

MODELADO DE LA TRANSFERENCIA SIMULTANEA  
DE CALOR Y MATERIA DURANTE  
LA CONGELACION Y ALMACENAMIENTO DE  
PRODUCTOS CARNEOS

Ana María Tocci

Tesis presentada para el grado de  
DOCTOR EN INGENIERIA

Departamento de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

U N L P

1997

El presente trabajo de tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería Química fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de la Plata, bajo la dirección del Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni.

"Todos cuantos han meditado sobre el arte de gobernar a la Humanidad han adquirido la convicción de que la suerte de los imperios depende de la educación de la juventud".

(Aristóteles)

A mi esposo e hijos.

## AGRADECIMIENTOS

. Al Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni por haberme brindado la posibilidad de iniciarme en la investigación bajo su dirección y por su apoyo y dedicación para hacer posible la realización de este trabajo de tesis.

. A la Dra. Viviana Salvadori, por su constante apoyo en el área de computación.

. Al Ingeniero Néstor Serena por su apoyo y colaboración en el manejo del DSC.

. A los Sres. Vicente Valenti y Sergio Torres, por su permanente ayuda técnica.

. A la Sra. María Cecilia Corda por su colaboración en la búsqueda de material bibliográfico.

. Al Sr. Mario Petterini, por la realización de parte de los gráficos utilizados en el trabajo de tesis.

. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por la formación científica recibida.

. A la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Buenos Aires (UBA), por la formación recibida en el área alimentos.

. A la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) y a la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por el apoyo económico recibido a través de becas otorgadas.

. A mis padres por la formación espiritual y educativa, y por ser una constante guía.

. A mi esposo e hijos por su constante apoyo y estímulo que me permiten continuar en esta carrera.

. A todos mis compañeros del CIDCA, por su amistad y apoyo que ayudaron a hacer más ameno y placentero mi trabajo.

Parte de los resultados presentados en esta tesis, han dado origen a los siguientes trabajos:

**-Heat transfer coefficient in the freezing of meat balls in continuous belt freezers.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

Regional Seminar: Cold Chain Development in Latin America. Tomo II (1988) 301-307.

**-Determination of heat transfer coefficients and freezing times of meat balls in blast freezers.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

Progress in the Science and Technology of Refrigeration in Food Engineering. International Journal of Refrigeration. Dresden, Germany (1990), 683-688.

**-Método numérico para la predicción de transferencia simultánea de calor y materia en la refrigeración y congelación de alimentos.**

Ana M. Tocci y R. H. Mascheroni.

Mecánica Computacional Vol XI. III Congreso Argentino de Mecánica Computacional MECOM'91. Paraná, (1991) 21-30.

**-Simulación de la transferencia simultánea de calor y materia en la congelación de alimentos.**

Ana M. Tocci y R. H. Mascheroni.

IV Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia. La Serena, Chile (1991) 352-359.

**-Determination of thermal properties of boneless mutton by DSC and modeling of their dependence with temperature and water content.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

International Congress COLD'92. Buenos Aires, Argentina (1992) 260-267.

**-Medida de capacidad calorífica y entalpía de carnes por calorimetría diferencial de barrido en el rango de temperaturas de refrigeración y congelación.**

Ana M. Tocci y R. H. Mascheroni.

VI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 1<sup>er</sup> Encuentro de Técnicos de Alimentos del Cono Sur. Buenos Aires, Argentina (1994) 587.

**-Modelling and numerical simulation of the simultaneous heat and mass transfer during food freezing and storage.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

Advanced Computational Methods in Heat Transfer III. Proceedings of the Third International Conference, Southampton, UK (1994) 579-586.

**-Freezing times of meat balls in belt freezers. Experimental determination and prediction by different methods.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

International Journal of Refrigeration. Volumen 17 (7), (1994) 445-452.

**-Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration, freezing and storage of meat, meat products and analogues.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

Journal of Food Engineering 26, (1994) 147-160.

**-Numerical models of the simultaneous heat and mass transfer during food freezing and storage.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

International Communications in Heat and Mass Transfer 22, (1995) 251-260.

**-Enthalpy, heat capacity and thermal conductivity of boneless mutton between -40 and +40 °C.**

Ana M. Tocci, E. S. Flores and R. H. Mascheroni.

Lebensmittel- Wissenschaft & Technologie 30, (1997) 184-191.

**-Characteristics of DSC determination of thermophysical properties of meats.**

Ana M. Tocci and R. H. Mascheroni.

Enviado para publicar en Lebensmittel- Wissenschaft & Technologie.

## CAPITULO 1

### I.- INTRODUCCION

1.- Presentación del tema.....	1
2.- Crecimiento del mercado de productos congelados.....	3
3.- Depósitos de almacenamiento de productos congelados..	11
4.- Descripción de objetivos y contenidos.....	12

## CAPITULO 2

### II.- PROPIEDADES TERMICAS DE PRODUCTOS CARNEOS

1.- Entalpía y capacidad calorífica de carnes.....	15
1.a.- Equipo experimental.....	16
1.a.a.- Materiales usados en las experiencias y método experimental.....	20
1.b.- Resultados experimentales y discusión.....	27
1.c.- Obtención de regresiones y ecuaciones de predicción.....	34
1.d.- Comparación con ecuaciones de bibliografía.....	36
1.e.- Estudio de la influencia de las condiciones de la congelación y almacenamiento sobre los valores medidos.....	48
2.- Conductividad térmica y densidad.....	53
2.a.- Búsqueda de ecuaciones de predicción de conductividad térmica y densidad de carnes.....	55
2.b.- Conclusiones.....	64

**CAPITULO 3**

**III.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA  
EN EQUIPOS DE CONGELACION**

1.- Coeficientes de transferencia de calor.....66

1.a.- Búsqueda bibliográfica de datos experimentales  
de métodos de medida y de ecuaciones de  
predicción.....67

1.b.- Equipo experimental y método de medida y  
cálculo.....72

1.c.- Determinaciones experimentales.....74

1.d.- Método de cálculo.....76

1.e.- Resultados experimentales.....78

1.f.- Obtención de las ecuaciones de predicción por  
regresión de los datos experimentales.....82

2.- Coeficientes de transferencia de materia.....88

2.a.- Búsqueda de relaciones teóricas entre coefi-  
cientes de transferencia de calor y materia....89

2.b.- Variación del coeficiente de transferencia de  
materia en función de la temperatura y de  
la dirección y velocidad de flujo de aire.....92

**CAPITULO 4**

**IV.- TIEMPOS DE CONGELACION**

1.- Presentación del tema.....96

2.- Materiales y métodos.....98

3.- Predicción por distintos métodos dados en bibliografía.....	99
3.a.- Métodos de cálculo	
3.a.a.- Método Numérico.....	99
3.a.b.- Métodos Aproximados.....	99
4.- Resultados experimentales y comparación con los valores calculados por los distintos métodos de predicción.....	107

**CAPITULO 5**

**V.- PREDICCIÓN DE LA TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MATERIA EN EQUIPOS DE CONGELACIÓN Y ALMACENAMIENTO**

1.- Planteo fisicoquímico y matemático del problema.....	114
1.a.- Balances microscópicos de calor y materia.....	115
1.b.- Propiedades térmicas utilizadas en la resolución de los balances.....	116
1.c.- Condiciones iniciales y de contorno usuales...	119
2.- Solución de los balances por métodos numéricos.....	120
2.a.- Métodos de cálculo	
2.a.a.- Método de incrementos de igual espesor.....	121
2.a.b.- Método de iguales incrementos de volumen.....	128
2.b.- Simulación de la congelación con simultánea sublimación	
2.b.a.- Simulación de la congelación de albóndigas.....	131
2.b.b.- Simulación de la congelación de	

hamburguesas.....	132
2.c.- Comparación de los resultados obtenidos por distintos métodos y con datos de bibliografía.....	133

**CAPITULO 6**

VI.- CONCLUSIONES.....	145
------------------------	-----

VII.- NOMENCLATURA.....	151
-------------------------	-----

VIII.- REFERENCIAS.....	155
-------------------------	-----

IX.- APENDICES

APENDICE 1.....	167
APENDICE 1'.....	169
APENDICE 2.....	171
APENDICE 3.....	174
APENDICE 4.....	179

TABLAS

TABLA 1a.....	4
TABLA 1b.....	5
TABLA 1c.....	6
TABLA 2.....	10
TABLA 3.....	12
TABLA 4.....	46
TABLA 5.....	60
TABLA 6.....	61

TABLA 7.....	64
TABLA 8.....	71
TABLA 9.....	79
TABLA 9 (continuación).....	80
TABLA 10.....	94
TABLA 11.....	108
TABLA 12.....	110
TABLA 13.....	112
TABLA 14.....	140
TABLA 15.....	142
TABLA 16.....	143

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

## I.- INTRODUCCION

### 1.- Presentación del tema

A nivel mundial, es notorio el crecimiento del consumo de los productos congelados. Dicho crecimiento se debe a varias razones, entre ellas la escasez de tiempo con que se cuenta en la actualidad para utilizar alimentos frescos, a la rapidez de la preparación de las comidas congeladas, a la mejora de la situación económica y a la preferencia de consumir los productos en la forma "más natural" que sea posible, sin que sea necesario preservarlos con aditivos cuyo consumo puede ser perjudicial para la salud.

A todo esto podemos agregar que, mientras el tamaño de familia está disminuyendo, la proporción de miembros que trabajan está en aumento. Se observó que el consumidor se orienta hacia las comidas rápidas que no necesitan descongelamiento y se cocinan en 2 ó 3 minutos en microondas. Además, un producto congelado tiene la ventaja frente al fresco que se puede consumir una porción racionada sin desperdiciar nada del alimento, y por lo tanto reducir los gastos.

Para poder llegar a la producción de estos alimentos, se debieron estudiar aspectos tecnológicos vinculados a la congelación de los mismos, disminuir costos de fabricación y mejorar las técnicas de almacenamiento y transporte de los productos congelados.

Para lograrlo, es necesario conocer más acerca de los

fundamentos de las técnicas de procesamiento y almacenamiento, para extender el tiempo que estos productos están en condiciones de consumo y ello se logra, entre otros aspectos, conociendo las propiedades termofísicas de los mismos y los aspectos físicos y matemáticos involucrados en el diseño y operación de equipos de congelación.

Respecto de los fundamentos de las técnicas de procesamiento y conservación de alimentos, las principales causas de deterioro de los alimentos son: el crecimiento microbiano y las reacciones químicas, las cuales pueden ser enzimáticas (propias del alimento) u oxidativas (debido al contacto con el aire o productos oxidantes).

Existen numerosas técnicas de conservación, de ellas las de uso más frecuente son:

- Pasteurización y esterilización,
- Deshidratación o secado,
- Refrigeración y congelación,
- Otras como liofilización, métodos combinados, etc.

En la pasteurización y esterilización o en la liofilización, se disminuye la cantidad de organismos vivos (eliminando por supuesto organismos patógenos) y en otras como la deshidratación o congelación se evita su multiplicación al eliminar del medio el agua líquida. Por otro lado, la mayoría de las reacciones de deterioro son fuertemente dependientes de la temperatura, de manera que al disminuir esta variable, disminuye también la velocidad de deterioro del alimento.

Además, debemos tener en cuenta que la congelación mantiene la calidad del alimento, ya que conserva en gran medida sus

características organolépticas (aroma, color, textura) que son tan necesarias ante los ojos del consumidor.

Teniendo una clara visión de lo requerido en los aspectos de calidad, en el momento de hacer una inversión se realiza un completo análisis que involucra una selección de equipos que tenga en cuenta no sólo los costos iniciales y de funcionamiento, sino también variables relacionadas con las características de los alimentos a procesar (forma, tamaño, composición, presentación, envase), las posibilidades de aglomeración o de deshidratación superficial durante el proceso, y otros factores que afectan la calidad final.

## **2.- Crecimiento del mercado de productos congelados**

Si tenemos en cuenta las estadísticas de los principales países europeos (Francia, Alemania, Italia, España) vemos que la demanda de alimentos congelados crece año a año, frente a otros productos como enlatados y conservas. También continúa en crecimiento la demanda de otros países de alto nivel de consumo como Estados Unidos y Japón.

Mediante el análisis discriminado según tipo de alimento que detallamos en la Tabla 1a, podemos comparar los datos estadísticos de Francia y Alemania; en la Tabla 1b los de Italia y España y en la Tabla 1c los de Estados Unidos y Japón, todos (excepto este último) durante los años 1992, 1993 y 1994.

TABLA 1a

Consumo de alimentos congelados (Toneladas métricas)	FRANCIA			ALEMANIA		
	1992	1993	1994	1992	1993	1994
Vegetales (sin papas)	325787	410000	402000	319113	318840	326986
Productos con papas (incluye papas fritas)	341711	360000	400000	334760	336000	343500
Pescados y Moluscos	189682	180000	186000	145223	157420	162150
Jugos y Frutas	7260	7500	7000	23210	24216	25760
Comidas preparadas	s.d.	265000	300000	s.d.	336100	351990
Carnes	142014	143000	140000	113221	117309	109470
Aves	205500	210000	218000	464000	446000	401000
Total (no incluye comidas preparadas)	1211954	1310500	1353000	1399527	1399785	1368866
Total (incluye comidas preparadas)		1575500	1653000		1735885	1720856
Variación porcentual		8,13	3,24		0,02	-2,20
			4,92			-0,86
Población (millones)	57,8	57,8	57,8	81,0	81,0	81,0
Consumo por habitante (kg/año)		27,3	28,6		21,4	21,2

TABLA 1b

Consumo de alimentos congelados (Toneladas métricas)	ITALIA			ESPAÑA		
	1992	1993	1994	1992	1993	1994
Vegetales (sin papas)	229900	243900	258400	185000	198000	208000
Productos con papas (incluye papas fritas)	68700	74200	75950	72000	79100	82300
Pescados y Moluscos	65320	65870	69630	325000	329000	338400
Jugos y Frutas	1200	1200	1480	5000	5000	5900
Comidas preparadas	s.d.	65880	65370	s.d.	65800	69000
Carnes	10850	10800	9150	12000	14800	20300
Aves	14100	7160	16350	15000	15000	15000
Total (no incluye comidas preparadas)	390070	403130	430960	614000	640900	669900
Total (incluye comidas preparadas)		469010	496330		706700	738900
Variación porcentual		3,35	6,9		4,38	4,52
			5,83			4,56
Población (millones)	57,8	57,8	57,8	39,2	39,2	39,2
Consumo por habitante (kg/año)		8,11	8,58		18,03	18,85

TABLA 1C

Consumo de alimentos congelados (Toneladas métricas)	ESTADOS UNIDOS			JAPON*	
	1992	1993	1994	1992	1993
Vegetales (sin papas)	1771081	1838649	1855292	221682	294945
Productos con papas (incluye papas fritas)	2889659	2999902	3599248	159102	155433
Pescados y Moluscos	1080929	1095898	1082743	1351843	1440748
Jugos y Frutas	1842070	1910563	1982318	130190	148062
Comidas preparadas	s.d.	2867205	3056357	s.d.	604634
Carnes	646380	616896	671328	813364	978801
Aves	2096993	2160950	2237155	393961	390318
Total (no incluye comidas preparadas)	10327112	10622858	11428084	3070145	3408307
Total (incluye comidas preparadas)		13490063	14484441		4012941
Variación porcentual		2,86	7,58		11
			7,37		
Población (millones)	248,2	248,2	248,2	123,2	123,2
Consumo por habitante (kg/año)		54,35	58,35		32,57

\*Debido a los cambios de categoría no se puede comparar con los valores para 1994. El total de carne para USA no incluye cadenas de distribución directa, como hamburgueserías. Los datos de esta tabla son dados por la Federation of European Frozen Food Associations y publicados en la QFFI de Octubre de 1993, 1994 y 1995.

## CONSUMO DE ALIMENTOS CONGELADOS POR PRODUCTO Y POR PAIS EN 1994

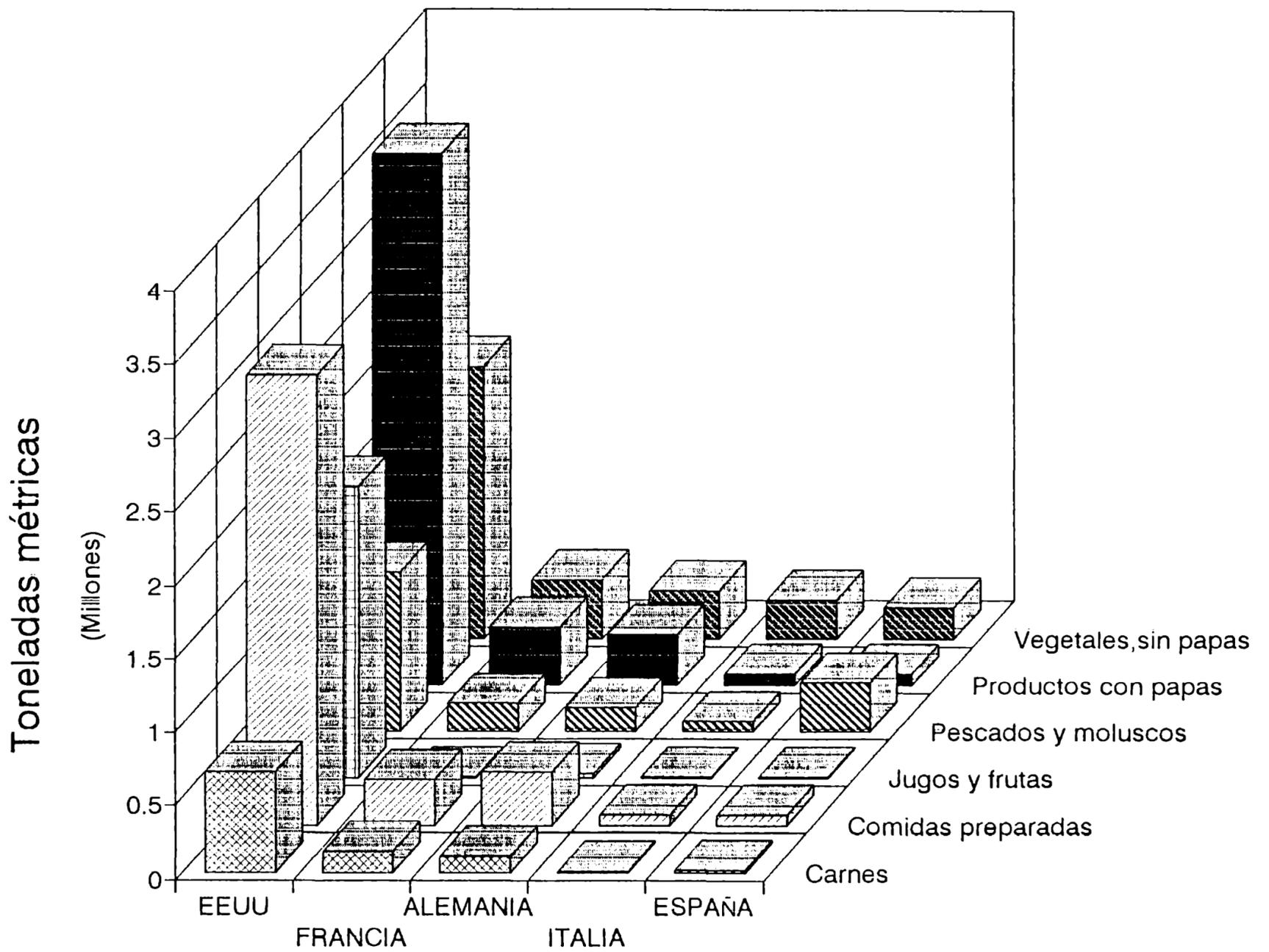
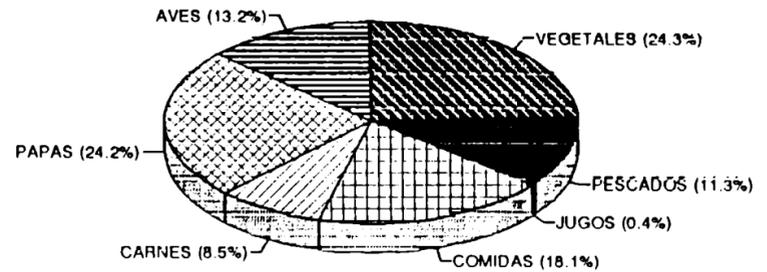
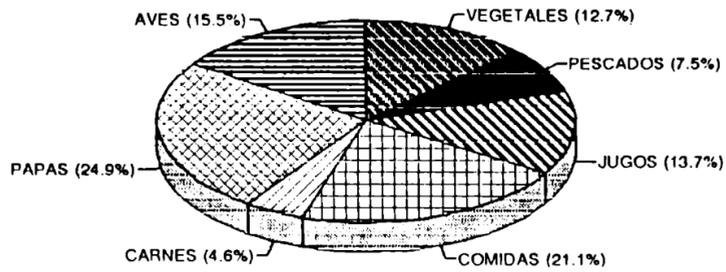


Figura 1.

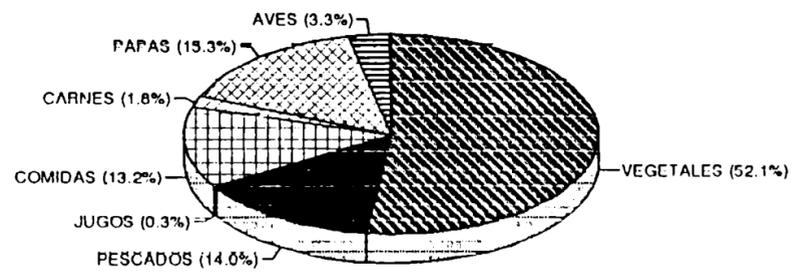
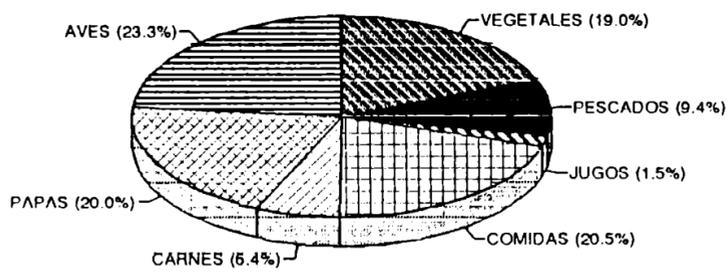
ESTADOS UNIDOS

FRANCIA



ALEMANIA

ITALIA



ESPAÑA

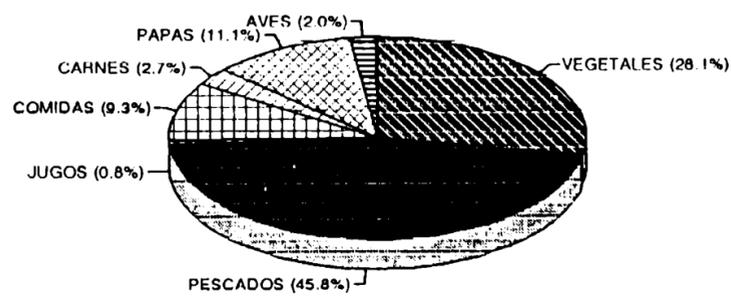


Figura 2.

De estas tablas podemos ver que no todos los países se inclinan hacia los mismos productos, por ejemplo en España y Japón prefieren los productos de mar, en cambio en Francia e Italia se inclinan por los vegetales, y en Estados Unidos hay un equilibrio entre productos vegetales y cárneos. Las Figuras 1 y 2 presentan información estadística respecto de dichas preferencias.

Otro dato que podemos aportar es que Japón, país de gran consumo de pescados y moluscos, se inclina ahora hacia un mayor consumo de carnes. Según datos de QFFI Octubre 1994, el consumo de hamburguesas disminuyó de 62485 toneladas en 1992 a 62378 ton en 1993; lo que equivale apenas a un 0,17% y aumentó en cambio para albóndigas de carne de 28561 ton en 1992 a 30219 ton en 1993 lo que sería una variación de 5,8%. Además, actualmente hay una apertura de mercado a los productos cárneos frescos y congelados.

Si tenemos en cuenta otros países, no encontramos datos de consumo en toneladas, pero si podemos ver como aumentó el gasto en dólares por consumo de congelados desde 1989 hasta 1993. Estos datos los encontramos en la Tabla 2.

TABLA 2

País	Consumo en U\$S en 1989 (millones)	Consumo en U\$S en 1993 (millones)	Aumento % promedio anual	Gasto en U\$S por habitante
México	2985	4298	9,5	48,2
Canadá	1690	1974	4,0	72,7
Brasil	1483	1812	5,1	11,6
Argentina	945	1645	15,4	50,6
Chile	411	699	14,2	51,4
Colombia	276	355	5,7	10,6
Venezuela	178	259	9,1	12,5
Perú	176	238	7,0	10,6
Total	8144	11280	6,7	33,5

Comparando el incremento en ventas, vemos que el incremento total de los países americanos por habitante (exceptuando USA) fue de 33,5% en los cinco años indicados, o sea un promedio de 6,7% anual. Argentina después de Canadá tiene el mayor gasto por habitante y si consideramos el aumento desde 1989 hasta 1993 tiene el mayor aumento porcentual anual.

Argentina exporta aproximadamente el 30% de lo que faena, siendo Alemania, EEUU, Inglaterra e Italia los países hacia los cuales se produce mayor exportación de carnes; esa faena es aproximadamente 2600000 toneladas.

Respecto de pescados y mariscos, el 50% se destina a

exportación, y se capturan 500000 toneladas anuales, siendo España, Italia, EEUU, Brasil, Francia, Japón y Alemania nuestros principales clientes.

El volumen de frutas y hortalizas congelados que se exportan actualmente es muy reducido, pero está en franco crecimiento.

### 3.- Depósitos de almacenamiento de productos congelados

Del mismo modo que se ha ido incrementando el consumo de congelados; las industrias debieron construir o renovar las unidades de almacenamiento. Según la Quick Frozen Foods International (Octubre 1995) la capacidad de almacenamiento congelado en EEUU, según el tipo de depósitos es la que muestra la Tabla 3.

En dicha tabla, el volumen bruto es el espacio total del depósito, medido de pared a pared y desde el piso hasta el techo. El volumen neto es el volumen bruto menos el volumen ocupado para ventilación y el espacio ocupado por aislantes, caños, etc.

Como vemos, así como aumenta el consumo de congelados año a año, también aumentan los depósitos para productos congelados.

TABLA 3

Almacenamiento General (miles de pie cúbicos)	1987		1989		1991		1993	
	Volumen		Volumen		Volumen		Volumen	
	Bruto	Neto	Bruto	Neto	Bruto	Neto	Bruto	Neto
Público	1034	771	1129	852	1293	978	1372	1054
Privado y Semi-privado	396	301	368	274	387	294	405	313
Total	1432	1072	1496	1127	1681	1272	1777	1367
Aumento porcentual			4,4	5,2	12,3	12,9	5,7	7,5

#### 4.- Descripción de objetivos y contenidos

En esta tesis, se estudian distintos aspectos relacionados con transferencia de calor y materia en congelación de alimentos.

Para diseñar, operar u optimizar el uso de equipos, se necesita información de parámetros tales como coeficientes de transferencia de calor (h), entalpía (H), capacidad calorífica (Cp) y conductividad térmica (K) de los alimentos a congelar. Estos se encuentran en bibliografía de manera escasa y dispersa y casi nunca para las condiciones de operación o el tipo de alimento que necesita el usuario. Por ejemplo, en muchos casos se han publicado valores promedio de H y Cp, pero no su variación con la temperatura o con la composición. Además existen otras

variables de diseño y operación que llevan a la elección de un determinado equipo tales como el tipo de alimento y sus características, forma de circulación del aire refrigerante y la velocidad del mismo, etc., cuya influencia debe también poder cuantificarse.

Cuando se elige un equipo de congelación, generalmente se busca un mínimo tiempo de congelación, un máximo de capacidad, condiciones de operación ajustables y que el consumo de energía (lo que se traduce en un costo de congelación por kg de producto) sea un mínimo, todo ello teniendo en cuenta una calidad final de producto preestablecida. En la actualidad hay sistemas de alta performance, como túneles continuos de cinta donde el aire incide sobre el producto desde una o más direcciones, con rangos de capacidad desde 100 kg hasta varias toneladas por hora. Estos equipos se utilizan para una gran variedad de productos y formas de presentación, entre ellas las más frecuentes que podemos nombrar son papas en dados, bastones o rodajas; arvejas, frutas (duraznos, melones y kiwis en porciones, frutillas y frambuesas enteras), pizzas, helados, hamburguesas, albóndigas, pollos enteros, panificados y una gran variedad de alimentos preparados que día a día se hace mayor.

El caso ideal sería hacer un estudio particular para hallar las condiciones óptimas de congelación para cada producto que se encuentra en el mercado. La realidad lleva a dar prioridad a aquellos productos de mayor interés económico local. Es por ello que este trabajo de tesis se orientó hacia la investigación de productos cárneos, pero con la intención de extender la metodología de trabajo desarrollada -unida de la información obtenida- a productos hortifrutícolas, ya que los modelos numéricos diseñados son independientes del tipo de producto estudiado.

Por este motivo esta tesis se divide en tres partes:

1.- Determinación de propiedades térmicas ( $C_p$  y  $H$ ) de productos cárneos, regresionado de los valores experimentales y comparación con modelos teóricos hallados en bibliografía. Selección de ecuaciones de predicción de conductividad térmica.

2.- Determinación experimental de los coeficientes de transferencia de calor en equipos de congelación y desarrollo de ecuaciones de predicción, para el cálculo de los mismos y de los coeficientes de transferencia de materia en dichos equipos.

3.- Desarrollo y aplicación de modelos de predicción de transferencia de calor y materia al proceso de congelación de alimentos sólidos en equipos industriales.

## CAPITULO 2

### PROPIEDADES TERMICAS DE PRODUCTOS CARNEOS

## II.- PROPIEDADES TERMICAS DE PRODUCTOS CARNEOS

### 1.- Entalpía y capacidad calorífica de carnes

Como ya se ha mencionado existe la necesidad de poseer valores de propiedades térmicas que realmente sean representativos del producto a estudiar, con el fin de diseñar convenientemente los equipos de refrigeración, de calcular de manera precisa tiempos de congelación o de enfriamiento, o de utilizarlos en ecuaciones o modelos de predicción.

Los valores de estas propiedades (H, Cp y K) dependen fuertemente de la temperatura y de la composición (principalmente contenido acuoso y tipo, contenido y distribución espacial de la grasa).

Hay información provista en forma de revisiones por algunos autores como Polley y col. (1980) o Sweat (1985), que hacen referencia a muchos tipos de alimentos, pero presentan datos puntuales sólo a una determinada temperatura o valores medios, y no su variación sobre y debajo de la temperatura de congelación, por lo que no son de mucha utilidad para nuestros propósitos.

En el caso de carne vacuna, hay amplia información ya sea mediante datos experimentales, así como numerosas ecuaciones de predicción derivadas de ellos, tal es el caso de Lentz (1961), Morley (1972), Miles y col. (1983), Succar y Hayakawa (1983) y Sanz y col. (1989). No ocurre lo mismo con otros tipos de carnes como la ovina o porcina, donde la información existente es

dispersa e incompleta y las ecuaciones citadas, aunque en promedio sean correctas, no reemplazan al valor experimental específico.

En este aspecto, Fleming (1969) determinó la capacidad calorífica y la entalpía de reses de cordero mientras que Morley y Fursey (1988) midieron esas propiedades en músculo subcutáneo graso. A su vez que Levy (1977) y Bazán y Mascheroni (1984), presentaron ecuaciones de predicción para carne de cordero a partir de datos experimentales obtenidos por Fleming (1969). Levy, además presentó ecuaciones para el caso de carne de cerdo.

La escasez de valores experimentales y la necesidad de usar datos térmicos en ecuaciones de predicción y programas de cálculo, llevaron a Succar y Hayakawa (1983), Miles y col. (1983), y a Sanz y col. (1989), entre otros, a formular ecuaciones de amplio rango de uso, pero que no reemplazan a los valores específicos.

Debido a esta falta de información experimental me pareció importante determinar entalpía y capacidad calorífica cubriendo el rango de temperaturas usualmente empleadas en congelación y refrigeración.

#### **1.a.- Equipo experimental**

Hay diferentes métodos para la determinación de calor específico y entalpía de alimentos como una función de la temperatura. Diversos autores como Mellor (1979), Mohsenin (1980), Ohlsson (1983) o Pham y col. (1994) han descrito el uso

de estos métodos tales como calorímetro adiabático, calorimetría diferencial de barrido (DSC) y microcalorimetría.

El más usado de estos métodos es el calorímetro adiabático. Riedel (1950) lo utilizó para medir propiedades térmicas de un amplio rango de productos como carne, frutas, vegetales, huevos, etc. El método puede dar una alta exactitud en los resultados, pero involucra tiempos de medición largos junto con dificultades en la preparación de la muestra.

El DSC es un instrumento muy usado en la medida de propiedades térmicas de todo tipo de materiales. Trabaja bariendo un rango de temperaturas predeterminado y comparando la energía usada para cambiar la temperatura de la muestra respecto de la necesaria para producir el mismo cambio de temperatura en el material de referencia cuyas propiedades son conocidas.

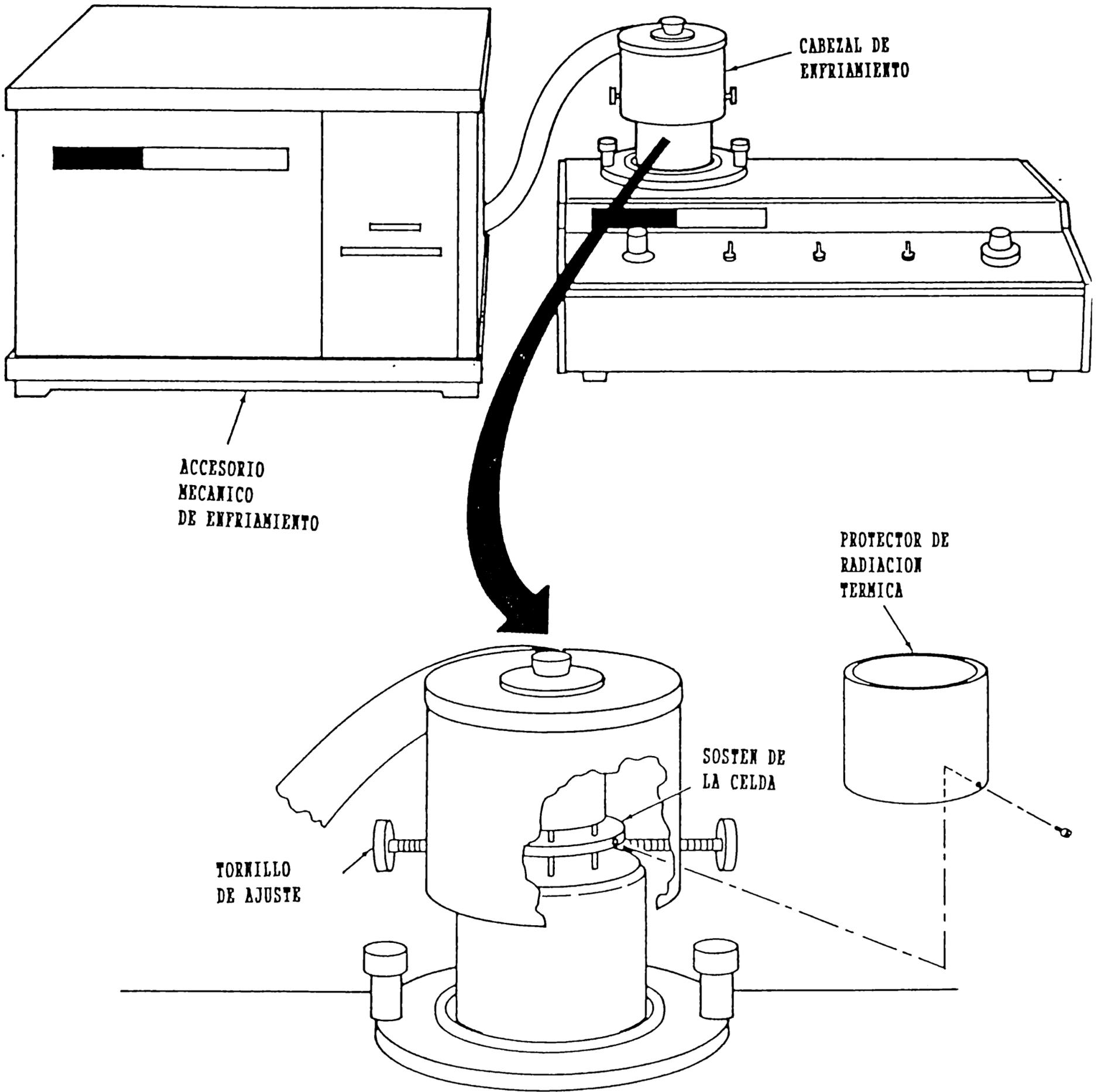


Figura 3. Esquema de un equipo de DSC.

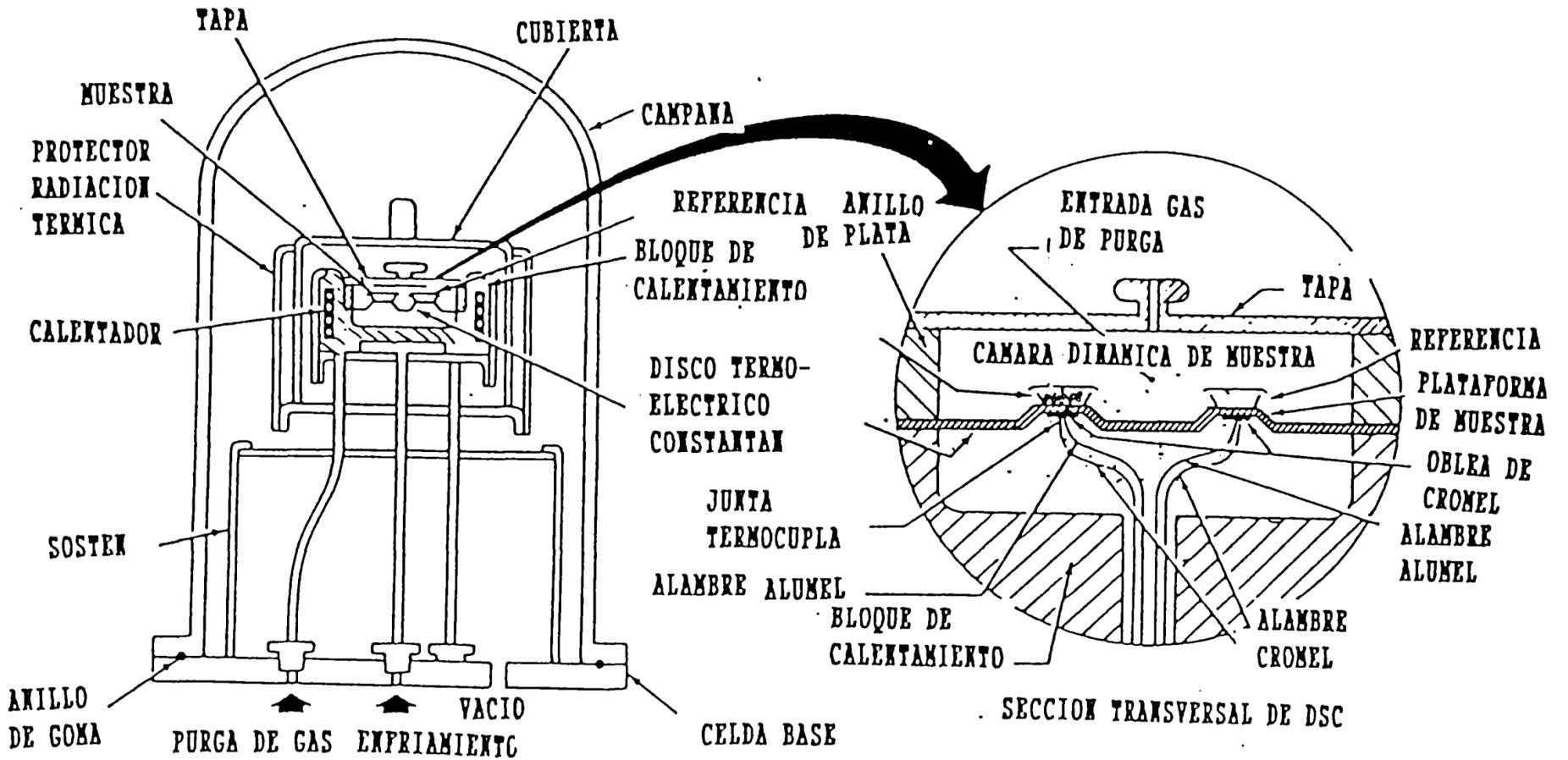


Figura 4. Sección transversal de la celda del DSC.

En el caso específico de alimentos, y dentro de éstos de carnes, ha sido usado entre otros, por Parducci y Duckworth (1972) (para determinación de propiedades en huevos y bacalao), Fernández-Martín y Sanz (1979) (para carne de vaca), Roos (1986) (para zanahorias, carne de reno y pan). También Sweat (1985) lo utilizó para alimentos de humedad baja e intermedia.

Callanan y Sullivan (1986) dieron un reporte completo de las mejores condiciones de uso de este equipo, de la más adecuada forma de calibración y de las rutinas de cálculo a usar.

Las principales ventajas del uso del DSC son:

- a) El método puede "barrer" un amplio rango de temperaturas por encima y por debajo de la temperatura ambiente.
- b) Adecuadamente usado es un método de alta precisión.
- c) Las medidas son rápidas; cada corrida necesita menos de una hora (en mi caso fueron de 40 minutos).

Las principales desventajas son:

- a) No es un método absoluto. Debido a esto el aparato debe ser perfectamente calibrado, haciendo corridas de calibración cada día, y en muchos casos antes de cada ensayo.
- b) Como usa muy pequeñas cantidades de producto (entre 10 y 20 mg) es muy difícil encontrar muestras representativas del material cuando éste no es homogéneo. Ello implica trabajar con muchas replicaciones para aumentar la seguridad de los resultados.
- c) Es imprescindible que la base de la cápsula esté perfectamente ocupada a fin de que no haya espacios vacíos que por mal contacto térmico enmascaren la medida.

**1.a.a.- Materiales usados en las experiencias y método experimental**

Se usaron muestras de carne ovina, porcina y vacuna. Las muestras se tomaron a partir de carne fresca de una pata del animal. Se requería carne sin congelar para evitar deterioro en

los tejidos por congelación y descongelación, lo que alteraría sus propiedades.

De las muestras se tomaban pequeñas piezas donde se visualizaba diferente contenido de grasa. Luego la pieza era triturada y homogeneizada, y de allí se pesaba entre 14 y 18 mg. Debido a que el peso requerido es pequeño la exactitud de la pesada tiene mucha importancia. El peso de las muestras fue determinado por una balanza METTLER AE 240 con una precisión de 0,00001 g.

Luego del análisis en el DSC cada cápsula se pinchaba para facilitar durante el secado la evaporación del agua contenida en la muestra. Para ello se colocaron las cápsulas en una termobalanza METTLER PE 300 que calienta las muestras y las seca hasta alcanzar constancia en el peso. Con este dato se pudo determinar contenido acuoso.

Los ensayos fueron corridos en un DSC SYSTEM 910 de DUPONT, el cual fue modificado en el Instituto para control automático y adquisición de datos.

Las cápsulas usadas son de aluminio barnizado y constan de una base y una tapa, la cual se coloca sobre la base y se sella presionando los bordes con un sellador DUPONT perteneciente al equipo.

Las corridas cubrieron el rango de temperatura desde -40°C hasta 40°C. Para estabilizar a tan baja temperatura inicial se utilizó un sistema de refrigeración mecánica que es parte del equipo DSC DUPONT.

Para realizar una corrida experimental primero es necesario estabilizar el equipo y la muestra a la temperatura inicial (de  $-40^{\circ}\text{C}$  en nuestro caso), se lo deja a esa temperatura unos 5 minutos y luego mediante un programa incorporado a la computadora del equipo se le controla el modo de calentamiento.

En este caso luego de estabilizar el sistema, se barrió el rango enunciado con una velocidad de calentamiento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Se eligió esta velocidad de calentamiento (relativamente baja) porque nos permitía determinar con precisión la variación de la entalpía con la temperatura, se diferenciaba bien el salto en el rango de fusión y se minimizaban los posibles errores por problemas de contacto térmico.

No se consideró necesario un análisis a menor temperatura que  $-40^{\circ}\text{C}$  porque no hay prácticamente cambios en las propiedades del congelado y está fuera del rango de temperaturas utilizado en la industria. Además es práctica habitual emplear esa temperatura como referencia para el cálculo de las entalpías de alimentos.

Es usual en este método, y así se hizo, determinar una línea de base corriendo previamente 2 cápsulas vacías. Luego se cambia una de las cápsulas por la que contiene la muestra a determinar y se hace la corrida.

Las curvas obtenidas con el DSC para alimentos tienen la forma general dada en la figura 5:

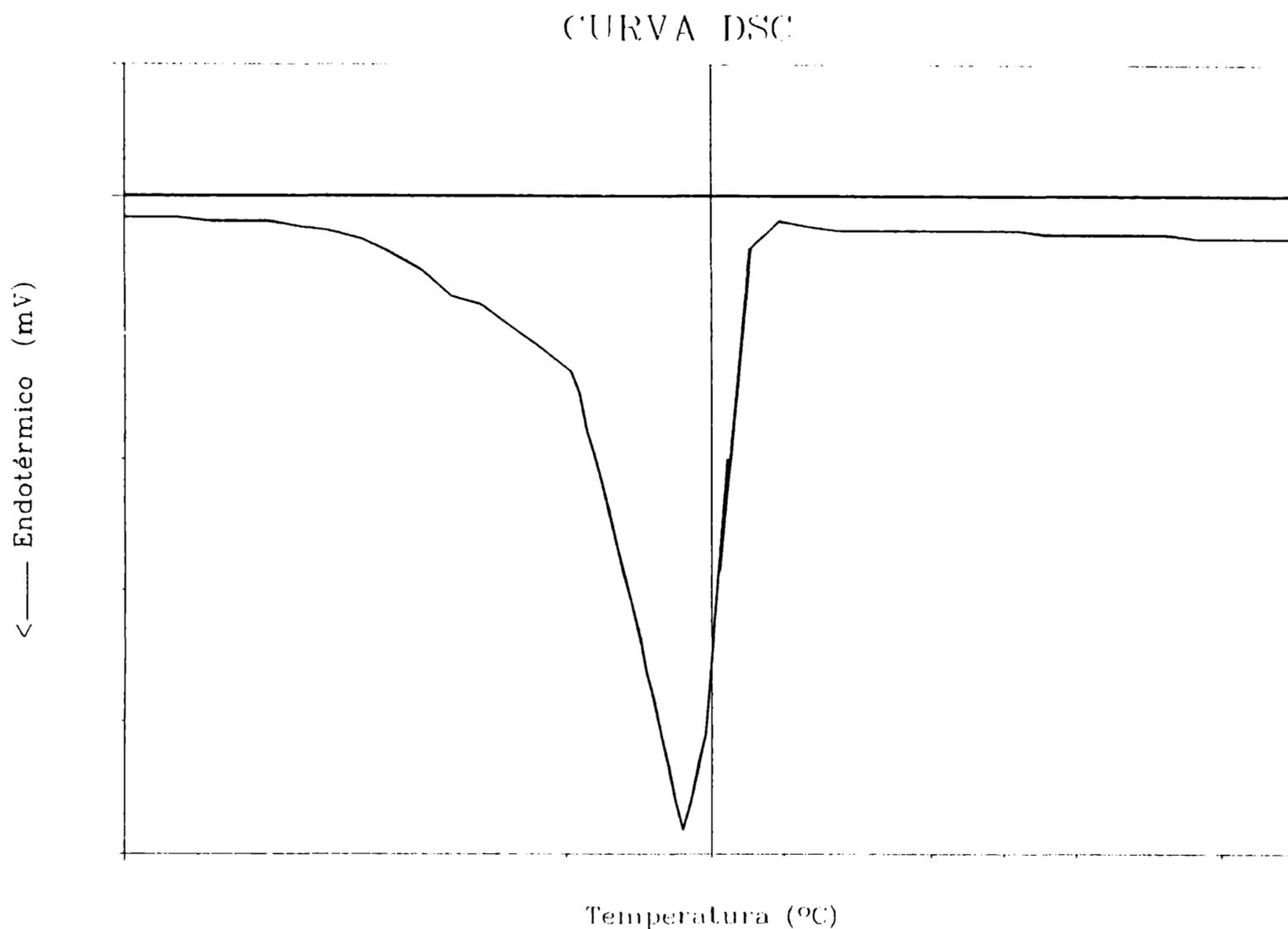


Figura 5. Curva de DSC.

