

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO POR AIRE CALIENTE DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA PROCESADORA DE TOMATE

*Luis Cruz-Viera**, *Guido Riera-González*, *Raidel Comet-Rodríguez* y *Raiza Abreu-Leyva*
Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" Ave. 114 No. 11901,
Marianao, CP 19390, La Habana, Cuba.
E-mail: lcruz@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Se realizó el secado de semillas y cortezas de tomate por aire caliente a temperaturas de 50, 60 y 70 °C, con un secador de bandeja, a escala de laboratorio, operado de manera discontinua. Para la descripción de la cinética de secado se emplearon dos modelos: uno fenomenológico, basado en la ley de Fick y otro empírico correspondiente al modelo de Peleg. En el secado, tanto de las cortezas como de las semillas, se evidenció un solo período difusivo en el rango de temperaturas investigadas. Se comprobó que la resistencia externa a la transferencia de masa resultó despreciable para las condiciones de trabajo. Los modelos difusivo y de Peleg resultaron adecuados para describir la cinética de secado de cortezas y semillas de tomate.

Palabras clave: tomate, desechos, secado, cinética de secado, modelación.

ABSTRACT

Study of the drying kinetic by hot air of waste from tomato processing industry

Seed and peel drying by hot air was made at 50, 60, and 70°C by a tray dryer at lab scale with discontinuous operation. Two models were employed for describing the drying kinetic: a phenomenological model based on Fick's law and an empirical model corresponding to the Peleg's model. So much in the drying of the seeds like in that of the peels, only one diffusive period was observed in the range of the investigated temperatures. It was showed that the external resistance to the mass transfer was negligible to the work conditions. Both diffusive and Peleg models were adequate for describing the drying kinetic of tomato peel and seed.

Keywords: tomato, waste, drying, drying kinetic, modelling.

INTRODUCCIÓN

El tomate y sus productos derivados constituyen una importante fuente de licopeno. Este compuesto, perteneciente a la familia de los carotenoides, es un pigmento vegetal soluble en grasas que aporta su color rojo característico (1).

Los carotenoides, y en especial el licopeno, ejercen efectos favorables en la salud humana debido a su alto contenido de antioxidantes. Ellos actúan como un medio esencial para prevenir diversas enfermedades crónicas y degenerativas por ser poderosos neutralizadores de radicales libres atenuando los daños oxidativos sobre los tejidos y moduladores de las moléculas responsables de la regulación del ciclo celular entre otros (2, 3).

**Luis Cruz Viera: Ingeniero Químico (Universidad de La Habana, 1971), Especialista en Industria Alimentaria (Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", 1979), Doctor en Ciencias Técnicas (Cuba, 1989). Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Química del Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". Coordinador de la Maestría en Ingeniería Alimentaria impartida en dicho centro. Miembro del tribunal nacional de doctorados en Ciencias Alimentarias. Desarrolla investigaciones en el campo de la conservación y el procesamiento de alimentos.*

La extracción de carotenoides a partir de desechos derivados de la industria del tomate reportaría la obtención de sustancias de alto valor con propiedades beneficiosas para la salud, lo que permitiría el enriquecimiento de productos alimenticios con estas sustancias naturales.

Teniendo en cuenta que para la extracción de las referidas sustancias es necesario realizar un pretratamiento de los desechos de la industria, dentro del cual el secado desempeña un papel fundamental, el objetivo del presente trabajo es estudiar la cinética de secado de desechos de la industria procesadora de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el estudio se utilizaron desechos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) híbrido H-A 3019, provenientes de una fábrica de conservas localizada en la provincia de Mayabeque. Estos desechos consistieron en cortezas y semillas, las que una vez recibidas se almacenaron en congelación protegidas de la luz para evitar su deterioro.

Como paso inicial de cada experiencia, el material experimental fue descongelado para llevarlo a la temperatura ambiente en ausencia de la luz. Posteriormente se realizó el atemperado de cada muestra para lo cual fueron envueltas en polietileno y mantenidas por un período de 10 min a la temperatura a la que se realizaría el secado. De esta manera se garantizó que la muestra alcanzara la temperatura de secado sin pérdida de humedad.

