2, 10.A.3, y 10.A.4; se realizó la discretización, tomando intervalos unidireccionales en la dirección del recorrido de la interfase (eje x) con divisiones en la capa seca ( $\Delta x$ ) y en la congelada ( $\Delta z$ ), considerando como variable independiente del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias al tiempo de operación ( $t$ ) y las variables dependientes a  $T_i^I$ ,  $T_i^{II}$ ,  $C_{wi}$  y  $C_{ini}$ .

**FIGURA N° 10.A.1**  
**ESQUEMA PARA EL CÁLCULO NUMÉRICO DE LA SIMULACIÓN DE LA LIOFILIZACIÓN DE ALIMENTOS**



Debido a que el fenómeno que se analiza se produce con movimiento de la interfase entre la capa seca (I) y la capa congelada (II), se cita lo siguiente:

Sea “x” el avance en la dirección del secado, que va desde 0 (en la cara superior) hasta “X” (ubicación de la interfase), el análisis de la capa congelada se hará tomando intervalos iguales de tamaño  $\Delta z$ , en la misma dirección pero en sentido contrario, es decir, desde la base del plato ( $x=L$ ) a la interfase ( $x=X$ ). El tamaño de los intervalos  $\Delta z$ , está en función del número de divisiones consideradas, el espesor del alimento (L) y la posición de la interfase (X).

$$\Delta z = \frac{L - X}{\text{número de intervalos}} = \frac{L - X}{10} \quad (10A.6)$$

Discretización general para un punto i de la ecuación 12.A.1:

$$\frac{\partial T_i^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_{i+1}^I - 2T_i^I + T_{i-1}^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_i^I - T_{i-1}^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right] \quad (10A.7)$$

Discretización general para un punto i de la ecuación 12.A.2:

$$\frac{\partial T_i^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_{i+1}^{II} - 2T_i^{II} + T_{i-1}^{II}}{\Delta x^2} \right] \quad (10A.8)$$

Discretización general para un punto i de la ecuación 12.A.3:

$$\frac{\partial C_{wi}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{wi+1} - 2C_{wi} + C_{wi-1}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{wi} - C_{wi-1}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \quad (10A.9)$$

Discretización general para un punto i de la ecuación 12.A.4:

$$\frac{\partial C_{ini}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{ini+1} - 2C_{ini} + C_{ini-1}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{ini} - C_{ini-1}}{\Delta x} \right] \quad (10A.10)$$

Con la ecuación 11.A.7 y considerando 10 divisiones para la capa seca, se especifica para cada punto lo siguiente:

TABLA N° 10.A.2.

SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA LA ECUACIÓN  
10.A.7

i=0	$\frac{\partial T_0^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_1^I - 2T_0^I + T_{-1}^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie}} \left[ \frac{T_0^I - T_{-1}^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.1
i=1	$\frac{\partial T_1^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_2^I - 2T_1^I + T_0^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_1^I - T_0^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.2
i=2	$\frac{\partial T_2^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_3^I - 2T_2^I + T_1^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_2^I - T_1^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.3
i=3	$\frac{\partial T_3^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_4^I - 2T_3^I + T_2^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_3^I - T_2^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.4
i=4	$\frac{\partial T_4^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_5^I - 2T_4^I + T_3^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_4^I - T_3^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.5
i=5	$\frac{\partial T_5^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_6^I - 2T_5^I + T_4^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_5^I - T_4^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.6
i=6	$\frac{\partial T_6^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_7^I - 2T_6^I + T_5^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_6^I - T_5^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.7
i=7	$\frac{\partial T_7^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_8^I - 2T_7^I + T_6^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_7^I - T_6^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.8
i=8	$\frac{\partial T_8^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_9^I - 2T_8^I + T_7^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_8^I - T_7^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.9
i=9	$\frac{\partial T_9^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_{10}^I - 2T_9^I + T_8^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{T_9^I - T_8^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$	A.10

**Nota:** Las ecuaciones A.1 y A.10 serán modificadas según la condición de frontera indicada posteriormente. La Temperatura  $T_{10}^I$ , corresponde a la temperatura de la interfase  $T_X$ .

Con la ecuación 10.A.8 y considerando 10 divisiones para la capa congelada, se especifica para cada punto lo siguiente:

**TABLA N° 10.A.3**  
**SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA LA ECUACIÓN**  
**10.A.8**

i=0	$\frac{\partial T_0^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_1^{II} - 2T_0^{II} + T_{-1}^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.1
i=1	$\frac{\partial T_1^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_2^{II} - 2T_1^{II} + T_0^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.2
i=2	$\frac{\partial T_2^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_3^{II} - 2T_2^{II} + T_1^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.3
i=3	$\frac{\partial T_3^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_4^{II} - 2T_3^{II} + T_2^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.4
i=4	$\frac{\partial T_4^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_5^{II} - 2T_4^{II} + T_3^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.5
i=5	$\frac{\partial T_5^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_6^{II} - 2T_5^{II} + T_4^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.6
i=6	$\frac{\partial T_6^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_7^{II} - 2T_6^{II} + T_5^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.7
i=7	$\frac{\partial T_7^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_8^{II} - 2T_7^{II} + T_6^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.8
i=8	$\frac{\partial T_8^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_9^{II} - 2T_8^{II} + T_7^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.9
i=9	$\frac{\partial T_9^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_{10}^{II} - 2T_9^{II} + T_8^{II}}{\Delta z^2} \right]$	B.10

