

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE JUGOS CONCENTRADOS CÍTRICOS COMO UNA FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA CONCENTRACIÓN

Ramón A. Linares, María M. Brousse, Ana M. Paredes, Eusebia C. Valdez

THERMAL CONDUCTIVITY OF CONCENTRATED JUICE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION ABSTRACT

The variation of thermal conductivity of tangerine, lemon and orange concentrated juice was investigated as a function of temperature (283, 293 and 303 K) and concentration (12 to 65°Brix).

Thermal conductivity was determined using a thermal properties analyzer type KD2, manufactured by Decagon Devices Incorporation.

Juice concentration had a significant influence in thermal conductivity ($p \leq 0.05$), but not in the temperature.

Experimental data were fitted to different mathematical models. Mean values of thermal conductivity varied from 0.3 to 0.6 (W m⁻¹K⁻¹).

KEY WORDS: Citric juice, Thermal Conductivity, Temperature, Concentration.

RESUMEN

Se estudió la variación de la conductividad térmica de jugos concentrados de mandarina, limón y naranja en un rango de concentraciones entre 12 a 65°Brix, y a tres temperaturas, 283, 293 y 303 K. La conductividad térmica fue determinada mediante un medidor de conductividad térmica, marca Decagon Devices Incorporation modelo KD2.

Para los tres jugos concentrados los valores de conductividad térmica obtenidos presentan diferencias estadísticamente significativas (en un nivel de 95 %) con la concentración, para el rango de concentraciones en estudio. La conductividad térmica no presenta diferencias estadísticamente significativas con la temperatura (para un nivel del 95 %) en el rango de temperatura estudiado.

Los datos se ajustaron a diferentes modelos matemáticos. Los valores promedios para la conductividad térmica en el rango de temperaturas y concentraciones en estudio, variaron entre 0.3 y 0.6 (W m⁻¹K⁻¹).

PALABRAS CLAVE: Jugos cítricos, conductividad térmica, concentración, temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria alimenticia, los datos de la conductividad térmica de jugos de frutas y sus variaciones con las condiciones de operación (temperatura y concentración), son fundamentales en el análisis de las operaciones unitarias (procesamiento de alimentos y equipos, procesos, etc.).

Modelar, optimizar y automatizar los procesos alimenticios es difícil debido a la complejidad de las materias primas y de los productos implicados, y a los efectos en las propiedades termofísicas como densidad, viscosidad, capacidad calorífica y conductividad térmica de la composición y la temperatura [1]. La conductividad térmica (k) de los jugos de frutas, exhibe cambios substanciales con la concentración y la temperatura durante diferentes procesos [2].

La conductividad térmica (k) de alimentos líquidos fue revisada por diversos autores tales como [3], [4], [5], [6], [7]. Entre estos autores existe coincidencia acerca de la falta de confiabilidad de los valores de conductividad térmica en alimentos líquidos, debido a la convección.

Asimismo, de la bibliografía se cuenta con datos de

k de jugos de fruta y vegetales reportados por diferentes autores [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

El objetivo del presente trabajo es medir experimentalmente los valores de la conductividad térmica de tres jugos concentrados de frutas cítricas (naranja, mandarina y limón) en un rango de concentraciones entre 12 a 65 °Brix, y a tres temperaturas, 283, 293 y 303 K, ajustar los datos a modelos propuestos por la bibliografía y evaluar la bondad del ajuste a los diferentes modelos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Se utilizaron para los ensayos jugos de frutas concentrados (aproximadamente 60 °Brix) obtenidos de la Cooperativa Leandro N. Alem de la Provincia de Misiones. Las diferentes concentraciones ensayadas fueron obtenidas mediante dilución con agua destilada de los concentrados a los valores de concentración del estudio.

2.2. Determinación de °Brix

Los °Brix se determinaron a través de un refractómetro Carl Zeiss 90300 a la temperatura de 298 K.