Posteriormente se colocaron 45 g de muestra en una bandeja conformada por una malla de acero inoxidable de 16 x 8 cm, depositándose de manera lo más compacta posible en forma de lámina de 2 cm de espesor, aproximadamente. La muestra se colocó en el interior de la cámara de un secador directo por convección forzada a escala de laboratorio, circulando el flujo de aire de manera paralela a la bandeja con la muestra. El secado se desarrolló a las temperaturas del aire de 50, 60 y 70 °C, con una velocidad másica de 32 800 kg/(m².h). Esta velocidad másica se calculó a partir de los valores promedio de las propiedades del aire de todas las experiencias y la velocidad del aire en el tubo de salida medida con un anemómetro (Alnor 6000-P). El peso de las muestras se determinó cada 30 min a partir

de una balanza con 0,1 g de precisión, conectada directamente a la bandeja donde se encontraba la muestra. Las muestras fueron deshidratadas hasta 80 % de pérdida con respecto al peso inicial, lo que permitió estudiar la cinética de secado en un amplio rango de humedades que incluyera aquellos niveles hasta los que las frutas son comúnmente secadas (4). A partir de estas determinaciones se evaluaron las humedades en base seca.

Con el propósito de modelar el proceso de secado se consideraron dos modelos, uno fenomenológico y otro empírico. Para el primer caso la modelación se efectuó mediante un modelo (ecuación 1) obtenido a partir de la solución de la ley de Fick para una lámina infinita de espesor 2 L, considerando que sólido homogéneo e isótropo, inicialmente en equilibrio con el ambiente que le rodea, con un contenido de humedad inicialmente uniforme e igual a la humedad crítica ($W(x,0) = W_0$), invariabilidad de la geometría de las muestras durante el secado y cumplimiento de la condición de simetría del sistema ($dW/dx = 0$) (5). Se consideró que la resistencia externa fue despreciable. La geometría del producto se consideró como una lámina infinita, tomando en consideración que la longitud y el ancho representaban 8 y 4 veces la altura, respectivamente. Para la solución de la ecuación se empleó el método de Newton disponible en la herramienta Solver de Microsoft Excel (2003).

$$\psi = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[(2n+1)^2 \pi^2 \frac{De}{4L^2} t \right] \quad [1]$$

donde:

ψ : humedad media adimensional, $(W - W_e)/(W_0 - W_e)$

W: humedad experimental (kg agua/kg sólido seco)

De: difusividad efectiva, m²/s

t: tiempo, s

L: semiespesor, m

Se consideró la humedad de equilibrio igual a cero basado en su valor relativamente pequeño en comparación con las humedades inicial y media (6). La humedad inicial de las muestras fue determinada (7).

El efecto de la resistencia externa a la transferencia de masa frente a la resistencia interna se determinó a partir de la representación gráfica de la ecuación 2 (8).

$$\frac{d \ln \varphi}{dt} = \frac{(a + b\varphi)^{0.5}}{\varphi} \quad [2]$$

El modelo empírico correspondió al propuesto por Peleg (1988) (9):

$$W = W_0 \pm \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad [3]$$

Los coeficientes de este modelo se calcularon empleando el método de optimización no lineal del gradiente reducido generalizado disponible en la herramienta Solver de la hoja de cálculo de Microsoft Excel (2007).

La evaluación de la calidad de los ajustes de se realizó a partir del error medio relativo (EMR) (10) y el porcentaje total de varianza explicada (%VAR) (11).

