

CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALIMENTOS CONGELADOS

CARLOS E. ORREGO A.*

RESUMEN

Se presenta un modelo sencillo para el pronóstico de las conductividades térmicas de alimentos congelados, que combina propuestas de distintos autores. Para variados materiales sobre los que hay información disponible de la modificación de esta propiedad con la temperatura en sistemas congelados, se hace la comparación de los valores estimados y empíricos para evaluar estas predicciones.

Introducción

Hay al menos dos razones para conocer y aplicar métodos predictivos para propiedades de alimentos. La primera de ellas es su heterogeneidad que hace que puedan presentarse variaciones importantes entre una parte y otra de una muestra alimenticia o entre muestras que sean de diferentes procedencias, sistemas o lotes de producción. Por esta causa se pueden conseguir valores mas ajustados a la realidad por modelos basados en composición, que por mediciones experimentales, si no se garantiza un extremo rigor en ellas. En el caso de alimentos congelados la situación es aún mas compleja puesto que existe información muy precaria sobre datos empíricos de sus propiedades

Un segundo aspecto es de tipo pragmático. Puesto que la velocidad de aparición de nuevos productos alimenticios siempre excederá a la de producción de datos experimentales, es conveniente conocer modelos predictivos de las propiedades térmicas. Ellos se basan en el conocimiento de la composición química y/o física (densidad, porosidad, tamaño de poro, etc.) y del rango de temperaturas a las que se someten los materiales.

* Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
E-mail:corrego@eccel.com

Descripción del modelo

Un modelo simple es el que considera el alimento como homogéneo, pero constituido por dos componentes: sólidos y agua. Si las fracciones másicas de agua y sólidos se llaman respectivamente a, s .

$$a + s = 1 \quad \text{Ec.1}$$

Los sólidos a su vez pueden discriminarse. Para p, c, gr, ζ las fracciones másicas de proteínas, carbohidratos, grasa y cenizas,

$$s = p + c + gr + \zeta \quad \text{Ec.2}$$

Para el caso de alimentos congelados se acostumbra discriminar la fase acuosa en hielo, agua líquida y agua ligada (l, al, ab):

$$a = l + al + ab \quad \text{Ec.3}$$

Tabla 1. Conductividades térmicas de alimentos y algunos de sus componentes como función de la temperatura ^a

Material	Ecuación	Ref.
Aire ^c	$k = 0.0184 + 1.225 \times 10^{-4} T$	[1]
Aire ^d	$k = 0.0076 + 7.85 \times 10^{-4} T + 0.0156 \phi$	[1]
Aire ^{ef}	$k = 0.0042P + 0.01$	[2]
Aire ^{eg}	$k_{760} / k = 1 + 1.436 (1/P)$	[2]
Proteína ^b	$k = 0.179 + 1.20 \times 10^{-3} T - 2.72 \times 10^{-6} T^2$	[3]
Gelatina	$k = 0.303 + 1.20 \times 10^{-3} T - 2.72 \times 10^{-6} T^2$	[4]
Ovoalbúmina	$k = 0.268 + 2.50 \times 10^{-3} T$	[4]
Carbohidratos ^b	$k = 0.201 + 1.39 \times 10^{-3} T - 4.33 \times 10^{-6} T^2$	[3]
Almidón	$k = 0.478 + 6.90 \times 10^{-3} T$	[4]
Almidón gelatinizado	$k = 0.210 + 0.41 \times 10^{-3} (T+273)$	[5]
Sacarosa	$k = 0.304 + 9.93 \times 10^{-4} T$	[4]
Grasa ^b	$k = 0.181 - 2.76 \times 10^{-3} T - 1.77 \times 10^{-7} T^2$	[3]
Fibra ^b	$k = 0.183 + 1.25 \times 10^{-3} T - 3.17 \times 10^{-6} T^2$	[3]
Cenizas ^b	$k = 0.330 + 1.40 \times 10^{-3} T - 2.91 \times 10^{-6} T^2$	[3]
Agua ^b	$k = 0.571 + 1.76 \times 10^{-3} T - 6.70 \times 10^{-6} T^2$	[3]
Hielo ^b	$k = 0.222 - 6.25 \times 10^{-3} T + 1.02 \times 10^{-4} T^2$	[3]

^a T en °C ^b Entre -40 a 150°C ^c Aire seco ^d Aire húmedo ^e P en mm Hg
^f P ≤ 2 mm Hg ^g P ≥ 2 mm Hg

Hay disponibles información y metodologías experimentales para encontrar la forma de presentación del agua en un producto congelado; también existen métodos predictivos con ese fin.

Choi y Oikos (1986) correlacionaron datos experimentales de diferentes propiedades termofísicas como conductividad térmica, densidad, calor específico usando un modelo basado en las fracciones másicas de los principales componentes de los alimentos (proteínas, grasa, carbohidrato, fibra, ceniza y agua). En las tablas 1 y 2 se presentan expresiones propuestas por ellos y otros autores para conductividades térmicas y densidades.