Para analizar la corrida se mide el área encerrada entre la línea de base y la curva obtenida para la muestra. En este caso, la diferencia entre ambas curvas (como una función de la temperatura), fue directamente obtenida desde los valores adquiridos y a partir de ello se calculaba el área.

Relacionado con ello, distintos autores definen temperaturas características del proceso de congelación y descongelación, y especifican como calcularlas. Entre otros autores Roos (1986), Lovric y col. (1987), Balla y col. (1990), Delgado y col. (1990), indican sobre la forma como se determinan estas temperaturas. Esto lo podemos ver más claramente indicado sobre una figura representativa de la curva dada por el DSC (figura 6).

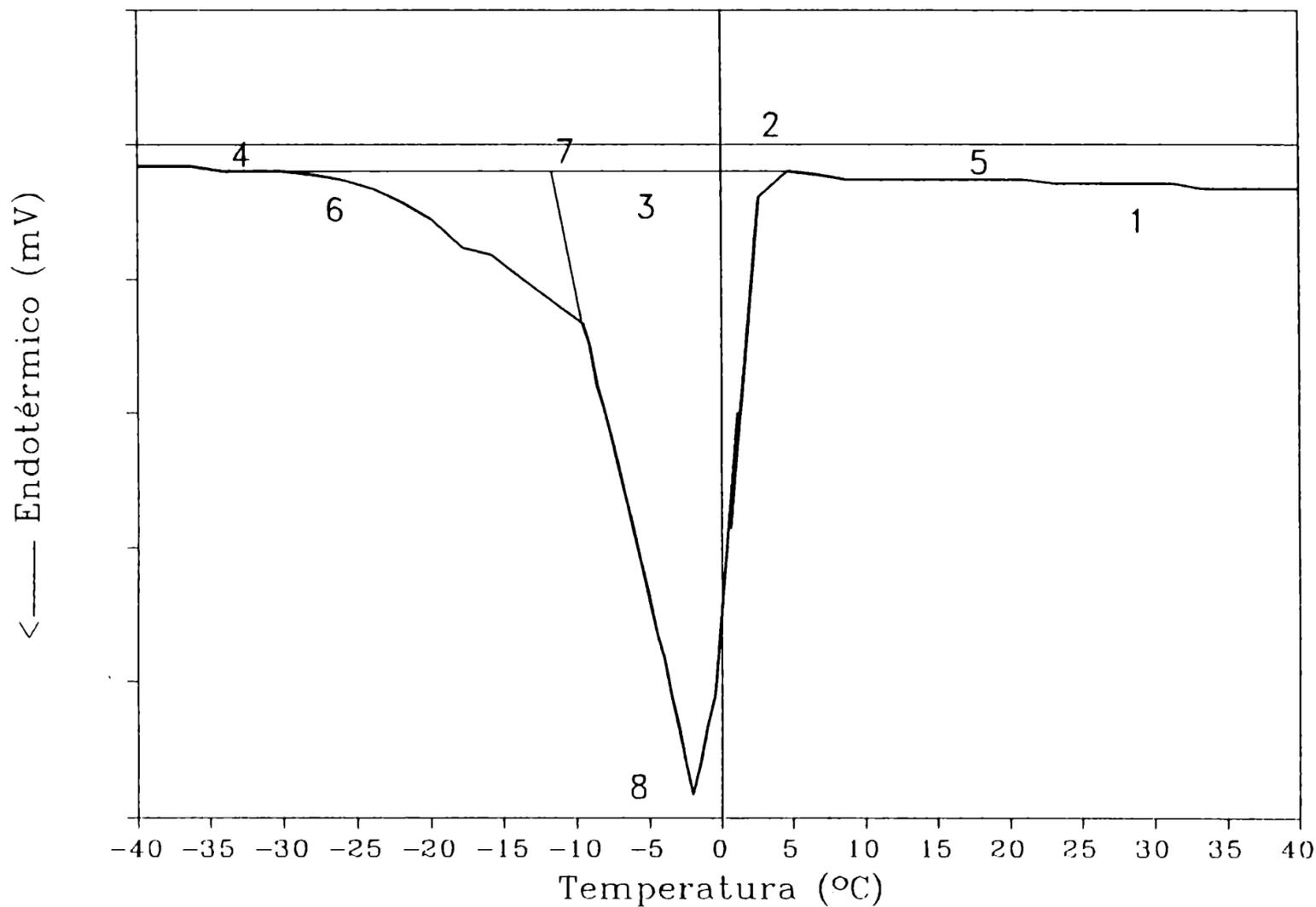


Figura 6.

- 1 curva dada por el DSC para la muestra.
- 2 línea de base.
- 3 línea de base para la fusión.
- 4 línea a partir de la cual se puede obtener la capacidad calorífica aparente del alimento completamente congelado.
- 5 línea a partir de la cual se puede obtener la capacidad calorífica aparente del alimento a una temperatura superior del comienzo de la congelación.
- 6 Temperatura inicio de la descongelación.
- 7 Temperatura de fusión propiamente dicha o intensiva.
- 8 Temperatura final de fusión.

Las curvas del DSC estudiadas fueron de carácter endotérmico y son típicas de los alimentos y difieren de las sustancias puras que tienen un punto de fusión característico.

Por otra parte, Balla y col. (1990) observaron que muestras conteniendo fibras (como es el caso de las carnes), tienen un área mayor de congelación que aquellas que son principalmente líquido. Esto quizá se deba a la diferencia en la conductividad térmica de las fibras con respecto a la fase líquida, lo que retardaría la transmisión de calor en la muestra (introduciendo un error sistemático).

En todos los puntos se hizo una corrección por temperatura como lo sugiere Callanan y Sullivan (1986) corriendo dos estándares de temperatura de fusión conocida (en este caso se utilizó Indio  $T_{st} = 156,5^{\circ}\text{C}$  y Agua bidestilada  $T_{st} = 0^{\circ}\text{C}$ ).

Luego se hace:

$$S = \frac{(T_{st_1} - T_{st_2})}{(T_{f_1} - T_{f_2})} \quad (1)$$

y

$$O = \frac{(T_{f_1} \cdot T_{st_2}) - (T_{st_1} \cdot T_{f_2})}{(T_{f_1} - T_{f_2})} \quad (2)$$

donde  $T_{st_1}$  y  $T_{st_2}$  son las temperaturas de fusión reales de los estándares 1 y 2.  $T_{f_1}$  y  $T_{f_2}$  son las temperaturas de fusión observadas en el DSC para los estándares 1 y 2.

Finalmente

$$T = T_{pu} \cdot S + O \quad (3)$$

donde  $T_{pu}$  es la temperatura medida en cada punto y  $T$  es la temperatura corregida.

El cálculo de  $H$  entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y una  $T$  cualquiera fue hecho de acuerdo a las especificaciones del equipo DUPONT Company (1980) de la siguiente manera:

$$H = \frac{A_T}{m} (60 \cdot B \cdot E \cdot \Delta q_s) \quad (4)$$

donde:

$H$  es el salto entálpico total y está dado en [kJ/kg]

$A_T$  es el área corregida del pico entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $T$  [ $\text{cm}^2$ ]

$m$  es la masa de la muestra [mg]

$B$  es la base tiempo del registrador del DSC [min/cm]

$E$  es el coeficiente de calibración de la celda en el rango de la temperatura del experimento [mW/mV]

La determinación de este factor se realizó con agua bidestilada cuyo  $H_f$  se conoce perfectamente.

$\Delta q_s$  es la sensibilidad del equipo [mV/cm]

Similarmente  $H$  es corregido usando el factor  $Z$  tal que

$$Z = \frac{H_{\text{verdadero}}}{H_{\text{medido}}} \Big|_{\text{estándar}} \quad (5)$$

y

$$H_{\text{corregido}_{\text{muestra}}} = Z H_{\text{medido}_{\text{muestra}}} \quad (6)$$

Mediante el trazo de una línea de base recta desde el comienzo de la fusión hasta el final de la misma se podía calcular el  $H$  de fusión (como el área bajo el pico así definido)

y también la temperatura final de fusión.

**1.b.- Resultados experimentales y discusión**

Como uno de los objetivos de las determinaciones fue conocer la influencia del contenido de agua sobre los valores de las propiedades, para cada tipo de carne se trabajó con distintos contenidos acuosos; esto se logró, como ya se expresó previamente, tomando muestras de cortes que visualmente mostraban tener diferente contenido graso.

Para carne de cordero se determinaron 5 contenidos acuosos,  $w$  de 0,674, 0,703, 0,745, 0,758 y 0,776. En el caso de carne vacuna los contenidos acuosos son 0,487, 0,544, 0,698 y 0,747 y para carne porcina 0,563, 0,639 y 0,666. En todos los casos para cada valor de  $w$  los resultados utilizados fueron el promedio de 4 corridas.

En las figuras 7 y 8 se presentan los datos experimentales de entalpía y  $C_p$ , respectivamente, para carne de cordero. En las figuras 9 y 10 se representan las mismas propiedades para carne de vaca y en las figuras 11 y 12 para carne de cerdo.

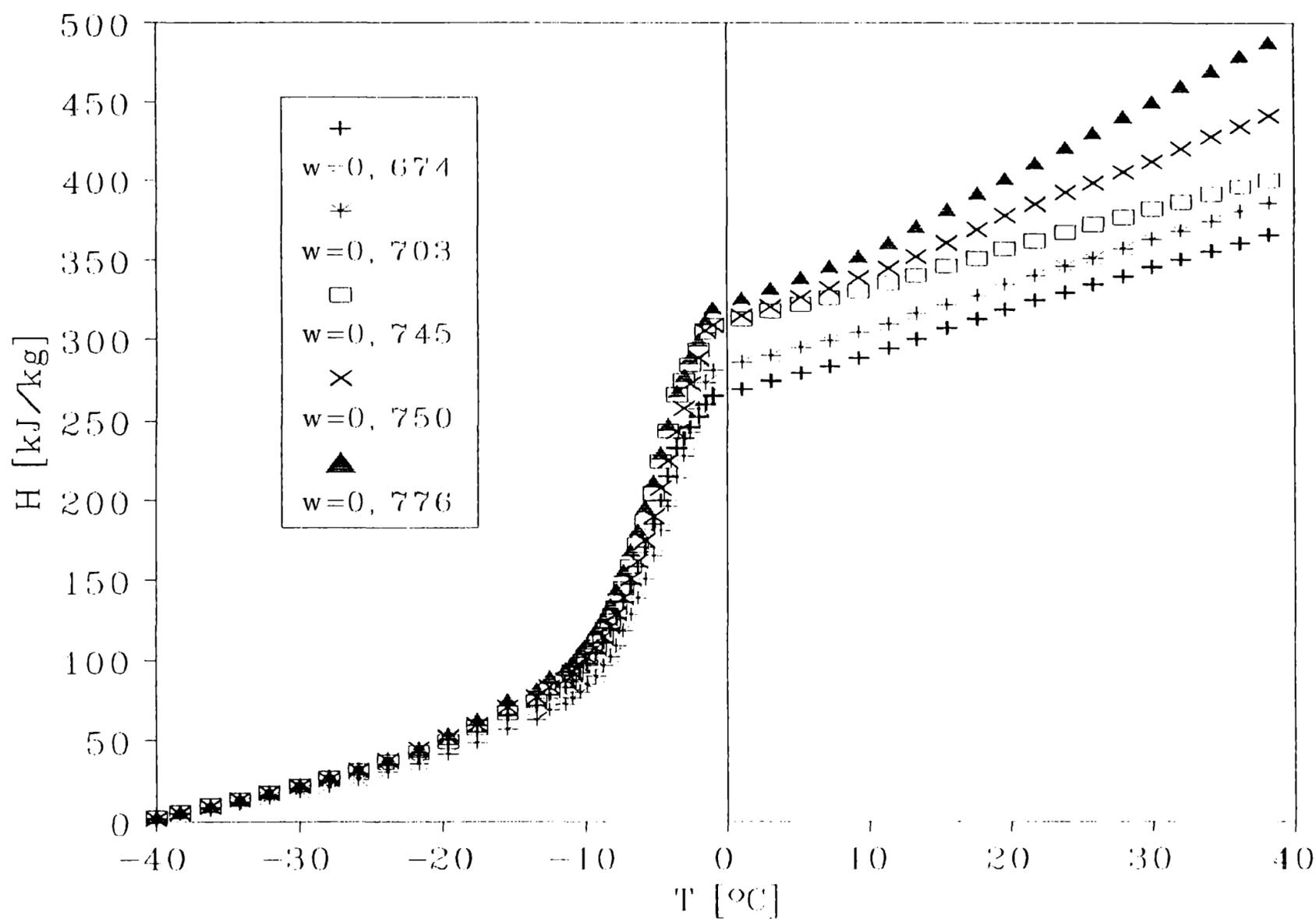


Figura 7. Variación de entalpía de carne de cordero con el contenido acuoso y con la temperatura.

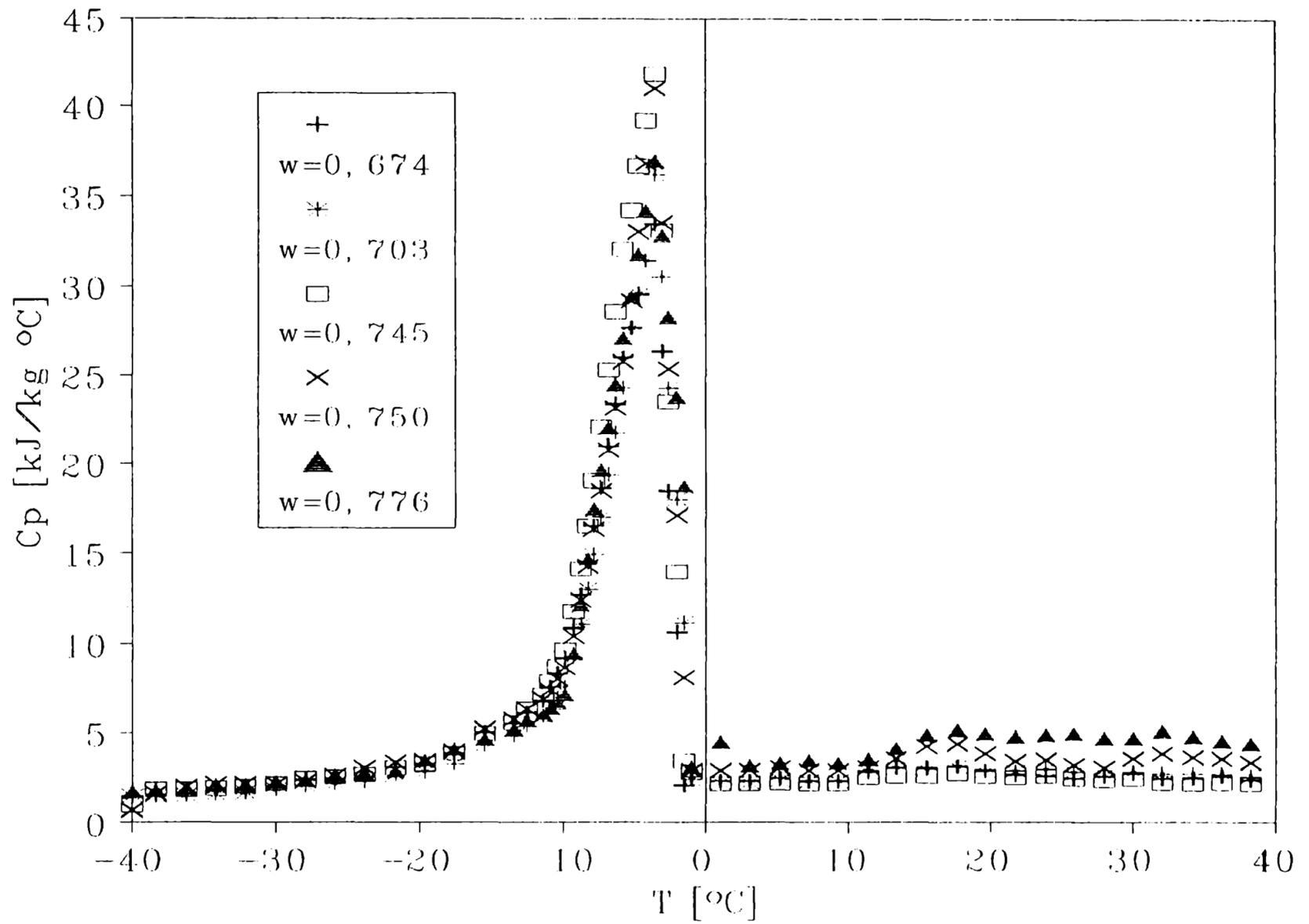


Figura 8. Variación de la capacidad calorífica aparente de carne de cordero con el contenido acuoso y con la temperatura.

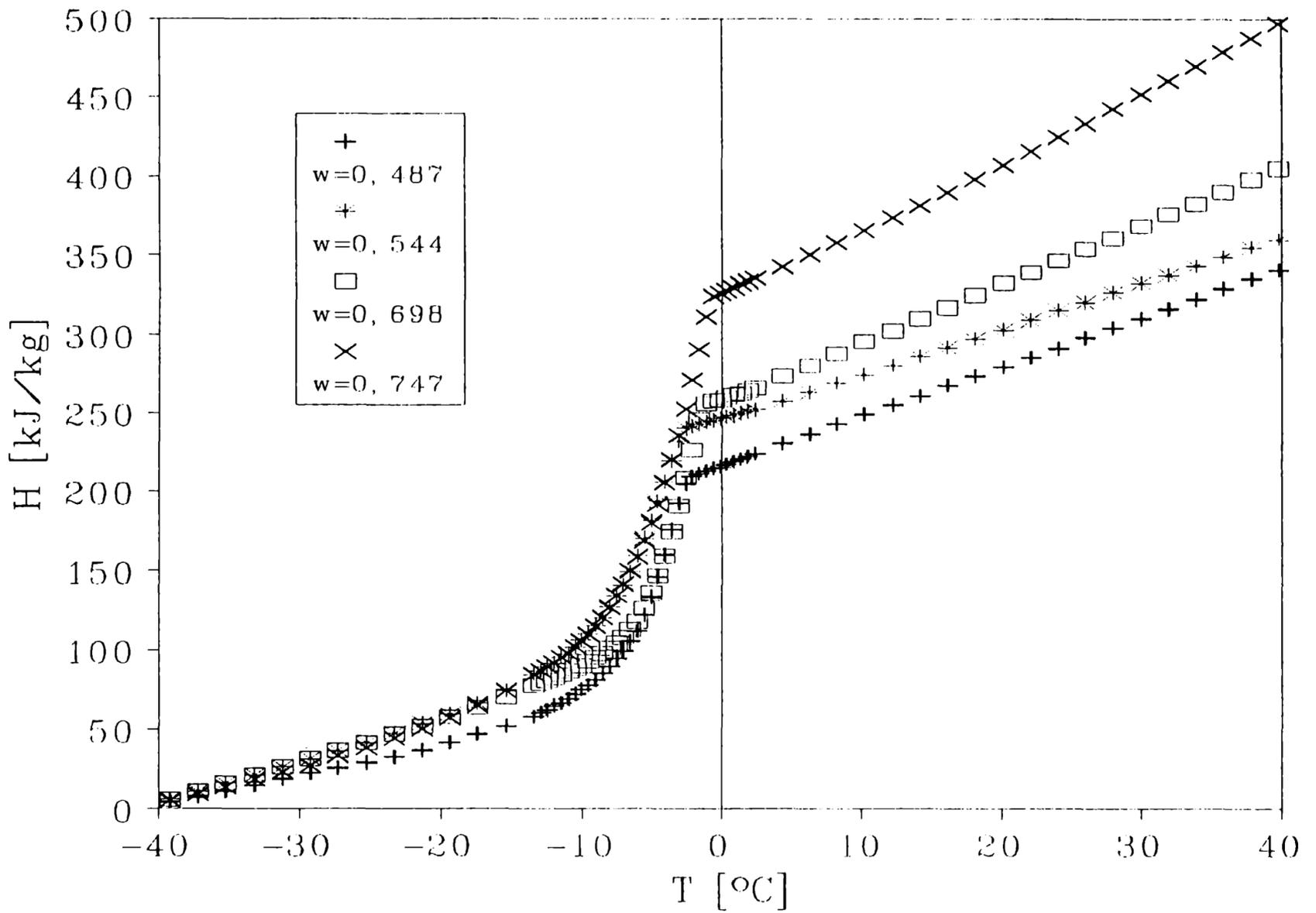


Figura 9. Variación de entalpía de carne vacuna con el contenido acuoso y con la temperatura.

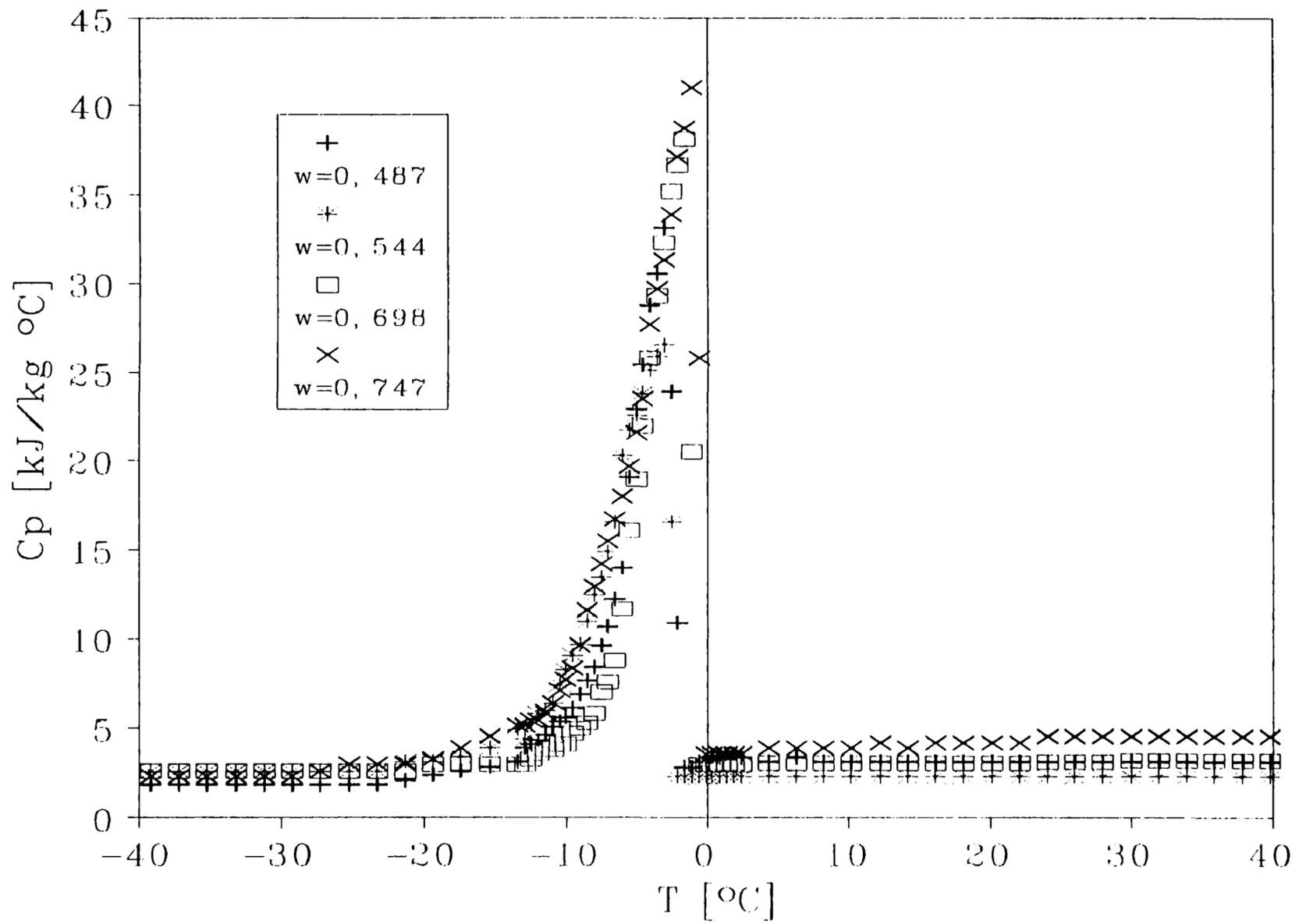


Figura 10. Variación de la capacidad calorífica aparente de carne vacuna con el contenido acuoso y con la temperatura.

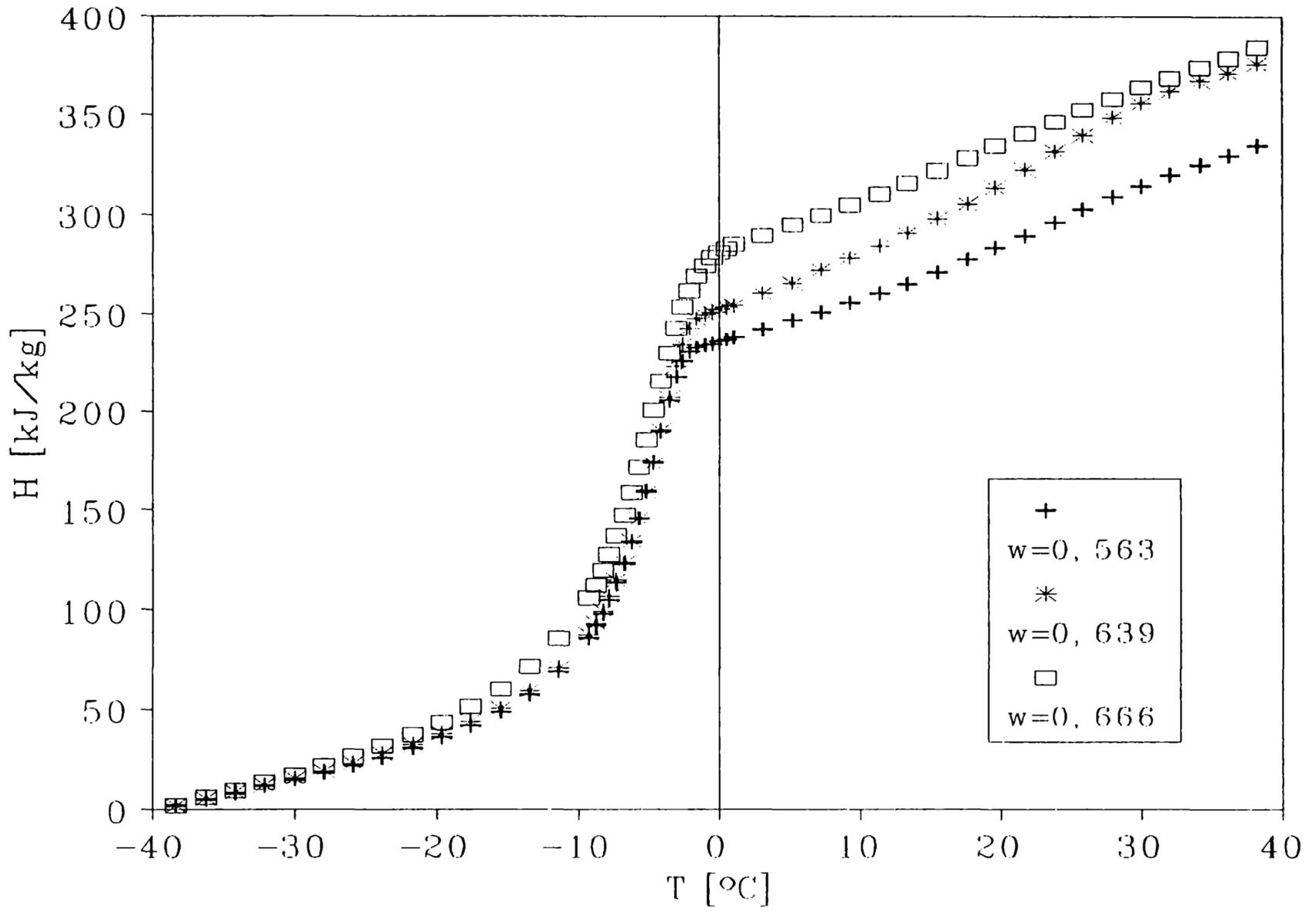


Figura 11. Variación de entalpía de carne de cerdo con el contenido acuoso y con la temperatura.

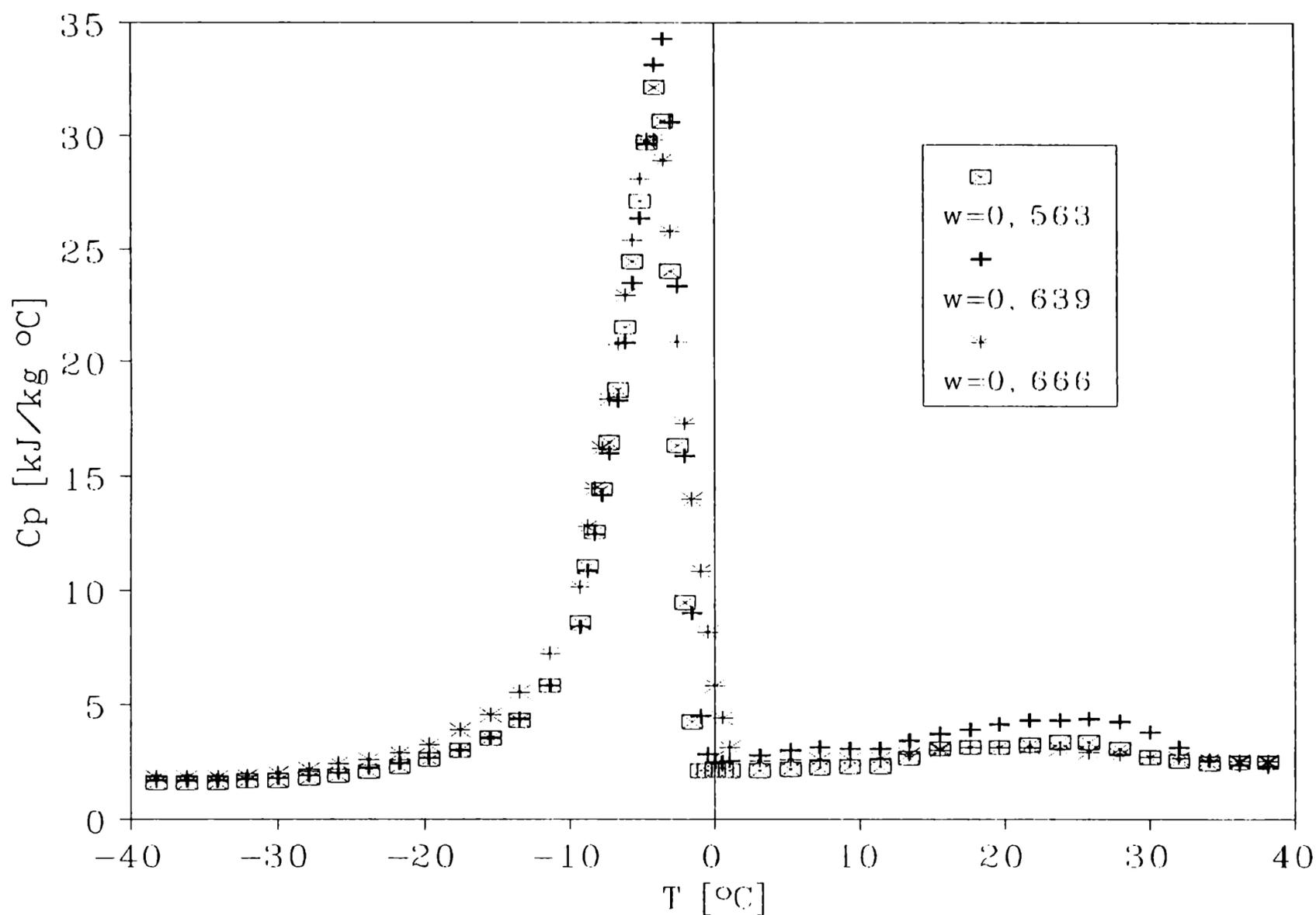


Figura 12. Variación de la capacidad calorífica aparente de carne de cerdo con el contenido acuoso y con la temperatura.

Como podemos ver en todos los tipos de carne, el cambio de entalpía es proporcional al contenido acuoso de manera que la proporción tan alta de agua frente a los demás componentes, hace que la influencia de los otros componentes no se manifieste, excepto en el rango por sobre la temperatura de inicio de congelación, en el que se observan pequeñas variaciones en el Cp debidas a la fusión de componentes grasos (Morley y Fursey (1988)).

1.c.- Obtención de regresiones y ecuaciones de predicción

A partir de los datos experimentales previamente presentados, se obtuvieron ecuaciones de regresión. Las mismas se realizaron mediante un software (SYSTAT) que permite encontrar regresiones lineales o no lineales, con sus coeficientes y parámetros estadísticos, de modo tal que las mismas representen adecuadamente los valores reales hallados. La ecuación de regresión obtenida tiene coeficientes que fueron determinados por el software para cada curva con diferente contenido acuoso; luego éstos fueron regresionados entre sí en función también del w, obteniéndose de esta manera una expresión generalizada.

Los valores a partir de los cuales se obtuvieron dichas regresiones fueron datos experimentales de carne de cordero, ya que de estos se tenía mayor información.

Las regresiones obtenidas fueron:

$$H = (-0,055 + 0,662 w) (T-40) + \frac{(233,883 - 2192,116 w)}{(T-1)} + \frac{(36,250 - 2115,104 w)}{(T-1)^2} + 1,95 \quad (7)$$

para  $T < T_f$  y para  $T \geq T_f$

$$H = H_f + (1,920 + 1,433 w) (T+1) \quad (8)$$

y para capacidad calorífica son:

$$Cp = (-0,055 + 0,662 w) - \frac{(233,883 - 2115,116 w)}{(T-1)^2} - \frac{(72,500 - 4230,108 w)}{(T-1)^3} \quad (9)$$

para  $T < T_f$  y para  $T \geq T_f$

$$Cp = 1,920 + 1,433 w \quad (10)$$

Las Figuras 13 y 14 muestran resultados de H y Cp respectivamente, predichos mediante las ecuaciones precedentes y los comparan con los datos experimentales obtenidos para los mismos w y T.

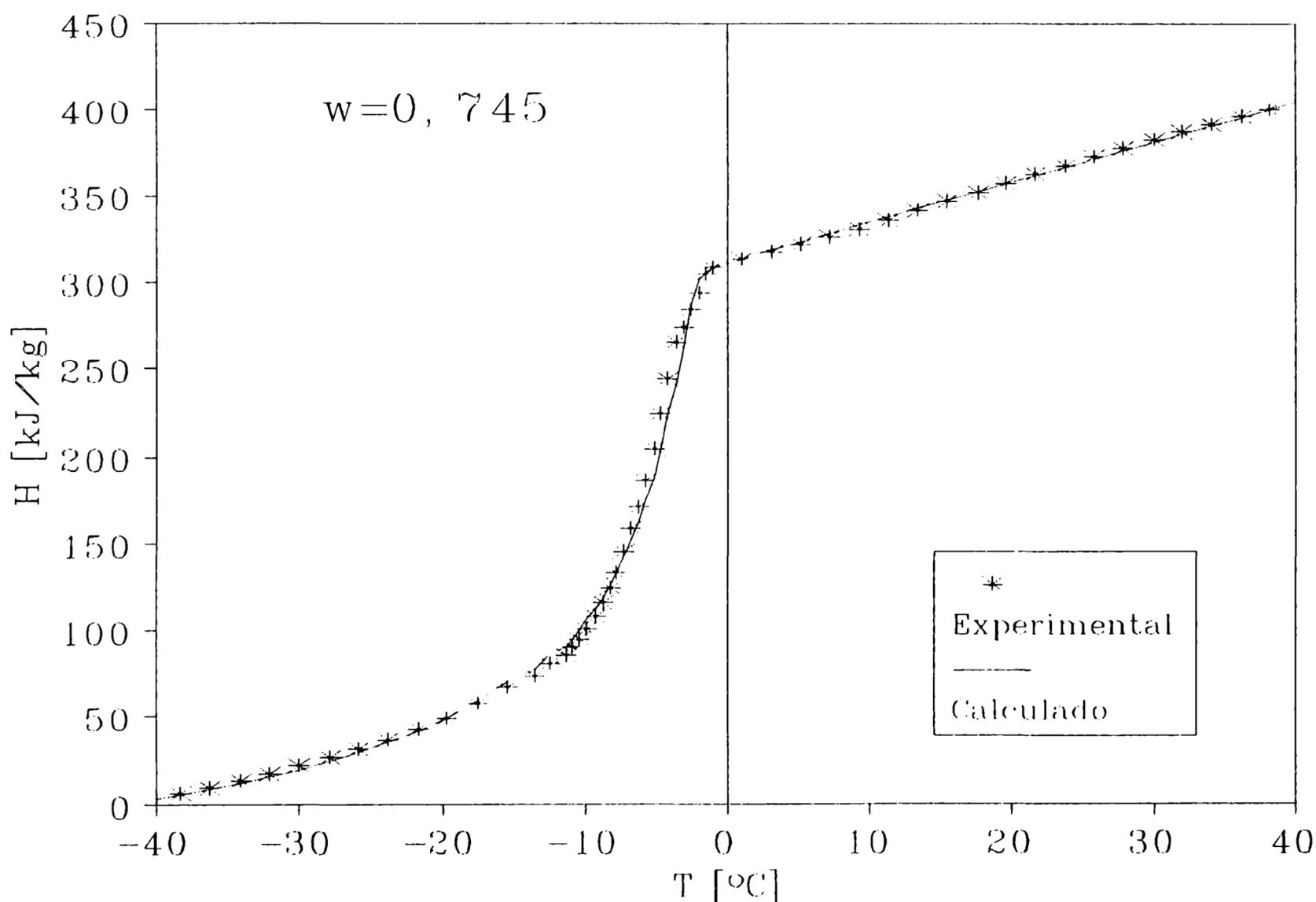


Figura 13. Comparación de la regresión hallada para H con los valores experimentales para cordero.

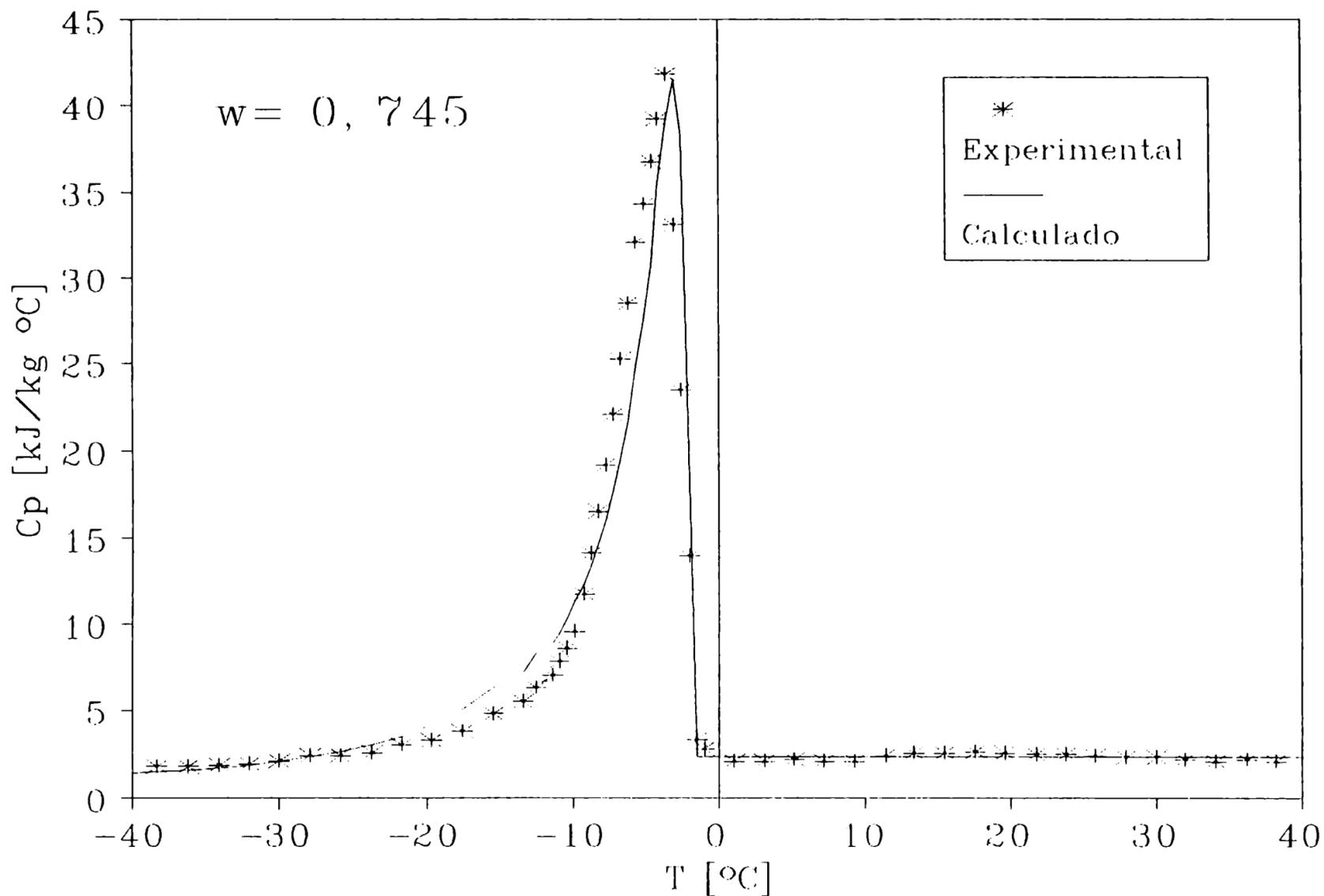


Figura 14. Comparación de la regresión hallada para Cp con los valores experimentales para cordero.

#### 1.d.- Comparación con ecuaciones de bibliografía

En la literatura encontramos numerosas ecuaciones de predicción para propiedades térmicas de carne, la mayoría basadas en el modelo de descenso crioscópico. Por ejemplo, Succar y Hayakawa (1983), Sanz y col. (1989), presentan ecuaciones que cubren todo el rango de temperaturas y composiciones usuales en congelación de productos cárneos.

Tres ecuaciones para H y tres ecuaciones para Cp, fueron

seleccionadas desde bibliografía para comparar contra los datos experimentales. La elección de las mismas se hizo en base a que dichas ecuaciones fuesen dependientes de la temperatura, del contenido acuoso y de la temperatura de fusión, éstos últimos determinados en este estudio y que caracterizan adecuadamente al tipo de carne.

Dichas ecuaciones son las siguientes:

a) **Mellor** (1978) predijo:

$$H = (T+40) (1,31(1-w) + 2,10w) + 8,375 T_f w + \frac{335 T_f w}{T} \quad (11)$$

para  $T < T_f$

y para  $T \geq T_f$  propuso

$$H = H_f + (1,31(1-w) + 4,19w)(T - T_f) \quad (12)$$

donde  $H_f$  es la entalpía evaluada a  $T_f$ .

También predice las capacidades caloríficas según

$$Cp = Cp_s(1-w) + 2,10w - \frac{335w T_f}{T^2} + \frac{2,09w T_f}{T} \quad (13)$$

para  $T < T_f$

y para  $T \geq T_f$

$$Cp = Cp_s(1 - w) + 4,19 w \quad (14)$$

con  $Cp_s$  = capacidad calorífica de los sólidos = 1,31 [kJ/(kg°C)]

b) **Schwartzberg** (1976) encontró:

$$H = (T+40) \left( Cp_u + (w(1+b) - b) \left( \frac{L_f}{40} \left( \frac{T_f}{T} \right) - Cp_w + Cp_{hi} \right) \right) \quad (15)$$

para  $T < T_f$

y para  $T \geq T_f$

$$H = H_f + Cp_u(T - T_f) \quad (16)$$

con  $Cp_u$  = capacidad calorífica del alimento no congelado = 3,48 [kJ/(kg °C)] y  $Cp_w$  y  $Cp_{hi}$  son los calores específicos del agua líquida y del hielo;  $b$  es el contenido de agua ligada, el autor sugiere que el rango a usar varía entre 0,24 y 0,27 para carnes, aquí se utilizó 0,25; finalmente  $\lambda = 335$  [kJ/kg].

$$Cp = Cp_u + (w - b(1 - w)) \left( Cp_{hi} - Cp_w - \frac{L_f T_f}{T^2} \right) \quad (17)$$

para  $T < T_f$  y para  $T \geq T_f$  es

$$Cp = Cp_u \quad (18)$$

c) **Mascheroni** (1977) propuso:

$$H = (T+40) (3,874 - 2,534 w) - 902,893(1-w) \left( \frac{1}{T} + \frac{1}{40} \right) \quad (19)$$

para  $T < T_f$  y para  $T \geq T_f$

$$H = H_f + (1,448 + 2,738 w) (T - T_f) \quad (20)$$

donde  $T_f = (1-w) / (0,06908 - 0,4393 w)$

$$C_p = 0,374 - 2,534 w + \frac{902,893(1-w)}{T^2} \quad (21)$$

para  $T < T_f$  y para  $T \geq T_f$  da

$$C_p = 1,448(1-w) + 4,187 w \quad (22)$$

La comparación de parte de los datos experimentales de H y Cp contra los datos teóricos predichos por los modelos de Mellor, Schwartzberg y Mascheroni, para muestras con el mismo contenido acuoso se presenta en las figuras 15 y 16 para cordero, 17 y 18 para carne de vaca y 19 y 20 para carne de cerdo.