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el paquete estadístico Statgraphics-Plus versión 5.1 (Statistical Graphics, Rockville, MD, USA) y comprendió análisis de varianza y comparación múltiple de medias a partir de la menor diferencia significativa para un nivel de significación de 95 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas de secado de la corteza (Figura 1a) correspondientes a las temperaturas de 50 y 60 °C resultaron prácticamente coincidentes, a diferencia de la de 70 °C que se aparta de las anteriores. En el caso de la semilla

(Figura 1b) son las curvas de 60 y 70 °C las que muestran un comportamiento similar. Los resultados del análisis de varianza y de la prueba de la menor diferencia significativa ($p < 0,05$) confirmaron tales comportamientos. Ello puede estar motivado por las características estructurales de cada uno de los materiales.

En ambas Figuras se aprecia que en las dos primeras horas de secado ocurre la mayor pérdida de humedad, lo que se corresponde con lo reportado por otros autores referente al secado de frutas y vegetales (12).

Las curvas de secado no revelan la existencia de un período de velocidad de secado constante, apreciándose, además, un marcado período de velocidad decreciente, con una clara tendencia exponencial. Este comportamiento ha sido descrito en alimentos (6, 13, 14).

En las Figuras 2a y 2b se representa, a manera de ilustración, el logaritmo de la humedad media adimensional contra el tiempo para cortezas y semilla correspondiente a 50 °C. El ajuste lineal obtenido en ambos casos para cada una de las temperaturas investigadas indica la existencia de un único período difusivo asumiéndose un único valor del coeficiente de difusividad efectiva. Ello implica la no existencia de cambios estructurales que provoquen variaciones en los mecanismos difusionales (15). El resultado obtenido contrasta con el reportado antes para el secado de hollejo de uva (16), donde se manifiestan dos períodos de velocidad decreciente.

En los ajustes realizados para las restantes temperaturas se obtuvieron similares valores del coeficiente de regresión múltiple.

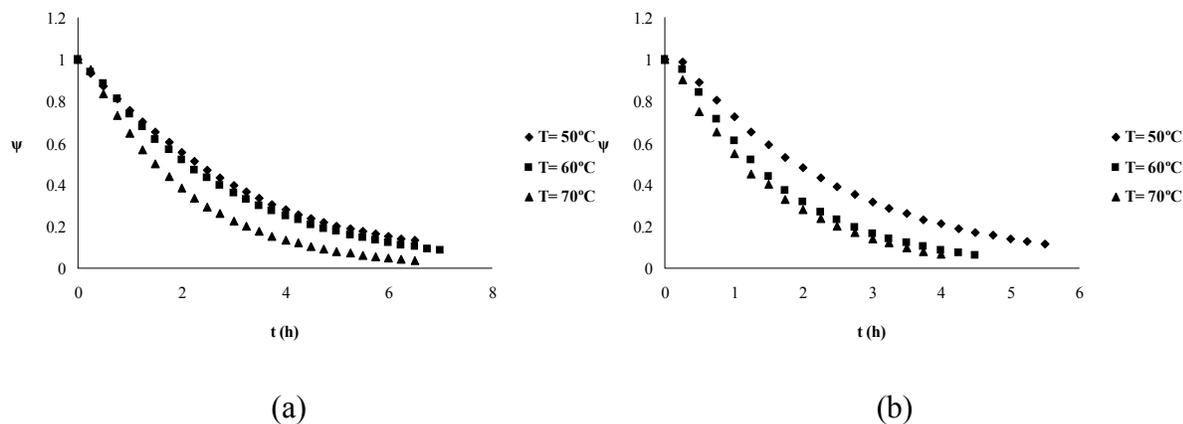


Figura 1. Curvas de secado: (a) corteza, (b) semilla.