2.3. Determinación de la conductividad térmica

La conductividad térmica se determinó utilizando un medidor de conductividad térmica marca Decagon modelo KD₂ con un sensor de una sola aguja.

2.4. Procedimiento experimental

Se prepararon las muestras a diferentes concentraciones a partir de los distintos jugos concentrados. Las muestras fueron colocadas en tubos de ensayo dentro de un baño termostático a la temperatura de estudio. La temperatura se monitoreó con un termómetro. Se tomaron las conductividades con el conductímetro KD₂, se midieron los grados Brix. Los ensayos se realizaron por triplicado, para cada concentración y temperatura ensayadas.

Los valores obtenidos se ajustaron a diferentes modelos propuestos por la bibliografía. Varios modelos fueron extensamente utilizados para el estudio de la dependencia de la conductividad térmica con la concentración y la temperatura, los mismos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos matemáticos aplicados a la conductividad térmica de agua y soluciones acuosas.

	Modelo matemático	Referencias
1	$k(x) = k_w + a_1 x$	(9), (11), (14), (17).
2	$k(x) = k_w + a_1 x + a_2 x^2$	(16).
3	$k(x) = k_w (1 + a_1 x + a_2 x^2)$	(18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25).
4	$k(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2$	Modelo cuadrático
5	$k(x) = a_1 + a_2 x$	Modelo lineal

k_w =conductividad térmica del agua a 283 K=0,5966; a 293 K=0,599 y a 303 K=0,615 Wm⁻¹ K⁻¹.

Los ajustes de los modelos se realizaron mediante correlación lineal o correlación no lineal (ajuste de curvas), utilizando el programa estadístico Graphpad Prism 4. La bondad del ajuste fue evaluada mediante los siguientes parámetros de error RMSE, error cuadrático medio que se calcula a través de:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2} \quad (1)$$

Mean Bias Error: error medio de desviación: indica la tendencia del modelo; un valor positivo significa que el modelo sobre estima y un valor negativo significa que el modelo sub estima. El valor ideal para el MBE es cero.

$$MBE = \sum (Y_i - X_i) / N \quad (2)$$

Error porcentual. Es el error promedio relativo multiplicado por cien

$$E\% = [(Y_i - X_i) / Y_i] * 100 \quad (3)$$

donde N es el número de datos de las series X (medida) e Y (simulada).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los datos de la determinación de las conductividades térmicas de los jugos de mandarina, naranja y limón, conduce a las siguientes generalizaciones: a) Los valores de conductividad térmica mostrados en la Tabla 2, para los jugos de mandarina, naranja y limón a las diferentes temperaturas estudiadas, no presentan diferencias significativas con la temperatura en un nivel de confianza del 95 %. Mandarina (P=0,87), Naranja (P=0,94) y Limón (P=0,77). b) Los valores de la conductividad térmica para las diferentes concentraciones estudiadas presentan diferencias significativas con la concentración en un nivel de confianza del 95 % (P < 0,05). c) Realizada un ANOVA para el conjunto de datos de conductividad térmica de los tres jugos el mismo nos indica que no existen diferencias significativas entre los diferentes jugos para un nivel de confianza del 95 %. (P=0,82).

Debido a que los valores de las conductividades térmicas de los tres jugos no son función de la temperatura en el rango de temperatura estudiado, se ajustaron los datos experimentales a los diferentes modelos dados en la Tabla 1, tomando los valores de las conductividades térmicas para las tres temperaturas como pertenecientes a una misma población. En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran los valores de las constantes de las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 dadas en la Tabla 1, para los jugos de naranja, limón y mandarina respectivamente.

La conductividad térmica de los tres tipos de jugos estudiados decrece a medida que aumenta la concentración. En los modelos lineales la pendiente para los tres jugos estudiados es negativa e independiente de la temperatura en un nivel de confianza del 95 %. Los valores de la pendiente para los datos en conjunto para las tres temperaturas estudiadas son de -0,003536 para el jugo de limón, -0,003385 para la naranja y -0,003627 para la mandarina.