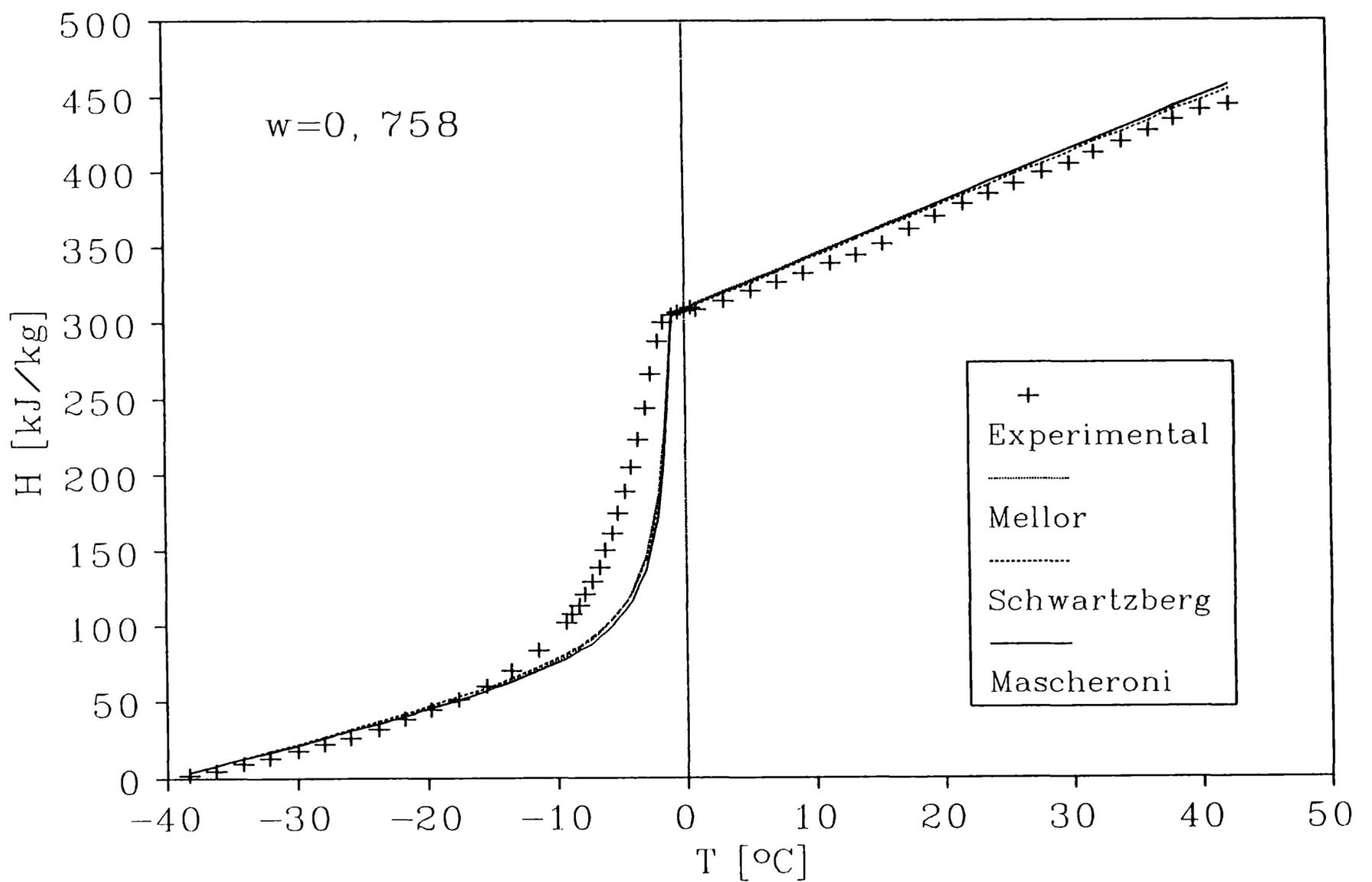


Figura 15. Comparación de los valores experimentales de Entalpía de carne de cordero con ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

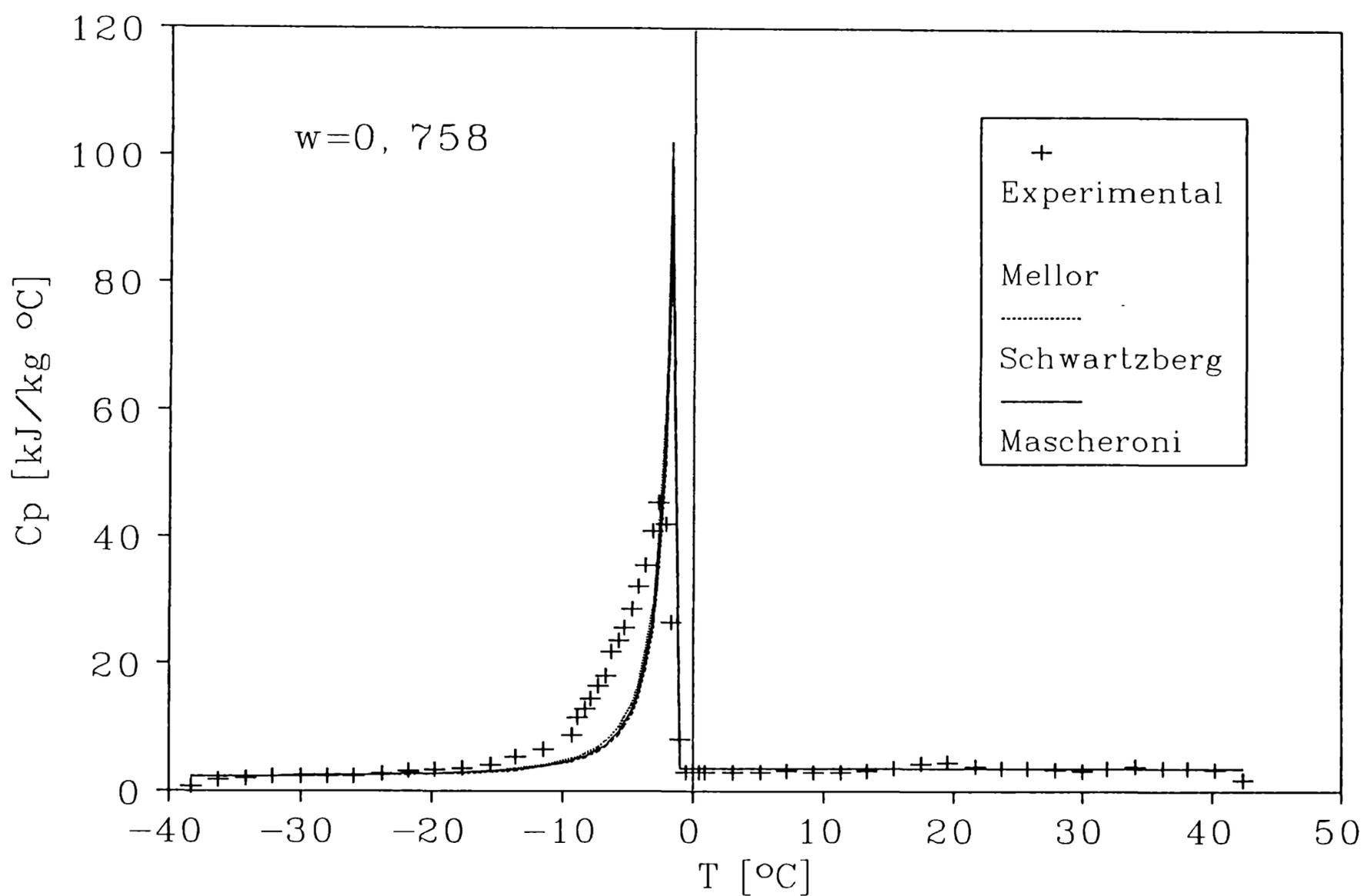


Figura 16. Comparación de los valores experimentales de  $C_p$  de carne de cordero con las ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

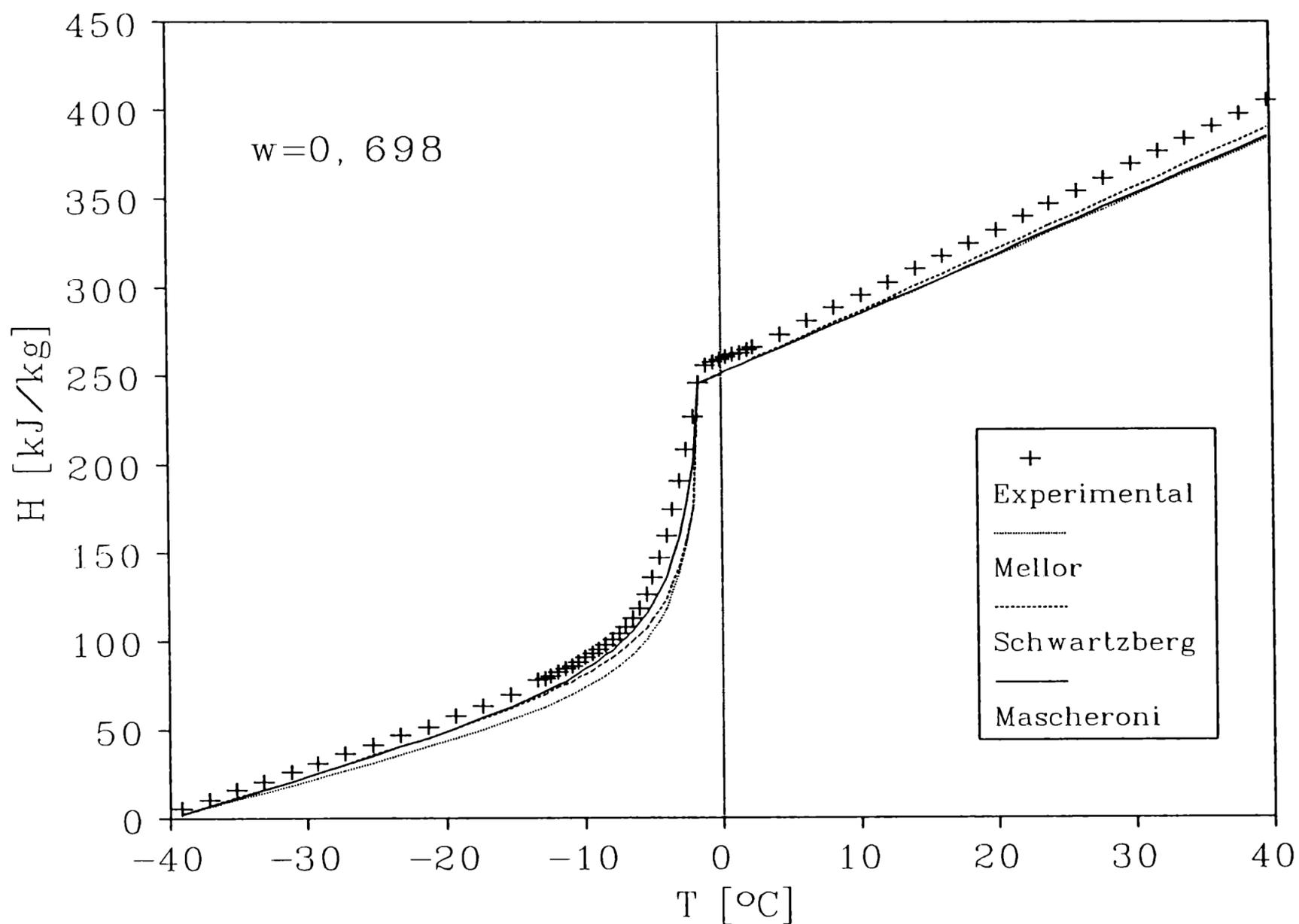


Figura 17. Comparación de los valores experimentales de Entalpía de carne de vaca con ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

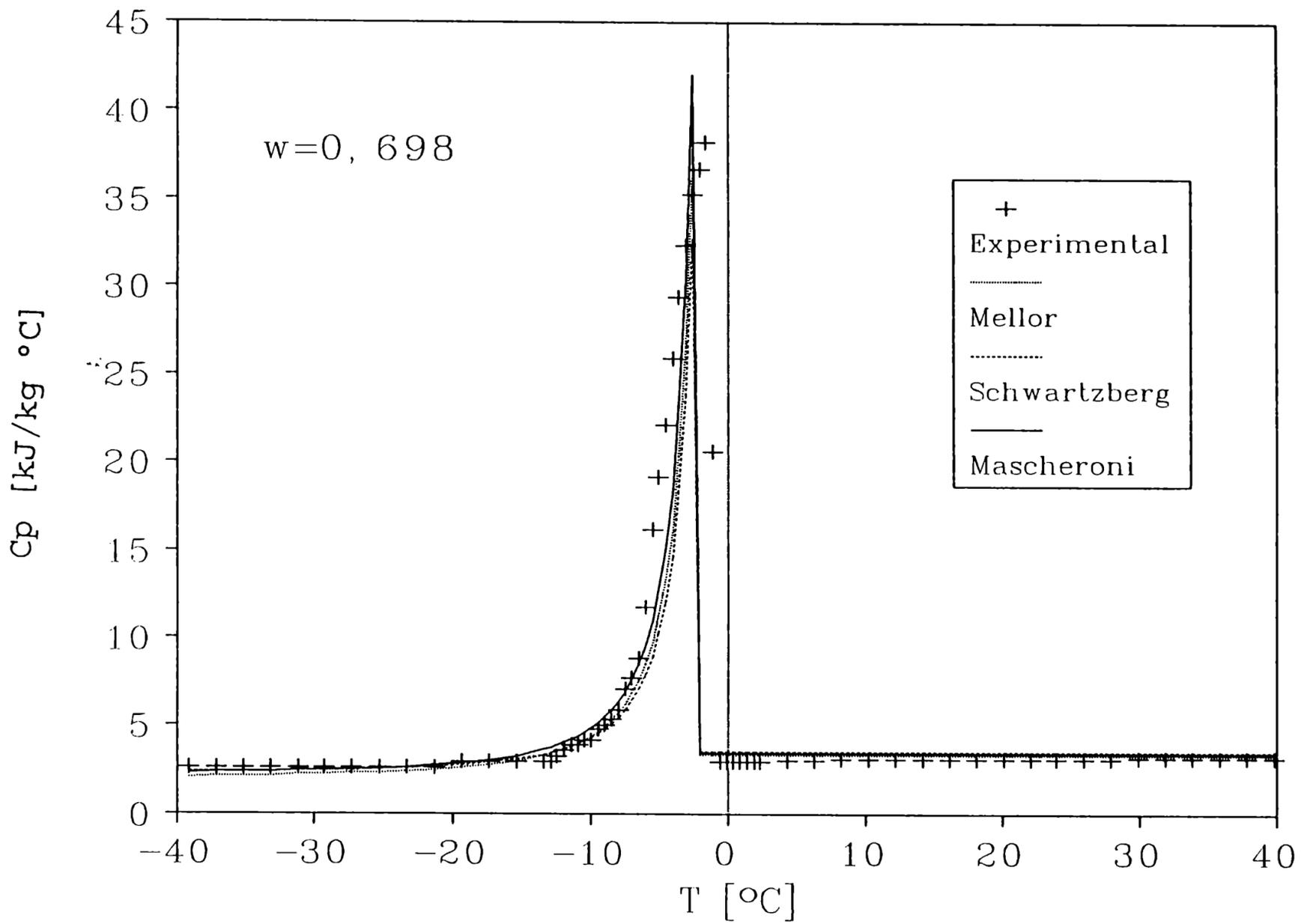


Figura 18. Comparación de los valores experimentales de  $C_p$  de carne vacuna con las ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

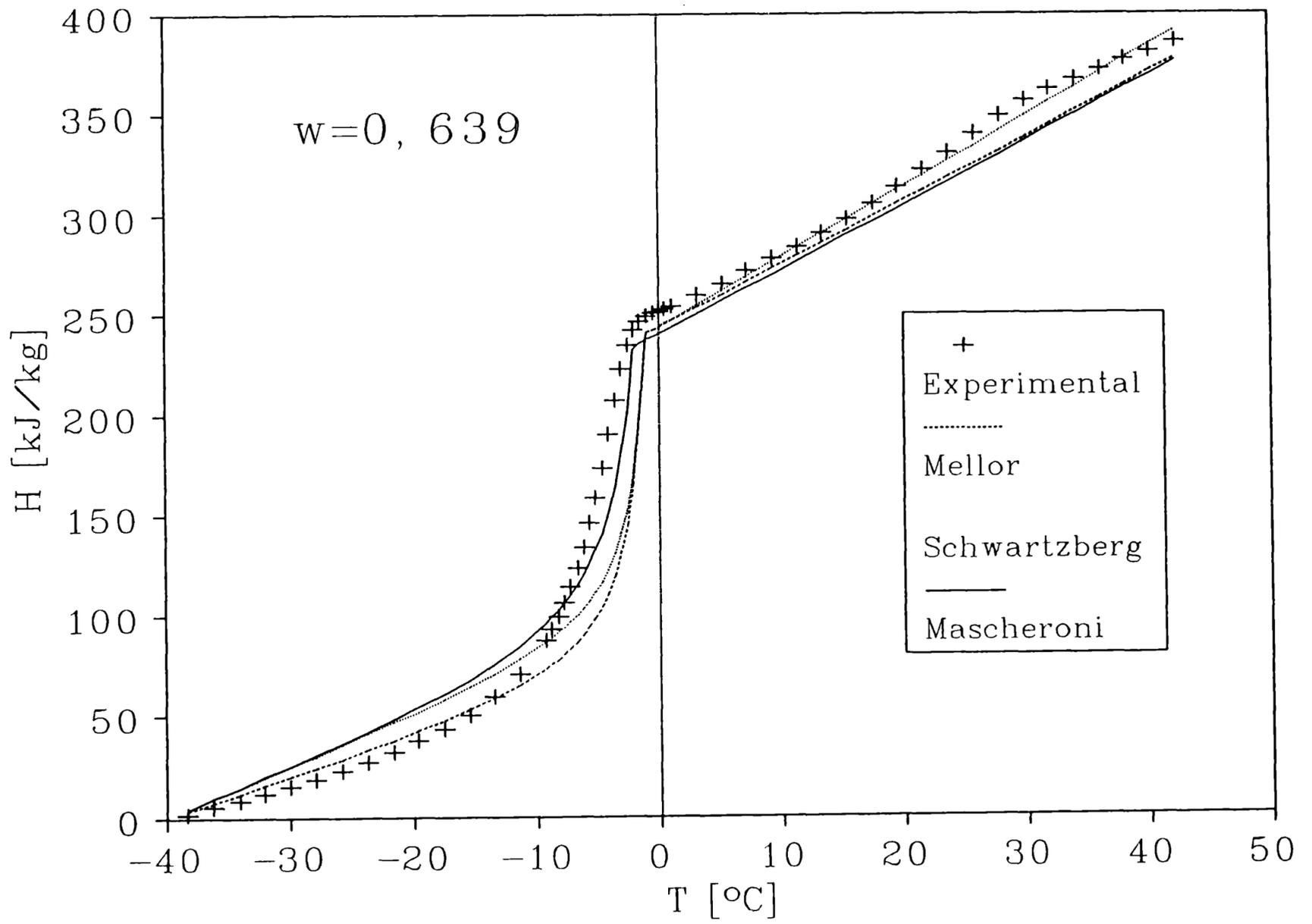


Figura 19. Comparación de los valores experimentales de Entalpía de carne de cerdo con las ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

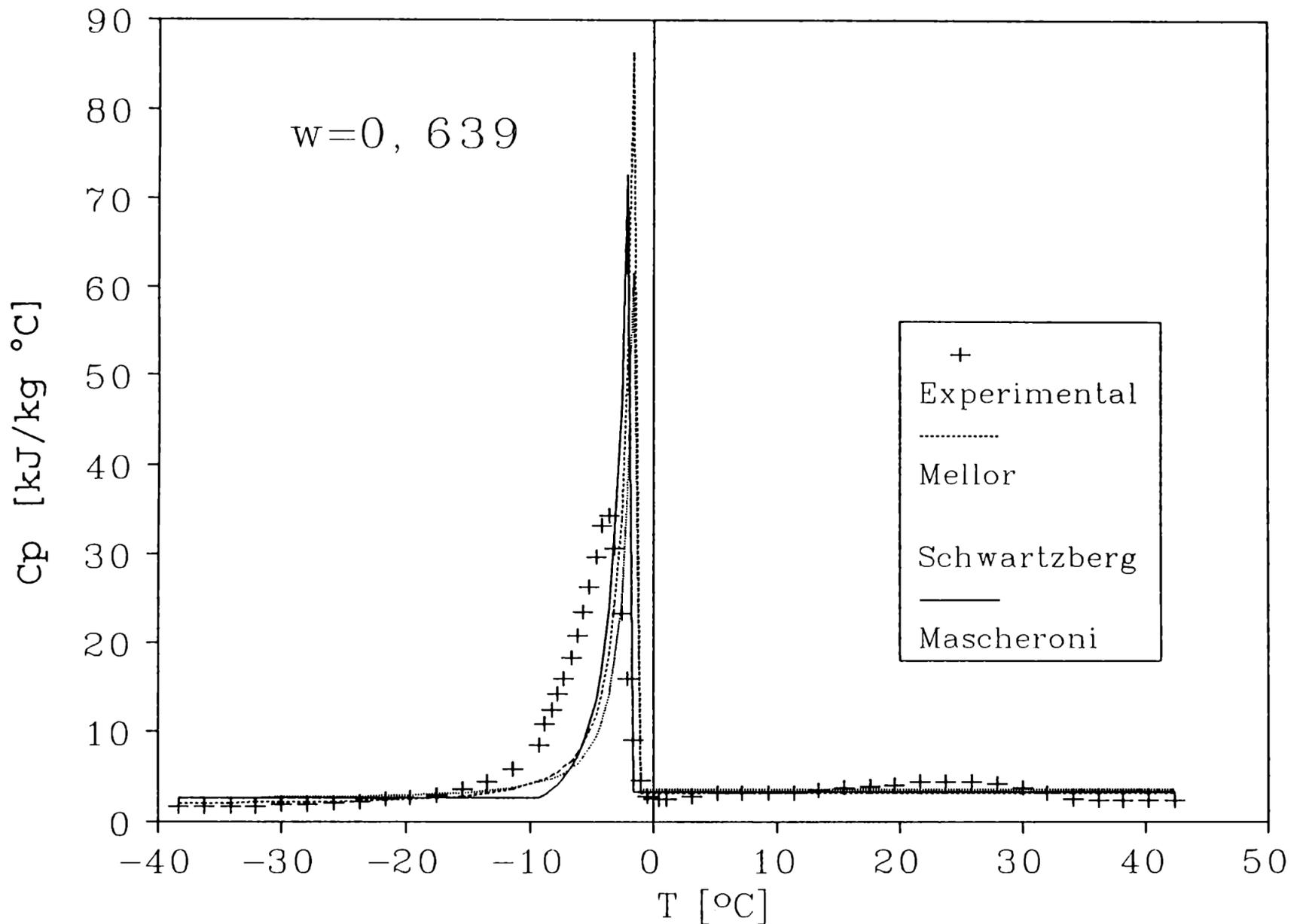


Figura 20. Comparación de los valores experimentales de  $C_p$  para carne de cerdo con las ecuaciones de predicción de bibliografía para un determinado contenido acuoso.

En todos los tipos de carne evaluados notamos que las curvas experimentales coincidían en su forma con las evaluadas a partir de ecuaciones de predicción encontradas en bibliografía, pero se encontró una diferencia importante en la zona de fusión intensiva y cerca de la temperatura de fusión (esta zona se encuentra entre

aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$  y la temperatura de fusión), lo que se analiza más adelante.

En la Tabla 4 se compara el cambio de entalpía H, entre  $-40$  y  $40^{\circ}\text{C}$  experimental, calculado según el manual del DSC, para los tres tipos de carne evaluadas y los obtenidos por cálculo de las ecuaciones de bibliografía.

**TABLA 4**

TIPO DE CARNE	w	Hexp [kJ/kg]	MELLOR	error %	SCHWARTZBERG	error %	MASCHE- RONI	error %
CORDERO	0,674	366,0	400,9	9,5	410,8	12,2	402,7	10,0
CORDERO	0,703	385,4	420,6	9,1	424,6	10,2	422,2	9,5
CORDERO	0,745	400,0	455,5	13,6	455,5	13,8	457,0	14,2
CORDERO	0,758	441,6	458,1	3,7	458,2	3,7	458,5	3,8
CORDERO	0,776	486,5	469,6	-3,5	466,7	-4,1	470,8	-3,2
CERDO	0,563	348,3	376,6	8,1	384,3	10,3	355,1	1,9
CERDO	0,639	385,9	377,6	-2,1	391,5	1,4	375,8	-2,6
CERDO	0,666	394,5	413,9	4,9	424,9	7,7	410,4	4,0
VACA	0,487	340,3	308,3	-9,4	341,2	0,3	311,2	-8,6
VACA	0,544	360,1	362,4	-0,6	388,0	7,7	365,0	1,4
VACA	0,698	404,9	482,7	19,2	389,3	-3,9	384,3	-5,1
VACA	0,747	496,1	431,9	-12,9	432,6	-12,8	433,2	-12,7

Analizando esta Tabla se ve que la concordancia es bastante buena, aunque los valores experimentales son en su mayoría algo menores que los calculados por ecuaciones teóricas, siendo 19,2% el error porcentual mayor por sobre el valor experimental y 12.9% por debajo del valor experimental. En promedio, comparando todos los datos, los valores predichos son 2,74% mayores que los experimentales.

De estas evaluaciones obtuvimos las siguientes conclusiones:

-Las curvas experimentales de  $H$  vs  $T$  y  $C_p$  vs  $T$  tuvieron las formas esperadas.

-El cambio entálpico medido durante la descongelación tuvo un valor similar a los valores predichos por ecuaciones de bibliografía. Esto implica que la proporción de agua congelable y no congelable coincide con la incluida en las ecuaciones de predicción (a través del coeficiente  $b$  dado por la ecuación de Schwartzberg y de las constantes en los otros métodos).

-En el rango de descongelación intensiva (desde aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta  $T_f$ ) los datos experimentales difieren de los teóricos. Los datos experimentales de  $H$  y  $C_p$  muestran una descongelación más gradual que los teóricos, los cuales predicen un menor cambio de fase a menores temperaturas y una velocidad de cambio mayor cerca del  $T_f$ . Una posible explicación está dada porque los métodos de predicción se hicieron a partir de datos experimentales (de calorimetría adiabática) tomados con cantidades grandes de muestra (comparadas con las utilizadas en el DSC). Estas muestras fueron congeladas en forma más lenta que lo que se hace en el DSC, teniendo probablemente una alta proporción de cristales extracelulares. Estos tienden a

comportarse como hielo puro durante la descongelación dando entonces un pico más fino y alargado. Por otro lado en el DSC las muestras tienen poca masa y se congelan rápidamente, lo que produce una alta proporción de cristales intracelulares, entonces la muestra tiende más al comportamiento de una solución, con un rango más amplio de fusión.

-Como conclusión se podría decir que los datos del DSC representan situaciones de rápida congelación o calentamiento mientras que los datos dados por otros calorímetros y la mayoría de las ecuaciones de predicción son más útiles para simular congelaciones y descongelaciones más lentas.

**1.e.- Estudio de la influencia de las condiciones de la congelación y almacenamiento sobre los valores medidos**

Como se ha explicado en el punto anterior existen diferencias en la zona de descongelación intensiva entre los datos experimentales y los valores predichos por las ecuaciones de predicción dadas por Mellor (1978), Schwartzberg (1976) y Mascheroni (1977).

Para estudiar la posible influencia de las condiciones de congelación y almacenamiento de las muestras, sobre los valores medidos de  $H$  y  $C_p$ , se repitieron las medidas pero variando las condiciones previas al estudio.

Se realizaron con cada tipo de carne (cordero y cerdo) 4 determinaciones para las distintas condiciones de congelación y almacenamiento, por lo tanto para cada tipo de carne se tomaron

16 medidas. Para ello se realizó lo siguiente: se utilizaron patas de cordero y de cerdo que no habían sido previamente congeladas; se tomaron muestras, todas del mismo trozo homogeneizado (con lo cual se aseguró que tengan el mismo w); luego se colocaron en las cápsulas y se congelaron así:

a) Congelación rápida en el DSC.

b) Congelación lenta en cámara de  $-5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, luego se llevaron a cámara de  $-20^{\circ}\text{C}$  por otras 24 horas y luego se llevó a  $-40^{\circ}\text{C}$  en el DSC.

c) Congelación rápida en freezer de  $-60^{\circ}\text{C}$ , y almacenamiento en el mismo durante 15 días.

d) Congelación lenta del mismo modo que en b) pero en lugar de terminar la congelación en el DSC, se llevó a freezer de  $-60^{\circ}\text{C}$  y se lo almacenó durante 15 días.

En todos los casos se utilizaron los mismos equipos y las corridas se hicieron de la forma que fue descripta anteriormente. Los resultados de estas experiencias se presentan en los gráficos siguientes y se discuten a continuación:

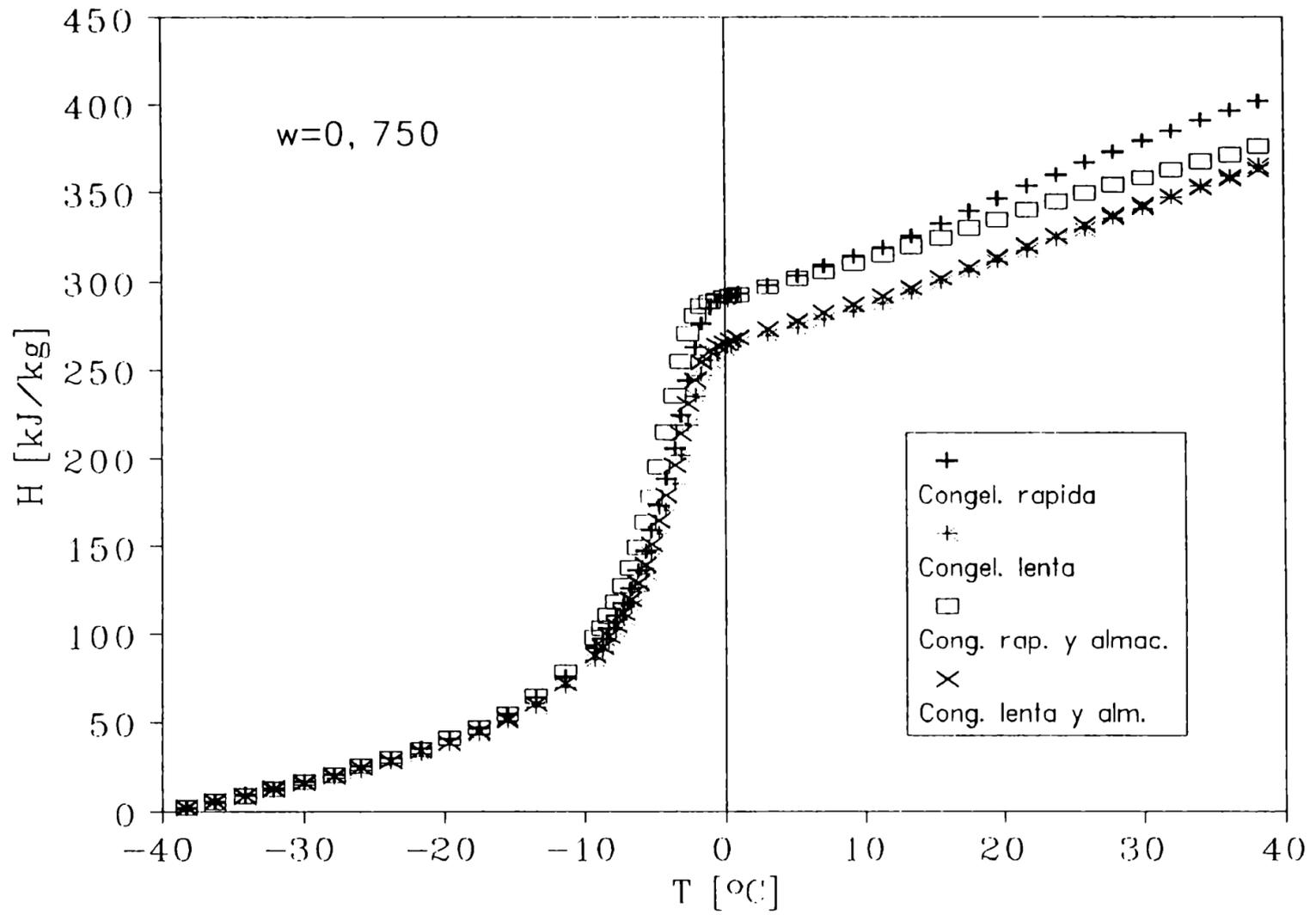


Figura 21. Comparación de entalpía de carne de cordero según las diferentes formas de congelación y almacenamiento.

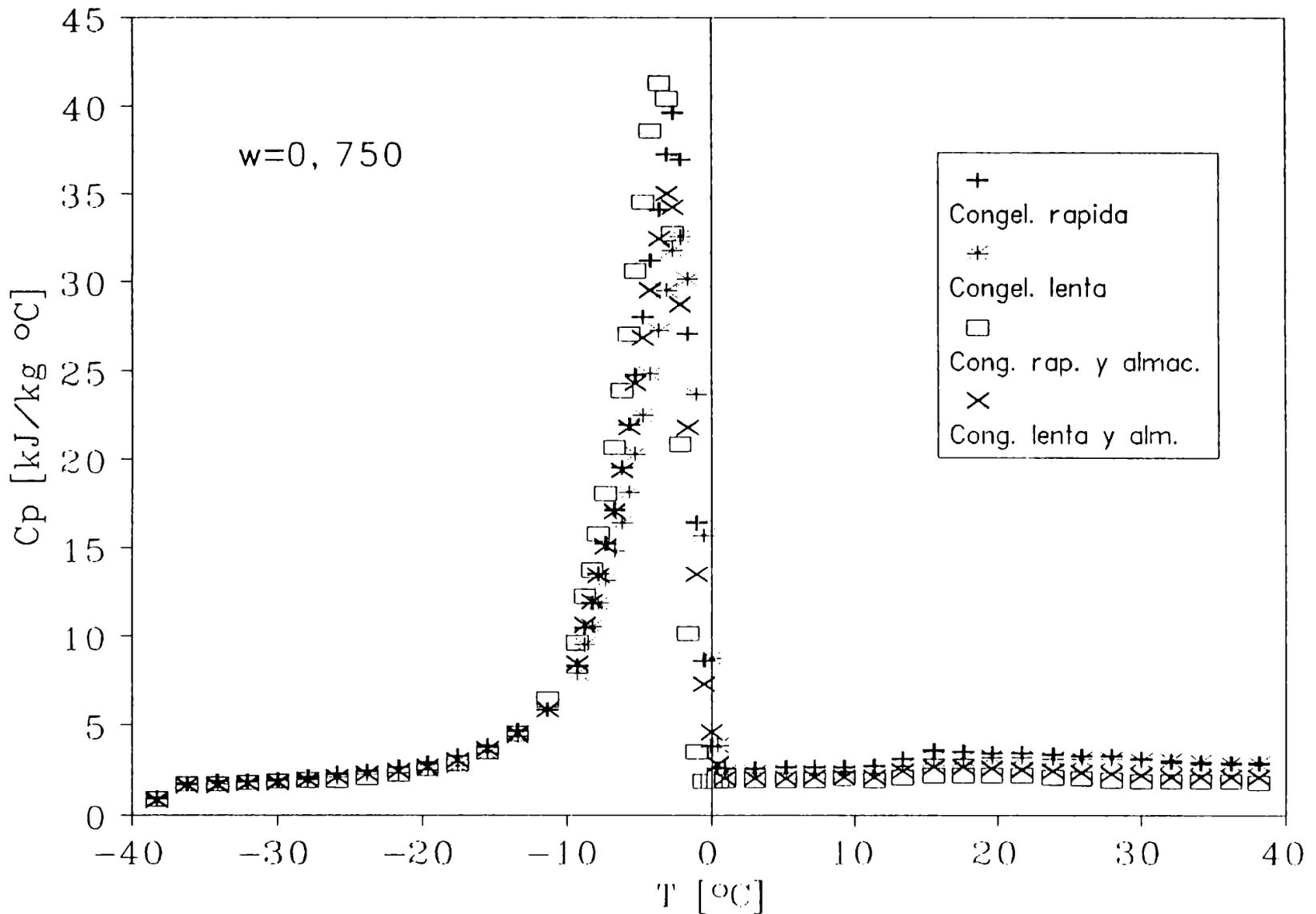


Figura 22. Comparación de capacidades caloríficas para carne de cordero según distintas formas de congelación y almacenamiento.

-En las figuras se compara la influencia sobre la entalpía y sobre la capacidad calorífica de las diferentes formas de congelación y almacenamiento. A pesar de ciertas diferencias en los valores entálpicos entre muestras de igual contenido acuoso, se puede concluir que en la zona de fusión propiamente dicha ( $-10^\circ\text{C}$  y  $T_f$ ) la forma de las curvas no es influenciada de manera apreciable por las condiciones de congelación y/o almacenamiento.

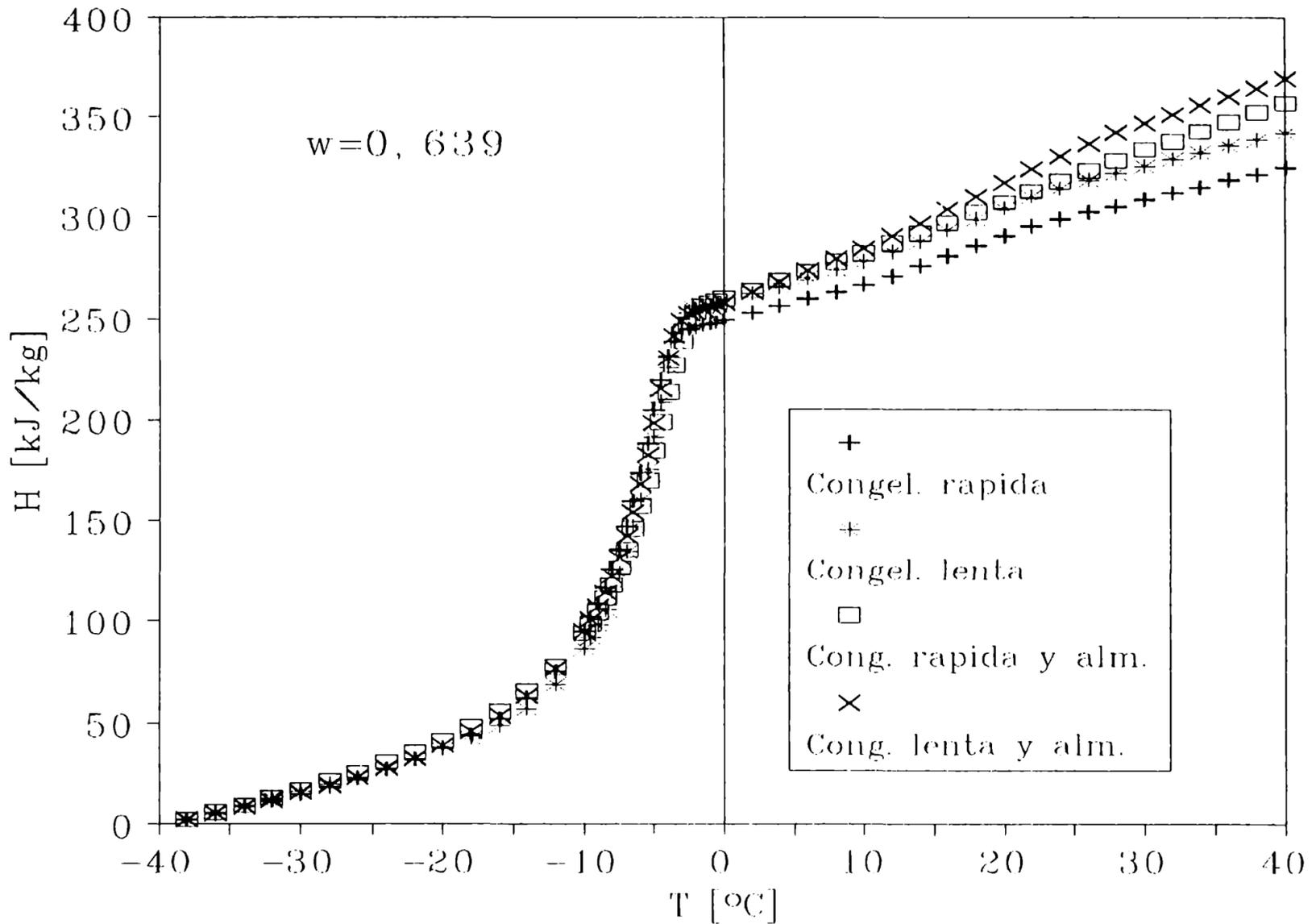


Figura 23. Comparación de las entalpías experimentales según las diferentes formas de congelación y almacenamiento para carne de cerdo.

-Aparentemente, a los fines prácticos, todos los casos estudiados darían el mismo tipo de cristales de hielo. Es evidente que para poder diferenciar la influencia de las condiciones de congelación y almacenamiento se debe buscar otro método de evaluación de propiedades que permita utilizar muestras de mayor tamaño y que además posibilite estudiar tamaño y posición de los cristales de hielo que se forman.

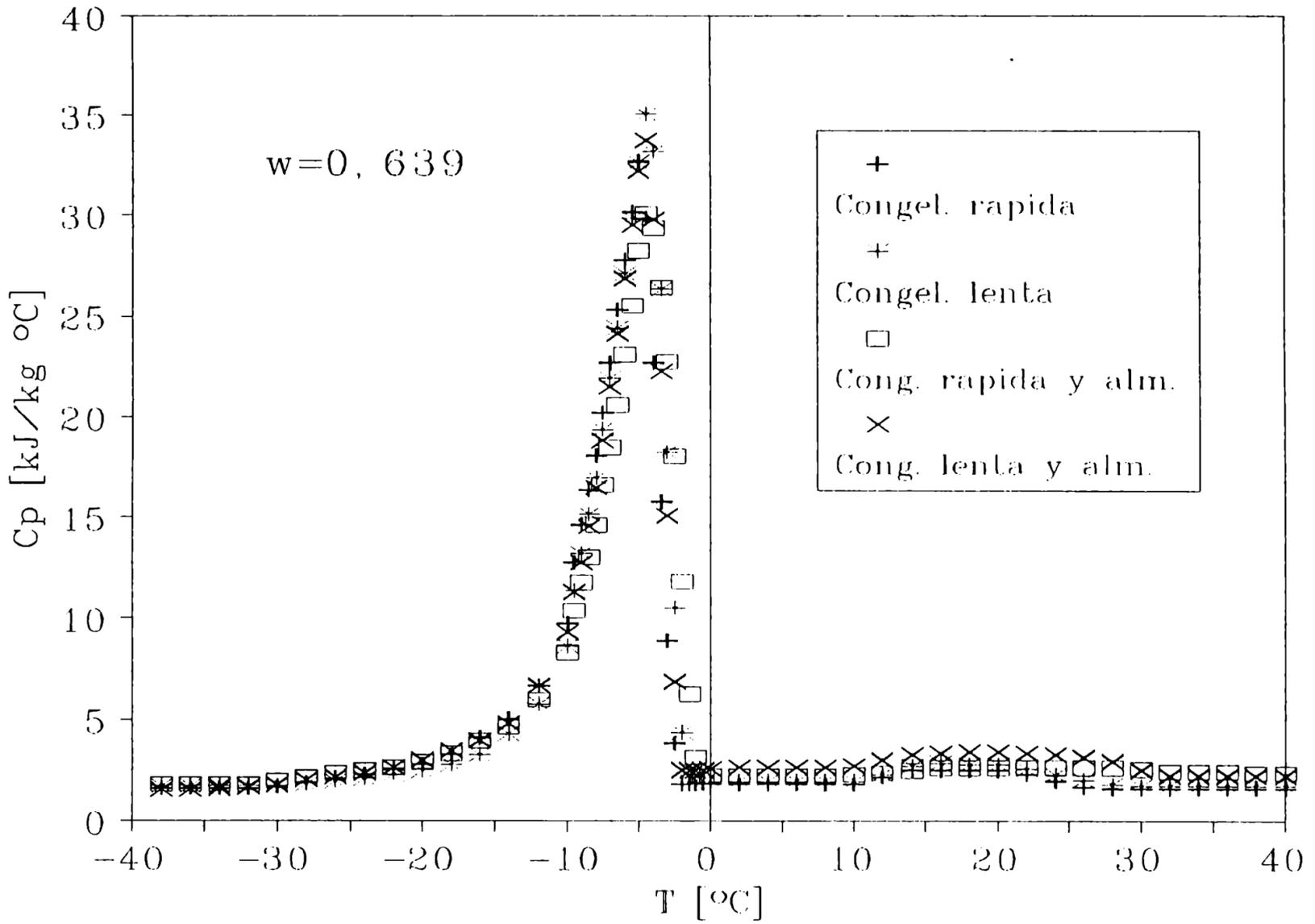


Figura 24. Comparación de los  $C_p$  experimentales para carne de cerdo con diferentes condiciones de congelación y almacenamiento.

## 2.- Conductividad térmica y densidad

Los valores de las propiedades, como ya hemos dicho, dependen fuertemente de la temperatura y composición. Para el caso de conductividad térmica la dependencia también incluye la estructura del músculo, dirección del flujo calórico respecto de la orientación de las fibras musculares, si se trata de cortes

musculares o de carne procesada, etc. Ello dificulta enormemente la obtención de datos experimentales o ecuaciones de predicción que sean generalizables a distintas carnes, cortes o tratamientos (con o sin hueso, picado, cocido).

En el caso de carne vacuna hay amplia información en distintas fuentes. Morley (1972) y Sanz y col. (1987) presentan revisiones con un amplio espectro de datos experimentales. Asimismo existen numerosas ecuaciones de predicción tales como las presentadas por Leitman (1967), Sweat (1975), Kong y col. (1982) y Sanz y col. (1989).

No ocurre lo mismo para otros tipos de carne. Así, para carne ovina Morley (1966) presenta un solo dato experimental a  $-19^{\circ}\text{C}$  para músculo lumbar. Por su parte Leitman (1967) determinó dos juegos de datos, uno para flujo paralelo a las fibras y el otro para flujo perpendicular, empleando una versión modificada del método de placa caliente en estado estacionario. La mínima temperatura alcanzada en esos experimentos fue de  $-14,7^{\circ}\text{C}$ . Más recientemente, Pham y Willix (1989) hicieron un extensivo estudio sobre carne de cordero, usando una versión del método de placa caliente. Las temperaturas cubiertas en este estudio van desde  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+30^{\circ}\text{C}$ . Al igual que Leitman, estos autores determinaron la conductividad para carnes deshuesadas, en dirección paralela a las fibras y también en dirección perpendicular. En nuestro instituto se determinó conductividad térmica de carne de cordero en el rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+25^{\circ}\text{C}$ . Los datos medidos por Bazán y Mascheroni (1984), presentan un considerable grado de dispersión debajo de  $T_f$ . Las posibles causas podrían ser el uso de muestras empaquetadas con diferente densidad y composición, las cuales podrían tener las fibras orientadas más o menos en forma perpendicular al flujo calórico.