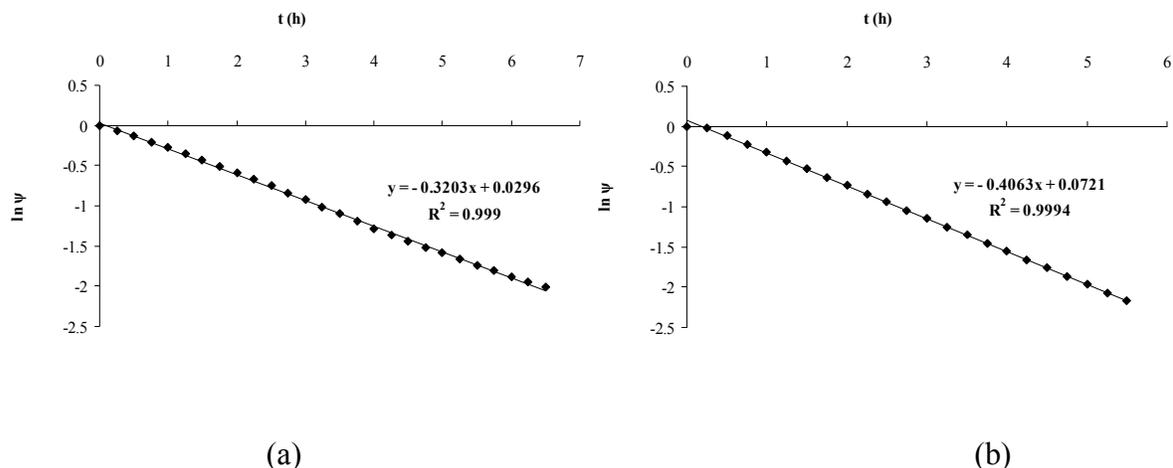


Figura 2. Período de velocidad de secado decreciente: (a) corteza, (b) semilla.

Aunque de manera general se aprecia un comportamiento similar de las humedades adimensionales experimentales medias y las calculadas a partir del modelo difusivo (Figuras 3a y 3b, para la temperatura de 50 °C), la discrepancia entre los valores puede estar influida por la consideración de que la difusividad permanece constante durante el secado. Esta suposición suele ser la principal causa de la falta de idoneidad de los modelos. Diversos autores han comprobado que el contenido de humedad puede influir significativamente en el coeficiente de difusividad efectiva (8, 17, 18). Por otro lado, en algunos productos biológicos se produce una variación de volumen durante la deshidratación, denominada genéricamente contracción, la que puede incidir en la modelación (19, 20).

Un resultado similar al antes descrito se obtuvo para las restantes temperaturas tanto para corteza como para semilla. La Tabla 1 reporta la calidad de los ajustes realizados.

La Tabla 2 presenta los valores de las difusividades medias efectivas calculados a partir del modelo difusivo, los que se encuentran en el rango de 10^{-9} a 10^{-11} m²/s reportado para la mayoría de los alimentos (8, 20, 21). La proximidad de los valores de las difusividades a dos de las temperaturas se corresponde con la similitud encontrada entre las cinéticas de secado a 60 y 70 °C en el caso de la semilla, y entre 50 y 60 °C para la corteza.

Un aspecto a considerar en el secado lo constituye la incidencia de las resistencias interna y externa en la transferencia de masa. En las Figuras 4a y 4b se aprecia que para todas las temperaturas investigadas no existe una relación lineal en todo el rango de humedad adimensional, tanto en corteza como en semilla, lo que es indicativo de que la resistencia externa puede considerarse despreciable para las condiciones de secado investigadas (8).

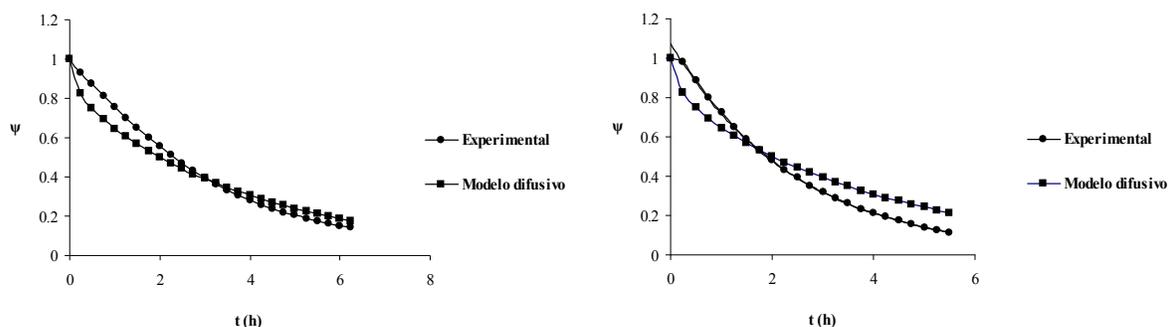


Figura 3. Curvas de secado experimental y calculada a partir del modelo difusivo a la temperatura de 50 °C: (a) corteza, (b) semilla.