Para el jugo concentrado de naranja los mejores ajustes se obtienen con los modelos 1, 4 y 5, que tiene errores porcentuales promedio del 1,59 %, 1,00 % y 1,01 %, con valores pequeños de RMSE y BME, presentados en la Tabla 6. Para el jugo de limón también se obtienen los mejores ajustes con los modelos 1, 4 y 5, se presentan los mejores ajustes con errores porcentuales promedio de 2,02 %, 2,17 % y 2,17 %. Para el jugo de mandarina con los modelos 3 y 4, con errores porcentuales promedio de 1,34 y 1,22 %. En las Tablas 6, 7 y 8 se dan los valores de los errores RMSE, MBE y error porcentual promedio para los jugos de naranja, limón y mandarina respectivamente.

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran las gráficas de los datos experimentales de k promediados para las tres

Tabla 2. Valores de conductividad térmica de los tres jugos a tres temperaturas.

		283 K	293 K	303 K
	Concentración ° Brix	k (W/m K)		
Naranja	63.2	0.360	0.360	0.370
Mandarina	64.6	0.363	0.366	0.356
Limón	11.5	0.520	0.533	0.520

Tabla 4. Valores de las constantes de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 para el jugo concentrado de limón.

Limón	Rango de temperaturas entre 283 a 303 K			
Modelo	a ₁	a ₂	a ₃	R ²
1	-0,003985	-	-	0,821
2	-0,004588	1,539 e-005	-	0,833
3	-0,007691	2,579 e-005	-	0,833
4	0,5766	-0,003227	5,022 e-006	0,837
5	0,5806	-0,003537	-	0,837

Tabla 6. Bondad del ajuste de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 mediante los valores de los errores RMSE, MBE y error porcentual para jugo de naranja, en el rango de temperaturas 283 a 303 K.

Modelo N°	RMSE	MBE	Error Porcentual
1	0,0091	0,002739	1,59
2	0,0338	0,033352	7,08
3	0,0586	-0,047738	14,77
4	0,0050	-0,000005	1,00
5	0,0050	-0,000012	1,01

Tabla 3. Valores de las constantes de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 para el jugo concentrado de naranja.

Naranja	Rango de temperaturas entre 283 a 303 K			
Modelo	a ₁	a ₂	a ₃	R ²
1	-0,003852	-	-	0,943
2	-0,004528	1,371e-005	-	0,962
3	-0,007590	2,298e-005	-	0,962
4	0,5788	-0,003575	2,412e-006	0,964
5	0,5756	-0,003385	-	0,964

Tabla 5. Valores de las constantes de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 para el jugo concentrado de mandarina.

Mandarina	Rango de temperaturas entre 283 a 303 K			
Modelo	a ₁	a ₂	a ₃	R ²
1	-0,003468	-	-	0,860
2	-0,003076	-7,435e-006	-	0,864
3	-0,005156	-1,246e-005	-	0,864
4	0,5846	-0,002433	-1,495e-005	0,865
5	0,6043	-0,003627	-	0,862

Tabla 7. Bondad del ajuste de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 mediante los valores de los errores RMSE, MBE y error porcentual para jugo de limón, en el rango de temperaturas 283 a 303 K.

Modelo N°	RMSE	MBE	Error Porcentual
1	0,0126	0,002162	2,02
2	0,0316	-0,021194	6,93
3	0,0429	-0,033422	9,47
4	0,0111	0,000018	2,17
5	0,0111	-0,000013	2,17