En el caso de carnes de cerdo Lentz (1961) determinó datos de conductividad de carne de cerdo perpendicular y paralelo a las fibras a diversas temperaturas. Morley (1966) realizó experiencias con el método del comparador térmico para 2 temperaturas: 16°C y -19°C. Kong y col. (1982) realizaron una comparación entre datos publicados por Lentz y los predichos por ellos en función del contenido acuoso y de grasa.

Por otra parte, para densidad, no existen datos experimentales por debajo de 0°C. Por sobre esa temperatura existen mayormente datos puntuales y solo Jarvis (1971) realizó un estudio detallado de la variación de la densidad de carne vacuna con la temperatura.

#### **2.a.- Búsqueda de ecuaciones de predicción de conductividad térmica y densidad de carnes**

De entre las ecuaciones de predicción de bibliografía se seleccionaron aquellas que poseían mayor fundamento teórico o estaban respaldados por datos experimentales. En todos los casos se buscó que todos los parámetros necesarios para el cálculo fuesen conocidos.

##### **A.- Y. CHOI y M. OKOS (1986)**

Estos autores dan un sistema de ecuaciones para cada componente de alimentos en función de la temperatura que permiten calcular la conductividad y densidad entre otras propiedades, en función de las fracciones en peso de los distintos componentes.

Las ecuaciones son las siguientes

$$K = \sum K_m X_m^v \quad (23)$$

$$\rho = \frac{1}{\sum X_m^w / \rho_m} \quad (24)$$

$$X_{w_u} = \ln \left( \frac{X_w^w / M_w}{X_w^w / M_w + \sum X_m^w / M_m} \right) \quad (25)$$

$$X_m^v = \frac{X_m^w / \rho_m}{\sum X_m^w / \rho_m} \quad (26)$$

AGUA  $K_w = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$

HIELO  $K_{hi} = 2,2196 - 6,2489 \times 10^{-3} T + 1,0154 \times 10^{-4} T^2$

PROTEINAS  $K_p = 1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$

GRASAS  $K_g = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3} T - 1,7749 \times 10^{-7} T^2$

CARBOHIDRATOS  $K_h = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$

FIBRAS  $K_b = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$

CENIZAS  $K_z = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$

y para densidad

AGUA  $\rho_w = 9,9718 \times 10^2 - 3,1439 \times 10^{-3} T$

HIELO  $\rho_{hi} = 9,1689 \times 10^2 - 1,3071 \times 10^{-1} T$

PROTEINAS  $\rho_p = 1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1} T$

GRASAS  $\rho_g = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$

CARBOHIDRATOS  $\rho_h = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$

FIBRAS  $\rho_b = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$

CENIZAS  $\rho_z = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$

**B.- V. SWEAT (1975)**

Este autor utilizó datos de carne de vaca, ave y pescado y encontró ecuaciones que predicen la conductividad térmica de carne con la temperatura y el contenido de agua. La exactitud y la simplicidad de cálculo fueron el criterio utilizado para seleccionar estas ecuaciones.

Las ecuaciones son las siguientes

$$K = 0,080 + 0,52w \quad (27)$$

para  $0^\circ < T < 60^\circ\text{C}$  y para  $0,60 < w < 0,80$

$$K = -0,28 + 1,9w - 0,0092T \quad (28)$$

para  $-40^\circ < T < -5^\circ\text{C}$  y para  $0,65 < w < 0,85$

C.- J. KONG y col. (1982)

Estos autores calcularon mediante las siguientes ecuaciones de predicción la conductividad térmica y densidad de distintas carnes a diferentes temperaturas.

$$K = \frac{1}{\left( \frac{X_w^v}{K_w} + \frac{X_p^v}{K_p} + \frac{X_g^v}{K_g} \right)} \quad (29)$$

donde

$$X_w^v + X_p^v + X_g^v = 1 \quad (30)$$

Las fracciones volumétricas fueron calculadas a partir de las fracciones másicas y las densidades de la siguiente forma

$$X_w^v = \frac{\left( \frac{X_w^w}{\rho_w} \right)}{\left( \left( \frac{X_w^w}{\rho_w} \right) + \left( \frac{X_p^w}{\rho_p} \right) + \left( \frac{X_g^w}{\rho_g} \right) \right)} \quad (31)$$

Del mismo modo se obtiene  $X_p^v$  y  $X_g^v$ , luego

$$X_w^w + X_p^w + X_g^w = 1 \quad (32)$$

Los valores usados en la predicción son:

	<b>carne no congelada</b>	<b>carne congelada</b>
$K_p$	0,342 [W/(m °C)]	0,581 [W/(m °C)]
$K_g$	0,19 [W/(m °C)]	0,19 [W/(m °C)]
$K_w$	ecuación (33)	ecuación (34)
$\rho_p$	1340 [kg/m <sup>3</sup> ]	1340 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	900 [kg/m <sup>3</sup> ]	930 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	1000 [kg/m <sup>3</sup> ]	919 [kg/m <sup>3</sup> ]

$$K_w = 0,565 + 0,0018 T - 5,8 \times 10^{-6} T^2 \quad (33)$$

$$K_w = 2,25 - 0,0062 T + 1,15 \times 10^{-4} T^2 \quad (34)$$

Luego estas ecuaciones fueron comparadas con las de Sweat (1975) y dieron gran exactitud para carnes frescas de bajo contenido graso. En carnes congeladas dieron valores menores que los publicados debido a que no se tuvo en cuenta el cambio de fase de agua durante la predicción.

D.- P. SANZ y col. (1989)

Estos autores hicieron una compilación de datos propios y de otros autores y presentan ecuaciones para el cálculo de las más importantes propiedades termofísicas de productos cárneos, las que se resumen en la Tabla 5.

TABLA 5

Temperatura [°C]	K [W/(m °C)]	Referencia	Especificación
T ≥ T <sub>f</sub> T < T <sub>f</sub>	0,261(1-w)+0,604w 1,745(1-T <sub>f</sub> /T)w+0,233	Fikiin (1974)	T <sub>f</sub> =-1°C para carnes
T < T <sub>f</sub>	K + (K <sub>o</sub> - K) (T <sub>f</sub> /T)	Schwartzberg (1977)	T <sub>f</sub> = -1°C
T ≥ T <sub>f</sub> T < T <sub>f</sub>	0,1075+0,501w+5,052x10 <sup>-4</sup> wT 0,398+1,448w+0,985/T	Sanz y col. (1989)	T <sub>f</sub> = $\frac{(1-w)}{0,069-0,44w}$ carne vacuna paral. fibras
T ≥ T <sub>f</sub> T < T <sub>f</sub>	0,0866+0,501w+5,052x10 <sup>-4</sup> wT 0,378+1,376w+0,930/T	Sanz y col. (1989)	T <sub>f</sub> = $\frac{(1-w)}{0,069-0,44w}$ carne vacuna perp. fibras
T > -1 -6 ≤ T ≤ -1 -30 ≤ T ≤ -6	0,48 0,48(-T) <sup>0,429</sup> 1,029+0,0821(-T-6) <sup>0,590</sup>	Levy (1977)	carne vacuna w=0,74
T > -0,6 -6 ≤ T ≤ -0,6 -30 ≤ T ≤ -6	0,48 0,48(-T+0,6) <sup>0,492</sup> 1,208+0,0603(-T-6) <sup>0,674</sup>	Levy (1977)	carne vacuna w=0,78
T > -0,6 -4,6 ≤ T ≤ -0,6 -30 ≤ T ≤ -4,6	0,454 0,454(-T+0,4) <sup>0,34</sup> 0,784+0,064(-T-4,6) <sup>0,736</sup>	Levy (1977)	carne de cerdo
T ≥ T <sub>f</sub>	0,096+0,34w	Sorenfors (1974)	carne picada
T ≥ T <sub>f</sub>	0,344w-0,0644x <sub>p</sub> - 0,1334x <sub>g</sub> +0,0008(273+T)	Hermans (1979)	carne vacuna

Para calcular la densidad estos autores también recopilaron ecuaciones de diferentes orígenes:

TABLA 6

Temperatura [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Referencia	Especificaciones
$5 \leq T \leq 30$	$\frac{1077,4}{(1+0,000375(T-5))}$	Jarvis (1971)	Vaca
$T < T_f$	$\frac{1053}{0,98221+0,11310w+0,25746(1-w)/T}$	Mascheroni y Calvelo (1980)	Vaca
$T > T_f$	$890+110w$	Domínguez Alonso y col. (1974)	Vaca

Como se puede ver existen numerosas ecuaciones de predicción de conductividad térmica, que varían con el contenido acuoso, con la temperatura y con el tipo de carne (algunas son específicas y otras son particulares). Por lo tanto es relativamente fácil calcular el valor que se requiera en función de la información que se posea ( $T, w, x_p, x_g$ ).

Además de las ecuaciones citadas, específicamente, para carne de cordero encontré ecuaciones de predicción en

**E.- E. FLORES y col. (1987)**

Los datos experimentales de conductividad térmica de carne de cordero utilizados cubrieron un amplio rango sobre y debajo de la temperatura de fusión y fueron matemáticamente

interpretados como una función de la temperatura por medio de las siguientes ecuaciones

$$K = 0,4866 + 8,1560 \times 10^{-4} T \quad (35)$$

para  $T \geq -0,9^{\circ}\text{C}$

$$K = 1,1424 - 9,0178 \times 10^{-3} T + \frac{0,5993}{T} \quad (36)$$

para  $-40,3^{\circ}\text{C} \leq T < -0,9^{\circ}\text{C}$ .

**F. - J. MELLOR (1978)**

Este autor realizó determinaciones experimentales y halló una regresión en función de la temperatura.

para  $T < 0$      $K = 0,8979 - 0,02827 T - 0,000016 T^2 + 0,0000649 T^3 \quad (37)$

para  $T > 0$      $K = 0,432 + 0,001825 T - 0,0000385 T^2 \quad (38)$

**G. - Q. PHAM Y J. WILLIX (1989)**

Realizaron una gran cantidad de medidas sobre carnes y menudencias de cordero. A partir de sus datos dan ecuaciones que permiten calcular conductividad térmica en función de la temperatura. Ellas son:

Para el rango de subcongelado

$$K = K_1 + K_2 (T - T_f) + K_3 \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_f} \right] \quad (39)$$

Para el rango sobre el congelado

$$K = K_1 + K_4 (T - T_f) \quad (40)$$

La fracción de agua congelada varía según:

$$\left[ 1 - \frac{T_f}{T} \right] \quad \text{para } T_f = -0,9^\circ C \quad (41)$$

Los parámetros para calcular la conductividad térmica de carne de cordero, menudencias y grasa en las ecuaciones dadas son los presentados en la Tabla 7.

TABLA 7

Material	$K_1$ [W/m °C]	$K_2$ [W/m °C <sup>2</sup> ]	$K_3$ [W/ m]	$K_4$ [W/m °C <sup>2</sup> ]
Pata, paralelo a las fibras	0,450	-0,0063	0,69	0,0009
Pata, Perpendicular a las fibras	0,421	0,0037	0,67	0,0010
Pata, carne picada	0,466	-0,0043	0,71	0,0011
Corazón	0,390	-0,0046	0,71	0,0009
Corazón picado	0,407	-0,0065	0,68	0,0008
Hígado	0,417	-0,0073	0,65	0,0006
Hígado picado	0,425	-0,0067	0,67	0,0012
Branquias	0,494	-0,0039	0,84	0,0003
Riñón	0,507	-0,0075	0,78	0,0012
Grasa	0,219	-0,0003	0,05	-0,0005
Grasa picada	0,212	-0,0000	0,06	-0,000

**2.b.- Conclusiones**

-Existen valores de conductividad térmica determinados experimentalmente para muchos alimentos y entre ellos para diferentes tipos de carne, evaluados a una o varias temperaturas.

-Se encuentran también ecuaciones de predicción que permiten evaluar por medio de ecuaciones relativamente sencillas la conductividad a cualquier temperatura.

-Según experiencias realizadas en el instituto, se comprobó que el valor de la conductividad depende fuertemente de la temperatura en la zona de congelación y substancialmente del contenido de agua y de la estructura y distribución espacial de las fibras.

## CAPITULO 3

### COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA EN EQUIPOS DE CONGELACION

**III.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA**  
**EN EQUIPOS DE CONGELACION**

**1.- Coeficientes de transferencia de calor**

Los valores de los coeficientes de transferencia de calor son esenciales para predecir no solo tiempos de proceso, sino también para obtener la pérdida de peso producida por la evaporación o sublimación del agua superficial, a través del uso de coeficientes de transferencia de materia calculados a partir de los de calor.

La información de bibliografía sobre coeficientes de transferencia de calor (h) en sistemas alimento-refrigerante es muy escasa. Además, en general los datos publicados se obtuvieron, como veremos más adelante, para situaciones distintas de las existentes en equipos de congelación, generalmente bajo condiciones ideales: superficies pulidas, sin otros cuerpos próximos y sin impedimentos estéricos a la circulación de aire, las que se diferencian mucho de las condiciones reales de operación de los congeladores industriales, en especial los de cintas, que son los que se utilizan con mayor frecuencia. Por ello es de esperar que tanto los valores experimentales como los predichos por las correlaciones de bibliografía, solo den una aproximación grosera cuando se los utilice en cálculos relacionados con la congelación.

Además, los congeladores de cinta pueden circular el aire en tres direcciones: paralelo a las cintas, o transversal, incidiendo desde arriba o incidiendo desde abajo de la cinta

transportadora; aún más en los últimos diseños, el tipo de flujo puede llegar a ser combinado. Entonces, además de estudiar la influencia de la velocidad del aire, debe determinarse el efecto que tengan sobre los coeficientes de transferencia las distintas opciones de circulación de aire.

Adicionalmente los factores que afectan el coeficiente de transferencia de calor no sólo están relacionados con las características de los objetos que sufrirán el calentamiento o enfriamiento, sino también con la dinámica del fluido de los alrededores (incluyendo fundamentalmente la existencia de otras superficies, otros cuerpos, etc.) y por las condiciones de superficie del cuerpo.

Esta gran dependencia de  $h$  con las propiedades y dinámica del fluido al cual se transfiere calor hace que normalmente se represente el resultado de su hallazgo con las bien conocidas correlaciones  $Nu=f(Re,Pr)$ , pero que además las mismas tengan aplicación rigurosa sólo sobre sistemas muy idealizados.

### 1.a.- Búsqueda bibliográfica de datos experimentales, de métodos de medida y de ecuaciones de predicción

El  $h$  es un fenómeno local, no es constante sobre la superficie, aún en geometrías simples. Pero debido a la forma en que se obtienen los valores de temperatura que se usan en las experiencias, generalmente sólo podemos obtener un valor promedio de  $h$  sobre toda la superficie.

Gran parte de la información de bibliografía fue obtenida

con materiales inertes (metales, plásticos, etc.). En el caso específico de alimentos, Chavarria y Heldman (1984) y Flores y Mascheroni (1988), han realizado algunos estudios sobre coeficientes de transferencia en congelación de alimentos sin empaquetar como hamburguesas, o sobre otros alimentos de geometrías planas, pero los coeficientes para las geometrías estudiadas no pueden usarse para otras geometrías como las esferas (lisas o rugosas) a las que se asemejan distintas frutas u hortalizas, porciones de melón y sandía, albóndigas, bollos de panadería, etc. También encontramos trabajos de Gac y Larbouillac (1962), Cleland y Earle (1976), Rubiolo y Schwartzberg (1986) y Pham y Willix (1987) quienes trabajaron con productos empaquetados.

Bonacina y Comini (1972), Comini (1972) y Kopelman y col. (1976), proveen información detallada acerca de las condiciones a ser cumplidas en la ejecución de experimentos en estado estacionario para tener la más alta precisión posible. Ellos adoptan métodos numéricos y emplean fórmulas para calcular los errores que involucran los cálculos.

Finalmente Arce y Sweat (1980) hicieron un completo estudio de la existencia de datos, sistemas modelos y métodos comunmente usados en las experiencias.

El método de determinación del coeficiente de transferencia de calor debe caer dentro de alguna de estas 3 categorías:

a) Medida de temperatura de superficie en estado estacionario para una dada disipación de calor del cuerpo.

b) Medida de flujo calórico a la superficie del cuerpo.

c) Medida de la temperatura transitoria del cuerpo cuando se calienta o se enfría.

a) **Medida de temperatura en estado estacionario**

Siempre que se adiciona energía al sistema, ésta debe ser disipada al ambiente. El  $h$  queda determinado por la siguiente ecuación:

$$q = hA(T_{\text{sup}} - T_a)$$

$q$ : energía por unidad de tiempo  
que se adiciona al sistema

$A$ : área superficial del sistema

El problema de este método es ubicar bien el sensor de tal forma que dé un valor real de la temperatura de superficie. Algunos investigadores la toman en 2 ó 3 puntos a lo largo de una línea perpendicular a la superficie y luego extrapolan para hallar la temperatura superficial.

b) **Medida del flujo calórico**

Utilizan aparatos especiales de medición de flujo calórico, llamados fluxímetros. Generalmente no es una técnica muy precisa.

c) **Medidas de temperatura transitorias**

Se basan en la medida de la variación de temperatura del

producto con el tiempo y se relacionan a través de los balances térmicos con el valor de  $h$ . Este tipo de determinaciones son las que se adaptan al trabajo con alimentos y es la que se utilizó en este trabajo, tal como se detallará oportunamente.

Finalmente, para concluir la revisión bibliográfica sobre el tema, la Tabla 8 presenta ecuaciones de bibliografía para el cálculo de  $Nu$  vs.  $Re$ , algunas de tipo general para diferentes geometrías (placa plana, cilindros finitos, esferas) en un rango de  $v_a$  o de  $Re$  definido y otras para ciertos alimentos específicos.

**TABLA 8**

AUTOR	PRODUCTO	RANGO DE Re o $v_a$	REGRESION
Giambelli (1971)	Placa plana	$3\text{m/s} \leq v_a \leq 13\text{m/s}$	$Nu = 0,036 Re^{0,8} Pr^{1/3}$
Chavarría y Heldman (1984)	Placa plana	no especifica	$Nu = 0,579 Re^{0,582}$
Feldmann (1979)	Esfera	$0,5 \leq v_a \leq 4\text{m/s}$	$Nu = 0,4 Re^{0,58}$
Morgan (1975)	Cilindro Finito	$5000 \leq Re \leq 50000$ $Re \leq 230000$	$Nu = 0,148 Re^{0,633}$ $Nu = 0,0208 Re^{0,814}$
Raithby y Eckert (1968)	Esfera	$3600 \leq Re \leq 52000$ $Re > 52000$	$Nu = 0,257 Re^{0,588}$ $Nu = 0,291 Re^{0,585}$
Perry y Chilton (1985)	Esfera Lisa		$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{1/3}$
Miles (1982)	Alimento	$50 \leq Re \leq 150000$	$Nu = 0,340 Re^{0,6}$
Flores y Mascheroni (1988)	Hamburguesa (cilindro finito)	$10000 \leq Re \leq 70000$ distintas formas de flujo	$Nu = 0,877 Re^{0,328}$ $Nu = 1,461 Re^{0,496}$ $Nu = 0,363 Re^{0,640}$
Arce y Sweat (1980)	Manzana		$Nu = 0,120 Re^{0,710}$
idem	Naranja	$35000 \leq Re \leq 135000$	$Nu = 5,05 Re^{0,333}$
idem	Huevo	$6000 \leq Re \leq 15000$ $15000 \leq Re \leq 25000$	$Nu = 0,46 Re^{0,56}$ $Nu = 0,71 Re^{0,55}$
idem	Papa redonda	$1000 \leq Re \leq 25000$	$Nu = 0,31 Re^{0,61}$

**1.b.- Equipo experimental y método de medida y cálculo**

El diseño del equipo fue hecho teniendo en cuenta las distintas formas y tamaños de los alimentos congelados en túneles de cinta transportadora como: pizzas, pasteles, tortas, bizcochuelos, hamburguesas, salchichas, pollos, albóndigas, mariscos, pescados, etc. variando el tamaño de los alimentos desde unos pocos cm. hasta 30 cm. de diámetro y desde 1 cm. hasta 10 cm. de altura, aunque este extremo es poco frecuente, siendo normalmente de mucho menor espesor.

El equipo consta de un soplador (de velocidad regulable) que se conecta por medio de una manga a un túnel, el cual tiene varias secciones de distinto diámetro. Luego de la primera sección se encuentran tres grillas metálicas cuyo fin es uniformizar el flujo de aire. En la última sección del túnel hay una ranura por la cual se introduce el objeto, cuyo coeficiente se desea determinar la que a su vez se sella con un burlete de goma para evitar fugas de aire durante los experimentos.

La Figura 25 (a), presenta el diseño del túnel utilizado en las experiencias, mostrando la posición de las grillas, de la muestra y la conexión al sistema de adquisición de datos. La parte (b) de la misma figura esquematiza la sección transversal del túnel y como se colocó la muestra en el caso de flujo de aire paralelo a la cinta. Y finalmente la figura (c) muestra una sección transversal del túnel cuando el flujo de aire era perpendicular a la cinta. El mismo ya había sido construido en el instituto, y fue utilizado previamente por Flores para determinar coeficientes de transferencia de calor en hamburguesas (Flores y Mascheroni (1988)).

El trabajo más importante que faltaba realizar en este tema era determinar los  $h$  para alimentos de forma esférica, para lo cual se utilizaron como modelo albóndigas de carne. Otros alimentos de igual geometría que usualmente se congelan son arvejas, esferas de melón, etc., pudiéndose utilizar para los mismos, los datos obtenidos en estas experiencias.

Se utilizaron tres direcciones de flujo de aire con el fin de estudiar la influencia de este factor de diseño en el valor de  $h$ . Los tipos de flujo utilizados en las determinaciones experimentales son:

a.-Flujo de aire paralelo a la cinta (pc).

b.-Flujo de aire perpendicular a la cinta con incidencia primero sobre la muestra y luego sobre la cinta (dc).

c.-Flujo de aire perpendicular a la cinta con incidencia primero sobre la cinta y luego sobre la muestra (ac).

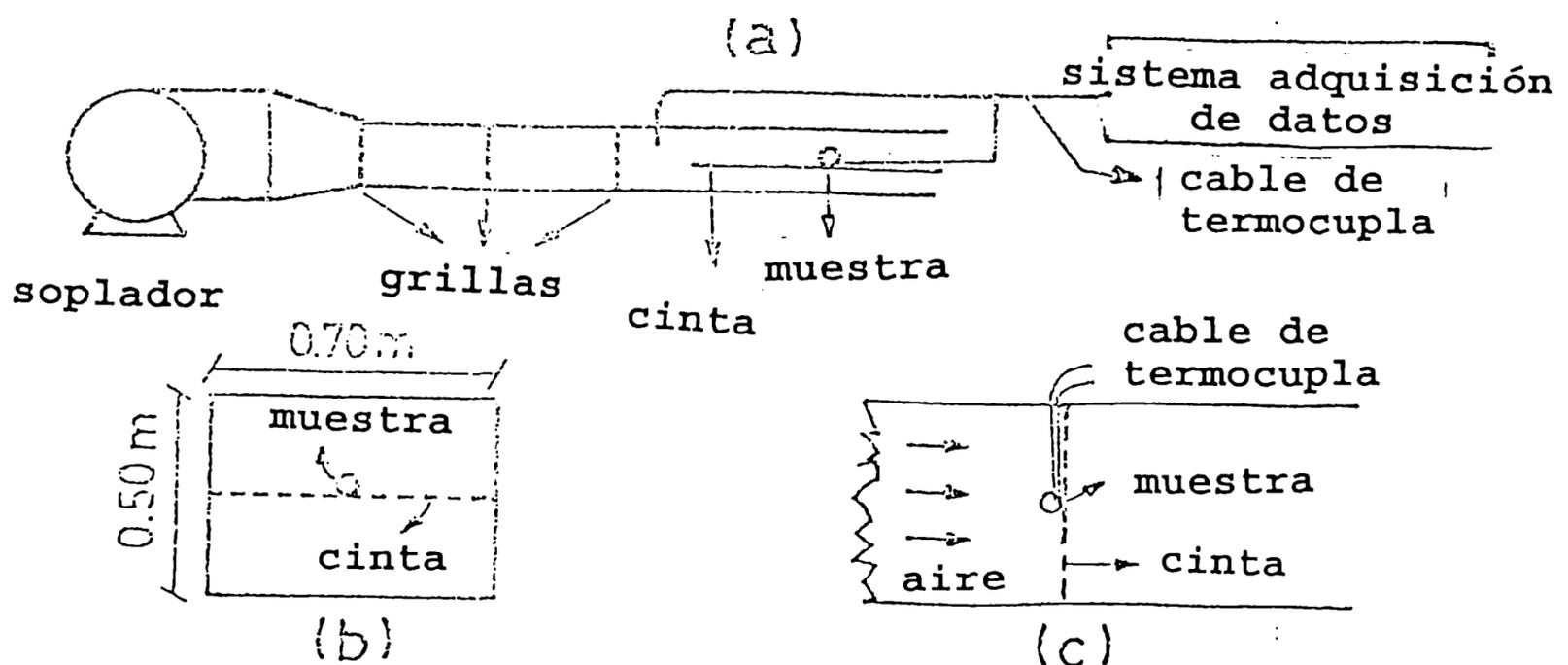


Figura 25. Esquema del equipo experimental.

**1.c.- Determinaciones experimentales**

En un congelador comercial de cintas, hay dos factores que determinan que la fluidodinámica sea muy distinta a la de un caso ideal. Uno es la existencia misma de la cinta, que es el factor principal, y el otro es el arreglo geométrico de los productos distribuidos sobre la cinta (principalmente para flujo de aire paralelo a las cintas).

En nuestras experiencias, sobre la cinta del congelador se distribuyeron una cierta cantidad de albóndigas (para dar una densidad de aproximadamente 165 albóndigas por metro cuadrado (Gruda y Poltovsky (1986)), al solo efecto de simular la situación real.

La particularidad es que en nuestro caso esas albóndigas "de relleno", fueron de poliestireno expandido ya que su función fue solo la mencionada y se tenía la ventaja de que no necesitan ser reemplazadas en cada experiencia.

Para preparar las albóndigas se buscó utilizar un molde de tamaño similar a las albóndigas que se congelan industrialmente y encontramos como tamaño ideal un diámetro de 3,8 cm; dicho molde permitió lograr uniformidad de forma, tamaño y peso. Las albóndigas preparadas se hicieron de carne vacuna picada sin ningún aditivo. El contenido de agua fue determinado por secado en una estufa a 102°C hasta alcanzar constancia en el peso.

Para medir las temperaturas durante las experiencias se usaron termocuplas de Cu-Constantan, las cuales se ubicaban en 2 puntos estratégicos: centro y superficie de la albóndiga. Se

eligieron estos dos lugares porque su posición es muy fácil de determinar y porque son importantes a los efectos de los cálculos.

Para ubicar las termocuplas en el centro se utilizaron agujas hipodérmicas dentro de las cuales pasaba una de las termocuplas y la otra se situaba pegada a la superficie externa de la aguja a 1,9 cm de su extremo de forma tal que al estar insertada quedase tocando la superficie del producto. La inserción de la aguja en el cuerpo se hacía utilizando un taladro de banco que permitió la caída de la misma en forma perpendicular al cuerpo y ser colocada a la profundidad exacta.

Las termocuplas se conectaron a un equipo de adquisición de datos Fluke Data Logger 2240 C, que se puede programar para adquirir datos a intervalos de tiempo constantes tan pequeños como se necesite. En nuestro caso fue cada 10 segundos. El equipo convierte directamente voltajes a temperaturas y las imprime en el intervalo de tiempo deseado; los valores de T se pueden leer a 0,1°C de resolución.

La velocidad del aire fue determinada por medio de un anemómetro de hilo caliente TSI modelo 1650, el cual permitió medirla con una resolución de 0,02 m/s para velocidades menores de 3 m/s y una resolución de 0,2 m/s para velocidades entre 3 m/s y 12 m/s. Este anemómetro fue previamente calibrado contra un anemómetro de aleta en el rango de velocidad y temperatura de los experimentos.

Para la lectura de la temperatura del aire en el túnel también se utilizó una termocupla la cual se introdujo por la ranura descripta junto con el cuerpo a medir.

Se trabajó con un soplador de 1410 RPM cuyo caudal de aire pudo regularse de modo tal que la velocidad de salida del aire varíe desde 1m/s hasta 8m/s.

Para la realización de cada determinación se estabilizó la albóndiga a la temperatura de inicio de la experiencia (del orden de -60 °C). Antes de introducir la misma al túnel, el soplador debió conectarse y regularse a la velocidad deseada; recién entonces se introdujo el producto y se dió comienzo a la experiencia. La misma se dió por finalizada cuando se alcanzaba una temperatura de -20 °C en la superficie. Esta temperatura final se eligió porque por encima de ella comienza a haber fusión de agua y no nos permitiría determinar con veracidad el coeficiente, ya que las propiedades de la carne son variables en ese rango de temperatura.

En todos los casos las propiedades térmicas del aire, utilizadas en los cálculos, fueron evaluadas a la temperatura del film,  $T_{film} = 0,5(T_a + T_{sup})$ .

### 1.d.- Método de cálculo

Si consideramos el balance microscópico de energía en el sólido, nos encontramos con:

$$\rho_s C p_s \frac{\partial T}{\partial t} = K_s \left[ 2 \frac{\partial T}{r \partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (42)$$

Esta ecuación requiere de una condición inicial

$t=0$        $T=T_0$        $T_0$ =Temperatura inicial de la carne

y dos condiciones de contorno

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r=0)} = 0 \quad \text{por simetria} \quad (43)$$

$$h(T_a - T)|_{(r=R)} = K_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r=R)} \quad \begin{array}{l} \text{condición de} \\ \text{contorno convectiva} \end{array} \quad (44)$$

Se asumieron propiedades constantes ( $K, \rho, Cp$ ), ello es válido, con un pequeño error, siempre y cuando no se exceda de  $-20^\circ\text{C}$  la temperatura final de la experiencia, tal como fue expresado previamente.

Como la variación de  $h$  con la posición no podría ser evaluada con exactitud, se tomó un valor global (promedio) de  $h$  sobre toda la superficie.

Para cada experiencia, la historia térmica medida fue comparada con curvas teóricas, de la solución de Ec. (42), calculadas en forma numérica para diferentes  $Bi$ , y se eligió aquella que coincidió mejor con la curva experimental. Ese es el valor de  $Bi$  elegido y a partir de allí se calcula el  $h$ .

Una vez hallados los coeficientes para diferentes velocidades de aire, se correlacionaron los mismos a fin de obtener una fórmula simple de predicción. Para esto, se utilizó un software comercial de regresión no lineal (SYSTAT).

Los valores de  $K_a, \rho_a, Dif_a$  y  $Cp_a$  necesarios para dichas

regresiones fueron calculados como una función de la temperatura usando las siguientes ecuaciones tomadas de Weast (1975), Bolz y Tuve (1980) y Perry y Chilton (1985), :

$$K_a = \frac{2,646 \times 10^{-3} (T_a + 273,16)^{1,5}}{(T_a + 273,16) + 245,4 \times 10^{(-12/(T_a + 273,16))}} \quad (45)$$

$$Cp_a = 1025,75 + 0,07724(T_a + 273,16) + 1,488 \times 10^{-5}(T_a + 273,16)^2 - \frac{5,7135 \times 10^6}{(T_a + 273,16)^2} \quad (46)$$

$$Dif_a = 1,4047 \times 10^{-9} (T_a + 273,16)^{1,75} \quad (47)$$

$$\rho_a = \frac{349,43}{(T_a + 273,16)} \quad (48)$$

$$\mu_a = \frac{1,458 \times 10^{-6} (T_a + 273,16)^{1,5}}{(T_a + 273,16) + 110,4} \quad (49)$$

**1.e.- Resultados experimentales**

La Tabla 9 nos muestra los valores de h obtenidos para cada velocidad y dirección de flujo y el número de casos en que se repitió ese valor.

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

TABLA 9

Flujo paralelo		Nº de repeticiones	Flujo descendente		Nº de repeticiones	Flujo ascendente		Nº de repeticiones
$v_a$ [m/s]	$h$ [W/m <sup>2</sup> °C]		$v_a$ [m/s]	$h$ [W/m <sup>2</sup> °C]		$v_a$ [m/s]	$h$ [W/m <sup>2</sup> °C]	
0,8	14,47	1	1	16,21	1	1	17,37	1
0,9	17,37	1	1	17,37	8	1	20,26	4
1	16,21	1	1	18,53	1	1	23,16	6
1	17,37	1	1	20,26	2	1	28,95	1
1	17,95	2	1	22,00	2	2,5	20,26	1
1	19,11	2	2,5	23,16	2	2,5	26,05	1
1	20,26	3	2,5	26,05	3	2,5	28,95	4
2,5	24,32	1	2,5	27,21	2	2,5	31,84	2
2,5	26,05	1	2,5	28,95	5	2,5	34,74	2
2,5	27,21	1	2,5	31,84	2	2,5	40,53	1
2,5	28,95	9	3,8	31,84	2	3,5	34,74	1
2,5	30,11	2	3,8	34,74	4	3,5	40,53	2
4	31,84	1	3,8	46,32	1	4	34,74	1
4	34,74	2	4	31,84	2	4	37,63	1
4,3	35,89	1	4	34,74	3	4	40,53	1
4,3	43,42	2	4	37,63	3	4	43,42	2
4,3	46,32	2	4	40,53	1	4	46,32	2
4,3	52,10	1	4,8	43,42	4	4	52,11	1
4,5	35,89	1	4,8	49,20	1	5	43,42	1

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

4,5	40,53	2	4,8	55,00	1	5	46,32	1
4,5	43,42	2	5	43,42	2	5	52,11	4
4,5	45,16	1	5,5	37,63	1	5	57,88	1
4,5	46,32	1	5,5	43,42	1	5,3	52,11	1
5,8	52,10	1	6	69,15	1	5,3	55,00	1
6,3	57,88	1	6,3	74,08	2	5,5	69,46	1
6,7	63,67	1	6,3	79,03	1	6	43,42	1
7	52,10	1				6	46,31	1
7	55,00	1						
7	57,89	4						
7,3	63,68	2						

Asimismo podemos ver en la Figura 26 la variación de Nu con el Re obtenida a partir de los datos experimentales. Vemos que existe un alto grado de dispersión en los resultados. Esto se debe presumiblemente a la presencia de la cinta y a la no uniformidad de las superficies de las diferentes muestras.

Asimismo se comprueba que existen diferencias fácilmente verificables según la forma de circulación del aire, por lo que, en su momento, cada grupo de datos será regresionado independientemente.

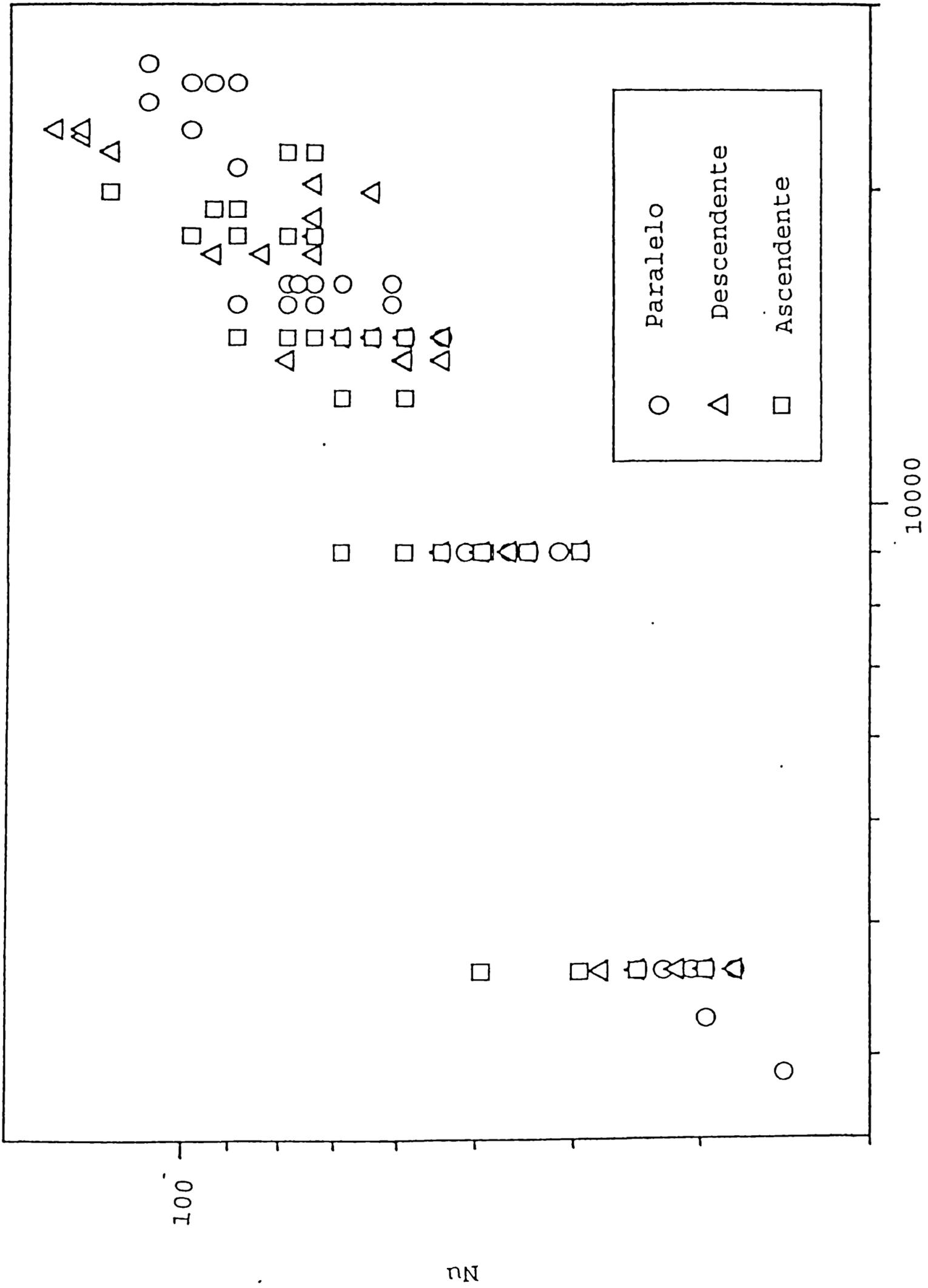


Figura 26. Valores experimentales de Nu en función del Re.

Re

**1.f.- Obtención de las ecuaciones de predicción por regresión de los datos experimentales**

Generalmente se considera para convección forzada  $Nu=f(Re,Pr)$ , pero como en el rango de temperaturas de trabajo cubiertas en este estudio (y en los equipos de congelación), el  $Pr$  no varía apreciablemente pues las propiedades físicas que forman este número adimensional tampoco lo hacen, consideré que el  $Pr$  se mantenía constante y desaparece como parámetro del sistema.

Obtuve regresiones del tipo  $Nu= F Re^G$ . Las mismas son:

$$Nu = 0,148 Re^{0,643} \quad \text{para flujo pc} \quad 2500 < Re < 25000 \quad (50)$$

con  $R= 0,992$  y  $R^2= 0,944$

$$Nu = 0,479 Re^{0,534} \quad \text{para flujo ac} \quad 2500 < Re < 25000 \quad (51)$$

con  $R= 0,980$  y  $R^2= 0,802$

$$Nu = 0,412 Re^{0,524} \quad \text{para flujo dc} \quad 2500 < Re < 25000 \quad (52)$$

con  $R= 0,988$  y  $R^2= 0,862$

Las Figuras 27, 28 y 29 muestran cada regresión y los datos experimentales de origen.

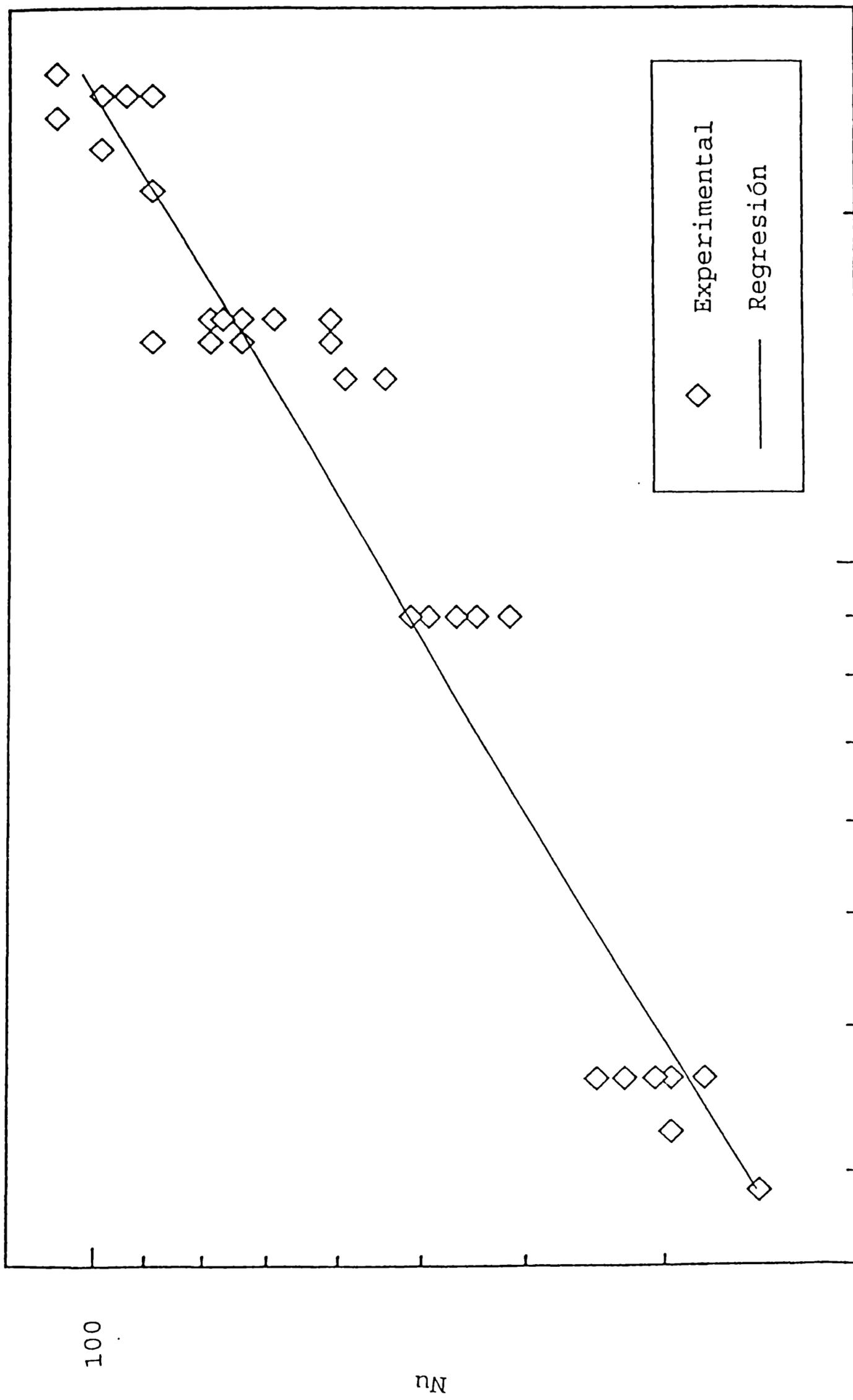


Figura 27. Regresión encontrada a partir de los datos experimentales de flujo paralelo a la cinta.

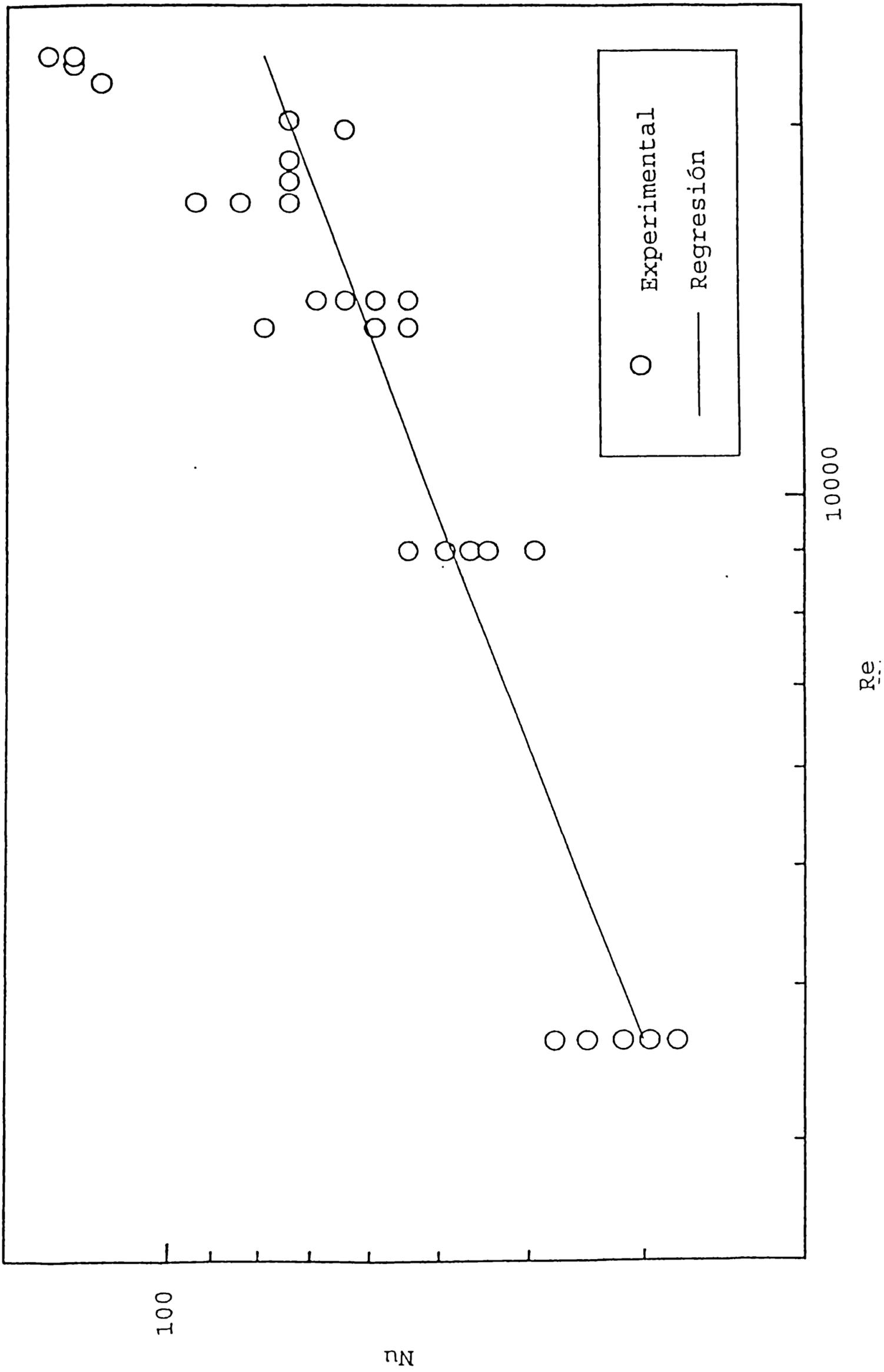


Figura 28. Regresión encontrada a partir de los datos experimentales para flujo de aire ascendente.