**Nota:** Las ecuaciones B.1 y B.10 serán modificadas según la condición de frontera indicada posteriormente. La Temperatura  $T_{10}^{II}$ , corresponde a la temperatura de la interfase  $T_X$ .

Con la ecuación 10.A.9 y considerando 10 divisiones para la capa seca, se especifica para cada punto lo siguiente:

**TABLA N° 10.A.4.**  
**SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA LA ECUACIÓN**  
**10A.9**

i=1	$\frac{\partial C_{w1}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w2} - 2C_{w1} + C_{w0}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w1} - C_{w0}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.1
i=2	$\frac{\partial C_{w2}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w3} - 2C_{w2} + C_{w1}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w2} - C_{w1}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.2
i=3	$\frac{\partial C_{w3}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w4} - 2C_{w3} + C_{w2}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w3} - C_{w2}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.3
i=4	$\frac{\partial C_{w4}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w5} - 2C_{w4} + C_{w3}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w4} - C_{w3}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.4
i=5	$\frac{\partial C_{w5}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w6} - 2C_{w5} + C_{w4}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w5} - C_{w4}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.5
i=6	$\frac{\partial C_{w6}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w7} - 2C_{w6} + C_{w5}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w6} - C_{w5}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.6
i=7	$\frac{\partial C_{w7}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w8} - 2C_{w7} + C_{w6}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w7} - C_{w6}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.7
i=8	$\frac{\partial C_{w8}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w9} - 2C_{w8} + C_{w7}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w8} - C_{w7}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.8
i=9	$\frac{\partial C_{w9}}{\partial t} = D_{win,e} \left[ \frac{C_{w10} - 2C_{w9} + C_{w8}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{w9} - C_{w8}}{\Delta x} \right] - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$	C.9

**Nota:** Las concentraciones de vapor de agua  $C_{w0}$  y  $C_{w10}$  (equivalente a  $C_{wx}$ ) para  $i=0$  ó  $i=10$  de la cara superior y la interfase respectivamente, serán analizadas posteriormente.

Con la ecuación 10.A.10 y considerando 10 divisiones para la capa seca, se especifica para cada punto lo siguiente:

**TABLA N° 10A.5**  
**SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA LA ECUACIÓN**  
**10.A.9**

i=1	$\frac{\partial C_{in\ 1}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 2} - 2C_{in\ 1} + C_{in\ 0}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 1} - C_{in\ 0}}{\Delta x} \right]$	D.1
i=2	$\frac{\partial C_{in\ 2}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 3} - 2C_{in\ 2} + C_{in\ 1}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 2} - C_{in\ 1}}{\Delta x} \right]$	D.2
i=3	$\frac{\partial C_{in\ 3}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 4} - 2C_{in\ 3} + C_{in\ 2}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 3} - C_{in\ 2}}{\Delta x} \right]$	D.3
i=4	$\frac{\partial C_{in\ 4}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 5} - 2C_{in\ 4} + C_{in\ 3}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 4} - C_{in\ 3}}{\Delta x} \right]$	D.4
i=5	$\frac{\partial C_{in\ 5}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 6} - 2C_{in\ 5} + C_{in\ 4}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 5} - C_{in\ 4}}{\Delta x} \right]$	D.5
i=6	$\frac{\partial C_{in\ 6}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 7} - 2C_{in\ 6} + C_{in\ 5}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 6} - C_{in\ 5}}{\Delta x} \right]$	D.6
i=7	$\frac{\partial C_{in\ 7}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 8} - 2C_{in\ 7} + C_{in\ 6}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 7} - C_{in\ 6}}{\Delta x} \right]$	D.7
i=8	$\frac{\partial C_{in\ 8}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 9} - 2C_{in\ 8} + C_{in\ 7}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 8} - C_{in\ 7}}{\Delta x} \right]$	D.8
i=9	$\frac{\partial C_{in\ 9}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 10} - 2C_{in\ 9} + C_{in\ 8}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 9} - C_{in\ 8}}{\Delta x} \right]$	D.9
i=10	$\frac{\partial C_{in\ 10}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in\ 11} - 2C_{in\ 10} + C_{in\ 9}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in\ 10} - C_{in\ 9}}{\Delta x} \right]$	D.10

**Nota:** Las concentraciones del inerte en la capa superior  $C_{in\ 0}$  de la ecuación D.1, como  $C_{in\ 11}$  de la ecuación D.10 de la interfase serán analizadas posteriormente.

### CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN LA LIOFILIZACIÓN

Mediante el uso de las ecuaciones diferenciales discretizadas, se brindan las condiciones iniciales propuestas en bibliografía y comentadas posteriormente.

**TABLA N° 10A.6**  
**CONDICIÓN Y DE FRONTERA DEL SISTEMA DE ECUACIONES**  
**PROPUESTAS**

t=0	$T_I = T_x = T_0$ (en la capa seca) $T_{II} = T_x = T_0$ (en la capa congelada) $C_{in} = 0; C_w = 0$ (en la capa seca)	(a)
x=0	$q_I = -k_{Ie} \frac{\partial T}{\partial x}, t > 0; q_I = \sigma F (T_{UP}^4 - T_0^{I4}), t > 0$	(b)
	$C_w^0 = M_w \left[ \frac{P_w^0}{RT_I^0} \right], t \geq 0; C_{in}^0 = M_{in} \left[ \frac{P_{in}^0}{RT_I^0} \right], t \geq 0;$	(c)
x=X	$-k_{Ie} \frac{\partial T_I}{\partial x} + k_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} + V(\rho_I C_{pI} T_I - \rho_{II} C_{pII} T_{II}) + N_t C_{pg} T_x = \Delta H_s N_w, 0 < t < t_{x=L}$	(d)
	$C_{wX} = M_w \left[ \frac{P_{wX}}{RT_X} \right] = M_w \left[ \frac{f(T_X)}{RT_X} \right], 0 < t \leq t_{x=L}$	(e)
	$\frac{\partial C_{in}}{\partial x} = 0, 0 < t \leq t_{x=L}$	(f)
x=L	$q_{II} = k_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x}, t > 0$	(g)

**Fuente:** Liapis y Bruttini citado por Turner (1997:482)

**Nota:** Las relaciones mostradas en la Tabla serán analizadas a continuación.

En la ecuación (a) la temperatura inicial en ambas capas (seca y congelada) será la misma.

En la ecuación (b) existe un flujo de calor desde la placa radiante superior a la cara superior del alimento; este calor irradiado se transmite inmediatamente mediante conducción de calor, despreciando pérdidas de calor se indica la siguiente:

Igualando las relaciones en la frontera:

$$q_I = \sigma F (T_{UP}^4 - T_I^4) = -k_{Ie} \frac{\partial T}{\partial x}$$

En  $i=0$ :

$$\sigma F (T_{UP}^4 - T_0^{I4}) = -k_{Ie} \left( \frac{T_0^I - T_{-1}^I}{\Delta x} \right)$$

$$T_{-1}^I = T_0^I + \frac{\sigma F \Delta x}{k_{Ie}} (T_{UP}^4 - T_0^{I4}) \quad (h)$$

Reemplazando (h) en A.1

$$\frac{\partial T_0^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_1^I - T_0^I + \frac{\sigma F \Delta x}{k_{Ie}} (T_{UP}^4 - T_0^{I4})}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{pIe}} \left[ \frac{-\frac{\sigma F \Delta x}{k_{Ie}} (T_{UP}^4 - T_0^{I4})}{\Delta x} \right]$$

$$+ \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{pIe}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right]$$

A.1\*

Donde:

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ) =  $5.67 \times 10^{-8}$



- $F$  : Factor de visión de Hottel, como función de la geometría y disposición del sistema (Ver Anexo 14).  
 $T_{UP}$  : Temperatura de la placa calefactora generadora del calor por radiación (K)  
 $T_I$  : Temperatura de la cara superior de la muestra en el plato (K)

En la ecuación (c), las concentraciones en la fase gaseosa del agua y del inerte (aire), son calculadas partiendo de la presión de trabajo y las constantes características, siendo estas las condiciones de frontera iniciales para las ecuaciones C.1 y D.1.

$$C_w = C_w^0 = M_w \left[ \frac{P_w^0}{RT_I^0} \right] \quad (i)$$

$$C_{in} = C_{in}^0 = M_{in} \left[ \frac{P_{in}^0}{RT_I^0} \right] \quad (j)$$

Donde:

- $P_w^0$  : Presión parcial de vapor de agua en  $x=0$  (parte superior de la capa seca)  
 $P_{in}^0$  : Presión parcial del aire en  $x=0$  (parte superior de la capa seca)  
 $M_w$  : Peso molecular del agua= 18.016 g.mol<sup>-1</sup>  
 $M_{in}$  : Peso molecular del aire (inerte)=28.97 g.mol<sup>-1</sup>  
 $T_I^0$  : Temperatura en la capa superior seca  
 $R$  : Constante de los gases ideales= 8.314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

La determinación de  $P_w^0$  está en función de la Temperatura de trabajo del condensador (Millman, Liapis y Marchello, 1984: 732); los datos relacionados a la presión de vapor del hielo en función de la temperatura se muestran en los anexos. La variable  $P_{in}^0$  es considerada como la presión de vacío absoluta del equipo de liofilización.