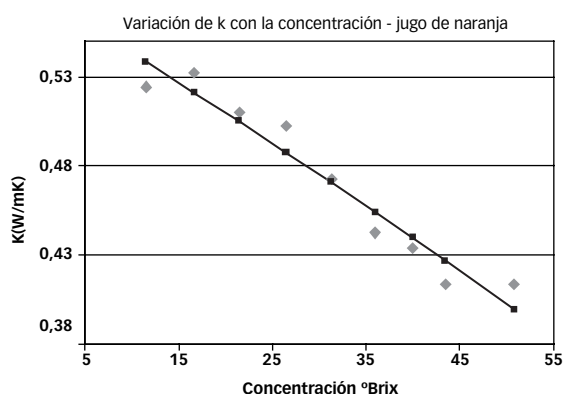
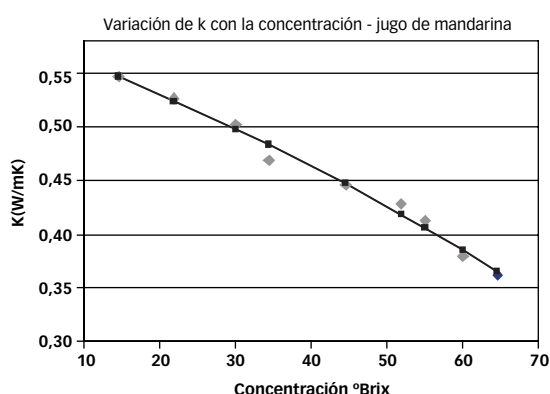
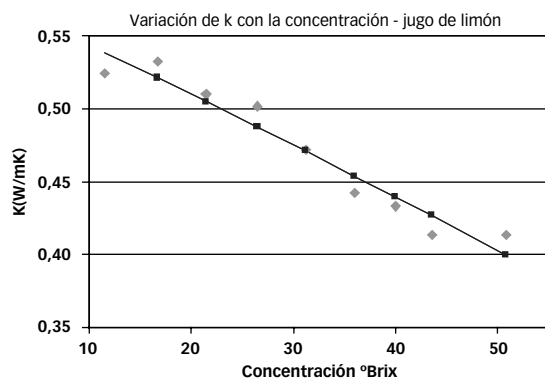
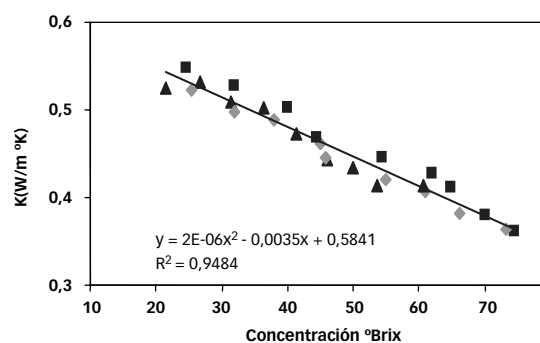
**FIGURA 1.** Variación de la conductividad térmica con la concentración para el jugo de naranja. Ajuste de valores con el modelo cuadrático (Modelo 4). Referencias: ♦ Experimental, —■— Modelo.**FIGURA 2.** Variación de la conductividad térmica con la concentración para el jugo de mandarina. Ajuste de valores con el modelo cuadrático (Modelo 4). Referencias: ♦ Experimental, —■— Modelo.**FIGURA 3.** Variación de la conductividad térmica con la concentración para el jugo de limón. Ajuste de valores con el modelo cuadrático (Modelo 4). Referencias: ♦ Experimental, —■— Modelo.**FIGURA 4.** Variación de la conductividad térmica con la concentración para los jugos de naranja, mandarina y limón. Ajuste de valores con el modelo cuadrático (Modelo 4). Referencias: ■ Mandarina, ▲ Limón, ♦ Naranja, — Modelo cuadrático.

Tabla 8. Bondad del ajuste de las ecuaciones de los modelos N° 1, 2, 3, 4 y 5 mediante los valores de los errores RMSE, MBE y error porcentual para jugo de mandarina, en el rango de temperaturas 283 a 303 K.

Modelo N°	RMSE	MBE	Error Porcentual
1	0,0080	-0,00105	1,70
2	0,0634	0,05836	11,82
3	0,0070	0,00028	1,34
4	0,0068	-0,00003	1,22
5	0,0075	-0,00002	1,59

temperaturas con el ajuste del modelo 4 para los jugos de naranja, limón y mandarina. Estas ecuaciones son aplicables para el rango de temperaturas comprendido entre 283 a 303 K.