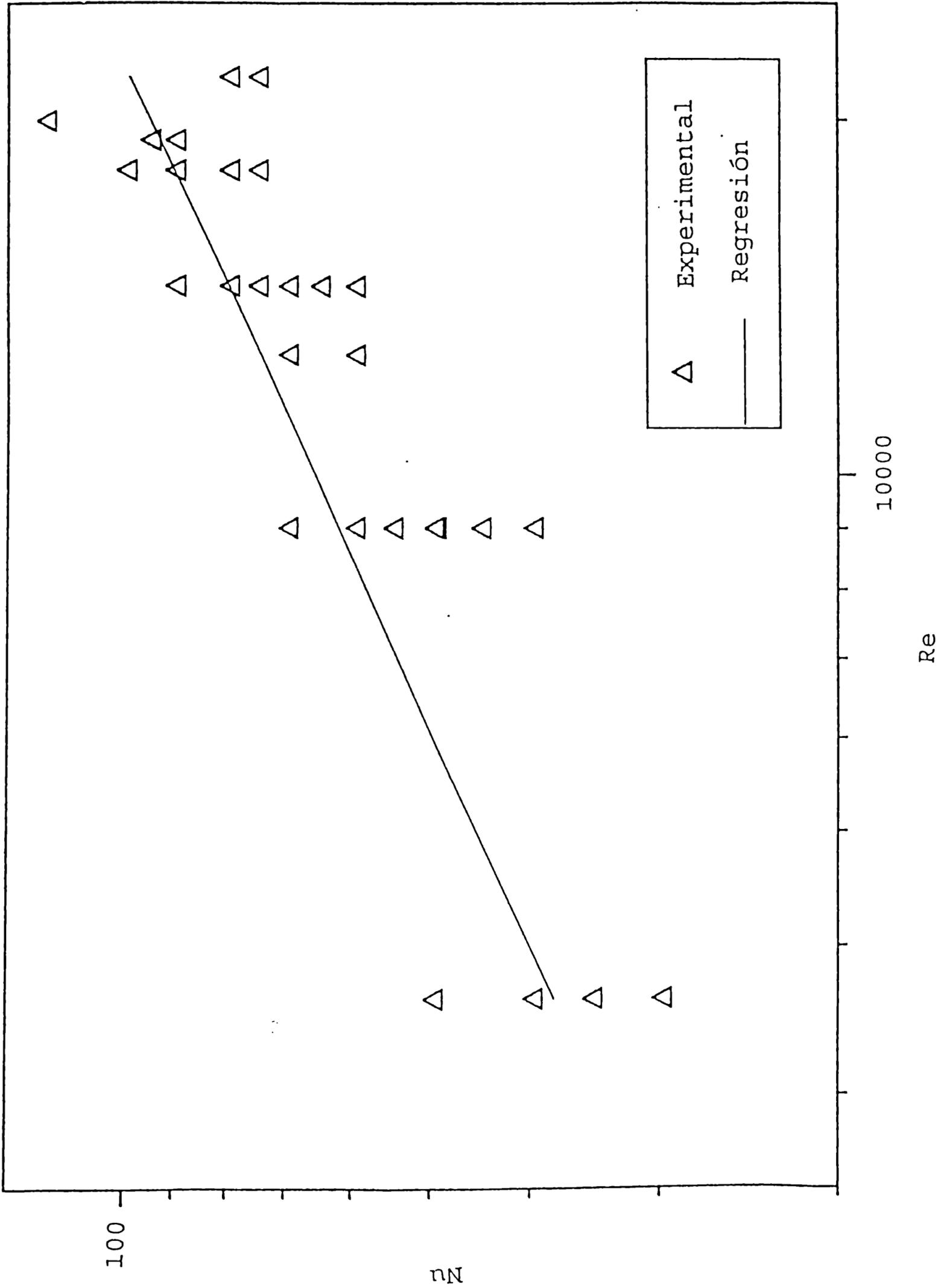


Figura 29. Regresión encontrada a partir de los datos experimentales para flujo de aire descendente.

La Figura 30 compara las regresiones encontradas para cada tipo de flujo.

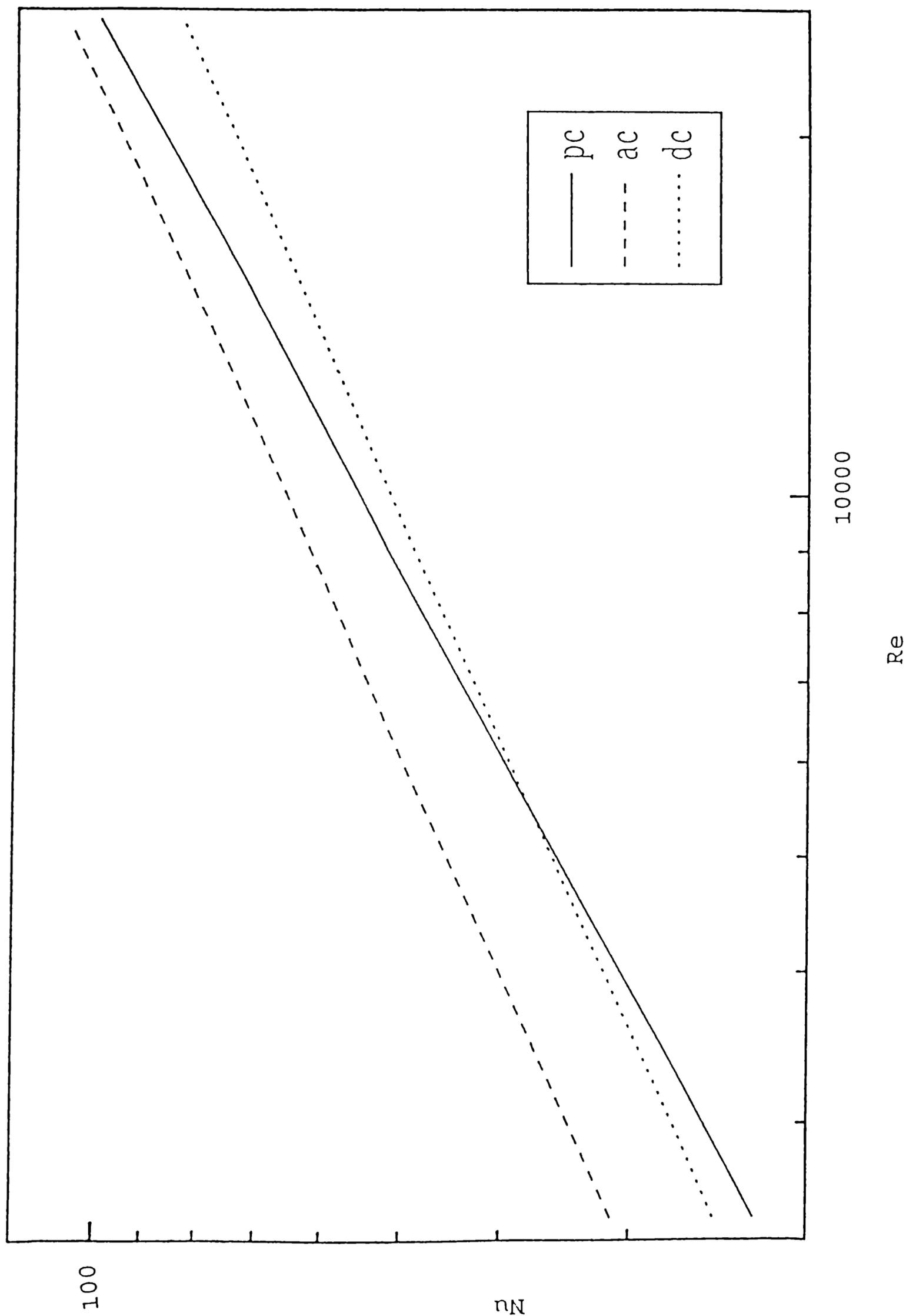


Figura 30. Comparación de las regresiones halladas para los tres tipos de flujo utilizados.

La Figura 31 compara la regresión hallada en función de los valores experimentales para los tres tipos de flujo con regresiones de Arce y Sweat citado en la Tabla 8 para distintos productos. Puede observarse que aunque la dependencia de Nu con Re sea semejante, existe una importante diferencia en los valores.

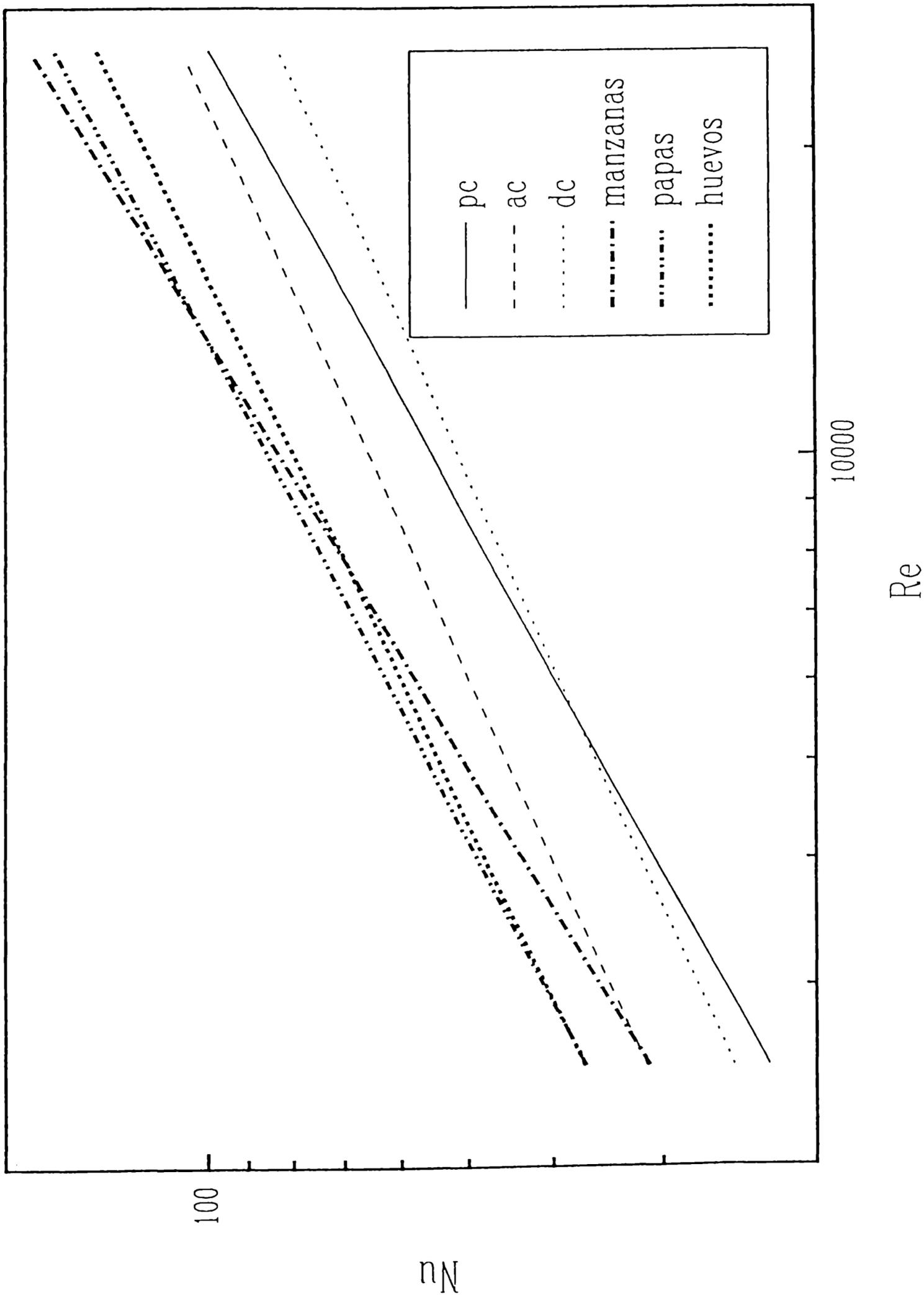


Figura 31: Regresión a partir de los valores experimentales para los tres tipos de flujo y comparación con regresiones dadas por otros autores.

Como conclusión se puede decir que los coeficientes para flujo paralelo a la cinta, crecen más rápidamente con la velocidad del aire que para flujo transversal a la cinta; y para todo el rango de  $Re$  cubierto el valor del coeficiente de transferencia de calor para flujo ascendente es mayor que para flujo paralelo o descendente. Mientras que los casos  $ac$  y  $dc$  tienen similar dependencia con el  $Re$  (similar exponente  $G$ ), el coeficiente de transferencia para flujo  $ac$  es aproximadamente 20% mayor para los valores de  $Re$  considerados. Esto indica que hay diferencias en la turbulencia del sistema según la forma de circulación de aire.

Otra conclusión importante es que del análisis de las Figuras, se puede comprobar que los resultados se encuentran en el mismo rango de valores que los hallados por otros autores para sistemas ideales, pero considero un dato muy importante la influencia conjunta de la cinta transportadora y la dirección y sentido de flujo de aire, la que no había sido estudiada previamente para esta geometría en presencia de un obstáculo de la magnitud de la cinta transportadora.

## 2.- Coeficientes de transferencia de materia

Ya se ha mencionado que durante la congelación y el almacenamiento, además de haber transferencia calórica, existe transferencia de materia por sublimación del hielo superficial, lo que hace imprescindible calcular también el valor del coeficiente de transferencia respectivo, pues se necesita para poder predecir la pérdida de peso de un producto durante dichos

procesos.

En el caso de congelación en un túnel, es complicada una determinación experimental del coeficiente de transferencia de masa ( $k_m$ ), pues se necesitan balanzas de muy alta precisión cuya acción se vería afectada por las velocidades alcanzadas por el aire y sería prácticamente imposible realizar una buena medida, máxime considerando las muy pequeñas diferencias de peso a determinar (las mayores del 1-2 % del peso de la muestra, sin considerar el peso de las partes de soporte).

Por ello se partió de la analogía entre transferencia de calor y materia y se utilizaron las correlaciones para coeficientes de transferencia de calor para determinar los correspondientes a transferencia de masa.

**2.a.- Búsqueda de relaciones teóricas entre coeficientes de transferencia de calor y materia**

La mayoría de los autores han hecho determinaciones para medir la pérdida de peso de los productos sólo para refrigeración, donde se utilizan bajas velocidades de aire. Por ejemplo, las publicaciones de Radford y col. (1976) y Daudin y Swain (1990) o en almacenamiento como las de Fulton y col. (1987). Pero no hay información acerca de los valores de los coeficientes de transferencia de materia obtenidos experimentalmente durante la congelación.

Por otra parte, se han realizado muchos intentos para encontrar correlaciones de los datos para predecir la

transferencia de masa a partir de la transferencia de calor; pero los mejores resultados fueron obtenidos por Ranz and Marshall (presentados en Sherwood y col. (1975)) y son los más usados, pues proveen gráficos y ecuaciones que relacionan ambas transferencias por reemplazo de  $Sh$  por  $Nu$  y de  $Sc$  por  $Pr$ .

Pham y Willix (1984) especifican que los coeficientes  $h$  y  $km$  se correlacionan según:

$$\frac{h}{km} = Cp_a \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^z \quad (53)$$

reemplazando  $Sc$  y  $Pr$  por sus definiciones y despejando

$$h = km Cp_a \left( \frac{K_a}{\rho_a Dif_a Cp_a} \right)^z \quad (54)$$

El exponente  $z$  ha sido determinado por varios autores. En especial Kusuda (1965) sugirió  $2/3$ , valor que es el más utilizado y se adoptará aquí.

Reemplazando en la primera igualdad de la función

$$Nu = \frac{hD}{K_a} = F Re^G \quad (55)$$

el valor de  $h$  por la expresión (54) y dividiendo ambos términos por  $\rho_a Dif_a$ , nos queda

$$\frac{Nu}{\rho_a Dif_a} = \frac{D km Cp_a}{\rho_a Dif_a K_a} \left( \frac{K_a}{\rho_a Dif_a Cp_a} \right)^{2/3} \quad (56)$$

donde

$$Sh = \frac{D km}{\rho_a Dif_a} \quad (57)$$

luego despejando Sh queda:

$$Sh = \frac{Nu K_a}{\rho_a Dif_a Cp_a} \left( \frac{K_a}{\rho_a Dif_a Cp_a} \right)^{-2/3} \quad (58)$$

por lo tanto

$$Sh = Nu \left( \frac{K_a}{\rho_a Cp_a Dif_a} \right)^{1/3} \quad (59)$$

y sustituyendo el Sh por Nu se obtuvo la siguiente relación

$$Sh = \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{(1/3)} \cdot Nu = \left( \frac{K_a}{\rho_a Cp_a Dif_a} \right)^{1/3} F Re^G \quad (60)$$

Debido a que todas las propiedades involucradas varían con la temperatura fue necesario hacer un programa de cálculo que permite obtener los coeficientes de transferencia de masa en función de los coeficientes de transferencia de calor, el cual a su vez varía con la temperatura, velocidad de aire y sentido de circulación del aire en el túnel y con el tamaño de la esfera.

El programa fue realizado en sistema FORTRAN 77 en una computadora personal. El listado se encuentra en el Apéndice 1. El mismo se empleó tanto para esferas como para hamburguesas

utilizando para éstas últimas las correlaciones de Flores y Mascheroni (1988), Apendice 1'.

**2.b.- Variación del coeficiente de transferencia de materia en función de la temperatura y de la dirección y velocidad de flujo de aire**

Como un ejemplo de los valores obtenidos para flujo de aire paralelo a la cinta, la Figura 32 nos muestra la variación del Sh con el Re para albóndigas a distintas temperaturas. La Figura 33, en cambio, nos muestra la variación de km para una dada temperatura en distintos flujos de aire.

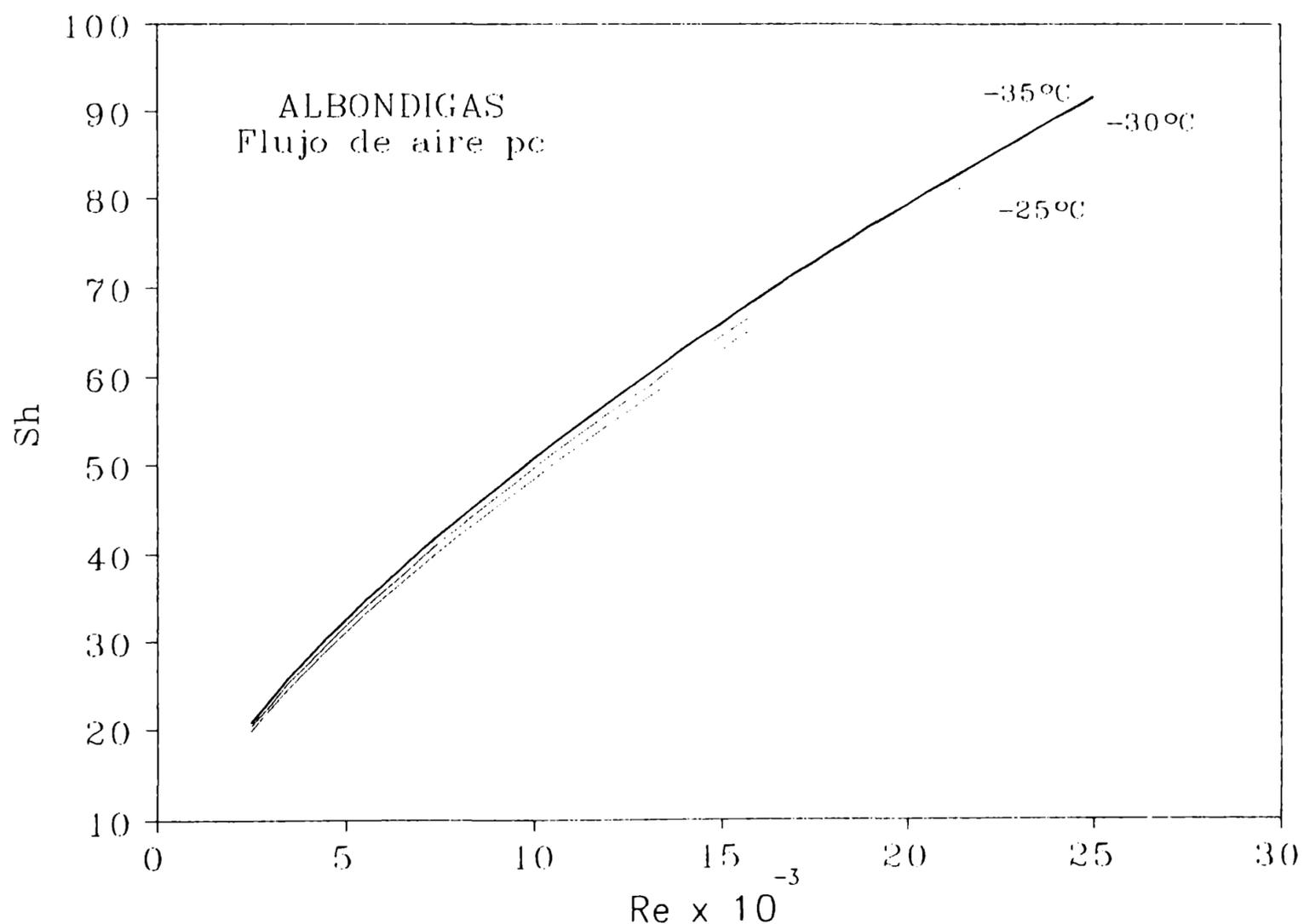


Figura 32. Variación del Sh con el Re para albóndigas a distintas temperaturas en flujo paralelo a la cinta.

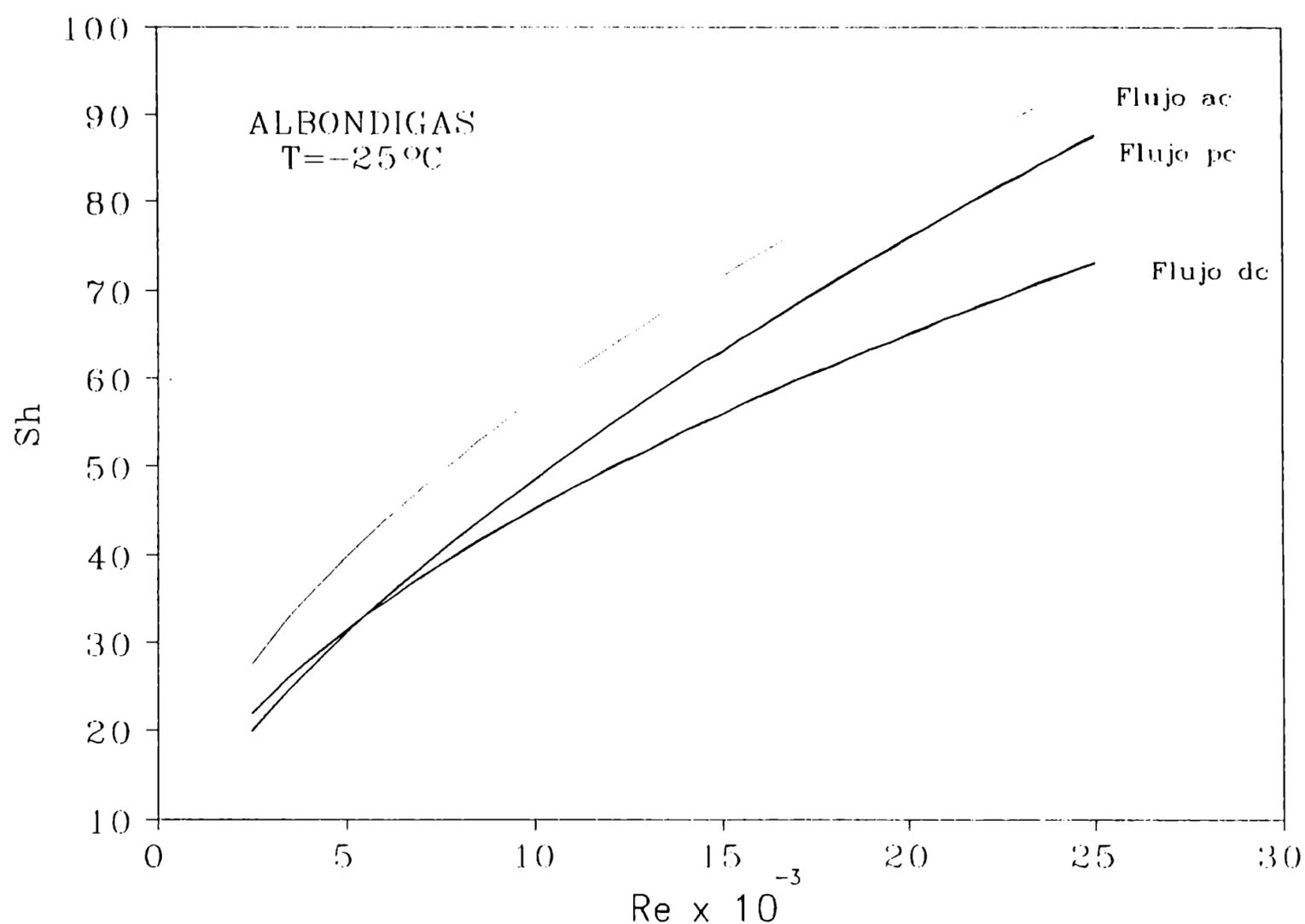


Figura 33. Variación del Sh con el Re para albóndigas según el tipo de flujo de aire.

Del mismo modo que para albóndigas, fueron utilizados datos de coeficientes de transferencia calórica tomados en el instituto por Flores y Mascheroni (1988) y mostrados en la Tabla 10 para hamburguesas y se obtuvieron los coeficientes de transferencia de masa cuyos gráficos de Sh en función del Re son mostrados en las Figuras 34 y 35. En ellas vemos, respectivamente, la variación a diferentes temperaturas y la variación según los distintos flujos de aire.

**TABLA 10**

Flujo de aire	Superficie	F	G	Rango de Re
Paralelo a la cinta	Ambas	8,770	0,328	10000-70000
Inciendiendo desde abajo	Superior	4,666	0,355	10000-70000
	Inferior	1,461	0,496	
Inciendiendo desde arriba	Ambas	0,363	0,640	10000-70000

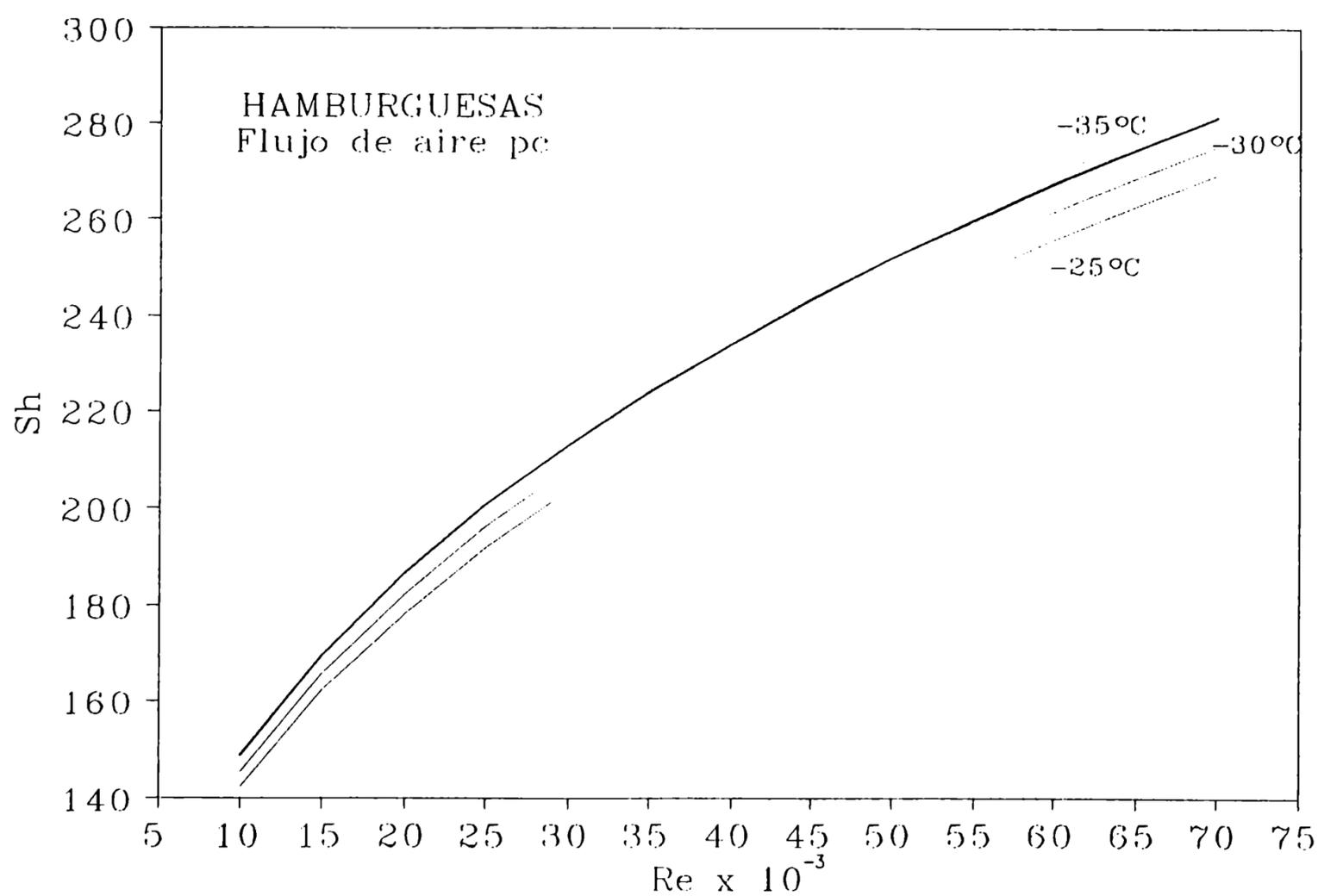


Figura 34. Variación del Sh con el Re para hamburguesas a distintas temperaturas.

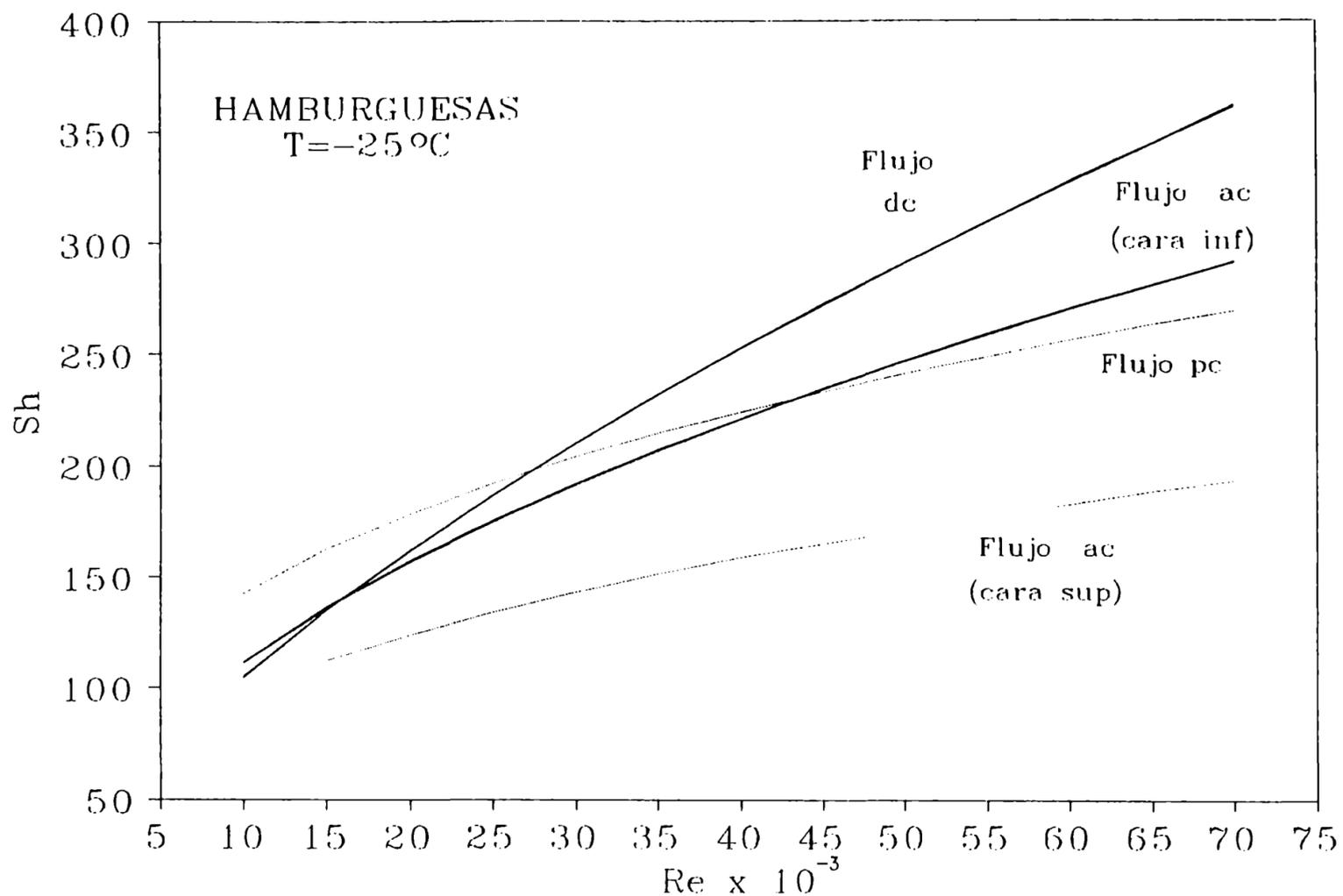


Figura 35. Variación del Sh con el Re para hamburguesas en todos los tipos de flujo de aire.

Como podemos ver no hay gran dependencia con la temperatura en ninguno de los dos casos (ni para albóndigas, ni para hamburguesas).

Es para remarcar que un incremento en la velocidad del aire incrementa  $k_m$ , pero la influencia de la velocidad y dirección de circulación de aire es diferente en el caso de albóndigas respecto de las hamburguesas ya que, según el valor del Re, es distinta la configuración que tendrá mayor pérdida de peso. En cambio, es notoria para una misma temperatura, la diferencia en el valor de  $k_m$  según el tipo de flujo de aire para las hamburguesas, donde al tener pendientes muy distintas en las regresiones de Sh vs Re hay cruces de las curvas y valores muy diferentes a altos Re.

## CAPITULO 4

### TIEMPOS DE CONGELACION

#### IV.- TIEMPOS DE CONGELACION

##### 1.- Presentación del tema

Es posible predecir la eficiencia de un equipo de congelación mediante una determinación del tiempo requerido para que el producto procesado esté completamente congelado, es decir que su centro térmico alcance una temperatura final ya establecida (generalmente  $-18^{\circ}\text{C}$ ).

Durante los últimos años, hubo un importante incremento en la literatura publicada sobre métodos tanto numéricos como aproximados para la predicción de tiempos de congelación de alimentos. En varios trabajos recientes Cleland y Earle (1977) y (1984 b), Ramaswamy y Tung (1984), Cleland y col. (1987 a) y principalmente en Cleland (1990), se presentan revisiones sobre dichos métodos de predicción.

Actualmente se cuenta con métodos numéricos precisos que permiten calcular detalladamente la variación de la temperatura con el tiempo para los distintos puntos del alimento. Hay un importante número de autores que han trabajado recientemente sobre geometrías regulares utilizando métodos de diferencias finitas, tales como Cleland y Earle (1977) y Mannapperuma y Singh (1988). Asimismo, en los últimos tiempos se ha aplicado el método de elementos finitos a geometrías multidimensionales y/o irregulares (Rebellato y col. (1978), Purwadaria y Heldman (1982) y Cleland y col. (1987 a)).

Paralelamente se han perfeccionado los métodos aproximados

de predicción obteniéndose resultados cada vez más precisos con métodos simples válidos para un amplio rango de condiciones de congelación (Cleland y Earle (1982), Pham (1984) y Salvadori y Mascheroni (1991)). Recientemente varios de dichos métodos han sido generalizados para geometrías irregulares y/o multidimensionales (Pham (1984), Cleland y col. (1987 b y c), y Arroyo y Mascheroni (1990)).

Ambos tipos de métodos (numéricos y aproximados) han sido contrastados contra experiencias de congelación realizadas principalmente sobre productos tales como la sustancia de prueba de Karlsruhe (Tylosa), un gel con 23% de metil-celulosa cuyas propiedades térmicas son bien conocidas y similares a las de las carnes (Riedel (1960)), y en condiciones ideales constantes, diferentes de las que existen en los equipos industriales. En cambio existe poca información sobre tiempos de congelación de alimentos en condiciones de operación similares a los industriales, sobre los valores de los coeficientes de transferencia de calor a utilizar en esas condiciones y sobre la bondad de los distintos métodos de predicción para simular dichas experiencias.

Basado en lo precedente, parte del objeto del presente trabajo de tesis fue obtener tiempos de congelación en túneles de cinta para distintas condiciones de operación ( $T_o$ ,  $T_{fi}$ ,  $v_a$ ) y para las tres formas de circulación de aire ya investigadas anteriormente y comparar la bondad de siete métodos de predicción (uno numérico y seis aproximados) e indirectamente la de los valores de propiedades térmicas y coeficientes utilizados.

## 2.- Materiales y métodos

El túnel utilizado para determinar tiempos de congelación es el mismo que se empleó para medidas de coeficientes de transferencia de calor.

Para las experiencias de tiempo de congelación se colocó el túnel en una cámara comercial que funciona con un equipo de frío de 3HP refrigerado por succión y con 2 evaporadores de techo que circulan el aire en forma vertical dentro de la misma, pudiéndose obtener en ella temperaturas de aire de hasta  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Las muestras utilizadas para las congelaciones (material, forma y tamaño) son las mismas que detallamos para la determinación del coeficiente de transferencia de calor. Para realizar las experiencias se estabilizaba previamente la muestra (con las termocuplas ya insertadas) en otra cámara de temperatura constante (del orden de  $5^{\circ}\text{C}$ ). La temperatura de la cámara se llevaba a las condiciones de trabajo, que podía ser un seteo de termostato a  $-25^{\circ}$ ,  $-30^{\circ}$  o  $-35^{\circ}\text{C}$ . Se hacía funcionar el soplador y se determinaba la  $v_a$  (ya a la temperatura de trabajo). A continuación se retiraba la muestra de la cámara de temperatura constante y se la trasladaba hasta la cámara de congelación, se introducía la muestra en la posición deseada en el túnel y se comenzaban a registrar las temperaturas. Las experiencias se daban por concluidas cuando se alcanzaba  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro térmico de la albóndiga.

### 3.- Predicción por distintos métodos dados en bibliografía

Para la predicción de tiempos de congelación he utilizado un método numérico de Mascheroni y Calvelo (1980) y seis métodos aproximados de reciente desarrollo (Cleland y Earle (1984 a), Pham (1984), Cleland y col. (1987 b), Cleland (1990), Arroyo y Mascheroni (1990) y Salvadori y Mascheroni (1991)).

#### 3.a.- Métodos de cálculo

##### 3.a.a- Método Numérico

El método numérico calcula perfiles de temperatura y tiempos de congelación para alimentos con geometrías regulares simples. Se obtuvo resolviendo en forma de diferencias finitas explícitas, centradas en la malla, la ecuación diferencial a derivadas parciales que resulta del balance microscópico de energía en el alimento que se congela. Este método ha sido exhaustivamente probado, asegurándose la precisión de sus resultados. El programa de cálculo se adjunta en el Apéndice 2.

##### 3.a.b- Métodos Aproximados

Los métodos aproximados son los siguientes:

a) **Pham** (1984) divide el tiempo total  $t_r$  en tres períodos

consecutivos y acumulativos: preenfriamiento, cambio de fase y subenfriamiento. La contribución de cada período al tiempo total puede ser calculada en forma independiente utilizando las siguientes fórmulas:

$$t_{pre} = \frac{\rho C p_u (T_o - T_{fm}) V}{A h \Delta T_{m_{pre}}} \left( 1 + \frac{Bi_{pre}}{6} \right) \quad (61)$$

donde

$$Bi_{pre} = \frac{hD}{2} \left( \frac{1}{K_u} + \frac{1}{K_s} \right) \quad (62)$$

$$\Delta T_{m_{pre}} = \frac{(T_o - T_a) - (T_{fm} - T_a)}{\ln \left[ \frac{(T_o - T_a)}{(T_{fm} - T_a)} \right]} \quad (63)$$

$$T_{fm} = T_f - 1,5 \quad (64)$$

$$t_{cf} = \frac{\rho H_{cf} V}{hA(T_f - T_a)} \left( 1 + \frac{Bi_s}{4} \right) \quad (65)$$

donde

$$Bi_s = \frac{hD}{K_s} \quad (66)$$

y  $H_{cf}$  es el cambio de entalpía desde  $T_f$  hasta el final del cambio de fase, menos el calor sensible puesto en juego en el mismo

rango de temperatura.

$$t_{su} = \frac{\rho C P_{su} (T_{fm} - T_{fi}) V}{h A \Delta T_{m_{su}}} \left( 1 + \frac{Bi_{su}}{6} \right) \quad (67)$$

donde

$$T_{fi} = T_c - (T_c - T_a) \left( 2 - \frac{4}{Bi_{su}} \right) \quad (68)$$

$$\Delta T_{m_{su}} = \frac{(T_{fm} - T_a) - (T_{fi} - T_a)}{\ln \left[ \frac{(T_{fm} - T_a)}{(T_{fi} - T_a)} \right]} \quad (69)$$

Sumando las ecuaciones (61), (65) y (67) queda:

$$t_T = t_{pre} + t_{cf} + t_{su} \quad (70)$$

b) Cleland and Earle (1984 a) propusieron:

$$t_T = \frac{H_{10}}{(T_f - T_a) EHTD} \left( P_{pl} \frac{D}{h} + R_{pl} \frac{D^2}{K_s} \right) \left[ 1 - \frac{1,65 Ste}{K_s} \ln \left( \frac{T_c - T_a}{-10 - T_a} \right) \right] \quad (71)$$

con

$H_{10}$  = cambio de entalpía volumétrica entre  $T_f$  y  $-10^\circ\text{C}$ .

$P_{pl} = 0,5 [1,026 + 0,5808 Pk + Ste(0,2296 Pk + 0,1050)]$

$R_{pl} = 0,125 [1,202 + Ste(3,41 Pk + 0,7336)]$

$$Pk = \rho C_{p_u} (T_o - T_f) / H_{10}$$

$$Ste = \rho C_{p_s} (T_f - T_a) / H_{10}$$

EHTD = Equivalent Heat Transfer Dimension (EHTD = 3, para esferas).

c) **Salvadori y Mascheroni** (1991) desarrollaron un método para la predicción de  $t_T$  para productos de geometrías simples. Este está basado en el uso de "diagramas térmicos generalizados" para la zona de cambio de fase ( $T < T_f$ ). En esta zona  $T_c$  (temperatura del centro térmico) puede ser relacionada en forma lineal con el tiempo, condiciones de operación, tamaño y propiedades físicas del producto por medio de una variable adimensional  $Q$  como

$$Q = C_1 + C_2 T_c$$

A su vez  $Q$  está definida como

$$Q = \frac{\alpha_u t}{R^2} \left( \frac{2}{Bi_u} + C_3 \right)^{-1} (T_o + 1.0)^{-C_4} (-1.0 - T_a)^{C_5} \quad (72)$$

Para esferas, los valores que dieron una mejor aproximación a los datos numéricos de tiempo de congelación son:

$$C_1 = 24,8040; \quad C_2 = -0,4390; \quad C_3 = 0,167; \quad C_4 = 0,073 \quad \text{y} \quad C_5 = 1,078.$$

Reemplazando en (72) y reordenando se tiene:

$$t_T = (24,8040 - 0,439 T_c) \left( \frac{2}{Bi_u} + 0,167 \right) (T_o + 1)^{0,073} (-1 - T_a)^{-1,078} \alpha_u^{-1} R^2 \quad (73)$$

d) **Arroyo y Mascheroni** (1990) emplearon un método válido para transmisión de calor uni o multidimensional en congelación de alimentos, para formas regulares o irregulares. El método se basa en la definición de tiempo de congelación como un producto de cuatro factores. Esos factores tienen en cuenta la influencia de la forma y propiedades, una diferencia de temperaturas características, una diferencia de entalpías entre el producto fresco y congelado y las condiciones de transferencia de calor, respectivamente.

Para geometrías esféricas la expresión es la siguiente

$$t_T = \frac{0,333R^2}{\alpha_u} \frac{(H_T - YL_f W (0,46383 - 0,016T_c))}{Cp_u(T_o - T_a)} \frac{\ln T^*}{(T^* - 1)} \left( \frac{3,4664}{Bi_u} + 0,3200 \right) \quad (74)$$

donde  $H_T$  es el cambio de entalpía total entre  $T_o$  y  $T_c$  y

$$T^* = \frac{T_c - T_a}{T_o - T_a} \quad (75)$$

e) **Mascheroni** (no publicado), encontró una ecuación simplificada a partir de métodos numéricos para obtener  $t_T$  (con  $T_c = -18^\circ\text{C}$ ) para placa plana. Esta regresión fue adaptada para geometrías esféricas por el uso del EHTD. La ecuación es

$$t_T = \frac{84,0186R^2}{EHTD \alpha_u} (1 + T_o)^{0,10247} \left( \frac{2}{Bi_u} + 0,5 \right)^{1,6202} (-1 - T_a)^{-1,17122} \quad (76)$$

f) **Cleland** (1990) obtuvo una expresión de  $t_T$  que es

$$t_r = \frac{1,31790 \rho_s C p_s D^2}{EHTD K_s} \left( \frac{1}{2Bi_s Ste} + \frac{0,12500}{Ste} \right)^{0,9576} Ste^{0,0550} 10^{0,0017Bi_s + 0,1727Pk} \left[ 1 - \frac{1,65 Ste}{K_s} \ln \left( \frac{-T_c - T_a}{-10 - T_a} \right) \right] \quad (77)$$

Simultáneamente, con el fin de estudiar la influencia de los valores usados para las propiedades físicas sobre las predicciones de los tiempos de congelación se emplearon tres juegos de valores de propiedades de carne vacuna tomados desde la literatura. Estos se utilizaron con el método numérico y con todos los métodos aproximados previamente citados.