En la ecuación (d), la presentación de la fórmula ha sido modificada levemente en algunos signos, teniendo en cuenta que existen constantes consideradas como negativas dependiendo de la entrada o salida de calor en el sistema; realizando un balance de calor en la interfase se menciona: Existe una entrada de calor por conducción desde la capa seca ( $q_{k1}$ ) hacia la interfase, y desde la base del plato hacia la interfase ( $q_{k2}$ ).

El calor que ingresa por la capa seca originará movimiento de gases que producirá una entrada de calor por convección ( $q_h$ ).

La sumatoria de calores originados proporciona el calor de sublimación ( $q_s$ ).

Cuando se produce la sublimación el flujo de gases producidos produce un calentamiento en la interfase ( $q_{gas}$ )

A continuación se obtiene las condiciones de frontera para la transferencia de calor en la capa seca y en la capa congelada.

Flujo de calor que entra es igual al flujo de calor originado para la sublimación en la interfase:

$$q_{k1} + q_{k2} + q_h + q_{gas} = q_s \quad (k)$$

La transferencia de calor en la capa seca, inmediatamente antes de la interfase, usando las discretizaciones correspondientes para dicho punto es:

$$q_{k1} = -k_{Ie} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{Ie} \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k_{Ie} \frac{(T_{10}^I - T_9^I)}{\Delta x} = -k_{Ie} \frac{(T_x - T_9^I)}{\Delta x} \quad (l)$$

La transferencia de calor en la capa seca, inmediatamente próxima a la interfase, usando las discretizaciones correspondientes para dicho punto es:

$$q_{k2} = k_{II} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{II} \frac{(T_9^{II} - T_{10}^{II})}{\Delta z} = k_{II} \frac{(T_9^{II} - T_x)}{\Delta z} \quad (m)$$

Para las expresiones (l) y (m), los puntos adicionales:  $T_{11}^I$  y  $T_{11}^{II}$  se igualan a la temperatura de la interfase  $T_x$ .

Millman, Liapis y Marchello (1984: 732) igualan la Temperatura de la capa seca y la temperatura de la capa congelada muy próxima a la interfase como la temperatura de la interfase: ( $T_I = T_{II} = T_x$ ). La velocidad de secado  $V$ , está referido a la velocidad de cambio de posición de la interfase ( $x=X$ ).

$$q_h = V(\rho_{II} c_{pII} T_{II} - \rho_I c_{pI} T_I) = \frac{N_w}{(\rho_{II} - \rho_I)} (\rho_{II} c_{pII} T_{II} - \rho_I c_{pI} T_I) T_x \quad (n)$$

Donde:

$q_h$  : Calor por convección ( $J.s^{-1}$ )

$V$  : Velocidad de la interfase =  $\frac{N_w}{(\rho_{II} - \rho_I)}$

$N_w$  : Flujo másico del vapor de agua en la capa seca ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )

$\rho_I$  : Densidad de la capa seca ( $kg.m^{-3}$ )

$\rho_{II}$  : Densidad de la capa congelada ( $kg.m^{-3}$ )

$c_{pIe}$  : Capacidad calórica efectiva de la capa seca ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )

$c_{pg}$  : Capacidad calórica del gas ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )

El calor originado por el flujo de vapor de agua que se va sublimando en la interfase, se expresa como sigue:

$$q_{gas} = N_t c_{pg} T_x \quad (o)$$

Donde:

$N_t$  : Flujo másico total en la capa seca =  $N_{in} + N_w = V_p (C_w + C_{in})$

$V_p$  : Velocidad convectiva del gas (agua e inerte) en la capa

seca =  $-\left(\frac{K_{p3}}{\mu}\right) \frac{\partial P}{\partial x}$

$c_{pg}$  : Capacidad calórica del gas en la capa seca ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )

$T_x$  : Temperatura de la interfase (K)

$K_{p3}$  : Permeabilidad de la capa seca porosa.

$\mu$  : Viscosidad del gas

El calor de sublimación originado es:

$$q_s = H_s N_w \quad (p)$$

Donde:

$q_s$  : Calor de sublimación ( $J.s^{-1}$ )

$H_s$  : Calor de sublimación del hielo ( $J.kg^{-1}$ )

$N_w$  : Flujo de vapor de agua en la capa seca ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Reemplazando las ecuaciones (l), (m), (n), (o) y (p) en (k); se define la ecuación que debe cumplirse en la interfase y que a la vez corresponde a la condición de frontera para la capa seca y la capa congelada:

$$-k_{Ie} \frac{(T_x - T_9^I)}{\Delta x} + k_{II} \frac{(T_9^{II} - T_x)}{\Delta z} + \frac{N_w}{(\rho_{II} - \rho_I)} (\rho_{II} C_{pII} T_{II} - \rho_I C_{pI} T_I) T_x + N_t C_{pg} T_x = H_s N_w$$