Al no existir diferencias significativas de las conductividades térmicas entre los tres jugos se ajustaron los datos al modelo 4, obteniéndose los valores de $a_1=0,5841$; $a_2=-0,0035$ y $a_3=2 \times 10^{-6}$, con $R^2=0,9484$.

CONCLUSIONES

El efecto de la temperatura y la concentración sobre la conductividad térmica para tres jugos de frutas cítricas concentrados (naranja, mandarina y limón) fueron determinadas con el KD_2 .

En este estudio, se encontró que la conductividad térmica (k) depende de la concentración pero no de la temperatura, para el rango estudiado.

Las conductividades reportadas presentan una tendencia de disminuir al aumentar la concentración para todo el rango de estudio. Los modelos de [9], [11], [14], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], el modelo lineal y el cuadrático ajustados, son capaces de simular la variación de la conductividad térmica con la concentración.

No existen diferencias significativas de las conductividades térmicas entre los jugos analizados en este trabajo para las temperaturas de estudio. Por lo que fue posible presentar una sola ecuación que correlaciona los datos experimentales de los tres jugos en función de la concentración de sólidos expresada en ° Brix.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ramos, A. and Ibarz, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. *Journal of food Engineering*. 35: p. 57–63. 1998.
2. Crandall, P. G.; Chen, C. S. and Carter, R. D. Models for predicting viscosity of orange juice concentrate. *Food Technology*. 36: p. 245–252. 1982.
3. Choi, I. and Okos, M. R. The Thermal Properties of Liquid Foods—Review. Presented at the Winter Meeting ASAE. 83: p. 6516. 1983a.
4. Choi, I. and Okos, M. R. Thermal properties of liquid

foods—Review. M.R. Okos, editor. *Physical and Chemical Properties of Food* New York. ASAE. p. 35–77. 1986.

5. Cuevas, R. and Cheryan, M. Thermal conductivity of liquid foods—Review. *Journal Food Process Engineering*. 2: p. 283–306. 1978.

6. Kolarov, K. and Gromov, M. A. Universal equation for the computing of thermal conductivity of fruit and vegetable juices and syrups. *Khromitelna Promishlennost*. 22: p. 33–39. 1973.

7. Qashou, M. S.; Vachon, R. I. and Touloukian, Y. W. Thermal conductivity of foods. *ASHRAE Transactions*. 78 (Part I): p. 165–183. 1972.

8. Assael, M. J.; Charitidou, E.; Georgiadis, G. P. And Wakeham, W. A. A transient hot-wire instrument for thermal conductivity measurements in electrically conducting liquids at elevated temperatures. *International Journal Thermophys*. 3: p. 225–235. 1982.

9. Choi, I. and Okos, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. *Transactions. ASAE*. 26(1): p. 305–311. 1983b.

10. Constenla, D. T.; Lozano, J. E. and Crapiste, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal Food Science*. 54: p. 663–668. 1989.

11. Gratao, A.; Junior, V.; Polizelli, M. and Telis Romero, J. Thermal properties of passion fruit juice as affected by temperature and water content. *Journal Food Process Engineering*. 27: p. 413–431. 2005.

12. Lau, A.; March, A.; Lo, K. and Cumming, D. Physical properties of celery juice. *Canadian. Agricultural Engineering*. 34: p. 105–110. 1992.

13. Moressi and Spinosi. Engineering factors in the production of concentrated fruit juices. 1: Fluid physical properties of orange juices. *Journal Food Technology*. 15: p. 265–276. 1980.

14. Riedel, L. Thermal conductivity measurements on sugar solutions, fruit juices and milk. *Chemie Ingenieur Technik*. 17/18: p. 340–341. 1949.