A) **Sanz y col.** (1989) proponen para carne vacuna

$$T_f = \frac{(1-w)}{(0,06908 - 0,4393w)} \quad (78)$$

Particularmente para flujo de calor perpendicular a las fibras o para carne picada las ecuaciones de predicción son:

Para  $T > T_f$

$$\rho_u = 973$$

$$K_u = 0,0866 + 0,501 w + 5,052 \times 10^{-4} w T$$

$$Cp_u = 1,448 (1-w) + 4,187 w$$

$$H = H_f + Cp_u (T - T_f)$$

$H_f$  es el valor de H a  $T = T_f$

Para  $T < T_f$  tales propiedades son calculadas de acuerdo a:

$$\rho_s = \frac{\rho_u}{\left(0,98221 + 0,11310 w + \frac{0,25746(1-w)}{T}\right)} \quad (79)$$

$$K_s = 0,378 + 1,376 w + \frac{0,930}{T} \quad (80)$$

$$Cp_s = 3874 - 2534 w + \frac{902893(1-w)}{T^2} \quad (81)$$

$$H = (T+40)(3874 - 2534 w) - 902893(1-w)\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{40}\right) \quad (82)$$

B) **Cleland y Earle** (1984 a) proveen tablas de  $\rho Cp$  y  $K$  para carne entre  $-40^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$  (sin especificar contenido de agua ni contenido graso).

Para  $T < T_f$  los valores de  $K$  pueden ser regresionados como:

$$K_s = 1,48 + \frac{1,1}{T} \quad (83)$$

Luego estos autores sugieren que se utilicen los siguientes datos en sus métodos de predicción:

$$(\rho Cp)_u = 3,47 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(\rho C_p)_s = 2,00 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$T_f = -1,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K_u = 0,44 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$K_s = 1,45 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$H_{10} = 211070 \text{ kJ m}^{-3}$  (calculado por integración lineal de la capacidad calorífica volumétrica entre  $T_f$  y  $-10^\circ\text{C}$ ).

C) Cleland y col. (1986) en forma similar proveen tablas de  $\rho C_p$  y  $K$  para carne picada en el rango  $-40^\circ\text{C}$  a  $40^\circ\text{C}$ . Los datos de  $K$  por debajo de  $T_f$  fueron aquí regresionados como:

$$K_s = 1,56 + \frac{1,09}{T} \tag{84}$$

y proponen el uso de:

$$(\rho C_p)_u = 4,60 \text{ kJ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(\rho C_p)_s = 1,95 \text{ kJ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$T_f = -1,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K_u = 0,50 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$K_s = 1,55 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$H_{10} = 230000 \text{ kJ m}^{-3}$$

Para todos los cálculos, los valores de  $h$  usados fueron los regresionados a partir de los obtenidos experimentalmente empleando el mismo equipo que para estas determinaciones.

**4.- Resultados experimentales y comparación con los valores calculados por los distintos métodos de predicción**

La Tabla 11 muestra las condiciones experimentales de las congelaciones y los resultados para los tres tipos de flujo de aire: paralelo a la cinta (pc), flujo desde abajo de la cinta (ac) y flujo desde arriba de la cinta (dc). El número total de experiencias fue 48 (16 para cada tipo de flujo). Los tiempos de congelación variaron desde 21 a 82 minutos, dependiendo de la  $T_o$ ,  $T_a$  y  $v_a$  y de la dirección del flujo.

Los rangos de operación cubiertos fueron los siguientes:

$$T_o = -0,5 \text{ a } 19^\circ\text{C}$$

$$T_a = -23,0 \text{ a } -33,7^\circ\text{C}$$

$$v_a = 1,5 \text{ a } 8 \text{ m s}^{-1}$$

TIEMPOS DE CONGELACION

TABLA 11

Flujo aire	T <sub>s</sub> [°C]	T <sub>o</sub> [°C]	h [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]	Experi-	Numérico		Pham		Cleland y Earle		Salvadori y Mascheroni		Arroyo y Mascheroni		Mascheroni (regresión)		Cleland (regresión)	
				t <sub>r</sub> [min]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]	t <sub>r</sub> [min]	error [%]
pc	-23.0	13.3	21.0	81.7	80.0	-2.1	82.2	0.6	86.2	5.5	80.6	-1.3	88.0	7.7	94.7	15.9	87.2	6.8
pc	-22.9	2.8	21.0	75.8	74.1	-2.2	75.9	0.1	78.9	4.1	73.6	-3.0	82.8	9.2	83.1	9.7	82.0	8.2
pc	-28.0	-0.5	21.1	52.4	54.1	3.2	56.0	6.9	58.7	12.1	50.4	-3.8	55.1	5.2	52.6	0.3	62.3	19.0
pc	-28.6	2.1	21.1	59.6	54.1	-9.2	56.3	-5.5	58.8	-1.3	56.2	-5.6	55.2	-7.4	61.8	3.6	61.9	3.8
pc	-24.3	3.6	29.1	49.7	51.7	4.0	53.7	8.0	56.3	13.2	52.9	6.4	56.3	13.3	55.9	12.4	58.5	17.7
pc	-25.0	-0.1	29.1	43.5	48.1	10.6	49.6	14.1	52.3	20.3	45.5	4.6	51.5	18.4	45.6	4.9	55.1	26.7
pc	-30.8	10.4	29.4	41.0	40.7	-0.7	42.6	3.9	45.0	9.7	43.0	4.8	41.5	1.2	45.5	3.6	46.0	12.3
pc	-30.5	19.0	29.4	44.8	43.8	-2.2	46.0	2.6	49.1	9.7	45.3	1.1	45.5	1.6	48.8	8.8	49.2	9.8
pc	-24.8	1.2	42.5	37.0	36.3	-1.9	37.9	2.3	40.3	9.0	36.2	-2.1	39.4	6.6	35.6	-3.7	42.1	13.8
pc	-24.9	10.3	42.5	38.6	38.8	0.5	41.1	6.4	43.7	13.3	40.6	5.3	42.4	9.9	41.9	8.6	44.4	15.1
pc	-28.9	1.8	42.9	30.1	29.9	-0.7	31.4	4.3	33.6	11.5	30.8	2.4	30.6	1.5	30.1	-0.1	35.1	16.6
pc	-30.8	13.1	42.9	31.0	30.6	-1.3	32.6	5.0	34.9	12.7	32.3	4.2	31.8	2.5	32.9	6.0	35.2	13.5
pc	-24.8	6.6	59.1	28.9	29.4	1.7	31.6	9.3	34.0	17.7	31.1	7.7	32.7	13.3	31.3	8.3	34.7	19.9
pc	-25.0	7.6	59.1	29.4	29.4	0.0	31.5	7.3	34.0	15.6	31.1	5.8	32.6	10.8	31.4	6.7	34.5	17.5
pc	-28.9	11.2	59.3	25.2	25.4	0.8	27.4	8.6	29.6	17.7	27.1	7.4	26.9	6.9	27.2	7.9	29.8	18.1
pc	-28.9	1.4	59.3	22.7	23.0	1.3	24.8	9.3	26.9	18.5	24.0	5.9	24.1	6.3	23.0	1.4	27.9	23.1
dc	-24.9	10.1	21.1	68.5	69.9	2.0	72.1	5.2	75.0	9.6	72.1	5.2	74.4	8.7	83.3	21.6	76.7	12.0
dc	-23.7	1.3	21.1	66.3	69.0	4.1	70.9	7.0	73.8	11.3	67.9	2.5	75.8	14.3	75.3	13.6	77.2	16.4
dc	-30.2	5.4	21.1	61.0	52.9	-13.3	54.7	-10.3	57.1	-6.4	55.8	-8.5	53.1	-12.9	62.3	2.1	59.5	-2.4
dc	-28.9	10.3	21.1	64.0	58.1	-9.2	60.3	-5.9	62.9	-1.8	61.1	-4.5	59.5	-7.0	69.6	8.8	64.5	0.8
dc	-26.8	9.4	27.6	54.8	50.1	-8.6	52.3	-4.6	54.8	0.0	52.6	-4.1	52.5	-4.1	56.8	3.7	56.2	2.6
dc	-25.5	0.1	27.6	47.5	49.0	3.2	50.7	6.6	53.3	12.2	47.2	-0.7	52.0	9.4	48.0	1.0	56.1	18.2
dc	-30.5	6.8	27.6	44.0	42.0	-4.5	43.9	-0.3	46.1	4.8	44.5	1.2	42.5	-3.3	47.2	7.2	47.8	8.6
dc	-29.0	3.2	27.6	43.2	43.0	-0.5	44.8	3.8	47.1	9.0	45.0	4.3	43.7	1.3	47.1	8.9	49.3	14.2
dc	-24.7	-0.3	37.6	34.7	38.9	12.1	41.0	18.3	43.7	25.8	36.8	6.1	42.9	23.7	35.4	2.1	45.9	32.2
dc	-25.3	1.4	37.6	39.0	38.8	-0.5	40.6	4.1	43.1	10.4	39.2	0.5	41.8	7.2	39.0	0.1	45.0	15.5
dc	-29.3	10.9	37.6	33.0	35.3	7.0	37.6	13.1	39.7	20.3	37.4	13.3	36.7	11.2	38.5	16.6	40.4	22.4
dc	-28.9	13.1	37.6	36.3	36.4	0.3	38.6	6.3	41.1	13.3	38.4	5.9	38.2	5.1	39.8	9.7	41.6	14.6
dc	-26.7	0.8	55.6	26.0	26.7	2.7	28.3	8.7	30.6	17.5	26.9	3.6	28.4	9.2	25.8	-0.8	31.8	22.4
dc	-23.3	-0.3	55.6	29.5	31.5	6.8	33.2	12.5	36.0	21.9	29.3	-0.7	36.3	23.1	27.6	-6.3	37.4	26.9
dc	-28.0	0.5	49.2	31.4	27.5	-12.4	29.0	-7.6	31.2	-0.5	27.5	-12.3	28.5	-9.1	26.2	-16.5	32.7	4.1
dc	-30.8	10.4	49.2	30.0	27.0	-10.0	28.8	-3.9	31.0	3.4	28.7	-4.3	28.0	-6.8	28.8	-4.1	31.4	4.6
ac	-24.8	13.4	26.8	57.3	58.5	2.1	60.7	6.0	63.9	11.6	60.2	5.0	62.8	9.6	66.6	16.2	64.8	13.2
ac	-26.2	10.4	26.8	55.2	53.4	-3.3	55.5	0.5	58.2	5.4	55.6	0.8	56.2	1.9	60.8	10.1	59.5	7.7
ac	-33.7	13.2	26.8	41.0	40.6	-1.0	42.5	3.7	45.1	9.9	42.7	4.1	41.2	0.6	45.8	11.7	45.8	11.8
ac	-31.0	4.6	26.8	43.0	41.4	-3.7	43.1	0.3	45.4	5.5	43.8	1.8	41.5	-3.5	46.1	7.1	47.4	10.2
ac	-26.1	6.4	35.2	45.6	41.3	-9.4	43.3	-5.1	45.6	0.1	43.3	-5.0	43.8	-3.9	44.8	-1.8	47.1	3.2
ac	-25.7	3.2	35.2	45.0	40.9	-9.1	42.8	-5.0	45.1	0.3	42.3	-6.1	43.6	-3.1	43.1	-4.3	47.0	4.4
ac	-31.4	-0.3	35.2	32.0	31.1	-2.8	32.3	0.9	34.5	7.8	29.6	-7.3	30.6	-4.5	28.1	-12.2	36.6	14.4
ac	-29.5	3.1	35.2	37.2	34.5	-7.3	36.2	-2.8	38.3	3.0	36.2	-2.8	35.1	-5.7	36.3	-2.3	40.1	7.7
ac	-24.9	0.1	48.2	30.1	31.9	6.0	33.9	12.5	36.4	20.8	31.2	3.6	35.3	17.2	29.8	-1.0	38.0	26.3
ac	-23.8	10.2	48.2	35.0	37.2	6.3	39.6	13.2	42.4	21.1	38.8	11.0	41.8	19.4	39.9	14.1	43.0	22.9
ac	-30.0	17.7	48.2	28.5	29.7	4.2	31.9	11.8	34.6	21.4	31.1	9.2	31.4	10.3	31.7	11.4	34.3	20.5
ac	-30.2	5.9	48.2	27.8	27.0	-2.9	28.7	3.1	30.7	10.5	28.7	3.3	27.7	-0.3	28.4	2.3	31.6	13.6
ac	-26.0	13.9	66.5	27.6	27.2	-1.4	29.2	6.0	31.9	15.5	28.6	3.5	29.7	7.7	29.2	5.7	31.8	15.1
ac	-25.4	10.2	66.5	28.2	27.4	-2.8	29.2	3.6	31.7	12.5	28.7	1.9	29.9	6.2	29.9	3.4	31.9	13.1
ac	-30.2	6.6	66.5	21.0	21.8	3.8	23.1	10.2	25.2	20.0	23.0	9.6	22.4	6.6	22.7	8.1	25.5	21.7
ac	-29.6	2.4	66.5	22.2	21.4	-3.6	22.6	1.9	24.7	11.1	22.2	0.0	21.9	-1.5	21.4	-3.5	25.4	14.5

Para cada juego de propiedades utilizados podemos ver en la Tabla 12 los parámetros estadísticos que comparan los tiempos de congelación experimentales con los predichos por los distintos métodos.

Como se puede ver en la Tabla 12, utilizando el juego de propiedades (A) el método numérico es el que nos da mayor exactitud en la predicción y menor error promedio (-0,92%), menor error absoluto promedio (4,36%) y el mínimo rango de error. La desviación estandar es muy baja (5,65%) aunque es ligeramente mayor que la dada por el método de Salvadori y Mascheroni (5,36%). La misma situación es encontrada para el rango de error del 90% de los datos.

El juego de propiedades (A) fue elegido para ser usado con los métodos aproximados porque con el mismo se obtenían mejores resultados en el método numérico. Podemos ver también que usando el juego de propiedades (A) el método de Salvadori y Mascheroni presentó el menor error promedio (1,66%), el menor error absoluto promedio (4,67%), la menor desviación standard (5,36%) y el menor rango de error.

El método de Pham dio errores promedio similares al método de Arroyo y Mascheroni y a la regresión de Mascheroni (4,11%, 4,87% y 4,89% respectivamente) pero la desviación standard, el error absoluto y el rango de error fue menor en el primero que en los otros dos.

**TABLA 12**

Juego de datos de propiedades térmicas	Diferencias porcentuales entre predicho y experimental	METODOS DE PREDICCIÓN						
		NUMERICO	PHAM	CLELAND Y EARLE	SALVADORI Y MASCHERONI	ARROYO Y MASCHERONI	MASCHERONI REGRESION	CLELAND REGRESION
Sanz y col. (1989) (A)	Error promedio	-0.92	4.11	10.76	1.66	4.87	4.89	14.06
	Error abs. prom.	4.36	6.23	11.18	4.67	7.92	7.25	14.16
	Desviación estándar	5.65	6.28	7.41	5.36	8.47	7.52	7.53
	Rango de error:							
	Límite Superior	12.10	18.27	25.83	13.28	23.75	21.63	32.22
	Límite Inferior	-13.28	-10.30	-6.39	-12.31	-12.91	-16.47	-2.41
	Rango del 90% de los datos:							
	Límite Superior	8.57	14.65	23.20	10.66	19.09	17.52	26.70
Límite Inferior	-10.40	-6.43	-1.67	-7.35	-9.34	-7.74	1.42	
Cleland y Earle (1984) (B)	Error promedio	9.39	12.76	4.36	4.99	17.26	8.29	7.28
	Error abs. prom.	9.76	12.83	6.54	6.28	17.37	9.52	8.30
	Desviación estándar	6.46	6.53	6.47	5.55	9.71	7.76	6.70
	Rango de error:							
	Límite Superior	25.13	28.31	18.47	16.98	40.43	25.52	23.84
	Límite Inferior	-3.77	-1.70	-10.41	-9.43	-2.49	-13.74	-7.08
	Rango del 90% de los datos:							
	Límite Superior	20.23	23.72	15.22	14.29	33.57	21.31	18.53
Límite Inferior	-1.45	1.80	-6.49	-54.32	0.96	-4.72	-3.96	
Cleland y col. (1986) (C)	Error promedio	21.41	23.10	9.72	13.00	26.41	18.65	12.47
	Error abs. prom.	21.41	23.10	10.05	13.13	26.41	18.96	12.54
	Desviación estándar	7.00	6.98	6.51	5.74	10.36	9.51	6.84
	Rango de error:							
	Límite Superior	38.13	40.19	24.75	25.95	51.61	41.11	29.63
	Límite Inferior	7.05	8.12	-4.78	-3.07	6.19	-6.96	-1.72
	Rango del 90% de los datos:							
	Límite Superior	33.16	34.82	20.65	22.63	43.80	34.61	23.95
Límite Inferior	9.66	11.38	-1.22	3.37	9.01	2.69	0.99	

Los métodos de Cleland y Earle (1984) y la regresión de Cleland (1986), dieron un pésimo resultado para el juego de datos A, ello se debe a que recomiendan usar el método con los juegos de datos B y C.

Un factor muy importante es hacer una buena selección de propiedades dependiendo del método a utilizar; por ejemplo, en el caso del método numérico las propiedades deben usarse a lo largo de un amplio rango de temperaturas, en cambio en el método de Salvadori y Mascheroni se deben usar valores de propiedades del producto no congelado. Los otros métodos usan valores del producto congelado.

Otro aspecto importante para los métodos que utilizan valores de propiedades del producto congelado, es que no se establece claramente en los distintos métodos la temperatura a la cual el producto se encuentra totalmente congelado. Pham menciona que debajo de  $-30^{\circ}\text{C}$ , la congelación está completa y los cambios no son notorios, Cleland y Earle en cambio establecen que la congelación completa se encuentra en el rango de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Así que para esos métodos un valor de  $-30^{\circ}\text{C}$  fue tomado para el cálculo de las propiedades de los productos completamente congelados.

La evaluación de resultados utilizando los juegos de datos (B) y (C) fue en general, muy pobre para los distintos métodos de predicción; tal como lo presentan las tablas. Por ejemplo el cambio de propiedades desde el juego (A) al juego (C) dio un aumento del error promedio en el método numérico desde  $-0,92\%$  a  $21,41\%$ . El método de Cleland y Earle (1984) fue el único que tuvo una mejora con un cambio de error promedio del  $10,76\%$  a  $9,72\%$  y a  $6,5\%$  para el uso del juego (B), probablemente por haber sido

el método deducido utilizando ese juego de datos.

Con el objeto de estudiar la influencia de los valores de  $h$  utilizados, la Tabla 13 muestra las diferencias entre resultados experimentales y los predichos por el método numérico usando el juego de propiedades (A) para los tres diferentes tipos de flujo de aire. Los errores promedio fueron muy pequeños y el rango de error fue similar para los tres tipos de flujo de aire. Aquí podemos ver que el error promedio, el error absoluto y la desviación standard fue menor para flujo paralelo (pc) que para el transversal descendente (dc), y mucho menor que para el transversal ascendente, probablemente debido a la mayor uniformidad del flujo en los primeros casos, tendencia que se ve reflejada en el valor de  $h$  y en consecuencia en el valor del  $t_r$  calculado utilizando ese parámetro.

**TABLA 13**

Diferencia porcentual entre valor predicho y valor experimental	Condiciones de Flujo de aire		
	Paralelo (pc)	Transver- sal (ac)	Transver- sal (dc)
Error promedio	0,11	-1,30	-1,55
Error absoluto promedio	2,65	6,07	4,35
Desviación standard	3,94	7,34	4,76
Bandas de error Superior	10.57	12.10	6.28
Inferior	-9.22	-13.28	-9.43

Se puede concluir este tema diciendo que los tiempos de congelación de albóndigas en congeladores de cinta pueden ser

adecuadamente predichos usando métodos numéricos o aproximados dentro de un rango de condiciones de trabajo encontradas para este tipo de equipos.

Todos los métodos aproximados testeados dieron niveles aceptables de exactitud cuando se usó el juego de propiedades recomendado por sus autores. La exactitud de los resultados depende fuertemente de la elección de este juego de datos.

Usando el juego de propiedades (A) el método de Salvadori y Mascheroni fue el más exacto. Este método junto con la regresión de Mascheroni son muy fáciles de usar porque solo requieren propiedades del producto no congelado, de manera que no se necesita el cálculo de la variación de entalpía durante el congelamiento, ni de la capacidad calorífica ni la conductividad térmica del congelado.

Por lo visto hasta aquí, podemos señalar que ha resultado conveniente el uso del juego de propiedades (A), y que los coeficientes de transferencia de calor están bien determinados dado que la comparación con los diferentes métodos usando dichos valores de  $h$ , dieron muy buenas aproximaciones a los valores experimentales.

## CAPITULO ,5

# PREDICCIÓN DE LA TRANSFERENCIA SIMULTANEA DE CALOR Y MATERIA EN EQUIPOS DE CONGELACION Y ALMACENAMIENTO

CAPITULO 5

V.- PREDICCIÓN DE LA TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y  
MATERIA EN EQUIPOS DE CONGELACION Y ALMACENAMIENTO

1.- Planteo fisicoquímico y matemático del problema

Es posible predecir simultáneamente la transferencia de calor y de masa durante la congelación y almacenamiento de alimentos, utilizando un modelo teórico, sin usar suposiciones simplificadoras y empleando soluciones numéricas basadas en el método de diferencias finitas. Dicho modelo permite calcular perfiles de temperatura y concentración, tiempos de congelación y pérdida de peso.

Aunque el fenómeno principal durante la congelación es el de transferencia de calor con cambio de fase (cristalización del hielo), en casi todos los casos ocurre simultáneamente transferencia de materia debido a la pérdida de agua por evaporación de agua líquida y principalmente por sublimación del hielo formado en los nodos de la superficie durante la congelación y almacenamiento de alimentos.

Es necesario, por lo tanto, realizar un planteo fisicoquímico del problema de congelación teniendo en cuenta las variaciones de propiedades del sistema en función de la temperatura, composición y estructura y los aspectos matemáticos resultantes.

A continuación planteamos los balances de calor y materia

para dos sistemas en particular: cilindros finitos y esferas, y los desarrollaremos para dos productos cárneos (hamburguesas y albóndigas, respectivamente), los que se pueden considerar representativos de otros productos de similares geometrías (tartas, pizzas, platos preparados, en el primer caso y frutas enteras, bolitas de melón o sandía, uvas, en el segundo caso).

**1.a.- Balances microscópicos de calor y materia**

Para la simulación de la transferencia de calor, el balance microscópico de energía térmica vale

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (K \nabla T) \quad (85)$$

el que tendrá componentes en la dirección radial (en el caso de esferas), quedando desarrollado como

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2K}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial K}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (86)$$

y tendrá componentes en la dirección radial y axial para cilindros finitos

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial K}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + K \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial K}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{K}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (87)$$

El balance microscópico de materia será

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla (Dif \nabla C) \quad (88)$$

El desarrollo para esferas será

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dif \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2Dif}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial Dif}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (89)$$

y los componentes para cilindro finito serán

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dif \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial Dif}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + Dif \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial Dif}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{Dif}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (90)$$

**1.b.- Propiedades térmicas utilizadas en la resolución de los balances**

Debido a que los alimentos simulados (albóndigas y hamburguesas) están compuestos casi totalmente por carne vacuna picada, en el programa de cálculo se utilizaron propiedades para la carne proporcionadas por Sanz y col. (1989) para  $K$ ,  $\rho$  y  $C_p$  y datos tomados de Fennema y Berny (1974) y de Pham y Willix (1984) para  $Dif$  y  $p_v$ .

Estos valores son

$$T_f = (1-w) / (0.06908 - 0.4393w)$$

$$\rho = 1053$$

## TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA

$$K = 0.0866 + 0.501w + 5.052 \cdot 10^{-4}wT$$

$$C_p = 1448 (1-w) + 4187w$$

$$Dif = 8.5 \cdot 10^{-8} e^{-2300/(273.16+T)}$$

$$\log (p_v) = 10.79586 (1 - \theta) + 1.50474 \cdot 10^{-4} (1 - 10^{-8.26692\{1/\theta - 1\}}) - 2.2195983 + 4.2873 \cdot 10^{-4} (10^{4.76955 \{1 - \theta\}} - 1) + 5.02808 \log (\theta)$$

para  $T \geq T_f$  y

$$\rho = 1053 / [0.98221 + 0.11310w + 0.25746 (1-w)/T]$$

$$K = 0.378 + 1.376w + 0.930/T$$

$$C_p = 3874 - 2534w + 902.893 (1-w)/T^2$$

$$Dif = 1.075 \cdot 10^{-5} e^{-3282.8/(273.16+T)}$$

$$\log (p_v) = -9.096936 (\theta - 1) - 3.56654 \log (\theta) + 0.876817 (1 - 1/\theta) - 2.2195983$$

para  $T < T_f$

Tanto para los coeficientes de transferencia de calor como de materia, se consideraron las tres posibilidades ya estudiadas de flujo de aire respecto a la cinta. Por tanto los coeficientes fueron calculados según las correlaciones halladas para los distintos casos, ecuaciones (50), (51) y (52) para albóndigas y datos compilados en la Tabla 10 para hamburguesas.

El coeficiente de transferencia de materia también es

predicho para los 3 tipos de circulación de aire mediante un programa de cálculo auxiliar codificado en FORTRAN 77 que se adjunta en los Apéndices 1 y 1' para albóndigas y hamburguesas respectivamente.

Durante la sublimación se produce una capa superficial deshidratada. La fina capa se incrementa continuamente con el tiempo y su velocidad de crecimiento depende de las condiciones de transferencia de calor, de la estructura del alimento parcialmente deshidratado y de la isoterma de adsorción del alimento; depende obviamente también de la temperatura y humedad del aire.

Deberíamos modelar el sistema considerando dos zonas con propiedades diferentes (la externa parcialmente deshidratada y el resto sin deshidratar). Pero como el espesor de la primera es muy pequeño, se puede considerar con poco error coeficientes efectivos de transferencia  $h_{eff}$  y  $km_{eff}$  tal como es común en el estudio de catalizadores y otros materiales porosos. Esta aproximación no considera en detalle la difusión de vapor de agua en la capa deshidratada, implicando una variación lineal de la  $p_v$  en esa zona. Estos coeficientes efectivos tienen en cuenta la resistencia resultante a la transferencia por la presencia de la interfase y de la capa deshidratada de espesor variable  $\delta$ .

$$h_{eff} = \frac{h_{nd}}{1 + \frac{\delta h_{nd}}{K_d}} \quad (91)$$

$$km_{eff} = \frac{km_{nd}}{1 + \frac{\delta km_{nd}}{Dif_{eff}}} \quad (92)$$

Los símbolos  $h_{nd}$  y  $km_{nd}$  corresponden al alimento no deshidratado y  $km_a$  y  $Dif_{eff}$  del alimento deshidratado. Un esquema similar se utiliza en Pham y Willix (1984). El valor de  $\delta$  se calcula por un balance de materia en función del agua perdida por sublimación.

1.c.- Condiciones iniciales y de contorno usuales

Para el caso de la transferencia de calor, las condiciones iniciales y de contorno para esferas son

$$T = T_o \quad \forall r \text{ y } t = 0 \quad (93)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \text{ y } t = 0 \quad (94)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_R(T - T_a) + km_R L_v (C - C_a) \Big|_{r=R} \quad r = R \text{ y } t \geq 0 \quad (95)$$

Y para el cilindro se cumplen, además de las ya nombradas para esfera, las siguientes condiciones

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{para } x = 0 \text{ y } t \geq 0 \quad (96)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=L} = h_L(T - T_a) + km_L L_v (C - C_a) \Big|_{x=L} \quad x = \pm L \quad y \quad t \geq 0 \quad (97)$$

Para la predicción de la transferencia de materia con sólo difusión interna, las condiciones iniciales y de contorno son

$$C = C_o \quad \forall r \quad y \quad t = 0 \quad (98)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad \text{para } r = 0 \quad y \quad T \geq 0 \quad (99)$$

$$- Dif \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} = km_R (C - C_a) \Big|_{r=R} \quad r = R \quad y \quad t \geq 0 \quad (100)$$

para cilindros, se cumple además que

$$\frac{\partial C}{\partial X} = 0 \quad \text{para } x = 0 \quad y \quad t \geq 0 \quad (101)$$

$$- Dif \frac{\partial C}{\partial X} \Big|_{x=L} = km_L (C - C_a) \Big|_{x=L} \quad x = \pm L \quad y \quad t \geq 0 \quad (102)$$

## 2.- Solución de los balances por métodos numéricos

El sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales

fue resuelto por medio de métodos numéricos de diferencias finitas explícitas. No se consideró necesario utilizar métodos implícitos más complicados porque está perfectamente establecido por Cleland y col. (1982) y Mascheroni (1982) que un método explícito, trabajando con los tamaños adecuados de incrementos de espacio y tiempo, es tan preciso como un método implícito mucho más elaborado. Debemos tener en cuenta, en el caso de alimentos, que la incertidumbre sobre el verdadero valor de las propiedades físicas, y coeficientes de transferencia, tal como lo muestra la diversidad de ecuaciones de predicción existentes, es mucho mayor que el error que pueda introducir el método numérico.

Basados en éste criterio, se utilizaron dos métodos explícitos, los cuales difieren en la distribución espacial de los puntos especificados en la grilla de cálculo.

### 2.a.- Métodos de cálculo

#### 2.a.a.- Método de incrementos de igual espesor

Para el desarrollo del algoritmo de cálculo se expresan las ecuaciones de transferencia de calor y de materia para esfera y para cilindro respectivamente, como diferencias finitas explícitas. Se toma como origen de coordenadas el centro del alimento, y se usan incrementos de espacio de tamaño constante  $\Delta r$  y  $\Delta x$  y de tiempo  $\Delta t$ . Entonces, las expresiones  $T_i^n$  y  $C_i^n$  significan que T y C están evaluadas en  $r=(i-1)\Delta r$  y  $t=n\Delta t$  en el caso de esferas. Similarmente  $T_{ij}^n$  y  $C_{ij}^n$  significan que T y C están evaluadas en  $r= (i-1)\Delta r$ ,  $x= (j-1)\Delta x$  y  $t= n\Delta t$  para el

caso de cilindros finitos. Se toman I puntos (I-1 incrementos) en la dirección radial y J puntos (J-1 incrementos) en la axial. La Figura 36 nos muestra un diagrama del esquema de la grilla de cálculo usada para iguales  $\Delta r$ .

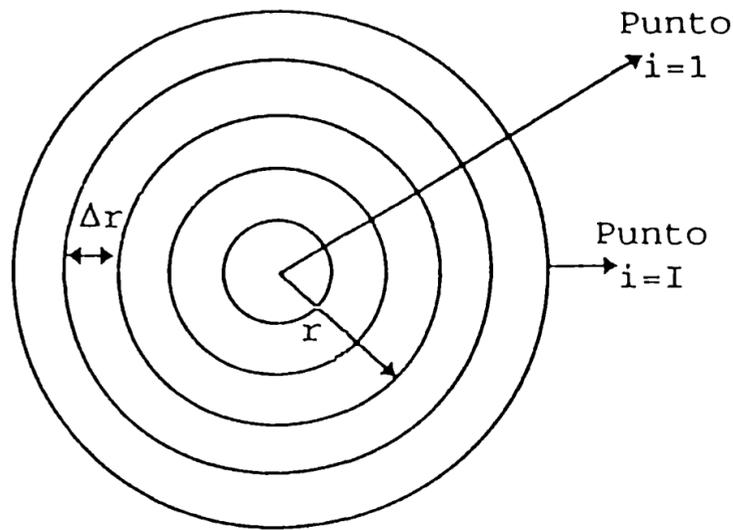


Figura 36. Esquema que representa iguales incrementos de espesor.

Si llamamos  $REL1 = \Delta t / \Delta r^2$  y  $\alpha = K / (\rho C_p)$  tenemos para esferas lo siguiente

$$\begin{aligned} \rho_i^n C_{p_i}^n \frac{(T_i^{n+1} - T_i^n)}{\Delta t} &= \frac{K_i^n}{\Delta r^2} (T_{i+1}^n - 2 T_i^n + T_{i-1}^n) + \\ + \frac{(K_{i+1}^n - K_{i-1}^n) (T_{i+1}^n - T_{i-1}^n)}{4 \Delta r^2} &+ \frac{K_i^n}{(i-1) \Delta r^2} (T_{i+1}^n - T_{i-1}^n) \end{aligned} \quad (103)$$

reordenando para despejar las temperaturas se obtiene para el término general la siguiente expresión

$$T_i^{n+1} = T_i^n + REL1 \alpha_i^n (T_{i+1}^n - 2 T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{REL1 \alpha_i^n}{(i-1)} (T_{i+1}^n - T_{i-1}^n) + \frac{REL1}{4 C p_i^n \rho_i^n} (K_{i+1}^n - K_{i-1}^n) (T_{i+1}^n - T_{i-1}^n) \quad (104)$$

Esta se reduce a

$$T_1^{n+1} = T_1^n + 6 REL1 \alpha_1^n (T_2^n - T_1^n) \quad (105)$$

para el centro de la esfera (i=1) y

$$T_I^{n+1} = T_I^n + 2 REL1 \alpha_I^n (T_{I-1}^n - T_I^n) - 2 REL1 \alpha_I^n \frac{\Delta r}{K_I^n} [ h_R (T_I^n - T_a) + km_R (C_I^n - C_a) L_v ] \left( 1 + \frac{K_{I+1}^n - K_I^n}{4 K_I^n} + \frac{1}{I-1} \right) \quad (106)$$

para la superficie de la misma (i=I); en estos dos casos luego de haber reemplazado las condiciones de contorno en la expresión  $T_i^{n+1}$ .

Del mismo modo podemos definir  $REL2 = \Delta t / \Delta x^2$  para cilindros, que luego de reemplazarla en las ecuaciones de diferencias finitas y despejar las temperaturas en el punto de coordenadas (i,j,n+1) nos queda

$$\begin{aligned}
 T_{i,j}^{n+1} = & T_{i,j}^n + REL1 \alpha_{i,j}^n (T_{i+1,j}^n - 2 T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n) + \\
 & + \frac{REL1 \alpha_{i,j}^n}{2 (i-1)} (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) + \\
 & + \frac{REL1}{4 \rho_{i,j}^n CP_{i,j}^n} (K_{i+1,j}^n - K_{i-1,j}^n) (T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n) + \quad (107) \\
 & + REL2 \alpha_{i,j}^n (T_{i,j+1}^n - 2 T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n) + \\
 & + \frac{REL2}{4 \rho_{i,j}^n CP_{i,j}^n} (K_{i,j+1}^n - K_{i,j-1}^n) (T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n)
 \end{aligned}$$

En el centro  $i=1$  y  $j=1$  y para las superficies ( $i=I$  y  $j=J$ ) se obtienen relaciones similares a las (105) y (106).

Podemos obtener las concentraciones de agua utilizando las ecuaciones diferenciales planteadas para dicho fin, realizando reemplazos similares a los del caso de temperatura

$$\begin{aligned}
 C_i^{n+1} = & C_i^n + REL1 Dif_i^n (C_{i+1}^n - 2 C_i^n + C_{i-1}^n) + \quad (108) \\
 + \frac{REL1 Dif_i^n}{(i-1)} (C_{i+1}^n - C_{i-1}^n) + \frac{REL1}{4} (Dif_{i+1}^n - Dif_{i-1}^n) (C_{i+1}^n - C_{i-1}^n)
 \end{aligned}$$

para esferas y

$$\begin{aligned}
 C_{i,j}^{n+1} = & C_{i,j}^n + REL1 Dif_{i,j}^n (C_{i+1,j}^n - 2 C_{i,j}^n + C_{i-1,j}^n) + \\
 + \frac{REL1 Dif_{i,j}^n}{2 (i-1)} (C_{i+1,j}^n - C_{i-1,j}^n) + \frac{REL1}{4} (Dif_{i+1,j}^n - Dif_{i-1,j}^n) & (109) \\
 (C_{i+1,j}^n - C_{i-1,j}^n) + REL2 Dif_{i,j}^n (C_{i,j+1}^n - 2 C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n) + \\
 + \frac{REL2}{4} (Dif_{i,j+1}^n - Dif_{i,j-1}^n) (C_{i,j+1}^n - C_{i,j-1}^n)
 \end{aligned}$$

para cilindros.

Existe una condición de estabilidad, común a todos los desarrollos en diferencias finitas explícitas, que se debe cumplir: es la que estipula que los coeficientes que multiplican a  $T_i^n$  ( $T_{ij}^n$ ) o  $C_i^n$  ( $C_{ij}^n$ ) deben ser positivos. Esta condición tendrá tres valores distintos para cada caso: una para los puntos interiores de la malla, otra para la superficie y otra para el centro, que dependen de los valores de las propiedades y de la manera de expresar las condiciones de contorno. La más restrictiva de ellas será la que gobierne la estabilidad del método.

-En los puntos interiores se debe cumplir:

$$\Delta t \leq \Delta r^2 / (2\alpha_i^n) \quad \text{para energía y}$$

$$\Delta t \leq \Delta r^2 / (2Dif_i^n) \quad \text{para materia,}$$

ambos para el caso de esferas y

$$\Delta t \leq \Delta r^2 \Delta x^2 / \{2\alpha_{i,j}^n (\Delta r^2 + \Delta x^2)\} \quad \text{para energía y}$$

$$\Delta t \leq \Delta r^2 \Delta x^2 / \{2Dif_{i,j}^n (\Delta r^2 + \Delta x^2)\} \quad \text{para materia,}$$

ambos para cilindros.

-En la superficie, y cuando las condiciones de contorno se expresan en diferencias utilizando el recurso del punto ficticio, se tendrán que respetar las relaciones

$$\Delta t \leq 0.5 \Delta r^2 (\alpha_I^n)^{-1} \left( 1 + \frac{h_R \Delta r}{K_I^n} \left( \frac{I}{[I-1]} + \frac{[K_{I+1}^n - K_{I-1}^n]}{4 K_I^n} \right) \right)^{-1} \quad (110)$$

$$\Delta t \leq 0.5 \Delta r^2 (Dif_I^n)^{-1} \left( 1 + \frac{km_R \Delta r}{Dif_I^n} \left( \frac{I}{[I-1]} + \frac{[Dif_{I+1}^n - Dif_{I-1}^n]}{4 Dif_I^n} \right) \right)^{-1} \quad (111)$$

para las esferas y

$$\left[ \Delta x^2 + \Delta r^2 + \frac{h_L \Delta x \Delta r^2}{K_{I,J}^n} \left( 1 + \frac{\Delta t \leq 0.50 \Delta x^2 \Delta r^2 (\alpha_{I,J}^n)^{-1} [K_{I,J+1}^n - K_{I,J-1}^n]}{4 K_{I,J}^n} \right) + \frac{h_R \Delta r \Delta x^2}{K_{I,J}^n} \left( \frac{[2I-1]}{2(I-1)} + \frac{[K_{I+1,J}^n - K_{I-1,J}^n]}{4 K_{I,J}^n} \right) \right]^{-1} \quad (112)$$

$$\left[ \Delta x^2 + \Delta r^2 + \frac{km_L \Delta x \Delta r^2}{Dif_{I,J}^n} \left( 1 + \frac{\Delta t \leq 0.50 \Delta x^2 \Delta r^2 (Dif_{I,J}^n)^{-1} [Dif_{I,J+1}^n - Dif_{I,J-1}^n]}{4 Dif_{I,J}^n} \right) + \frac{km_R \Delta r \Delta x^2}{Dif_{I,J}^n} \left( \frac{[2I-1]}{2(I-1)} + \frac{[Dif_{I+1,J}^n - Dif_{I-1,J}^n]}{4 Dif_{I,J}^n} \right) \right]^{-1} \quad (113)$$

para los cilindros.

-En el centro aparece una indeterminación en  $1/r \delta T/\delta r$  y en  $1/r \delta C/\delta r$ , las que se salvan utilizando la regla de L'Hôpital

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} = \frac{\delta^2 T}{\delta r^2} \quad (114)$$

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\delta C}{\delta r} = \frac{\delta^2 C}{\delta r^2} \quad (115)$$

De la expresión en diferencias finitas y de la aplicación de las condiciones de contorno  $\delta T/\delta r=0$  ,  $\delta T/\delta x=0$  ,  $\delta C/\delta r=0$  y  $\delta C/\delta x=0$  se tiene

$$\Delta t \leq \Delta r^2 / (6 \alpha_i^n) \quad y$$

$$\Delta t \leq \Delta r^2 / (6 \text{Dif}_i^n) \quad \text{para esferas y}$$

para cilindros tenemos

$$\Delta t \leq \frac{0.50 \Delta x^2 \Delta r^2}{\alpha_{i,1}^n (2 \Delta x^2 + \Delta r^2)} \quad y \quad \Delta t \leq \frac{0.50 \Delta x^2 \Delta r^2}{\text{Dif}_{i,1}^n (2 \Delta x^2 + \Delta r^2)}$$

Para el caso específico que se modeló, el tamaño de los productos, los valores de sus propiedades físicas y los rangos de los parámetros de congelación usados ( $T_a$ ,  $v_a$ ) determinaron que las condiciones de estabilidad para materia sean más restrictivas que las de energía. Asimismo las condiciones para la superficie fueron siempre más restrictivas que las del centro, de modo que las condiciones de estabilidad para la superficie del producto fueron las que determinaron el tamaño de los incrementos de tiempo a usar.

Un caso particular, para el que hubo que hacer modificaciones en el esquema de cálculo, fue para el de hamburguesas con flujo de aire vertical circulando hacia arriba. En esas circunstancias el  $h_L$  es diferente en las caras inferior

y superior, con lo que no existe simetría en la dirección  $x$ . Por ello, en lugar de las condiciones  $\delta T/\delta x = 0$  y  $\delta C/\delta x = 0$  se deben usar las evaluadas en  $x = \pm L$  y con el valor de  $h$  y  $k_m$  adecuados. En este caso evidentemente, se deberá usar el doble de puntos (incrementos) en la dirección  $x$ .

**2.a.b.- Método de iguales incrementos de volumen**

Chau y Gaffney (1990) presentaron una explicación detallada del empleo de este método, aplicándolo al caso de refrigeración de hortifrutícolas. Principalmente consiste en la división del cuerpo en  $I$  anillos concéntricos de igual volumen  $\Delta V$ , donde  $\Delta V = V/I$ , y  $V$  es el volumen total del cuerpo. Cada punto de la grilla es localizado en el centro del correspondiente incremento de volumen, tal como se muestra en la Figura 37.

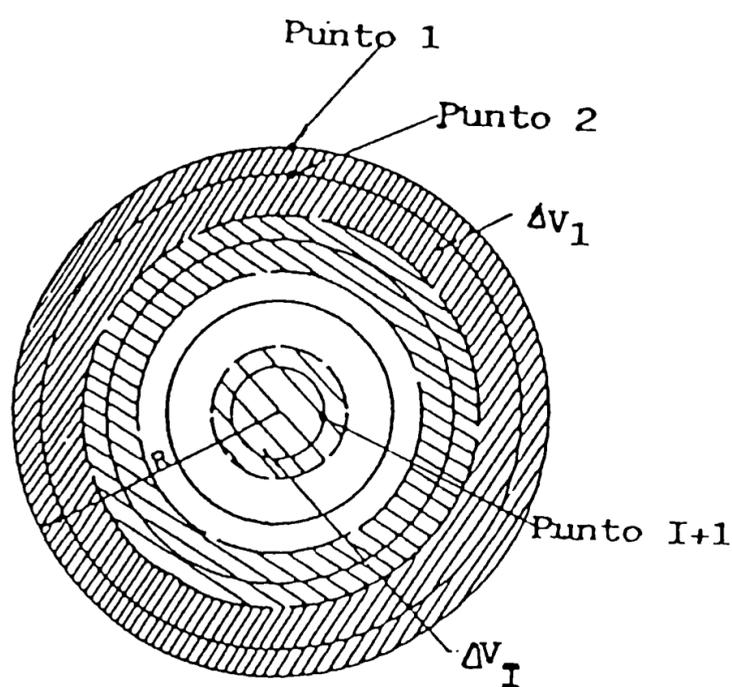


Figura 37. Diagrama del esquema utilizado en el cálculo de  $\Delta V$ .

La principal ventaja de este método es que, para esferas y cilindros infinitos, se obtiene una alta densidad de puntos de

grilla cerca de la superficie, dando de este modo una mayor exactitud en el cálculo de los perfiles de temperatura y concentración. Además es particularmente importante para el punto localizado en la superficie del cuerpo ya que el que no haya masa asociada en ese punto, permite una mayor exactitud en el cálculo de su temperatura. Tiene la desventaja de que el centro no tiene un punto asociado y por lo tanto no puede calcularse exactamente su temperatura, siendo particularmente dificultoso en el período de comienzo de cambio de fase.

La fórmula general se basa en el balance de energía del elemento de volumen  $\Delta V_i$  y está dado en la siguiente ecuación

$$\rho_i^n C p_i^n \Delta V_i \frac{(T_i^{n+1} - T_i^n)}{\Delta t} = \frac{K_{i-1/2}^n A_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} (T_{i-1}^n - T_i^n) - \frac{K_{i+1/2}^n A_i}{\Delta r_i} (T_i^n - T_{i+1}^n) \quad (116)$$

donde  $A_i = 4 \pi r_i r_{i+1}$

$$r_i = (1 + (1.5 - i) / I) \quad \text{para } 2 \leq i \leq I+1$$

$$\Delta r_i = r_i - r_{i+1}$$

$$\Delta r_{i-1} = r_{i-1} - r_i$$

Como se puede ver en la figura, cada punto de la malla está situado en el centro del elemento de volumen, el punto 1 está sobre la superficie y el punto  $I+2$  está en el centro de la esfera. Reordenando podemos escribir la fórmula general para  $T_i^{n+1}$

de la siguiente manera:

$$T_i^{n+1} = T_i^n \left[ 1 - \frac{\Delta t}{\Delta V_i \rho_i^n c_{p_i}^n} \left( \frac{K_{i-1/2}^n A_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{K_{i+1/2}^n A_i}{\Delta r_i} \right) \right] + \frac{\Delta t}{\Delta V_i \rho_i^n c_{p_i}^n} \left( \frac{K_{i-1/2}^n A_{i-1} T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} + \frac{K_{i+1/2}^n A_i T_{i+1}^n}{\Delta r_i} \right) \quad (117)$$

Para  $i=1$  (superficie) se tiene la siguiente expresión:

$$T_1^{n+1} = \frac{\left[ K_{3/2}^n \frac{A_1}{\Delta r_1} T_2^n + 4 \pi R^2 (h_R T_a - km_R L_v (C_1^n - C_a)) \right]}{K_{3/2}^n \frac{A_1}{\Delta r_1} + 4 \pi R^2 h_R} \quad (118)$$

El punto  $I+2$  no se puede calcular mediante este tipo de resolución y puede ser obtenido por extrapolación polinómica.