A.1\*\*

Asimismo, reemplazando  $T_{10}^I = T_{10}^{II} = T_x$  en las ecuaciones A.10 y B.10 se obtiene:

$$\frac{\partial T_9^I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \left[ \frac{T_x - 2T_9^I + T_8^I}{\Delta x^2} \right] - \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{pIe}} \left[ \frac{T_9^I - T_8^I}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{pIe}} \left[ \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right] \quad \text{A10*}$$

$$\frac{\partial T_9^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_x - 2T_9^{II} + T_8^{II}}{\Delta z^2} \right] \quad \text{B.10*}$$

En la ecuación (g), la condición de frontera inicial en la capa congelada (contacto con el plato de calentamiento) se deduce y reemplazando en la ecuación B.1 se obtiene:

$$q_{II} = k_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} = k_{II} \frac{(T_{-1}^{II} - T_0^{II})}{\Delta z}$$

$$T_{-1}^{II} = T_0^{II} + \frac{\Delta z \cdot q_{II}}{k_{II}}$$

$$\frac{\partial T_0^{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \left[ \frac{T_1^{II} - T_0^{II} + \frac{\Delta z \cdot q_{II}}{k_{II}}}{\Delta z^2} \right] \quad \text{B1*}$$

En la ecuación (e), la concentración del vapor de agua en la interfase se calcula usando la relación en general de los gases ideales, considerando la temperatura en la interfase calculada.

En la ecuación (f) se deduce la condición de frontera en la interfase; discretizando y reemplazando en la ecuación D.10 se obtiene:

$$\frac{\partial C_{in}}{\partial x} = \left[ \frac{C_{in11} - C_{in10}}{\Delta x} \right] = 0$$

$$\frac{\partial C_{in10}}{\partial t} = D_{inw,e} \left[ \frac{C_{in11} - C_{in10}}{\Delta x^2} \right] - \frac{V_p}{\varepsilon_p} \left[ \frac{C_{in10} - C_{in9}}{\Delta x} \right] \quad \text{D.10*}$$

Además, se deben considerar relaciones adicionales como:

$$P = P^0 = P_{in}^0 + P_w^0 \quad \text{10.A.11}$$

$$P_X = P_{wX} + P_{inX} \quad \text{10.A.12}$$

$$P_{wX} = f(T_X) \quad \text{10.A.13}$$

La expresión  $\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$  es el cambio de concentración del agua adsorbida con respecto al tiempo, uno de los mecanismos puede ser representado:

$$\frac{\partial C_{sw}}{\partial t} = k_1 C_{pw} (C_T - C_{sw}) - k_2 C_{sw} \quad \text{10.A.14}$$

$$k_1 = k_{10} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) \quad 10.A.15$$

$$k_2 = k_{20} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_1}\right) \quad 10.A.16$$

Donde:

$C_{SW}$  Concentración del agua adsorbida ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$C_T$  Concentración máxima de equilibrio del agua adsorbida ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$k_1, k_2, k_{10}, k_{20}$  = Constantes de la razón de adsorción y desorción en función de la temperatura ( $T_1$ )

$E_1$  y  $E_2$ : Energía de Activación

En la ecuación 10.A.16, el término  $\frac{\partial C_{SW}}{\partial t}$  es negativo (prevalece desorción) si  $k_2 C_{SW}$  es mucho más grado que  $k_1 C_{pw} (C_T - C_{SW})$ . Por supuesto, si  $k_2 C_{SW} \gg k_1 C_{pw} (C_T - C_{SW})$ . para todos los tiempos y en cualquier sitio de la capa seca, entonces el término puede ser considerado igual a  $-k_2 C_{SW}$  sin introducir ningún error significativo en los cálculos.

### DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DEL PASO DE LA VARIABLE TIEMPO DURANTE EL CÁLCULO

Constantinides et al. (2000: 396) indica que como regla del pulgar, cuando todos los valores conocidos son arreglados en el lado derecho de la formulación de las diferencias finitas, si algún coeficiente negativo, la solución es inestable. Por ejemplo:

$$u_{i,n+1} = Au_{i+1,n} + Bu_{i,n} + Cu_{i-1,n} \quad 10.A.17$$

Si A, B, C son positivos y  $A+B+C \leq 1$ , entonces el esquema numérico es estable. Para el caso específico de las cuatro primeras ecuaciones del Anexo N°10, se tiene, colocándolas de manera explícita:

**TABLA N° 10.A.7.**  
**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

<p>Ecuación 10.A.1</p> $T_{i,n+1}^I = \left(\frac{\alpha_{Ie} \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i+1,n}^I + \left(1 - 2\frac{\alpha_{Ie} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{C_{pg} N_t \Delta t}{\rho_{Ie} C_{ple} \Delta x}\right) T_{i,n}^I + \left(\frac{\alpha_{Ie} \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{C_{pg} N_t}{\rho_{Ie} C_{ple} \Delta x}\right) T_{i-1,n}^I + \frac{\Delta H_v}{\rho_{Ie} C_{ple}} \left[\frac{\partial C_{sw}}{\partial t}\right]$ <p>Entonces:</p> $\left(1 - 2\frac{\alpha_{Ie} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{C_{pg} N_t \Delta t}{\rho_{Ie} C_{ple} \Delta x}\right) \geq 0; \quad 2\frac{\alpha_{Ie} \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{C_{pg} N_t \Delta t}{\rho_{Ie} C_{ple} \Delta x} \leq 1$
<p>Ecuación 10.A.2</p> $T_{i,n+1}^{II} = \left(\frac{\alpha_{II} \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i+1,n}^{II} + \left(1 - 2\frac{\alpha_{II} \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i,n}^{II} + \frac{\alpha_{II} \Delta t}{\Delta x^2} T_{i-1,n}^{II}$ <p>Entonces:</p> $\left(1 - 2\frac{\alpha_{II} \Delta t}{\Delta x^2}\right) \geq 0; \quad \frac{\alpha_{II} \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$

**TABLA N° 10.A.8.**  
**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS ECUACIONES DE**  
**TRANSFERENCIA DE MASA**

<p>Ecuación 10.A.3</p> $C_{wi,n+1} = \left( \frac{D_{win,e}\Delta t}{\Delta x^2} \right) C_{wi+1,n} + \left[ 1 - 2 \frac{D_{win,e}\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \right] C_{wi,n} + \left[ \frac{D_{win,e}\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \right] C_{wi-1,n} - \frac{1}{\varepsilon_p} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t}$ <p>Entonces:</p> $1 - 2 \frac{D_{win,e}\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t \cdot V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \geq 0; \quad 2 \frac{D_{win,e}\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t \cdot V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \leq 1$
<p>Ecuación 10.A.4</p> $C_{ini,n+1} = \left( \frac{D_{inw,e}\Delta t}{\Delta x^2} \right) C_{ini+1,n} + \left[ 1 - 2 \frac{D_{inw,e}\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \right] C_{in i,n} + \left[ \frac{D_{inw,e}\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \right] C_{in i-1,n}$ <p>Entonces:</p> $1 - 2 \frac{D_{inw,e}\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t \cdot V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \geq 0; \quad 2 \frac{D_{inw,e}\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t \cdot V_p}{\varepsilon_p \Delta x} \leq 1$

## ANEXO Nº11 PROGRAMA EN MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE LA LIOFILIZACIÓN

Los perfiles de temperatura de la capa seca y de la capa congelada, fueron desarrollados en un mismo subprograma.

Los perfiles de concentración de agua y de concentración de inertes fueron calculados en dos sub-programas distintos.

### SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE TEMPERATURA- ARCHIVO PRINCIPAL

```
function [F1]=ODE41(T)
global Mw R C2 Cpg Cp_1 Cp_2 kf k_2 Hs dens_1 dens_2 L Tcond T01
Tm Ts Tup Tx P0 Ta Pw0 Pwx Dw Kw kie alf_ie alf_ii X Nw Nt cvg_1
cvg_2 dx dz q_1 q_2 cte_0 cte_1 cte_2 cte_3 cte_4 cte_5 V F sig Hv
dCswdt

%DESARROLLO CASO 1
Nw=(C2*Dw*Kw*Mw)*(Pwx-Pw0)/((C2*Dw+Kw*P0)*R*Ta*X);%kg/m2/sec
Nt=2*Nw;%kg/m2/sec

%CONVERGENCIA 1 ECUACION CAPA (I) (<=1)
cvg_1=2*dt*alf_ie/(dt^2)+(Cpg*Nt*dt)/(dens_1*Cp_1*dx);
%CONVERGENCIA 1 ECUACION CAPA (II) (<=1/2)
cvg_2=dt*alf_ii/(dz^2);

%CALCULO DE CONSTANTES DE LOS MODELO
cte_0=sig*F*dx/kie;
cte_1=alf_ie/(dx^2);
cte_2=Cpg*Nt/(dens_1*Cp_1*dx);
cte_3=alf_ii/(dz^2);
cte_4=dz*q_2/k_2;
cte_5=Hv*dCswdt/(dens_1*Cp_1);
V=Nw/(dens_2-dens_1);%velocidad de la interfase

%SISTEMA DE ECUACIONES DEL METODO DE LINEAS
%CAPA SECA (I):
F1(1)=cte_1*(T(2)-T(1)+cte_0*((Tup^4)-(T(1)^4)))-cte_2*(-
cte_0)*((Tup^4)-(T(1)^4))+cte_5;%dT0(I)/dt
F1(2)=cte_1*(T(3)-2*T(2)+T(1))-cte_2*(T(2)-T(1))+cte_5;%dT1(I)/dt
F1(3)=cte_1*(T(4)-2*T(3)+T(2))-cte_2*(T(3)-T(2))+cte_5;%dT2(I)/dt
F1(4)=cte_1*(T(5)-2*T(4)+T(3))-cte_2*(T(4)-T(3))+cte_5;%dT3(I)/dt
F1(5)=cte_1*(T(6)-2*T(5)+T(4))-cte_2*(T(5)-T(4))+cte_5;%dT4(I)/dt
F1(6)=cte_1*(T(7)-2*T(6)+T(5))-cte_2*(T(6)-T(5))+cte_5;%dT5(I)/dt
F1(7)=cte_1*(T(8)-2*T(7)+T(6))-cte_2*(T(7)-T(6))+cte_5;%dT6(I)/dt
F1(8)=cte_1*(T(9)-2*T(8)+T(7))-cte_2*(T(8)-T(7))+cte_5;%dT7(I)/dt
F1(9)=cte_1*(T(10)-2*T(9)+T(8))-cte_2*(T(9)-T(8))+cte_5;%dT8(I)/dt
F1(10)=cte_1*(T(11)-2*T(10)+T(9))-cte_2*(T(10)-
T(9))+cte_5;%dT9(I)/dt
%Balance en la interfase
T(12)=Tx+(dz/k_2)*(Hs*Nw+(kie*(Tx-T(10))/dx)-(Nw/(dens_2-
dens_1))*(dens_2*Cp_2-dens_1*Cp_1)*Tx-Nt*Cpg*Tx);
%CAPA CONGELADA (II):
F1(11)=cte_3*(Tx-2*T(11)+T(12));%dT9(II)/dt
F1(12)=cte_3*(T(11)-2*T(12)+T(13));%dT8(II)/dt
F1(13)=cte_3*(T(12)-2*T(13)+T(14));%dT7(II)/dt
```

```

F1(14)=cte_3*(T(13)-2*T(14)+T(15));%dT6(II)/dt
F1(15)=cte_3*(T(14)-2*T(15)+T(16));%dT5(II)/dt
F1(16)=cte_3*(T(15)-2*T(16)+T(17));%dT4(II)/dt
F1(17)=cte_3*(T(16)-2*T(17)+T(18));%dT3(II)/dt
F1(18)=cte_3*(T(17)-2*T(18)+T(19));%dT2(II)/dt
F1(19)=cte_3*(T(18)-2*T(19)+T(20));%dT1(II)/dt
F1(20)=cte_3*(T(19)-T(20)+cte_4);%dT0(II)/dt

```

### **SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE TEMPERATURA- MÉTODO NUMÉRICO**

```

function [Y]=RK4_1(F,a,b,Y0,N)
%Sintaxi
%[t,Z]=RK4(F,a,b,Z0,N)
%Entrada
%F es el sistema de ecuaciones diferenciales, almacenados en un
archivo F.m
% a y b son los extremos del intervalo
%Z0 es la condición inicial Z0=[X10,X20, ...]
%N= es el número de pasos
%salida
%t es el vector de las abcisas o variables independientes
%Z es el vector de resultados Z=[X1, X2,....]
H=(b-a)/N;
Y=zeros(N+1,length(Y0));
Y(1,:)=Y0;
for J=1:N
    K1=H*feval(F,Y(J,:));
    K2=H*feval(F,Y(J,)+K1/2);
    K3=H*feval(F,Y(J,)+K2/2);
    K4=H*feval(F,Y(J,)+K3);
    Y(J+1,:)=Y(J,)+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6;
end

```

### **SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE VAPOR DE AGUA EN LA CAPA SECA- ARCHIVO PRINCIPAL**

```

function [F2]=ODE4_2(Cw)
global Mw R C2 Cpg Cp_1 Cp_2 kf k_2 Hs dens_1 dens_2 DWagua_aire k
u Ep X T0 Tx Pw0 Pwx dt Np dx VPEVx Vp cte_4 cte_5 cvg_3 Cw0

%INPUT DATOS PARA MÉTODOS NUMÉRICOS
dt=7.9*10^(-14);%s
Np=10;%número de espacios o intervalos en la posición
dx=X/Np;%m

%CALCULADOS
VPEVx=(Pwx-Pw0)/X;
Vp=-(k/u)*(VPEVx);

%CALCULO DE CONSTANTES DEL MODELO
cte_4=DWagua_aire/(dx^2);
cte_5=Vp/(Ep*dx);