15. Venart, J. and Prasad, R.C. Thermal conductivity of water and oleum. *Journal Chemical. Engineering*. 25: p. 196–198. 1980.

16. Ziegler, G. R. and Rizvi, S. Thermal conductivity of liquids foods by thermal comparator method. *Journal Food Science*. 50: p. 1458–1462. 1985.

17. Romero, J.; Telis, V. R. N.; Gabas, A. L. and Yamashita, F. Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal Food Engineering*. 38:p. 27–40. 1998.

18. Abdulagatov, I. M. and Magomedov, U. B. Thermal conductivity measurements of aqueous SrCl_2 and $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ solutions in the temperature range between 293 and 473 K at pressures up to 100 MPa. *International Journal Thermophys*. 20: p. 187–196. 1999a.

19. Abdulagatov, I. M. and Magomedov, U. B. Measurements of thermal conductivity of aqueous CoCl_2 solutions at pres-

tures up to 100 MPa by parallel-plate apparatus. *Journal of Chemical Engineering Japan*. 32: p. 465–471. 1999b.

20. Abdulagatov, I. M. and Magomedov, U. B. Thermal conductivity of aqueous BaI_2 solutions in the temperature range 293 and 473 K and the pressures range 0.1–100 MPa. *Fluid Phase Equilibria*. 171: p. 243–252. 2000.

21. Abdulagatov, I. M. and Magomedov, U. B. Thermal conductivity measurements of aqueous KI and KBr solutions at high temperatures and high pressures. *Journal of Solution Chemistry*. 30: p. 223–235. 2001.

22. Abdulagatov, I. M. and Magomedov, U. B. Thermal conductivity measurements of pure water and aqueous SrBr_2 solutions at high temperatures and high pressures. *High Temperature*. 35/36: p. 149–168. 2004.

23. Abdulagatov, I. M.; Akhmedova–Azizova, L. A. and Azizov, N. D. Thermal conductivity of aqueous $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ and LiNO_3 solutions at high temperatures and high pressures. *Journal of Chemical Engineering*. 49: p. 688–704. 2004a.

24. Abdulagatov, I. M.; Akhmedova–Azizova, L. A. and Azizov, N. D. Thermal conductivity of binary aqueous NaBr and KBr and ternary $\text{H}_2\text{O}+\text{NaBr}+\text{KBr}$ solutions at temperatures from 294 to 577 K and pressures up to 40 MPa. *Journal of Chemical Engineering*. 49: p. 1727–1737. 2004b.

25. Abdulagatov, I. M. and Azizov, N. D. Thermal conductivity and viscosity of the aqueous K_2SO_4 solutions at temperatures from 298 to 573 K and at pressures up to 30 MPa. *International Journal Thermophys.* 26: p. 593–635. 2005.

26. Ramirez, M. L. V. and Nieto de Castro, C. A. Thermal conductivity of aqueous potassium chloride solutions. *International Journal Thermophys.* 21: p. 671–679. 2000.

• Eusebia Valdez

Ingeniero Químico. Especialista en Gestión de la Calidad. Profesor Adjunto Dedicación Exclusiva. Categoría en el Sistema de Incentivos: IV.

Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales. Félix de Azara 1552. Posadas, Misiones, Argentina.

Recibido: 31/08/07.

Aprobado: 15/11/07.

• Ramón Andrés Linares

Ingeniero Químico. Diploma de Alta Especialización en Tecnología de Alimentos. Profesor Titular Regular Dedicación Exclusiva. Categoría en el Sistema de Incentivos: II.

• Maria Marcela Brousse

(marcelabrousse@fceqyn.unam.edu.ar).

Ingeniera Química. Magíster en Tecnología de los Alimentos. Ayudante de Primera Exclusiva. Categoría en el Sistema de Incentivos: V.

• Ana María Paredes

Ingeniera Química. Especialista en Gestión de la Calidad. Profesor Adjunto Dedicación Exclusiva. Categoría en el Sistema de Incentivos: IV.