Para el balance de materia llegamos a la expresión general siguiente:

$$C_i^{n+1} = C_i^n \left[ 1 - \frac{\Delta t}{\Delta V_i} \left( \frac{Dif_{i-1/2}^n A_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{Dif_{i+1/2}^n A_i}{\Delta r_i} \right) \right] + \frac{\Delta t}{V_i} \left[ \frac{Dif_{i-1/2}^n A_{i-1} C_{i-1}^n}{\Delta r_i} + \frac{Dif_{i+1/2}^n A_i C_{i+1}^n}{\Delta r_i} \right] \quad (119)$$

Las condiciones de estabilidad que debe cumplir son:

-En los puntos interiores:

$$\Delta t \leq \frac{V_i \rho_i^n C p_i^n}{\left[ \frac{K_{i-1/2}^n A_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{K_{i+1/2}^n A_i}{\Delta r_i} \right]} \quad \text{para energía}$$

$$\Delta t \leq \frac{V_i}{\left[ \frac{Dif_{i-1/2}^n A_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{Dif_{i+1/2}^n A_i}{\Delta r_i} \right]} \quad \text{para materia}$$

- En el centro:

$$\Delta t \leq \frac{V_i \rho_i^n C p_i^n \Delta r_{i-1}}{K_{i-1/2}^n A_{i-1}} \quad \text{para energía}$$

$$\Delta t \leq \frac{V_i \Delta r_{i-1}}{Dif_{i-1/2}^n A_{i-1}} \quad \text{para materia}$$

En todos los casos los métodos numéricos fueron codificados en QuickBASIC y los programas resultantes fueron corridos en una PC AT 486. El listado de los programas de cálculo se encuentra en el Apéndice 3 para albóndigas y en el Apéndice 4 para hamburguesas.

**2.b.- Simulación de la congelación con simultánea sublimación**

**2.b.a.- Simulación de la congelación de albóndigas**

Se modeló la congelación de albóndigas de  $R = 0.019$  m. Se utilizó  $T_o = 5^\circ\text{C}$ ; tres temperaturas de aire refrigerante  $T_a = -25^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$  y  $-35^\circ\text{C}$  y velocidades del mismo  $v_a$  de 1 a 10 m/s.

De acuerdo a lo estudiado anteriormente, en los congeladores a cinta se pueden utilizar flujo de aire paralelo o transversal a la cinta (ya sea incidiendo de arriba hacia abajo o en forma inversa). Las tres opciones fueron modeladas para estudiar la influencia de estas variables en el tiempo de congelación y en la pérdida de peso. En todos los casos la humedad relativa supuesta fue la de saturación (100%).

Por el método a, se usaron 16 puntos de grilla en la mayoría de los cálculos, aunque también fueron testeados 31 y 46 puntos ( $\Delta r$  de 1.266, 0.633 y 0.422 mm respectivamente). Se comprobó que las diferencias en los tiempos de congelación y en la pérdida de peso debidas a la variación de  $\Delta r$  (en ese rango de espaciados), eran prácticamente despreciables. Usando una grilla de 16 puntos un  $\Delta t = 0.50$  s dió resultados estables.

Por el método b, se usaron 14 elementos de volumen en los cálculos, pero también se testearon 29 y 44 elementos sin encontrar diferencias significativas en los tiempos de congelación o en la pérdida de peso. Para  $I=14$ , un  $\Delta t = 0.10$  s dió resultados estables.

### 2.b.b.- Simulación de la congelación de hamburguesas

Se modeló la congelación industrial de hamburguesas de carne vacuna de  $L= 0.5$  cm,  $R= 5$  cm y peso 0.0833 kg. Nuevamente se consideraron tres tipos de flujo de aire. Se cubrió el rango de  $T_a$  desde  $-30^\circ\text{C}$  a  $-40^\circ\text{C}$  y  $v_a$  de 1 a 10 m/s, con  $T_o= 10^\circ\text{C}$ . Se utilizó solo el método a y se trabajó con  $I=J=11$ , aunque se hicieron pruebas con 16 y 21 puntos, las que dieron muy poca variación en los resultados, pero incrementándose notablemente

el tiempo de cálculo.

**2.c.- Comparación de los resultados obtenidos por distintos métodos y con datos de bibliografía**

Con la información obtenida se construyeron las siguientes figuras: la figura 38 es un ejemplo típico de la forma de variación de los perfiles de temperatura con la posición adimensional y con el tiempo. Ellos fueron predichos para albóndigas con las siguientes condiciones de operación:  $T_o = 5.0^\circ\text{C}$ ,  $T_a = -30^\circ\text{C}$ ,  $v_a = 7 \text{ m/s}$  y circulación de aire de abajo hacia arriba. El tiempo de congelación fue de 26.74 min.

Un hecho relevante de los resultados predichos es que a medida que progresa la congelación la forma de los perfiles de temperatura se distorsiona cerca de la superficie. Tal distorsión es causada por la formación de la capa deshidratada que es consecuencia de la sublimación en la superficie. Esta capa tiene distinta composición y estructura y por lo tanto diferente capacidad calorífica y conductividad térmica.

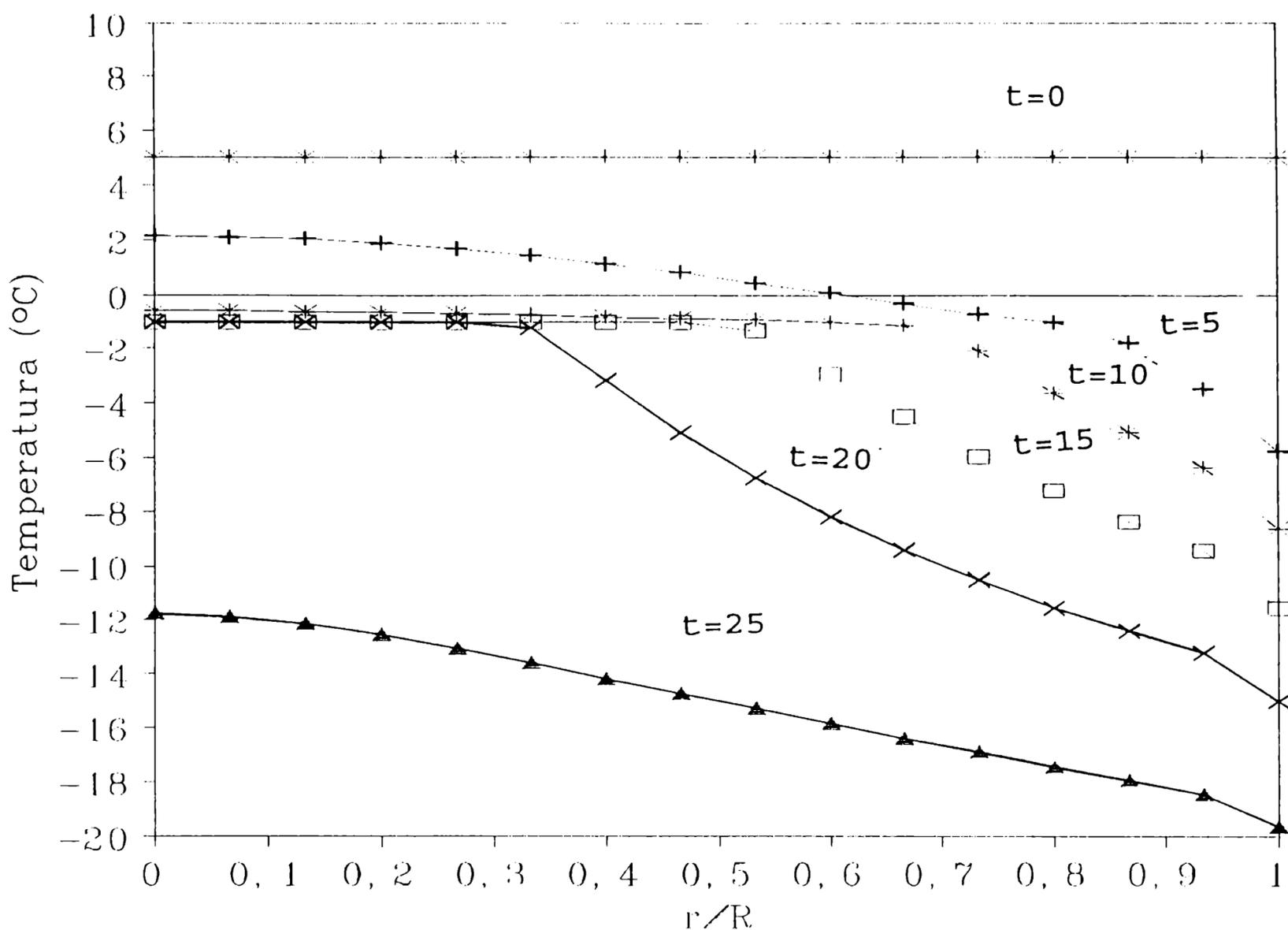


Figura 38. Perfiles de temperatura a distintos tiempos (en minutos) para la congelación de una albóndiga.

Bajo las mismas condiciones de la figura 38 se construyó la figura 39, la cual exhibe la historia térmica de tres puntos (superficie ( $r=R$ ), centro ( $r=0$ ), y un punto medio ( $r=0.5R$ )). Con la información proporcionada por ambos gráficos comprobamos que, tal como es típico de la congelación, cerca de la superficie la temperatura cae rápidamente debajo de la temperatura de congelación ( $T_f$ ), mientras que para puntos interiores una vez que se alcanza la temperatura del comienzo de congelación se mantiene a la misma por un cierto período, el cual es mayor cuanto más interno sea el punto involucrado (formando el llamado "plateau").

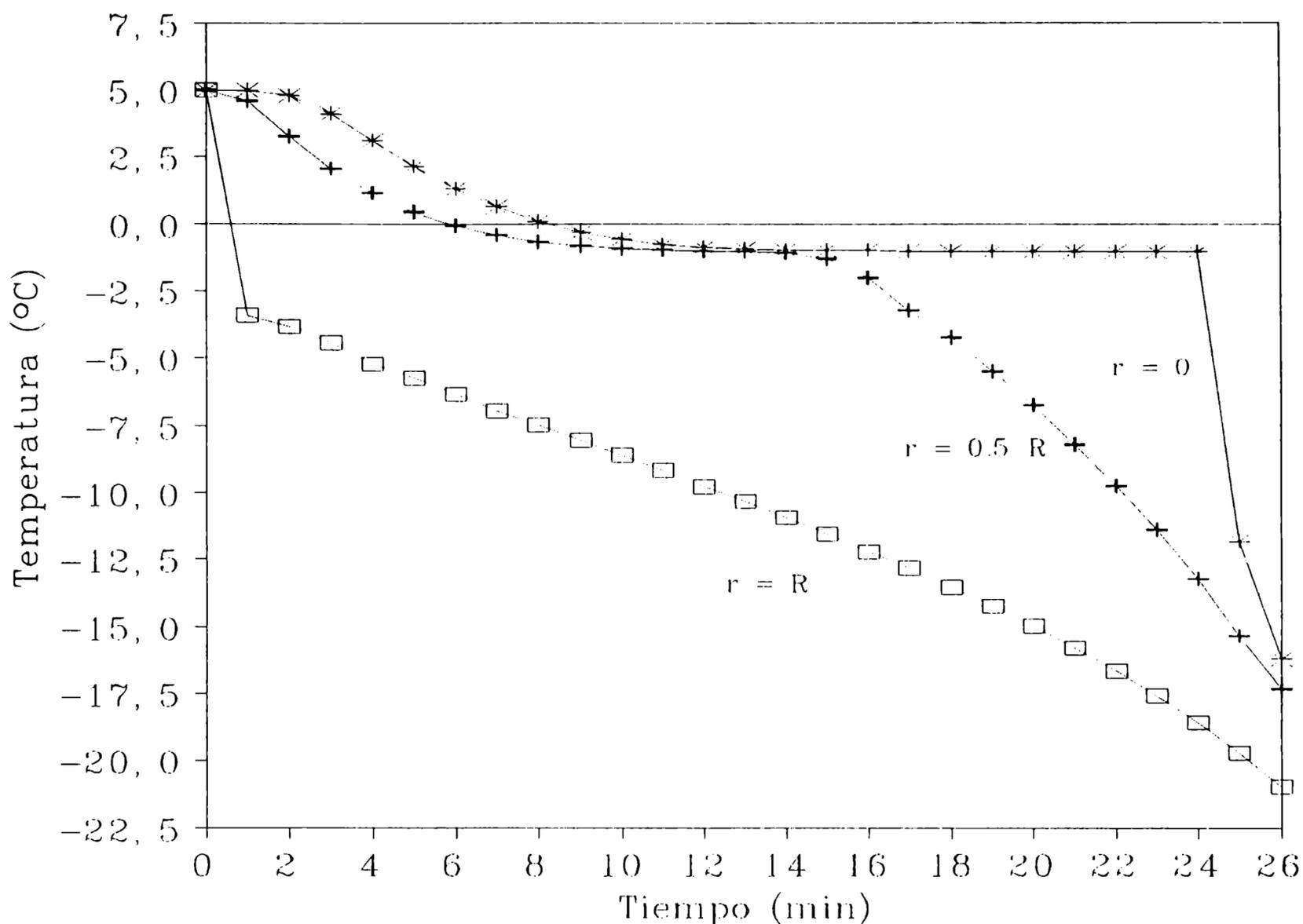


Figura 39. Historias térmicas de distintos puntos de una albóndiga durante su congelación.

La figura 40 muestra la variación en la predicción de tiempos de congelación (el tiempo requerido para alcanzar  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro del alimento) como una función de la temperatura y de la velocidad del aire para el caso de albóndigas. Como es de esperar ese tiempo es menor a menor temperatura y mayor velocidad del aire circulante. La misma figura presenta la relación entre los tiempos de congelación calculados considerando y sin considerar evaporación de agua.

velocidad del aire para hamburguesas con flujo paralelo a la cinta.

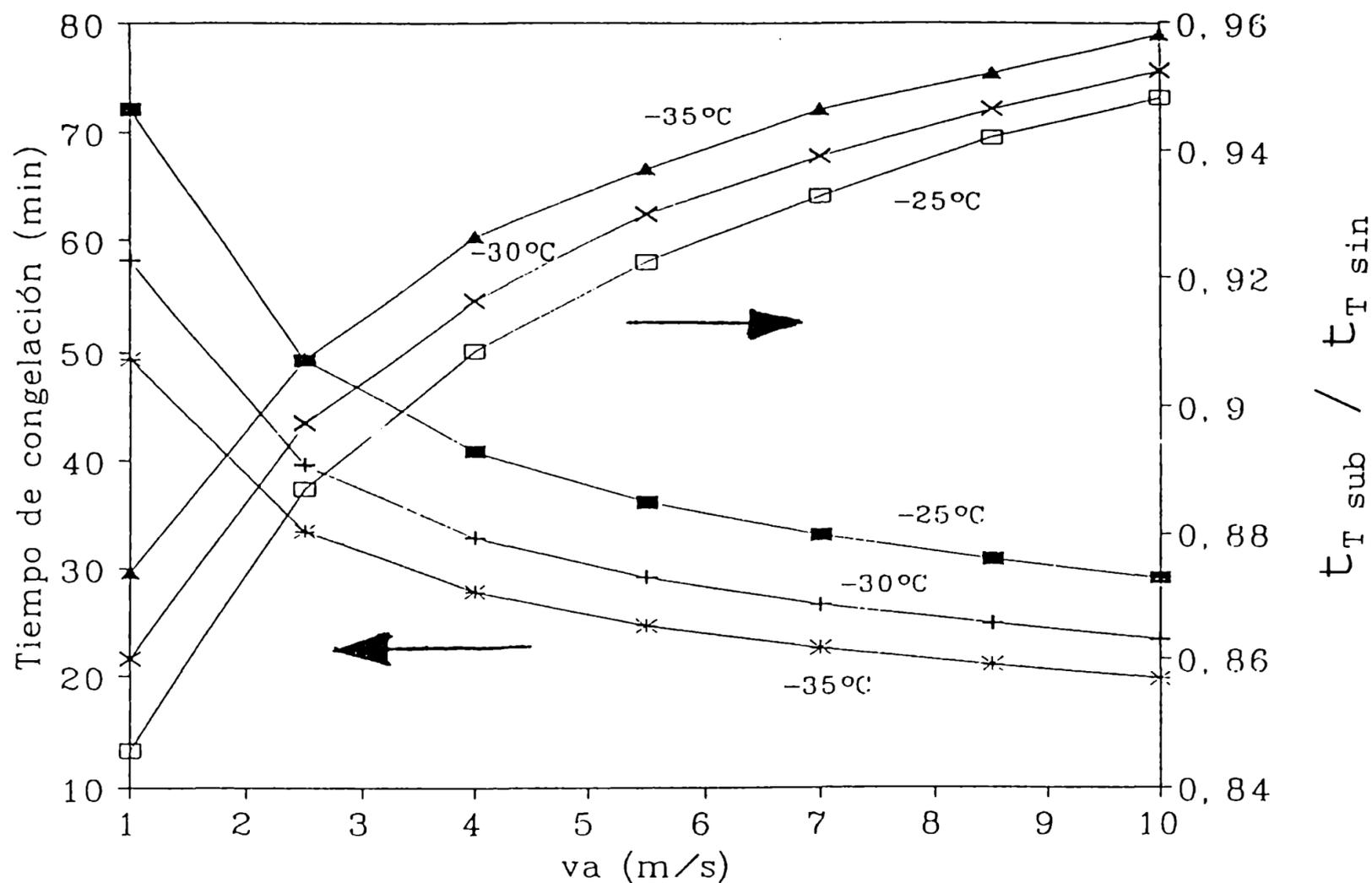


Figura 40. Tiempos de congelación de albóndigas y relación de tiempo de congelación con sublimación de agua y sin sublimación para flujo de aire ascendente en función de la temperatura y velocidad del aire.

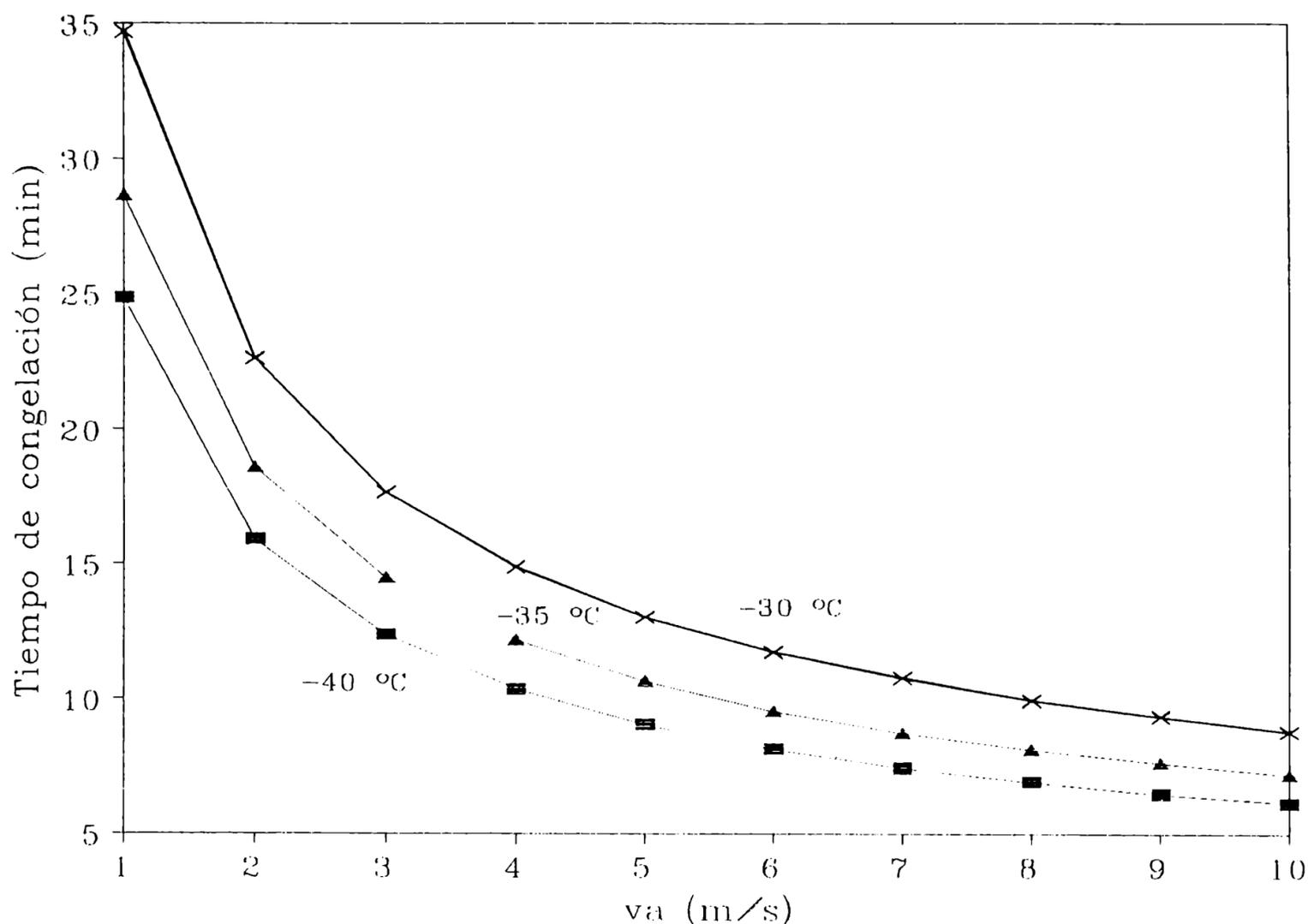


Figura 41. Variación del tiempo de congelación de hamburguesas con la temperatura y velocidad del aire para flujo paralelo a la cinta.

De las figuras se deduce que la influencia de  $v_a$  es alta a valores bajos, pero pierde rápidamente influencia a medida que crece, siendo poco importante por sobre 5m/s. También se comprueba que el despreciar el proceso de sublimación puede introducir errores por exceso en el tiempo de congelado predicho de hasta un 15%.

La figura 42 nos muestra la variación porcentual de la pérdida de peso con la velocidad de aire para  $-35^{\circ}\text{C}$  y distintas direcciones del flujo de aire para el caso de albóndigas. Como podemos comprobar, cuanto mayor es la velocidad de enfriamiento

menor tiempo de congelación y menor pérdida de peso porcentual. Lo mismo ocurre en la figura 43 para el caso de hamburguesas. Se observa que aunque la tendencia es similar, a iguales condiciones las hamburguesas tienen mayor pérdida de peso debida a la mayor área expuesta por unidad de volumen.

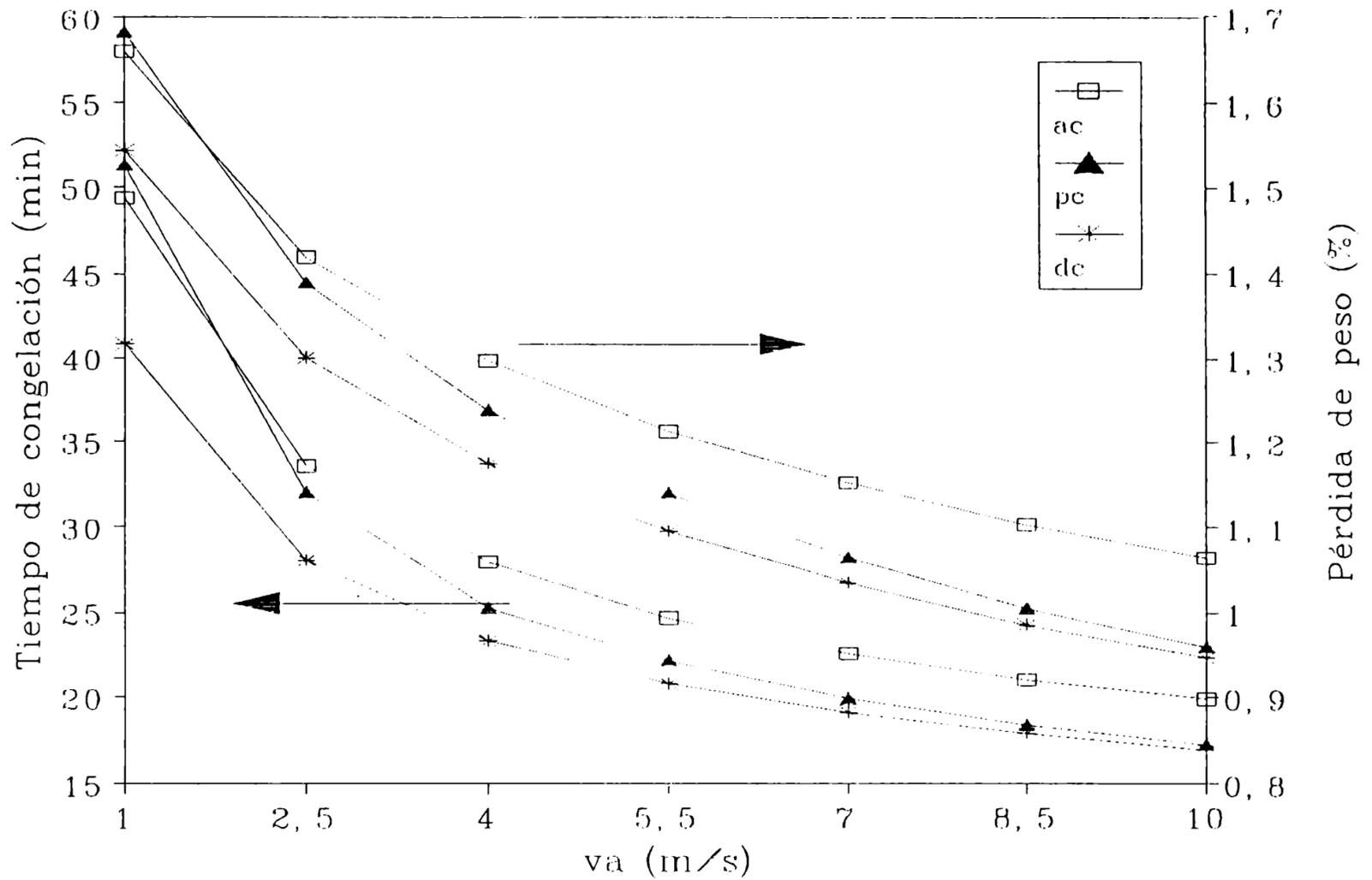


Figura 42. Variación de la pérdida de peso porcentual y del tiempo de congelación de albóndigas con la velocidad del aire, para distintas direcciones de flujo de aire.

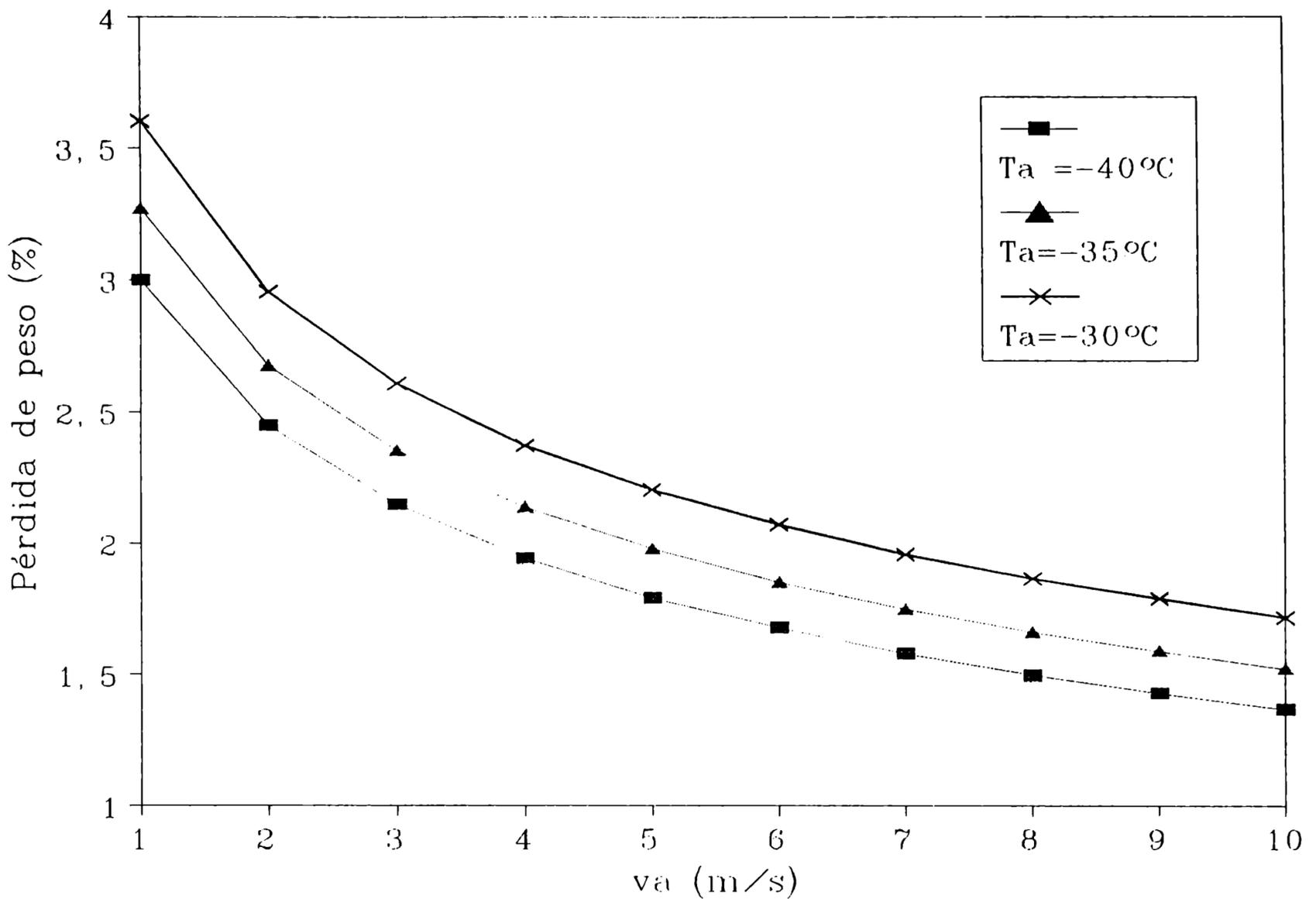


Figura 43. Variación porcentual de la pérdida de peso de hamburguesas con la velocidad del aire y con la temperatura, para flujo paralelo a la cinta.

A continuación se presenta, como resumen de lo visto, toda la información obtenida para los distintos productos, métodos numéricos y condiciones de congelación modeladas. En el caso de albóndigas se comparan los resultados dados por los dos métodos numéricos probados.

Así la Tabla 14 nos presenta los tiempos de congelación de albóndigas (con y sin considerar la sublimación de agua) y la pérdida de peso para flujo de aire ascendente y distintas temperaturas, permitiendo comparar también los dos métodos probados.

**TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA**

**TABLA 14**

$\Delta r$ constante					$\Delta V$ constante				
$T_a$ [°C]	$v_a$ [m/s]	$t_{T\ sub}$ [min]	$t_{T\ sin}$ [min]	Wl [%]	$T_a$ [°C]	$v_a$ [m/s]	$t_{T\ sub}$ [min]	$t_{T\ sin}$ [min]	Wl [%]
	1	72.27	82.24	2.073		1	72.10	85.26	2.062
	2.5	49.29	53.87	1.767		2.5	49.26	55.53	1.774
	4	41.03	43.91	1.616		4	40.91	45.02	1.627
-25	5.5	36.31	38.38	1.513	-25	5.5	36.22	39.27	1.527
ac	7	33.23	34.73	1.439	ac	7	33.12	35.51	1.454
	8.5	30.93	32.16	1.378		8.5	30.90	32.80	1.397
	10	29.29	30.23	1.334		10	29.16	30.75	1.349
	1	58.21	65.40	1.846		1	58.22	67.70	1.848
	2.5	39.86	42.96	1.570		2.5	39.67	44.21	1.586
	4	33.02	35.08	1.434		4	32.92	35.92	1.45
-30	5.5	29.27	30.72	1.343	-30	5.5	29.16	31.36	1.361
ac	7	26.74	27.88	1.273	ac	7	26.67	28.40	1.294
	8.5	24.90	25.89	1.216		8.5	24.86	26.27	1.239
	10	23.72	24.38	1.182		10	23.49	24.66	1.196
	1	49.23	54.68	1.647		1	49.36	56.50	1.659
	2.5	33.61	36.01	1.401		2.5	33.56	36.98	1.419
	4	27.92	29.48	1.275		4	27.87	30.09	1.297
-35	5.5	24.72	25.97	1.188	-35	5.5	24.67	26.33	1.213
ac	7	22.67	23.58	1.126	ac	7	22.59	23.87	1.152
	8.5	21.25	21.94	1.080		8.5	21.08	22.14	1.103
	10	20.15	20.74	1.042		10	19.93	20.80	1.062

Considerando la congelación de albóndigas las mayores diferencias entre ambos métodos fueron de 0.22 min en el tiempo de congelación para  $T_a = -35^\circ\text{C}$  y  $v_a = 10$  m/s y en el caso de pérdida de peso las mayores diferencias encontradas fueron 0.026% para  $T_a = -35^\circ\text{C}$  y  $v_a = 7$  m/s, en ambos casos para flujo de aire incidiendo de abajo hacia arriba.

En la tabla 15 vemos los tiempos de congelación de albóndigas con y sin sublimación de agua y la pérdida de peso de albóndigas para  $-35^\circ\text{C}$  y distintos flujos de aire, y para el método de incrementos de volumen constantes.

**TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA**

**TABLA 15**

$\Delta V$ constante (distintos tipos de flujo)				
$T_a$ [°C]	$v_a$ [m/s]	$t_{T_{sub}}$ [min]	$t_{T_{sin}}$ [min]	Wl [%]
	1	49.36	56.50	1.659
	2.5	33.56	36.98	1.419
	4	27.87	30.09	1.297
-35	5.5	24.67	26.33	1.213
Flujo ac	7	22.59	23.87	1.152
	8.5	21.08	22.14	1.103
	10	19.93	20.80	1.062
	1	51.33	58.97	1.682
	2.5	31.99	35.09	1.388
	4	25.56	27.36	1.237
-35	5.5	22.16	23.34	1.139
Flujo pc	7	19.96	20.85	1.063
	8.5	18.42	19.08	1.005
	10	17.28	17.79	0.959
	1	40.80	45.87	1.543
	2.5	27.95	30.20	1.299
	4	23.33	24.74	1.174
-35	5.5	20.80	21.78	1.094
Flujo dc	7	19.13	19.86	1.034
	8.5	17.91	18.49	0.985
	10	17.00	17.45	0.947

**TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA**

La Tabla 16 muestra los tiempos de congelación para hamburguesas considerando sublimación de agua y pérdida de peso a diferentes temperaturas, para flujo de aire paralelo a la cinta.

**TABLA 16**

$\Delta V$ constante							
$T_a$ [°C]	$v_a$ [m/s]	$t_{T\ sub}$ [min]	Wl [%]	$T_a$ [°C]	$v_a$ [m/s]	$t_{T\ sub}$ [min]	Wl [%]
-40	1	24.88	2.997	-35	6	9.57	1.848
-40	2	15.88	2.444	-35	7	8.76	1.746
-40	3	12.35	2.144	-35	8	8.13	1.662
-40	4	10.36	1.941	-35	9	7.62	1.590
-40	5	9.06	1.790	-35	10	7.18	1.523
-40	6	8.16	1.675	-30	1	34.68	3.601
-40	7	7.46	1.577	-30	2	22.60	2.952
-40	8	6.93	1.499	-30	3	17.66	2.604
-40	9	6.49	1.430	-30	4	14.87	2.372
-40	10	6.12	1.368	-30	5	13.04	2.202
-35	1	28.61	3.269	-30	6	11.73	2.067
-35	2	18.56	2.672	-30	7	10.75	1.958
-35	3	14.47	2.350	-30	8	9.97	1.866
-35	4	12.15	2.134	-30	9	9.34	1.787
-35	5	10.65	1.976	-30	10	8.81	1.719

Podemos ver de acuerdo a las figuras y datos determinados

que hay diferencias significativas en la predicción de tiempos de congelación considerando pérdida de materia respecto a cuando ésta no se considera.

Siempre se predice menor tiempo de congelación cuando se considera la sublimación de agua superficial que cuando no se tiene en cuenta. Estas diferencias son mayores a altas  $T_a$  y bajas  $v_a$ .

Podemos concluir que es posible predecir la transferencia simultánea de calor y materia durante la congelación y el almacenamiento de alimentos a través del uso de un modelo teórico, sin realizar hipótesis simplificadoras en su deducción.

El empleo de métodos numéricos explícitos facilita el desarrollo y uso de los programas de cálculo. El uso del modelo de elementos de volumen constantes, no incrementó la precisión de los cálculos respecto del de elementos espaciales constantes, pero si las necesidades de tiempo de máquina.

El modelo desarrollado permite calcular perfiles de temperatura y composición, tiempos de congelación y pérdida de peso. Vemos como es de esperar que los tiempos de congelación y la pérdida de peso disminuyen con el aumento de la velocidad del aire y con el descenso de la temperatura exterior (de la cámara).

Este modelo es de utilidad porque permite mejorar el diseño de equipos, disminuir el tiempo de proceso, el consumo de energía y las pérdidas de peso de los productos.

## CAPITULO 6

## CONCLUSIONES

## VI.- CONCLUSIONES

Del estudio de los distintos tipos de carnes con diferentes composiciones y cubriendo un amplio rango de temperaturas se pudieron evaluar las propiedades térmicas de las mismas, primer objetivo de esta tesis.

De ello se puede concluir lo siguiente: en todos los tipos de carne, el cambio de entalpía es directamente proporcional al contenido acuoso, de manera que la proporción tan alta de agua frente a los demás componentes hace que su influencia sea la determinante de los valores medidos o calculados. Las determinaciones fueron hechas en un DSC, los termogramas son de carácter endotérmico y su forma se diferencia claramente de los de materiales que tienen un punto de fusión característico, ya que las de carnes presentan un rango de fusión al ser un sistema acuoso multicomponente.

Debido a la gran dependencia que tiene el valor de estas propiedades con la temperatura es que se propusieron regresiones para entalpía y para capacidad calorífica con distinta funcionalidad con la temperatura, ya sea que se encuentren por debajo o por encima de la temperatura de fusión. Las mismas dieron una buena aproximación a los datos experimentales, para todo el rango de contenido de agua estudiado.

Una comparación de los datos experimentales con ecuaciones de predicción de bibliografía permitió comprobar que estas predicen la variación de  $H$  y  $C_p$  con la temperatura y el contenido acuoso y de la temperatura de fusión con la composición en el mismo sentido que lo hacían los valores experimentales. Asimismo,

he encontrado que el valor total del contenido entálpico coincide con los valores teóricos, siendo los valores predichos en promedio 7,96% mayores que los experimentales.

Otro hecho a destacar es que existen diferencias importantes entre los resultados experimentales y las ecuaciones de predicción de bibliografía en la zona de descongelación intensiva (aproximadamente desde  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta la temperatura de fusión), mostrando los datos experimentales de H y Cp una descongelación más gradual que los teóricos. Una posible explicación estaría dada porque los métodos de predicción se hicieron a partir de datos experimentales tomados con cantidades de muestras grandes, donde la forma de congelación, y por consiguiente el tipo de cristales formados y su distribución espacial tiene influencia en la forma de la curva, presentando la misma un comportamiento más cercano a la de una sustancia pura durante el proceso de descongelación. Esto originó un segundo estudio donde se determinó si había influencia de la velocidad de congelación y almacenamiento sobre los valores medidos.

Los estudios se realizaron sobre carne de cordero y cerdo, comparando los datos se determinó que, independientemente de pequeñas diferencias en los valores entálpicos entre muestras de igual contenido acuoso, en la zona de fusión propiamente dicha la forma de las curvas y los valores experimentales de H y Cp no son influenciadas de manera apreciable por las condiciones de congelación y/o almacenamiento. Ello significaría a los fines prácticos, que todas las condiciones estudiadas corresponden a un mismo rango de velocidades de congelación y por tanto no hubo una influencia apreciable sobre la distribución espacial de los cristales de hielo. Quizás otro método de evaluación que utilice muestras de mayor tamaño (masa) donde se puedan diferenciar según

tamaño y posición de los cristales de hielo permita encontrar diferencias en dicha zona. El DSC, si bien es un método de alta precisión, utiliza muestras tan pequeñas que impiden hacer esa diferenciación.

Dentro de los datos necesarios para predecir tiempos de proceso y la pérdida de peso producida por evaporación o sublimación del agua superficial se encuentran los coeficientes de transferencia de calor y materia. Su determinación y cálculo fue el segundo objetivo de mi tesis, ya que la información de bibliografía además de ser escasa, generalmente se obtuvo bajo condiciones ideales de medida, las que se diferencian mucho de las condiciones reales de operación de los congeladores industriales.

Uno de los equipos más utilizados a nivel industrial son los congeladores de cinta, que según el modelo tienen circulación de aire en distintas direcciones y a veces lo hacen en forma combinada. Por ello creí necesario hacer una determinación de los coeficientes de transferencia, no solo teniendo en cuenta la velocidad del aire, sino la forma de circulación del mismo y otros factores que acerquen los valores así determinados a la realidad de los equipos industriales, tales como presencia de otros cuerpos cercanos y las condiciones de superficie del cuerpo a congelar.

Del análisis de los resultados pude comprobar que los valores experimentales se encuentran en el mismo rango que los hallados por otros autores para sistemas ideales, aunque existen importantes diferencias según la forma de circulación del aire, así como también es distinto el comportamiento para el caso de

albóndigas que para hamburguesas. Otra conclusión es la dispersión de los resultados obtenidos en distintas experiencias debidas presumiblemente a la presencia de la cinta y a la no uniformidad de las superficies de las muestras, es probable que en los equipos comerciales exista una dispersión semejante.

Respecto del coeficiente de transferencia de masa, se calcularon los mismos como una función del  $Sh$  con el  $Re$  y con la temperatura y sentido de flujo de aire utilizando la analogía entre transferencia de calor y materia. Obviamente se obtuvieron relaciones  $Sh$  vs  $Re$  similares a las de los coeficientes de transferencia de calor y se observó que la influencia de la temperatura del aire sobre el valor de los coeficientes era muy baja.

La obtención de valores adecuados de las propiedades térmicas y la determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor permitieron predecir los tiempos de congelación en equipos de cinta y los mismos ser comparados con las determinaciones experimentales hechas en un equipo similar a los industriales.

Para dar amplitud al estudio se compararon un método numérico y seis métodos aproximados. Luego de evaluar los datos comprobé que el método numérico es el que da mayor exactitud y menor error promedio (-0,92%), menor error absoluto promedio (4,36%) y el mínimo rango de error. De los métodos aproximados el que dio mejores resultados fue el de Salvadori y Mascheroni (menor error promedio). El método de Pham fue similar en error promedio al de Arroyo y Mascheroni y a la regresión de Mascheroni (4,11%, 4,87% y 4,89% respectivamente), pero la desviación

estándar, el error absoluto y el rango de error fue menor en el primero que en los otros dos.

Los métodos de Cleland y Earle y la regresión de Cleland dieron un pésimo resultado para el juego de valores de Sanz pero ello se debe a que los mismos recomiendan utilizar otro juego de valores. A su vez, la evaluación de resultados utilizando los juegos de datos propuestos por Cleland y Earle dio, en general, valores pobres para los distintos métodos de predicción. Con esto se comprueba que la selección de propiedades térmicas es un factor clave en la exactitud de las predicciones de tiempos de congelación.

Podemos concluir este tema diciendo que los tiempos de congelación de albóndigas en congeladores de cinta pueden ser adecuadamente predichos usando métodos numéricos o aproximados teniendo en cuenta las condiciones de trabajo y los valores adecuados de propiedades del producto a congelar.

Como objetivo final de esta tesis se realizó el desarrollo y aplicación de modelos de predicción de transferencia de calor y materia al proceso de congelación de alimentos. A pesar de que el fenómeno principal durante la congelación es el de transferencia de calor con cambio de fase (cristalización del hielo), debemos tener en cuenta que ocurre simultáneamente una transferencia de materia debido a la pérdida por evaporación de agua líquida y principalmente por sublimación del hielo superficial durante la congelación y almacenamiento.

Un hecho relevante de los resultados predichos es que a medida que progresa la congelación, la forma de los perfiles de temperatura se distorsionan cerca de la superficie. Tal

distorsión es causada por la formación de una capa deshidratada que es consecuencia de la sublimación del hielo superficial. Esta capa tiene distintas propiedades térmicas y por lo tanto diferente capacidad calorífica y conductividad térmica que el resto del producto y por ello cambia la forma de los perfiles en dicha zona.

De los dos modelos probados (de iguales incrementos de espesor y de iguales incrementos de volumen), no se encontraron diferencias significativas en los resultados, pero se pudo ver que el uso del modelo de elementos de volumen constantes requirió mayor tiempo de máquina.

El modelo desarrollado (Apéndices 3 y 4), permite calcular perfiles de temperatura y composición, tiempos de congelación y pérdida de peso, siendo de muchísima utilidad para determinar previamente (por ejemplo en un análisis de costos de producción) los equipos a comprar o los gastos de funcionamiento de una planta. En el caso de equipos ya existentes también será muy útil para predecir que sucederá cuando se procesen nuevos productos y permitirá determinar las condiciones operativas más adecuadas para los mismos.

Con esto doy por finalizada la presentación de mi trabajo de tesis, creyendo que es un aporte importante para futuros cálculos de predicción de propiedades, cálculo de tiempos de congelación y determinaciones de pérdida de peso en equipos industriales, pudiendo contribuir a un mejor diseño y operación de los mismos.