Tabla 1. Parámetros de calidad de los ajustes del modelo difusivo para corteza y semilla

T (°C)	Corteza		Semilla	
	%VAR	EMR (%)	%VAR	EMR (%)
50	94,9	2,4	90,5	2,2
60	95,2	3,1	93,0	11,4
70	95,5	7,3	95,7	12,8

Tabla 2. Difusividades efectivas de la corteza y la semilla

T (°C)	Corteza	Semilla
	De.10 ⁹ (m ² /s)	De.10 ⁹ (m ² /s)
50	2,68 a	2,62 a
60	2,94 a	5,03 b
70	4,33 b	5,72 b

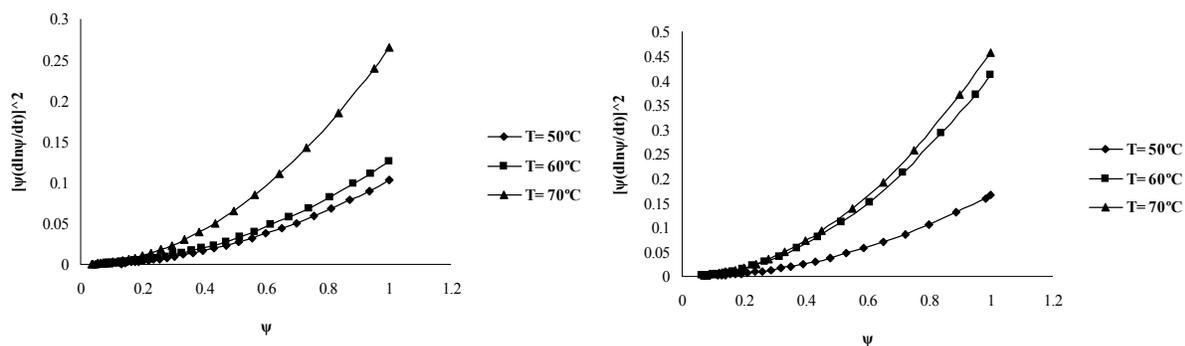


Figura 4. Influencia de la resistencia externa sobre la transferencia de masa: (a) corteza, (b) semilla.

Tabla 3. Coeficientes del modelo de Peleg y calidad de los ajustes realizados

T (°C)	Corteza				Semilla			
	k ₁	k ₂	%VAR	EMR (%)	k ₁	k ₂	%VAR	EMR (%)
50	0,93 a	0,20 a	99,5	3,0	0,53 a	0,11 a	99,7	4,3
60	0,62 b	0,21 a	99,3	12,5	0,47 b	0,11 a	99,6	5,7
70	0,51 c	0,23 a	99,8	6,8	0,31 c	0,12 a	99,3	15,8

Los valores de los parámetros del modelo de Peleg y la calidad de los ajustes se muestran en las Tabla 3. El modelo describe de manera satisfactoria la cinética de secado de los materiales estudiados.

El parámetro k_1^{-1} representa el parámetro cinético del modelo estando directamente relacionado con la transferencia de masa. Este parámetro mostró una tendencia creciente con la temperatura lo que se corresponde con la disminución del tiempo de secado con el aumento de esta última. Este parámetro depende tanto del material (temperatura, tamaño y forma) como de las propiedades del aire (humedad, temperatura y velocidad del aire) (22-24).

El parámetro k_2 , asociado con las características del material, se mantiene en el mismo orden de magnitud (23).