Tabla 2. Densidades (Kg/m³) algunos componentes de alimentos como función de la temperatura ^a

Material	Ecuación
Carbohidratos	$\rho = 1559.1 - 0.31046T$
Grasa	$\rho = 925.59 - 0.41757T$
Fibra	$\rho = 1311.5 - 0.36589T$
Cenizas	$\rho = 2423.8 - 0.28063T$
Agua	$\rho = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2$
Hielo	$\rho = 916.89 - 0.13071T$
Proteína	$\rho = 1330 - 0.5184T$

^a T en °C. En el rango entre -40 a 150°C

Definiendo la fracción volumétrica del componente j - ésimo como:

$$v_j = \frac{\frac{w_j}{\rho_j}}{\sum \frac{w_j}{\rho_j}} \quad \text{Ec.4}$$

donde w y ρ son fracción másica y densidad, respectivamente.

$$k_{e-0} = \sum v_j k_j \quad \text{Ec.5}$$

La expresión anterior es adecuada para predecir la conductividad por encima del punto de congelación del alimento.

Debajo del punto de fusión se recomienda usar un modelo serie- paralelo (paralelo para los componentes distintos de agua líquida y/o ligada, en serie con el agua líquida -a-y/o ligada-l -):

$$\frac{1}{k_{\varepsilon=0}} = \frac{(v_a + v_l)}{k_a} + \frac{(1 - v_a - v_l)^2}{\sum_{j \in \text{in-a,l}} v_j k_j} \quad \text{Ec.6}$$

$k_{\varepsilon=0}$ es la conductividad térmica para cuando el alimento no sea poroso, o la que tendría si se eliminaran sus poros.

La porosidad se define como

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{V \rho_{\varepsilon=0}} = 1 - \frac{\rho_{AP}}{\rho_{\varepsilon=0}}, \quad \text{Ec.7}$$

para W y V el peso y volumen de la muestra, $\rho_{\varepsilon=0}$ la densidad de la misma cuando su porosidad se reduce a cero y ρ_{AP} la densidad aparente del alimento, teniendo en cuenta sus poros.

$$\rho_{\varepsilon=0} = \sum_j \frac{w_j}{\rho_j} \quad \text{Ec.8}$$

Entre las propiedades térmicas la densidad y la conductividad térmica se afectan sensiblemente con la porosidad

A la fecha hay numerosos modelos propuestos para productos porosos y/o fibrosos. El que se estudia aquí supone que el material tiene poro pequeño de tal forma que sea mínima la convección natural dentro del poro (modelo Maxwell – Eucken ^[6]):

$$k = k_{\varepsilon=0} \left[\frac{2k_{\varepsilon=0} + k_{aire} - 2\varepsilon(k_{\varepsilon=0} - k_{aire})}{2k_{\varepsilon=0} + k_{aire} + \varepsilon(k_{\varepsilon=0} - k_{aire})} \right] \quad \text{Ec.9}$$

La combinación de las propuestas de estos autores, que reúne características de simplicidad y relativa facilidad para estimar, medir o encontrar las variables necesarias, es la que se analiza a continuación.

Evaluación

Para una determinación de la validez del método se utilizó información experimental reportada en diferentes fuentes para los valores de composición, densidad aparente, conductividad térmica en estado congelado y fracción de agua congelada de algunos materiales alimenticios.

Las composiciones fueron las que para cada material presentaron valores idénticos o muy cercanos de la humedad (y/u otros reportes de composición de las fuentes empíricas) de la base de datos "Foods" [7]

En la tabla 3 se resume la información utilizada para alimentar el modelo. Los valores de densidad aparente, se tomaron a 0°C. A igual temperatura se estimaron las densidades reportadas en la tabla. Con base en estos datos se estimaron la densidad sin porosidad con la Ec.8, y la porosidad de acuerdo con la Ec. 7.

Mediante las Ecs. 6 y 9 se determinaron los valores conductividades. Un resumen de los cálculos aparece en la tabla 4.

Un resumen de los cálculos aparece en la tabla 4

Tabla 3. Propiedades de algunos materiales alimenticios

Material	Composición, en fracción en peso					Densidad aparente Kg/m ³ [8]	Porcentaje de agua no congelada ^[9]			
	Agua	Proteína	Grasa	Carbohidratos	Ceniza		0°C	-2°C	-10°C	-20°C
Manzana	0.85	0.002	0.003	0.142	0.003	840	100	71	18	8
Fresa	0.86	0.007	0.005	0.122	0.005	880	100	43	11	5
Jugo de naranja	0.89	0.006	0.002	0.100	0.004	1040	100	96	14	8
Guisante	0.77	0.048	0.004	0.168	0.011	708	100	90	21	10
Carne de res	0.77	0.217	0.047	0	0.01	1010	100	55	26	11
Cordero	0.74	0.199	0.047	0	0	1063	100	52	17	12
Torta de soya	0.848	0.078	0.042	0.024	0.008	1028	100	90	21	10
Bacalao	0.81	0.176	0.003	0	0	1055	100	48	16	11