```

```

%CONVERGENCIA DE LA ECUACION
cvg_3=2*(DWagua_aire*dt/(dx^2))-(dt*Vp/(Ep*dx));

Cw0=Mw*(Pw0/R*T(1));%Condición inicial (i=0) para Cw0
Cw10=Mw*Pwx/R*Tx;

%ECUACIONES DISCRETIZADAS
F2(1)=cte_4*(Cw(2)-2*Cw(1)+Cw0)-cte_5*(Cw(1)-Cw0);%dCw(1)/dt
F2(2)=cte_4*(Cw(3)-2*Cw(2)+Cw(1))-cte_5*(Cw(2)-Cw(1));%dCw(2)/dt
F2(3)=cte_4*(Cw(4)-2*Cw(3)+Cw(2))-cte_5*(Cw(3)-Cw(2));%dCw(3)/dt
F2(4)=cte_4*(Cw(5)-2*Cw(4)+Cw(3))-cte_5*(Cw(4)-Cw(3));%dCw(4)/dt
F2(5)=cte_4*(Cw(6)-2*Cw(5)+Cw(4))-cte_5*(Cw(5)-Cw(4));%dCw(5)/dt
F2(6)=cte_4*(Cw(7)-2*Cw(6)+Cw(5))-cte_5*(Cw(6)-Cw(5));%dCw(6)/dt
F2(7)=cte_4*(Cw(8)-2*Cw(7)+Cw(6))-cte_5*(Cw(7)-Cw(6));%dCw(7)/dt
F2(8)=cte_4*(Cw(9)-2*Cw(8)+Cw(7))-cte_5*(Cw(8)-Cw(7));%dCw(8)/dt
F2(9)=cte_4*(Cw10-2*Cw(9)+Cw(8))-cte_5*(Cw(9)-Cw(8));%dCw(9)/dt

```

### **SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE VAPOR DE AGUA -MÉTODO NUMÉRICO**

```

function [Cw]=RK4_2(F,dt,Cw0,N)
Cw=zeros(N+1,length(Cw0));
Cw(1,:)=Cw0;
for J=1:N
    K1=dt*feval(F,Cw(J,:));
    K2=dt*feval(F,Cw(J, :)+K1/2);
    K3=dt*feval(F,Cw(J, :)+K2/2);
    K4=dt*feval(F,Cw(J, :)+K3);
    Cw(J+1,:)=Cw(J, :)+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6;
end

```

### **SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE AIRE EN LA CAPA SECA-ARCHIVO PRINCIPAL**

```

function [F3]=ODE4_3(CI)
global Mw R C2 Cpg Cp_1 Cp_2 kf k_2 Hs dens_1 dens_2 DWaire_agua k
u Ep X T0 Pin dt Np dx VPEVx Vp cte_5 cte_6 cvg_4 Cin0

%CALCULADOS
VPEVx=(Pwx-Pw0)/X;
Vp=- (k/u) * (VPEVx);

%CALCULO DE CONSTANTES DEL MODELO
cte_5=DWaire_agua/(dx^2);
cte_6=Vp/(Ep*dx);

%CONVERGENCIA DE LA ECUACION
cvg_4=2*(DWaire_agua*dt/(dx^2))-(dt*Vp/(Ep*dx));

Cin0=Mw*(Pin/R*T(1));
%Condición inicial (i=0) para Cw0

%ECUACIONES DISCRETIZADAS
F3(1)=cte_5*(Cin(2)-2*Cin(1)+Cin0)-cte_5*(Cin(1)-Cin0);%dCin 1/dt

```



```

F3(2)=cte_5*(Cin(3)-2*Cin(2)+Cin(1))-cte_5*(Cin(2)-Cin(1));%dCin
2/dt
F3(3)=cte_5*(Cin(4)-2*Cin(3)+Cin(2))-cte_5*(Cin(3)-Cin(2));%dCin
3/dt
F3(4)=cte_5*(Cin(5)-2*Cin(4)+Cin(3))-cte_5*(Cin(4)-Cin(3));%dCin
4/dt
F3(5)=cte_5*(Cin(6)-2*Cin(5)+Cin(4))-cte_5*(Cin(5)-Cin(4));%dCin
5/dt
F3(6)=cte_5*(Cin(7)-2*Cin(6)+Cin(5))-cte_5*(Cin(6)-Cin(5));%dCin
6/dt
F3(7)=cte_5*(Cin(8)-2*Cin(7)+Cin(6))-cte_5*(Cin(7)-Cin(6));%dCin
7/dt
F3(8)=cte_5*(Cin(9)-2*Cin(8)+Cin(7))-cte_5*(Cin(8)-Cin(7));%dCin
8/dt
F3(9)=cte_5*(Cin(10)-2*Cin(9)+Cin(8))-cte_5*(Cin(9)-Cin(8));%dCin
9/dt
F3(10)=cte_4*(-Cin(10)+Cin(9))-cte_5*(Cin(10)-Cin(9));%dCin 10/dt

```

### **SUB-PROGRAMA PARA CALCULAR PERFILES DE AIRE -MÉTODO NUMÉRICO**

```

function [CI]=RK4_3(F,dt,CI0,N)
CI=zeros(N+1,length(CI0));
CI(1,:)=CI0;
for J=1:N
    K1=dt*feval(F,CI(J,:));
    K2=dt*feval(F,CI(J,:)+K1/2);
    K3=dt*feval(F,CI(J,:)+K2/2);
    K4=dt*feval(F,CI(J,:)+K3);
    CI(J+1,:)=CI(J,:)+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6;
end

```