REFERENCIAS

1. Shi J.; Le Maguer, M. Food Sci. Nutr. (40):1-42, 2000.
2. Calvo, C. Alimentación, equipos y tecnol. 22(180): 87-92, 2003.
3. Torres, A. M.; Rojas, L. F.; Mazo, J. C.; Sam C.; Restrepo, S.; Atehortúa, L. Vitae 10 (2): 37-45, 2003.
4. Jayaraman, K. S.; Dave, G. Drying Technol. 10 (1): 1-50, 1992.
5. Crank, J. The mathematics of diffusion, Second edition, Oxford University, UK, 1975.
6. Doymaz, I.; Pala, M. J. Food Eng. 55: 331-335, 2002.
7. AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Chemist. Washington DC, 1997.
8. Mulet, A. J. Food Eng. 22: 329-348, 1994.
9. Peleg, M. J. Food Sci. 53 (4): 1216-1219, 1988.
10. Krokida, M. K.; Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B. Int. J. Food Properties 4: 373-382, 2001.
11. Rinaman, W. C.; Heil, C.; Strauss, M.; Mascagni, M.; Sousa, M. Probability and statistics. En: Standard Mathematical Tables and Formulae, 30th ed., CRC Press Inc., Florida, USA, 1996.
12. Kaymak-Ertekin, F.; Sean, M. J. Food Eng. (46): 243-250, 2000.
13. Mc Minn, W. A. M.; Magee, T. R. A. Drying Technol. 14 (9): 2025-2040, 1996.
14. Azzouz, S.; Guisan, A.; Jomaa, W.; Belghith, A. J. Food Eng. 55: 323-330, 2002.
15. Chirife, J. (1979). Chapter 3: Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. En: Advances in Drying, Ed. Mujumdar, A. S., Hemisphere Pub. Co., New York, 1979.
16. Cruz-Viera, L.; Riera-González, G.; Zumalacárregui, B.; Valdés-Míguez, F. Cienc. Tecnol. Alim. 21 (3): 36-40, 2011.
17. Sjöholm, I.; Gekas, V. J. Food Eng. 25: 123-130, 1995.
18. Schultz, E. L.; Mazzuco, M. M.; Machado, R. A. F.; Bolzan, A.; Quadri, M. B.; Quadri, M. G. N. J. Food Eng. 78: 1103-1110, 2007.
19. Simal, S.; Rosselló, C.; Berna, A.; Mulet, A. J. Food Eng. 37: 423-435, 1998.
20. Hassini, L.; Azzouz, S.; Peczaliski, R.; Belghith, A. J. Food Eng. 79: 47-56, 2007.
21. Srikiatden, J.; Roberts, J. S. J. Food Eng. 74: 143-152, 2006.
22. García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Melis, R.; Mulet, A. J. Food Eng. 72: 346-353, 2006.
23. Blasco, M.; Garcia-Perez, J. V.; Bon, J.; Carreres, J. E.; Mulet, A. Food Sci. Technol. Int. 12: 315-323, 2006.
24. Turhan, M.; Sayar, S.; Gunasekaran, S. J. Food Eng. 53: 153-159, 2002.

CONCLUSIONES

En el secado de cortezas y semillas de tomate se evidenció un solo período difusivo en el rango de las temperaturas investigadas. La resistencia externa a la transferencia de masa resultó despreciable para las condiciones en que se llevó a cabo el secado.

Las difusividades efectivas obtenidas a partir del modelo difusivo se encuentran en el rango de $2,62 \times 10^{-9}$ a $5,72 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para la semilla y entre $2,68 \times 10^{-9}$ y $4,33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para la corteza. Estos valores se encuentran en el rango reportado en la literatura para frutas y vegetales. Los modelos difusivo y empírico resultaron adecuados para describir la cinética de secado de residuos de cortezas y semillas de tomate considerando los valores de la varianza explicada y que el error medio relativo puede considerarse aceptable.