Tabla 4. Cálculo de las conductividades térmicas

Material	Densidad calculada Ec. 8	Porosidad Ec. 7	Conductividad térmica (W/m°C)							
			0°C		-2°C		-10°C		-20°C	
			$k_{r=0}$	k	$k_{r=0}$	k	$k_{r=0}$	k	$k_{r=0}$	k
Manzana	1056	0.204	0.53	0.39	0.76	0.55	1.46	1.06	1.80	1.30
Fresa	1048	0.161	0.54	0.42	1.02	0.79	1.66	1.29	1.94	1.50
Jugo de naranja	1040	0	0.54	0.54	0.59	0.59	1.58	1.58	1.83	1.83
Guisante	1085	0.348	0.51	0.29	0.63	0.36	1.36	0.76	1.66	0.93
Carne de res	1010	0	0.49	0.49	0.80	0.80	1.25	1.25	1.49	1.49
Cordero	1063	0	0.49	0.49	0.95	0.95	1.37	1.37	1.51	1.51
Torta de soya	1028	0	0.52	0.52	0.93	0.93	1.41	1.41	1.64	1.64
Bacalao	1028	0	0.50	0.50	0.96	0.96	1.46	1.46	1.62	1.88

Tabla 5. Algunos valores empíricos de conductividades térmicas de alimentos y su variación con la temperatura

Material	Conductividad experimental (W/m°C)				Referencia
	0°C	-2°C	-10°C	-20°C	
Manzana	0.39	-	1.40	1.48	[9]
Fresa	-	-	0.68	1.25	[10], [11]
Jugo de naranja				2.34 (-17°C)	[10]
Guisantes		-	0.52 (-12.2°C)		[10]
Carne de res	0.48	1.06 (-5°C)	1.35	1.57	[10]
Cordero	0.45	-	1.30	1.37	[12]
Torta de soya	0.46	-	1.467	1.520	[9]
Bacalao	0.55	1.1	1.49	1.75	[9]

En la tabla 5 se aprecian las conductividades térmicas reportadas por varias fuentes en relación con el grupo de alimentos analizados.

Conclusión

En esta aproximación, limitada por la escasa información experimental disponible, el modelo se comporta adecuadamente para los materiales analizados, presentando las desviaciones máximas en aquellos productos en los que sólo se tiene un dato de conductividad a cierta temperatura. Para el caso de información mas completa, las predicciones presentan una diferencia porcentual máxima respecto del valor real del orden del 15%, que es aceptable para cálculos de ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Luikov,A.V., *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Advances in heat transfer, 1, 34, 1964
- [2] Fito,P.J., Pinaga,F. y Aranda, V., *Thermal conductivity of porous bodies at low pressure: Part I*, *J. Food Eng.* 3 (1), 75, 1984
- [3] Choi,Y y Oikos,M.R.,*Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods*, en *Food Engineering and Process Applications*, Vol. 1, Transport phenomena, Maguer,M. y Jelen, P., Editores, Elsevier Applied Science, London, 1986
- [4] Renaud, T., Briery, P., Andrieu,J. Y Laurent, M., *Thermal properties of model foods in the frozen state*, *J. Of Food Eng.*, 15(2), 83, 1992
- [5] Moroulis,Z.B., Tsami, E. y Saravacos, G.D., *Thermal conductivity of gelatinized starch*, *J.Food Sci.* 56(3), 773, 1991.
- [6] Cleland,D.J., Valentas, K.J.,*Prediction of freezing time and design of food freezers* en *Handbook of food engineering practice*, Valentas,K.J.,Rotstein,E. y Singh, R.P., Editores, CRC Press, Boca Ratón USA, 1997
- [7] Singh,R.P.,*Computer applications in food technology*, Academic Press,San Diego,CA, 1996
- [8] Rahman,S., *Food properties handbook*, CRC Press, Boca Ratón, 1995
- [9] Sweat,V.E.,*Thermal properties of foods* en *Engineering properties of foods*, Rao,M.A., Rizvi, S.S.H., Marcel Dekker Inc., New york, 1986
- [10] Charm, S.E., *The fundamentals of food engineering*, AVI Publishing Co., Westport, 1981
- [11] Hayes, G.D., *Manual de datos para ingeniería de los alimentos*, Acribia, Zaragoza, 1992
- [12] Sing, R.P., Mannapperuma, J.D., *Developments in food freezing* en *Biotechnology and food process engineering*, Schwatzeneger, H.G., Rao, M.A., Editores, Marcel Dekker Inc., New York, 1990