## NOMENCLATURA

**VII.- NOMENCLATURA**

**A** area [cm<sup>2</sup>]

**ac** flujo perpendicular a la cinta con incidencia primero en la cinta

**B** base tiempo del DSC [min/cm]

**Bi** número de Biot ( $h D/K$ ) [adimensional]

**b** contenido de agua ligada ecuación (15)  
(masa de agua/masa total) [adimensional]

**C** concentración de agua en el medio [kg/m<sup>3</sup>]

**Ca** concentración de agua a la T del aire [kg/m<sup>3</sup>]

**Cp** capacidad calorífica aparente (incluye el calor sensible y el calor de fusión) [kJ/kg °C]

**C<sub>1</sub> C<sub>2</sub>** constantes en la definición de Q [adimensional]

**C<sub>3</sub> C<sub>4</sub> C<sub>5</sub>** constantes ecuación (72) [adimensional]

**D** diámetro [m]

**dc** flujo perpendicular a la cinta con incidencia primero en la muestra

**Δq<sub>s</sub>** sensibilidad del equipo [mV/cm]

**Δr** incremento en el radio

**Δt** incremento en el tiempo

**ΔT<sub>m</sub>** diferencia de temperatura media logarítmica [adimensional]

**Δx** incremento en la dirección axial

**ΔV** incremento en el volumen

**Dif** coeficiente de difusión [m<sup>2</sup>/s]

**E** coeficiente de calibración de la celda del DSC [mW/mV]

**F** constante de la ecuación (55) [adimensional]

**G** constante de la ecuación (55) [adimensional]

**H** entalpía [kJ/kg]

**H<sub>10</sub>** entalpía volumétrica entre -10°C y T<sub>f</sub> [kJ/m<sup>3</sup>]

**h** coeficiente de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup> °C]

**I** número de puntos en la dirección radial

**J** número de puntos en la dirección axial  
**K** conductividad térmica [W/m °C]  
**km** coeficiente de transferencia de materia [kg/m<sup>2</sup> s]  
**K<sub>1</sub>** constante ecuación (39) [W/m °C]  
**K<sub>2</sub>** constante ecuación (39) [W/m °C]  
**K<sub>3</sub>** constante ecuación (39) [W/m]  
**K<sub>4</sub>** constante ecuación (39) [W/m °C]  
**L** semiespesor del cilindro [m]  
**L<sub>f</sub>** calor latente de fusión de agua pura [kJ/kg]  
**L<sub>v</sub>** calor latente de sublimación de agua pura [kJ/kg]  
**M** peso molecular [g/gmol]  
**m** masa [mg]  
**Nu** número de Nusselt ( $h D/K_a$ ) [adimensional]  
**O** constante de ecuación 2 [adimensional]  
**pc** flujo paralelo a la cinta  
**Pk** número de Plank ( $\rho C_{p_u} (T_o - T_f)/H_{10}$ ) [adimensional]  
**P<sub>p1</sub>** constante ecuación (71)  
**Pr** número de Prandtl ( $C_{p_a} \mu_a/K_a$ ) [adimensional]  
**p<sub>v</sub>** presión de vapor  
**Q** variable de ecuación (72) [adimensional]  
**R** radio [m]  
**Re** número de Reynolds ( $v_a D \rho_a/\mu_a$ ) [adimensional]  
**R<sub>p1</sub>** constante ecuación (71)  
**S** constante de ecuación 3 [adimensional]  
**Sc** número de Schmidt ( $\mu/\rho Dif$ ) [adimensional]  
**Sh** número de Sherwood ( $D km/\rho Dif$ ) [adimensional]  
**Ste** número de Stefan ( $\rho C_{p_s} (T_f - T_a)/H_{10}$ ) [adimensional]  
**T** temperatura [°C]  
**T\*** temperatura adimensional ( $(T_c - T_a)/(T_o - T_a)$ )  
**t** tiempo [min]  
**V** volumen [m<sup>3</sup>]  
**v** velocidad [m/s]

**Wl** pérdida de peso porcentual [adimensional]

**w** contenido acuoso (calculado como %p/p) [adimensional]

**X<sup>v</sup>** fracción volumétrica [adimensional]

**X<sup>m</sup>** fracción másica [adimensional]

**Y** contenido de hielo

(masa de hielo/masa total de agua) [adimensional]

**Z** factor de corrección de la entalpía [adimensional]

### Símbolos griegos

**$\alpha$**  difusividad térmica [m<sup>2</sup>/s]

**$\rho$**  densidad [kg/m<sup>3</sup>]

**$\theta$**  [273,16/T<sub>a</sub>] [adimensional]

**$\mu$**  viscosidad [kg/m s]

### subíndices

**a** aire

**b** fibras

**c** centro térmico

**cf** cambio de fase

**d** deshidratado

**eff** efectivo

**f** fusión

**fi** final

**fm** valor medio del rango de congelación

**g** grasas

**h** carbohidratos

**hi** hielo

**i** componente radial  
**j** componente axial  
**L** dirección longitudinal  
**m** componente  
**nd** no deshidratado  
**o** inicial  
**p** proteínas  
**pre** preenfriamiento  
**pu** medido en un punto  
**r** dirección radial  
**s** sólido  
**sin** sin sublimación de hielo superficial  
**st** estándar  
**su** subenfriamiento  
**sub** con sublimación de hielo superficial  
**sup** superficie  
**T** total  
**u** no congelado  
**w** agua  
**z** cenizas

**supraíndices**

**n+1** evaluado al tiempo  $(n+1)\Delta t$   
**n** evaluado al tiempo  $n\Delta t$   
**v** volumétrico  
**w** másico  
**z** exponente ecuación (53)

## REFERENCIAS

**VIII.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- ARCE, J. Y SWEAT, V. (1980). Survey of published heat transfer coefficients encountered in food refrigeration processes. **ASHRAE Transactions** 86 (2), 235.
  
- ARROYO, J. Y MASCHERONI, R. (1990). A generalized method for the prediction of freezing times of regular or irregular foods. **Progress in the Science and Technology of Refrigeration in Food Engineering, International Institute of Refrigeration**, 643.
  
- BALLA, C., SARAY, T. Y MESZAROS, L. (1990). State of water in frozen foods studied by differential scanning calorimetry. **Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Vol. II**, 703.
  
- BAZAN, H. Y MASCHERONI, R. (1984). Transferencia de calor con simultáneo cambio de fase en la congelación de carnes ovinas deshuesadas. **Revista Latinoamericana de Transferencia de Calor y Materia**, 8, 55.
  
- BOLZ, R Y TUVE, G. (1980). **CRC Handbook of Tables for Applied Engineering Science**, 2<sup>nd</sup> edn, CRC Press, Boca Ratón, FL.
  
- BONACINA, C. Y COMINI, G. (1972). Calculation of convective heat transfer coefficient for time-temperature curves. **Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-1**, 157.
  
- CALLANAN, J. Y SULLIVAN, S. (1986). Development of standard operating procedures for differential scanning calorimeters. **Review Science Instrumental** 57, 2584.

- CHAU, K. Y GAFFNEY, J. (1990). A finite-difference model for heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration. *Journal of Food Science* 55, 484.
  
- CHAVARRIA, V. Y HELDMAN, D. (1984). Measurement of convective heat transfer coefficients during food freezing processes. *Journal of Food Science* 49, 810.
  
- CHOI, Y. Y OKOS, M. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications, Vol 1, Transport Phenomena. Elsevier App. Sci. Publishers, London, 93.*
  
- CLELAND, A. Y EARLE, R. (1976). A new method for prediction of surface heat transfer coefficient in freezing. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-1, 361.*
  
- CLELAND, A. Y EARLE, R. (1977). A comparison of analytical and numerical methods for predicting the freezing times of foods. *Journal of Food Science* 42, 1390.
  
- CLELAND, A. Y EARLE, R. (1982). Freezing time prediction for foods - a simplified procedure. *International Journal of Refrigeration* 5, 134.
  
- CLELAND, A., EARLE, R. Y CLELAND, D. (1982). The effect of freezing rate on the accuracy of numerical freezing calculations. *International Journal of Refrigeration* 5, 294.
  
- CLELAND, A. Y EARLE, R. (1984) (a). Freezing time predictions for different final product temperatures. *Journal of Food Science* 49, 1230.

- CLELAND, A. Y EARLE, R. (1984) (b). Assessment of freezing time prediction methods. *Journal of Food Science* 49, 1034.
  
- CLELAND, D., CLELAND, A., EARLE, R. Y BYRNE, S. (1986). Prediction of thawing times for foods of simple shape. *International Journal of Refrigeration*, 9, 220.
  
- CLELAND, D., CLELAND, A., EARLE, R. Y BYRNE S. (1987) (a). Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods. *International Journal of Refrigeration* 10, 32.
  
- CLELAND, D., CLELAND, A. Y EARLE, R. (1987) (b). Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae. Part 1: regular shapes. *International Journal of Refrigeration* 10, 156.
  
- CLELAND, D., CLELAND, A. Y EARLE, R. (1987) (c). Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae. Part 2: irregular shapes. *International Journal of Refrigeration* 10, 234.
  
- CLELAND, A. (1990). *Food refrigeration processes*. Elsevier Applied Science.
  
- COMINI, G. (1972). Design of transient experiments for measurement of convective heat transfer coefficients. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-1*, 169.
  
- DAUDIN, J. Y SWAIN, V. (1990). Heat and mass transfer in chilling and storage of meat. *Journal of Food Engineering* 12, 95.

- DELGADO, A., RUBIOLO, A. Y GRIBAUDO, L. (1990).  
Characteristic temperatures determination for strawberry freezing and thawing. *Journal of Food Processing and Preservation* 14, 231.
- DOMINGUEZ ALONSO, M., de ELVIRA, C. Y FUSTER, C. (1974).  
Influence of air velocity and temperature on the two-stage cooling of perishable large-sized products. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-3*, 83.
- DUPONT Company (1980). *Instruction manual 910 differential scanning calorimeter system (DSC)*.
- FELDMANN, C. (1979). Transfert de chaleur et de masse entre une sphere et de l'air a basse temperature -Application au calcul des equipements de congelation. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, II*, 411.
- FENNEMA, O. Y BERNY, L. (1974). Equilibrium vapor pressure and water activity of food at subfreezing temperatures. *Proc. IV International Congress Food Science & Technology, Madrid, Vol. II*. 27.
- FERNANDEZ-MARTIN, F. Y SANZ, P. (1979). Use of differential scanning calorimetry in the thermal characterization of meat. *XVth. International Congress of Refrigeration, II*, 309.
- FIKIIN, A. (1974). Sur les parametres thermophysiques des produits alimentaires congelés. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-3*, 173.
- FLEMING, A. (1969). Calorimetric properties of lamb and other

meats. *Journal of Food Technology* 4, 199.

- FLORES, E., BAZAN, H. Y MASCHERONI, R.H. (1987). Propiedades térmicas de carne de cordero. Conductividad térmica, entalpía y capacidad calorífica. *Actas de las XIV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada, II*, 433.

- FLORES, E. Y MASCHERONI, R. (1988). Determination of heat transfer coefficients for continuous belt freezers. *Journal of Food Science* 53, 1872.

- FULTON, G., BURFOOT, D., BAILEY C. Y JAMES, S. (1987). Predicting weight loss from unwrapped chilled meat in retail display. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration*, 555.

- GAC, A. Y LARBOUILLAT, J. (1962). Determination du coefficient global de transmission de chaleur des emballages en carton. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration XLII*, 881.

- GIAMBELLI, G. (1971). Valori del coefficiente liminare tra aria a bassa temperatura e pareti piane. *Il Freddo* 3, 7.

- GRUDA, S. Y POLTOVSKY, K. (1986). *Tecnología de la congelación de los alimentos*. Ed. Acribia, Barcelona, 204.

- HERMANS, F. (1979). *Thesis, University of Leven, The Netherlands*.

- JARVIS, H. (1971). The thermal variation of the density of beef

and the determination of its coefficient of cubical expansion. *Journal of Food Technology* 6, 383.

- KONG, J., IIBUCHI, S., MIYAWAKI, O. Y YANO, T. (1982). Analysis and prediction of the effective thermal conductivities of meats. *Agricultural and Biological Chemistry* 46, 1235.

- KOPELMAN, I., BORRERO, C. Y PFLUG, I. (1976). Evaluation of surface film heat transfer coefficients using transient method. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, II*, 291.

- KUSUDA, T. (1965). Calculation of the temperature of a flat-plate wet surface under adiabatic conditions with respect to the Lewis relation. *Humidity and Moisture, Vol. I, Principles and methods of measuring humidity in gases*. R. E. Leinhold Pub., N.Y.

- LEITMAN, J. (1967). Thermal conductivity of nondehydrated meats by current investigation. *M.S. Thesis. Georgia Institute of Technology*.

- LENTZ, C. (1961). Thermal conductivity of meats, fats, gelatin and gels. *Food Technology* 15, 243.

- LEVY, F. (1977). Calculating time-temperature and weight loss diagrams of chilling and freezing meat. *Freezing, frozen storage and freeze-drying of biological materials and foodstuffs. International Institute of Refrigeration*, 325.

- LOVRIC, T., PILIZOTA, V. Y JANEKOVIC, A. (1987). DSC study of the thermophysical properties of aqueous liquid and semi-liquid foodstuffs at freezing temperatures. *Journal of Food Science* 52, 772.

52, 772.

- MANNAPPERUMA, J. Y SINGH, R. (1988). Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy formulation. *Journal of Food Science* 53, 626.
- MASCHERONI, R. (1977). Transferencia de calor con simultáneo cambio de fase en tejidos cárneos. *Tesis doctoral en la Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional de La Plata, Argentina.*
- MASCHERONI, R. Y CALVELO, A. (1980). Relationship between heat transfer parameters and the characteristic damage variables for the freezing of beef. *Meat Science* 4, 267.
- MASCHERONI, R. (1982). The utilization of numerical methods for the solution of the heat balance during the thawing of meat blocks under industrial conditions. *Latinamerican Journal Heat and Mass Transfer*, 6, 13.
- MELLOR, J. (1978). Thermophysical properties of foodstuffs, 2. Theoretical aspects, *Bulletin of the International Institute of Refrigeration LVIII*, 569.
- MELLOR, J. (1979). Thermophysical properties of foodstuffs, 3.- Measurements. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration LIX*, 551.
- MELLOR, J. (1983). Critical evaluation of thermophysical properties of foodstuffs and outline of future development. *Physical Properties of Foods, Applied Science Publishers*, 331.
- MILES, C. (1982). Heat transfer at the air/meat interface.

U.K.

- MILES, C., van BEEK, G. Y VEERKAMP, C. (1983). Calculation of thermophysical properties of foods. *Physical properties of foods, Applied Science Pub., New York, 269.*
- MOHSENIN, N. (1980). Thermal properties of foods and agricultural materials. *Gordon and Breach Publishers, New York.*
- MORGAN, V. (1975). The overall convective heat transfer coefficient from smooth circular cylinders. *Advances in Heat Transfer 11, 199.*
- MORLEY, M. (1966). Thermal conductivities of muscles, fats and bones. *Journal of Food Technology 1, 303.*
- MORLEY, M. (1972). Thermal properties of meats. Tabulated data. *Meat Research Institute Special Report No 1. Langford, Meat Research Institute.*
- MORLEY, M. Y FURSEY, G. (1988). The apparent specific heat and enthalpy of fatty tissue. *International Journal of Food Science and Technology 27, 467.*
- OHLSSON, T. (1983). The measurement of thermal properties. *Physical properties of foods. Applied Science Pub, New York. 313.*
- PARDUCCI, L. Y DUCKWORTH, R. (1972). Differential thermal analysis of frozen food systems II. Micro-scale studies on egg white, cod and celery. *Journal of Food Technology 7, 423.*

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- PERRY, R. Y CHILTON, C. (1985). *Chemical Engineers' Handbook*. Mc. Graw Hill Kogakuska, Ltd.
  
- PHAM, Q. (1984). Extension of Plank's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes. *International Journal of Refrigeration* 7, 377.
  
- PHAM, Q. Y WILLIX, J. (1984). A model for food desiccation in frozen storage. *Journal of Food Science* 49, 1275.
  
- PHAM, Q. (1985). A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28, 2079.
  
- PHAM, Q. Y WILLIX, J. (1987). Heat transfer coefficients in the air-blast freezing of rows of cartons. *Proceedings of the XVII International Congress of Refrigeration*, B: 350.
  
- PHAM, Q. Y WILLIX, J. (1989). Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range -40 to +30 °C: Measurements and correlations. *Journal of Food Science* 54, 508.
  
- PHAM, Q., WEE, H., KEMP, R. Y LINDSAY, D. (1994). Determination of the enthalpy of foods by an adiabatic calorimeter. *Journal of Food Engineering* 21, 137.
  
- POLLEY, S., SNYDER, O. Y KOTNOUR, P. (1980). A compilation of thermal properties of foods. *Food Technology* 34 (11), 76.
  
- PURWADARIA, H. Y HELDMAN, D. (1982). A finite element model for prediction of freezing rates in food products with anomalous

shapes. *Transactions of the ASAE* 25, 827.

- RADFORD, R., HERBERT, L. Y LOVATT, D. (1976). Chilling of meat- A mathematical model for heat and mass transfer. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Annexe-1*, 323.

- RAITHBY, G. Y ECKERT, E. (1968). The effect of turbulence parameters and support position on the heat transfer from spheres. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 11, 1233.

- RAMASWAMY, H. Y TUNG, A. (1981). Thermophysical properties of apples in relation to freezing. *Journal of Food Science* 46, 724.

- RAMASWAMY, H. Y TUNG, M. (1984). A review on predicting freezing times of foods. *Journal of Food Process Engineering* 7, 169.

- REBELLATO, L., DEL GIUDICE, S. Y COMINI, G. (1978). Finite element analysis of freezing processes in foodstuffs. *Journal of Food Science* 43, 239.

- RIEDEL, L. (1950). Der Kaltebedarf beim Gefrieren von Obst und Gemuse. *Kaltetechnik* 2, 195.

- RIEDEL, L. (1960). Eine Prufsubstanz fur Gefrierversuche *Kaltetechnik* 12, 222.

- ROOS, Y. (1986). Phase transitions and unfreezable water content of carrots, reindeer meat and white bread studied using differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science* 51,

684.

- RUBIOLO, A. Y SCHWARTZBERG, H. (1986). Coefficients for air-to-solid heat transfer for uniformly spaced arrays of rectangular foods. *Food Engineering and Process Applications 1. Transport Phenomena. Le Maguer y Jelen (Eds.)*, 273.
  
- SALVADORI, V. Y MASCHERONI, R. (1991). Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *Journal of Food Engineering 13*, 67.
  
- SANZ, P., DOMINGUEZ ALONSO, M. Y MASCHERONI, R. (1987). Thermophysical properties of meat products: General bibliography and experimental values. *Transactions of the ASAE 30*, 283.
  
- SANZ, P., DOMINGUEZ ALONSO, M. Y MASCHERONI, R. (1989). Equations for the prediction of thermophysical properties of meat products. *Latinamerican Applied Reserch 19*, 155.
  
- SCHWARTZBERG, H. (1976). Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *Journal of Food Science 41*, 152.
  
- SCHWARTZBERG, H. (1977). Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *Freezing, frozen storage and freeze-drying. International Institute of Refrigeration, Karlsruhe*, 303.
  
- SHERWOOD, T., PIGFORD, R. Y WILKE, C. (1975). *Mass Transfer, Mc Graw Hill Kogakusha, Tokio*.
  
- SORENFORS, P. (1974). Determination of the thermal conductivity of minced meat. *Lebensmittel Wissenschaft u Technologie 7*, 236.

- SUCCAR, J. Y HAYAKAWA, K. (1983). Empirical formulae for predicting thermal physical properties of food at freezing or defrosting temperatures. *Lebensmittel, Wissenschaft u Technologie* 16, 326.
- SWEAT, V., HAUGH, C. Y STADELMAN, W. (1973). Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between -75 and 20 °C. *Journal of Food Science* 38, 158.
- SWEAT, V. (1975). Modelling the thermal conductivity of meats. *Transactions of the ASAE* 18, 564.
- SWEAT, V. (1985). Thermal properties of low- and intermediate-moisture food. *ASHRAE Transactions* 91 (2B), 369.
- WEAST, R. (1975). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 56<sup>th</sup> ed. CRC Press, Boca Ratón, FL.

## APENDICES

## APENDICE 1

**CALCULA LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA DE ALBONDIGAS A PARTIR DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

```
Implicit real*8(a-h,o-z)
dimension tn(51),con(51),tna(51),cona(51),densc(51),
xcapcc(51),difusc(51),condc(51),pdud(51),
xpres1(51)
open(6,file='lpt1')
write(*,'('' INGRESE LOS VALORES ta '')')
read(*,*)ta
ac=1.0
dt=0.
dr=0.0019
d=0.038
6 ta=ta-5.
visca=1.458E-6*(ta**1.5)/(ta+110.4)
z=10.79586*(1.-(273.16/ta))
y=5.02808*log10(273.16/ta)
w=(1.50474E-4)*(1.-(10.**(-8.29692*((ta/273.16)-1.))))
u=(0.42873E-3)*(10.** (4.76955*(1.-(273.16/ta)))-1.)
x-2.2195983
presva=0.9*(10.** (z+y+w+u))*760.
densa=1.2929*(273.13/ta)*((760.-.3783*presva)/760.)
difusa=(1.4047E-9)*(ta**1.75)
capca=(7.0771+(0.5329E-3)*ta+(0.1027E-6)*
x(ta**2.)-(0.3942E5/(ta**2.)))*144.94
conda=(6.325E-7*(ta**1.5)/(ta+(245.4*
x(10.**(-12./ta)))))*4183.
schmit=visca/(densa*difusa)
prandl=capca*visca/conda
rel1=(prandl/schmit)**(2./3.)
rel2=(1/(densa*capca))*rel1
pres2=presva/760.
do40j=1,3
do40iv=1,7,1
v=iv
v=-0.5+1.5*v
dir=j
re=d*densa*v/visca
if(j.ne.1)goto60
a=0.148
b=0.643
goto70
60 if(j.eq.3)goto80
a=0.479
b=0.534
goto70
80 a=0.412
b=0.524
70 uselt=a*(re**b)
coefih=uselt*conda/d
coefik=coefih*rel2
coefkr=(219.5*coefik/ta)*9.8692E-6
```

```
write(6, '( ' ta='',f6.2,' ' dir='',F3.1,' ' v='',F4.1,' '
xRe='',f8.2,' ' coefih='',F5.2,' ' coefik='',f7.5,' '
coefkr='',E10.4)')ta,dir,v,Re,coefih,coefik,coefkr
40 continue
if(ta.ge.243.)goto6
stop
end
```

## APENDICE 1'

**CALCULA LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA DE HAMBURGUESAS A PARTIR DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

```
Implicit real*8(a-h,o-z)
dimension tn(51),con(51),tna(51),cona(51),densc(51),
xcapcc(51),difusc(51),condc(51),pdud(51),pres1(51)
open(6,file='lpt1')
write(*,'('' INGRESE LOS VALORES ta '')')
read(*,*)ta
ac=1.0
dt=0.
dr=0.0010
d=0.10
6 ta=ta-5.
visca=1.458E-6*(ta**1.5)/(ta+110.4)
z=10.79586*(1.-(273.16/ta))
y=5.02808*log10(273.16/ta)
w=(1.50474E-4)*(1.-(10.**(-8.29692*((ta/273.16)-1.))))
u=(0.42873E-3)*(10.**((4.76955*(1.-(273.16/ta)))-1.))
x=2.2195983
presva=0.9*(10.**((z+y+w+u)))*760.
densa=1.2929*(273.13/ta)*((760.-.3783*presva)/760.)
difusa=(1.4047E-9)*(ta**1.75)
capca=(7.0771+(0.5329E-3)*ta+(0.1027E-6)*(ta**2.))-
x(0.3942E5/ta**2.))*144.94
conda=(6.325E-7*(ta**1.5)/(ta+(245.4*(10.**(-12./ta))))))
x*4183.
schmit=visca/(densa*difusa)
prandl=capca*visca/conda
```

```

rel1=(prandl/schmit)**(2./3.)
rel2=(1/(densa*capca))*rel1
pres2=presva/760.
do40j=1,3
do40iv=1,7,1
v=iv
v=-0.5+1.5*v
dir=j
re=d*densa*v/visca
if(j.ne.1)goto60
a=7.891
b=0.328
goto70
60 if(j.eq.3)goto80
a=4.190
b=0.355
goto70
80 a=0.326
b=0.640
70 uselt=a*(re**b)
coefih=uselt*conda/d
coefik=coefih*rel2
coefkr=(219.5*coefik/ta)*9.8692E-6
write(6,('( ta='',f6.2,' dir='',F3.1,'
xv='',F4.1,' re='',f8.2,' coefih='',F5.2,'
coefik='',f7.5,' coefkr='',E10.4)')ta,dir,v,
xre,coefih,coefik,coefkr
40 continue
if(ta.ge.243.)goto6
stop
end

```

## APENDICE 2

```
dimension hcom(100),Tcom3(100),Tcom4(100),Tcom5(100)
real*4 lc,k
open(3,file='a:datos.',status='new')
write(*,'('' INGRESE long.car. fac de forma '',,$)')
read(*,*)lc,ff
write(*,'('' FACTOR DE FORMA = '',f8.4)')ff
write(*,'('' INGRESE AHORA :''')')
write(*,'('' Ó k %H2O ''')')
read(*,*)alfa,k,prom2
write(*,'('' CUANTOS VALORES DE H DESEA CALCULAR
?'',,$)')
read(*,*)iache
do 245 iach=1,iache
write(*,'('' Ingrese el valor del h No.'',i2,'''
'',,$)')iach
read(*,*)hcom(iach)
245 continue
write(*,'('' CUANTAS TEMPERATURAS DE REFRIGERANTE
?'',,$)')
read(*,*)iTmed
do 246 iTm=1,iTmed
write(*,'('' Ingrese Tmedio No.'',i2,''' '',,$)')iTm
read(*,*)Tcom3(iTm)
246 continue
write(*,'('' CUANTAS TEMPERATURAS INICIALES ?''',,$)')
read(*,*)iTmid
do 247 iTi=1,iTmid
write(*,'('' Ingrese Tinicial No.'',i2,''' '',,$)')iTi
read(*,*)Tcom4(iTi)
247 continue
```

```

write(*,'('' CUANTAS TEMPERATURAS EN EL CENTRO
?'', $)')
read(*,*)iTced
do 248 iTc=1,iTced
write(*,'('' Ingrese Tcentro No.'',i2,'' '' , $)')iTc
read(*,*)Tcom5(iTc)
248 continue
write(3,'('' _____ ''))
write(3,'('' | Tinic| Tmed| Tct| t(min)| h(si)| ''))
do 1 ipri=1,iache
do 1 isec=1,iTmed
do 1 iter=1,iTmid
do 1 icua=1,iTced
h=hcom(ipri)
T3=Tcom3(isec)
T1=Tcom4(iter)
T2=Tcom5(icua)
biot=h*lc/k
Trc=(1-prom2)/(0.06990824-(0.439277*prom2))
ECUACION DE CALCULO DEL FACTOR C
fcal=.46383+(T2/(-61.8501))
deltaT=(T1-T3)
Tadim=(T2-T3)/deltaT
Tu=(T2-T3)/log((T2/T3))
if(Tu.ge.Trc) ftem=10
Cpf=1447+2736*prom2
Hf=11884+373735*prom2+(1447+2736*prom2)*(T1-Trc)
if(ftem.eq.0.0)go to 333
Hc=11884+373735*prom2+(1447+2736*prom2)*(Tu-Trc)
go to 300
333 Thum=(2.7013/Tu)*((1-prom2)/prom2)
prom3=1.1866-(0.1866/prom2)+Thum
Hcc=3870*Tu-2532*prom2*Tu-902138*((1-prom2)/Tu)+76100

```

```

Hc=Hcc-22553*prom2
Hc=Hc+(333960*prom2*prom3)*
(.46383+((T2-Trc)/(-61.8501)))
300 Cadim=(( Hf - Hc)/(Cpf * deltaT))
fact=log(Tadim)/(Tadim-1.)
tc=ff*((lc**2.)/alfa)*(1.7332/biot+.32)*Cadim*fact
tc=tc/60.
write(3,'(1x,5f8.2)')T1,T3,T2,tc,h
write(*,*)lc,ff,alfa,k,prom2,h,t2,t3,t1,hc,hf,cadim,tc
1 continue
stop
end

```

### APENDICE 3

CALCULA PERDIDA DE PESO EN LA CONGELACION DE ALBONDIGAS A PARTIR DE VALORES CONOCIDOS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

```
Implicit real*8(a-h,o-z)
dimension tn(51),con(51),tna(51),cona(51),densc(51),
xcapcc(51),difusc(51),condc(51),pdud(51),pres1(51)
open(6,file='lpt1')
write(*,'('' INGRESE LOS VALORES ta, det '''))
read(*,*)ta, det
ac=1.0
dt=0.
dr=0.0019
d=0.038
6 ta=ta^T5.
visca=1.458E-6*(ta**1.5)/(ta+110.4)
z=10.79586*(1.-(273.16/ta))
y=5.02808*log10(273.16/ta)
w=(1.50474E-4)*(1.-(10.**(-8.29692*((ta/273.16)-1.))))
u=(0.42873E-3)*(10.** (4.76955*(1.-(273.16/ta)))-1.)
x-2.2195983
presva=0.8*(10.** (z+y+w+u))*760.
densa=1.2929*(273.13/ta)*((760.-.3783*presva)/760.)
difusa=(1.4047E-9)*(ta**1.75)
capca=(7.0771+(0.5329E-3)*ta+(0.1027E-6)*(ta**2.)
x-(0.3942E5/ta**2.)))*144.94
conda=(6.325E-7*(ta**1.5)/(t-+(245.4*(10.**
x(-12./ta)))))*4183.
schmit=visca/(densa*difusa)
prandl=capca*visca/conda
```

```

rel1=(prandl/schmit)**(2./3.)
rel2=(1/(densa*capca))*rel1
h1=10.79586*(1.-(273.16/ ta ))
o1=5.02808 * log10( 273.16/ ta )
p1=1.50474E-4*(1.-(10.** (0.-8.26692*((1./(273.16/ ta
x)-1.))))))
q1=0.42873E-3*((10.** (4.76955*(1.-(273.16/ta 1.))-2.2195983
pres2=0.8*(10.** (h1+o1+p1+q1))
do40j=1,3
do40iv=1,4,1
do345in=1,11
tn(in)=278.16
pdud(in)=273.16/tn(in)
con(in)=719.8
345 continue
v=iv
v=-0.5+1.5*v
direct=j
reynol=d*densa*v/visca
write(6,(' ' reynol='',e10.4)')reynol
if(j.ne.1)goto60
a=0.148
b=0.643
goto70
60 if(j.eq.3)goto80
a=0.479
b=0.534
goto70
80 a=0.412
b=0.524
70 uselt=a*(reynol**b)
write(6,(' ' uselt='',f5.2)')uselt
coefih=uselt*conda/d

```

```

coefik=coefih*rel2
coefkr=219.51*coefik/ta
write(6,('' direct='',F3.1,'' v='',F6.1,''
xcoefih='',E10.4,'' coe
xfik='',E10.4,''
coefkr='',E10.4)')direct,v,coefih,coefik,coefkr
84 do 30 I=1,11
clt=2.25E6
if(tn(I).ge.272.1)goto1
densc(I)=(1053./(1.0659+(0.06694/(tn(I)-273.16))))
capcc(I)=(1.9988+234.75/((tn(I)-273.16)**2))*1000.
condc(I)=(1.3962+(0.930/(tn(I)-273.16)))
difusc(I)=(1.075E-5*(1./exp(6.5E3/(1.98*tn(I))))))
pres1(I)=10.**((0.-9.096936*((273.16/tn(I)
x)-1.))- (3.56654*log10(pdud(I)))+(0.876817*
x(1.-1./(273.16/tn(I)))-2.219598))
ac=i-1
goto31
1 densc(I)=972.73
capcc(I)=3474.9
condc(I)=(0.4573+3.738E-4*(tn(I)-273.16))
difusc(I)=8.5E-8*(1.0/exp(2300./tn(I)))
pres1(I)=0.99*(10.**((10.79586*(1.-(273.16/tn(I)
x)))+(5.02808*
xlog10(273.16/tn(I)
x)))+(1.50474E-4*(1.-(10.**((0.-8.26692*
x((1./x(pdud(I))-1.)))))))+(0.42873E-3*
x((10.**((4.76955*(1.-(273.16/tn(I))
x))-1.))-2.2195983))))
ac=i-1
31 if(I.eq.1) goto 17
if(I.eq.11) goto 19
tna(I)=tn(I)+(dt/(densc(I)*capcc(I)*dr**2))*

```

```

x((condc(I)/ac)*(tn(I+
x1)-tn(I-1))+(1./4.)*(condc(I+1)-condc(I-1))*
x(tn(I+1)-tn(I-1))+cond
xc(I)*(tn(I+1)-2.*tn(I)+tn(I-1)))
cona(I)=con(I)+(difusc(I)*dt/dr**2)*((1./ac)*
x(con(I+1)-con(I-1))
x+con(I+1)-2*con(I)+con(I-1))
goto30
17 tna(I)=tn(I)+(6.*dt/dr**2)*(condc(I)/(densc(I)*
xcapcc(I)))*(tn(I+1)
x-tn(I))
cona(I)=con(I)+(6.*difusc(I)*dt/dr**2)*(con(I+1)-con(I))
write(6,'(x,f6.3,F7.2,F6.1,$)')dt,tna(1),cona(1)
goto30
19 tn(12)=tn(10)-(2.*dr*coefih*(tn(11)-ta)/condc(11))
x-(2.*dr*coefkr*(pres1(11)-pres2)*clt/condc(11))
con(12)=con(10)-(2*dr*coefkr*(pres1(11)-pres2)/
xdifusc(11))
if(tn(12).ge.272.1)goto22
condc(12)=1.3962+(0.930/(tn(12)-273.16))
goto21
22 condc(12)=0.4573+(3.738E-4*(tn(12)-273.16))
21 continue
tna(I)=tn(I)+(dt/(densc(I)*capcc(I)*(dr**2)))*
x((coefih*(-2.)*dr*x(tn(I)-ta)/ac)-(dr*(2.)*
xclt*coefkr*(pres1(I)-pres2)/ac)+((1./4.)*
x(condc(I+1)-condc(I-1))*((-2.)*dr*coefih*
x(tn(I)-ta)/condc(I))-(2.*dr*coefkr*clt*(pres1(I)-
xpres2)/condc(I)))+(2.*tn(I-1)*condc(I))
x-(2.*tn(I)*condc(I))-(2.*dr*coefih*(tn(I)-ta))-
x(2.*dr*clt*coefkr*(pres1(I)-pres2)))
cona(I)=con(I)-((2.*dt*coefkr*(pres1(I)-pres2))/(ac*dr))
x+(2.*difusc(I)*dt*(con(I-1)-con(I))/(dr**2))-

```

```

        x(2.*dt*coefkr*(pres1(I)
        x-pres2)/dr)
30  continue
    DT=DT+DET
    do 3456 I=1,11
        tn(I)=tna(I)
        pdud(I)=( 273.16/ tn(I) )
3456 con(I)=cona(I)
        if(tna(1).ge.255.16)goto84
        write(6,' (/)')
        dt=0.
40  continue
        if(ta.ge.243.)goto6
        stop
    end

```

#### APENDICE 4

```
10 LPRINT CHR$(18)
20 WIDTH "LPT1:",132
30 LPRINT"  CALCULA PERFILES DE TEMPERATURA Y TIEMPOS DE
  CONGELACION
  PARA ALIMENTOS ":LPRINT" CON GEOMETRIA DE ESFERA"
40 LPRINT"  UTILIZA UN METODO EXPLICITO PARA
  RESOLVER LAS ECUACIONES DIFERENCIALES":LPRINT"
  UTILIZA GRILLA NO CENTRADA CON ELEMENTOS DE VOLUMEN
  IGUALES"
50 LPRINT:LPRINT"  UTILIZA PROPIEDADES TERMICAS DE
  CARNE CON 74% DE AGUA"
60 LPRINT"LA ECUACION DE CONDUCTIVIDAD VALE PARA FLUJO
  ";CHR$(193);"  A LAS FIBRAS O PARA CARNE
  PICADA":LPRINT"SI SE QUIERE CAMBIAR DE
  PRODUCTO MODIFICAR LAS SENTENCIAS 230, 470, 480 Y
  500":LPRINT: LPRINT
70 LPRINT" SE RECOMIENDA UTILIZAR NUMERO TOTAL DE PUNTOS
  NV+2= 16 o 31 o 46":LPRINT" EN CASO DE EMPLEARSE UN
  NV DISTINTO MODIFICAR LAS ORDENES DE
  IMPRESION":LPRINT:LPRINT
80 DEFINT I-N: DEFDBL A-H,O-Z
90 DIM TA(51),T(50),CONDA(51),RCPINV(50),CA(51),
  C(50),DIFUSC(51), DR(51),AR(51),R(51)
100 INPUT "RADIO (m):",RADIO
110 INPUT "NUMERO DE ELEMENTOS DE VOLUMEN:",NV
120 INPUT "TEMPERATURA INICIAL Ti:",TI
130 INPUT "COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA CALORICA (W/m2
  K):",H
135 INPUT "COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA Cam
  (m/s):",CAM
```

```

INPUT "FRACCION DE AGUA NO CONGELABLE FRACCI:",FRACCI
INPUT "RELACION ENTRE Deff Y Dav RELACI:",RELACI
140 INPUT "TEMPERATURA DEL MEDIO REFRIGERANTE Tf
      (°C) :",TF
142 INPUT "PRESION DE VAPOR DEL HIELO A Tf Y CON HR=100%
      Pres2 (Atm) :",PRES2
150 INPUT "INTERVALO DE TIEMPO (s), Dt:",DT
160 INPUT "CADA CUANTO TIEMPO EN s IMPRIME:",DI
170 INPUT "QUE TEMPERATURA SE DESEA ALCANZAR EN EL
      CENTRO, Tfinal (°C) :",TFINAL
180 PI=3.1415926#: DV=1.333333333#PI*RADIO^3/NV:
      AREA=4#*PI*RADIO^2
190 NVMA1=NV+1: NVMA2=NV+2: R(1)=RADIO: R(NVMA2)=0#
192 FOR I=2 TO NVMA1
194 R(I)=(1#+(1.5#-I)/NV)^.3333333333#*RADIO:
      AR(I-1)=4#*PI*R(I-1)*R(I): DR(I-1)=R(I-1)-R(I):
      DHAGUA=2250000!
196 NEXT I
198 DR(NVMA)=R(NVMA1)
200 NC=0
205 NOSC=0
210 NIMP=DI/DT+.1
211 FACMUL=(R(NV-2)*R(NV-1)*R(NV)*R(NVMA1))^2
212 F=-R(NV-2)^2*(R(NV-2)-R(NV-1))*(R(NV-2M-R(NV))*
      (R(NV-2)-R(NVMA1))*(R(NV-2)+R(NVMA1))*(R(NV-2)+
      R(NV))*(R(NV-2)+R(NV-1)): FACTO=1#/F
213 F=-R(NV-1)^2*(R(NV-1)-R(NV-2))*(R(NV-1)-
      R(NV))*(R(NV-1)-R(NVMA1))*(R(NV-1)+R(NVMA1))*(R(NV-1)+
      R(NV))*(R(NV-1)+R(NV-2)): FACT1=1#/F
214 F=-R(NV)^2*(R(NV)-R(NV-2))*(R(NV)-
      R(NV-1))*(R(NV)-R(NVMA1))*
      (R(NV)+R(NVMA1))*(R(NV)+R(NV-1))*(R(NV)+
      R(NV-2)): FACT2=1#/F

```

```

215 F=-R(NVMA1)^2*(R(NVMA1)-R(NV-2))*(R(NVMA1)-R(NV-1))
      *(R(NVMA1)-R(NV))*(R(NVMA1)+R(NV))*(R(NVMA1)+
      R(NV-1))*(R(NVMA1)+R(NV-2)): FACT3=1#/F
220 DTDV=DT/DV: H)S=H*AREA: HASTF=HAS*TF:
      AR1DR1=AR(1)/DR(1):B6=DTDV*AR(NV)/DR(NV)
230 TCR=-1.015617#: TAD=273.16/(273.16+TCR):'
      TEMPERATURA DE CONGELACION PARA CARNE CON 74% DE AGUA
240 'CALCULA LAS TEMPERATURAS Y HUMEDADES INICIALES
245 AGUAO=719.8202*PI*RADIO^3*1.333333333333#: AGUAPE=0!:
      AGUAP1=0!: DELTA=0: corr=0: CONST1=H/.06#:
      CONST2=CAM*273.16^1.75/(.000021*RELACI)
250 FOR I=1 TO NVMA2
260 T(I)=TI
270 NEXT
280 CTPER=CAM*219.51/(TF+273.16):CTT=CAM*2250000!:
      CONC2=219.51* PRES2/(273.16+TF):
      ASCTPE=AREA*CTPEA:ASCAM+AREA*CAM: ASCACI=
      ASCAM/719.8202: CAMDT=CAM*DT: CADTCI=CAMDT/719.8202:'

      CONDICIONES DE CONTORNO EN LA SUPERFICIE
285 CTPECO=CTPER/719.8202:' Estas constantes tienen en
      cuenta la disminucion del area efectiva para la
      transferencia
310 LPRINT "          RADIO: R=";R;"m"
320 LPRINT"          TEMPERATURA INICRAL Ti=";TI;"(C)
      TEMPERATURA DEL MEDIO REFRIGERANTE Tf=";TF;"(C)"
330 LPRINT "          COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA CALORICA
      H=";H;"W/m^2K"
      NUMERO DE ELEMENTOS DE VOLUMEN NV=";NV
335 LPRINT"          COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA
      Cam=";CAM;
      "m/s": LPRINT"          PRESION DE VAPOR DEL HIELO EN EL AIRE
      Pres2=";PRES2;"(Atm)" LPRINT"          FRACCION DE AGUA NO

```

```

CONGELABLE
FRACCI=";FRACCI;" RELACION Deff/Dav RELACI=";RELACI
340 LPRINT"INTERVALO DE TIEMPO Dt=";DT;"s TEMPERATURA
FINAL EN EL CENTRO Tfinal=";TFINAL;"(C)"
350 LPRINT: LPRINT: LPRINT " VALORES DE LAS TEMPERATURAS"
360 LPRINT CHR$(15)
361 LPRINT "r(cm)/R(1)";:NN=NVMA1/15
362 FOR I=NN+1 TO NVMA2 STEP NN
363 LPRINT USING "r(##)";I;
364 NEXT
365 LPRINT " ";
366 FOR I=1 TO NVMA2 STEP NN
367 LPRINT USING"##.#####";100*R(I);
368 NEXT I
370 LPRINT " t(m) T(1) ";
380 FOR I=NN+1 TO NVMA2 STEP NN
390 LPRINT USING " T(##) ";I;
400 NEXT
410 TIEMPO=0: TBORDE=T(1)
420 ' CALCULA PARA CADA INTERVALO DE TIEMPO
430 TIEMPO=TIEMPO+DT: NC=NC+1
440 ' CALCULA TEMPERATURAS Y PROPIEDADES DEL TIEMPO
ANTERIOR TBORD=TBORDE
450 FOR I=1 TO NVMA1
460 TA(I)=T(I): CA(I)=C(I): TM=(T(I)+T(I+1))* .5#
470 CONDA(I)=.45734#+.000373848#*TM: IF TM<TCR THEN
CONDA(I)= 1.36924#+.93#/TM: ' CALCULA LA CONDUCTIVIDAD
TERMICA
475 DIFUSC (I)=8.500001E-08*EXP(-2300/(273.16+TM)): IF
TM<TCR THEN
DIFUSC(I)=1.075E-05*EXP(-3282.828/(273.16+TM))
480 RCPINV(I)=.000000307064377#: IF TA(I)<TCR THEN
RCPINV(I)=

```

```

(1.068812#+.06183683#/TA(I))/(1944331.63#
+228350488#/TA(I)^2):'
  CALCULA LA INVERSA DE Cp*Rho VALE SOLO PARA
  Rho=972.73 CAMBIARLA PARA OTRO Rho
490 NEXT
495 TT=273.16/(TA(1)+273.16):
  PRES1=10^(-9.096936*(TT-1)-1.548929*
  LOG(TT)+.876817*(1-1/TT)-2.2195983):IF TT<=TAD THEN
  PRES1=.99*10^0.79586*(1-TT)+2.183667*LOG(TT)
  +1.5047E-04*(1-10^(-8.29692*(1/TT-1)))+
  4.2873E-04*(10^(4.76955*(1-TT))-1)-2.2195983#)
510 ' CALCULA PARA EL NUEVO INTERVALO DE TIEMPO
530 FOR I=2 TO NV
540 A=DTDV*RCPINV(I): B1=CONDA(I-1)*AR(I-1)/DR(I-1):
  B2=CONDA(I)*AR(I)/DR(I)
550 T(I)=TA(I)*(1#-A*(B1+B2))+A*(B1*TA(I-1)+B2*TA(I+1))
555 B3=DIFUSC(I-1)*AR(I-1)/DR(I-1):
  B4=DIFUSC(I)*AR(I)/DR(I):
  C(I)=CA(I)*(1#-DTDV*(B3+B4))+DTDV*(B3*CA(I-1)+
  B4*CA(I+1))
560 NEXT
561 IF TABORD <TCR THEN DHAGUA=2823333.3#:
  CORR1=1/(1+DELTA*
  CONST2/(273.16+TA(1))^1.75): CORR=1.2548148*CORR1
562 CONC1=PRES1*219.512/(T(1)+273.16):
  T(1)=(CONDA(1)*AR1DR1*TA(2)
  +HASTF/(1+DELTA*CONST1)-ASCAM*DHAGUA*
  CORR*(CONC1-CONC2))/(CONDA(1)
  *AR1DR1+HAS/(1+DELTA*CONST1))
563 C(1)=CA(2)-ASCAM*CORR1*(CONC1-CONC2)/(DIFUSC(1)*AR1DR1
  +ASCAM*CORR1
564 I=NVMA1: B5=B6*CONDA(NV)*RCPINV(I):
  T(I)=TA(I)*(1#-B5)+B5*TA(NV):

```

```

C(I) = CA(I) * (1# - B6 * DIFUSC(NV)) + B6 * DIFUSC(NV) * CA(NV)
565 T(NVMA2) = FACMUL * (T(NV-2) * FACTO + T(NV-1) *
FACT1 + (NV) * FACT2 + T(NVMA1) * FACT3)
566 IF T(NVMA2) < T(NVMA1) THEN T(NVMA2) = T(NVMA1)
568 C(NVMA2) = FACMUL * (C(NV-2) * FACTO + C(NV-1) * FACT1
+C(NV) * FACT2 + C(NVMA1) * FACT3) TBORDE = T(1) :
IF TABORD >= TCR THEN 569
AGUAP1 = AGUAP1 + ASCAM * CORR1 * (CONC1 - CONC2) * DT
DELTA = RADIO * (1 - (1 - AGUAP1 / (AGUA0 * (1 - FRACCI))) ^
.3333333333333333) : TBORDE = (DELTA * CONCT1 * Tf +
T(1)) / (DELTA * CONST1 + 1) :
569 AGUAPE = AGUAPE + CAmDT * CORR1 * (CONC1 - CONC2)
570 IF T(1) > TA(1) OR C(1) > CA(1) THEN NOSC = NOSC + 1 : IF
NOSC >= 10
THEN 640 : '          OSCILO, CAMBIO DE Dt
580 IF T(1) < Tf THEN 640 : ' OSCILO, CAMBIO DE Dt
590 IF T(NVMA2) > TFINAL THEN 610 : '   CONTROLA SI EL CENTRO
ALCANZO LA TEMPERATURA FINAL
600 LPRINT: LPRINT: LPRINT USING " TIEMPO DE
CONGELACION =####.## minutos =###.##
horas"; TIEMPO/60; TIEMPO/3600
605 PERCIE = AREA * AGUAPE * 100 / AGUA0 : LPRINT USING
PORCENTAJE DE AGUA
PERDIDA POR EVAPORACION =##.###"; PERCIE: END
610 IF NC < NIMP THEN 430 : ' IMPRIME. PASA AL INTERVALO
SIGUIENTE
615 TIME = TIEMPO / 60
616 IF T(NVMA1) < TCR AND T(NVMA2) > TCR THEN T(NVMA2) = TCR
LPRINT USING "##.##"; TIME; : LPRINT
USING "####.##"; TBORDE(1); : LPRINT
USING "####.###"; T(NN+1), T(2*NN+1), T(3*NN+1),
T(4*NN+1), T(5*NN+1), T(6*NN+1), T(7*NN+1),
T(8*NN+1), T(9*NN+1), T(10*NN+1), T(11*NN+1),

```

```
T(12*NN+1), T(13*NN+1), T(14*NN+1),  
T(15*NN+1),  
630 NC=0: GOTO 430  
640 LPRINT:LPRINT CHR$(18):LPRINT"OSCILA EN  
n=";N;"T(1)=";T(1);"  
RECOMIENZA EL CALCULO CON  
Dt/2":DT=DT/2#:LPRINT:LPRINT:LPRINT:  
GOTO 200
```

