

## ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO POR AIRE CALIENTE DEL ORUJO DE UVA

*Luis Cruz-Viera\**, *Guido Riera-González*, *Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas* y  
*Frank Valdés-Míguez*

*Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"*

*Ave. 114 No. 11901, C.P. 19 390, La Habana, Cuba.*

*E-mail: lcruz@quimica.cujae.edu.cu*

### RESUMEN

Se determinó la cinética de secado del orujo de uva (*Vitis vinifera* L.) a diferentes temperaturas y su influencia en la actividad antioxidante de sus extractos. Las experiencias se desarrollaron en un secador de laboratorio a tres temperaturas del aire (40, 50 y 60 °C) y a una velocidad de aire constante. La extracción de los polifenoles se realizó a 55 °C, 100 min<sup>-1</sup>, relación soluto-disolvente de 1:10 (m/v) durante 4 h con una mezcla etanol-agua en proporción de 1:1 (v/v). La cinética de secado pudo ser descrita de manera satisfactoria mediante un modelo teórico, a partir de la ley de Fick, y del modelo empírico de Peleg. A partir del modelo teórico se determinaron las difusividades efectivas correspondientes a cada periodo de secado. La actividad antioxidante del extracto obtenido disminuyó de manera significativa a 60 °C con respecto a las restantes temperaturas de secado investigadas.

**Palabras clave:** actividad antioxidante, polifenoles, cinética de secado.

### ABSTRACT

#### **Study of the drying kinetics by hot air of grape marc**

The drying kinetic of grape marc (*Vitis vinifera* L.) to different temperatures and its influence on the antioxidant activity of the extracts obtained was determined. The experiments were carried out in a lab dryer to three air temperatures (40, 50 y 60°C) and a constant air velocity. The extraction of polyphenols was developed to 55°C, 100 rpm, ratio solute-solvent 1:10 (m/v) during 4h, employing an ethanol-water mixture in a proportion of 1:1 (v/v) as solvent. The drying kinetic may be satisfactorily described by means of a theoretical model, derived from the Fick's law, and the empirical model of Peleg. Effective diffusivities corresponding to each drying period were determined from the theoretical model. The antioxidant activity of the extracts decreased significantly to 60°C respect to the remaining temperatures of drying researched.

**Key words:** antioxidant activity, polyphenols, drying kinetic.

### INTRODUCCIÓN

A nivel mundial 80 % de la cosecha de la uva es destinada a la elaboración de vino y como consecuencia de ello, una gran cantidad de orujo es obtenida a las pocas semanas de iniciada esta (1).

Los extractos obtenidos a partir del orujo pueden ejercer efectos favorables en la salud humana debido a su contenido fenólico por su elevada actividad antioxidante (1, 2). Para la extracción de polifenoles a partir de estos desechos se requiere la preparación de la materia prima, siendo la operación de secado un paso necesario. La modelación de esta operación permitiría el

---

*\*Luis Cruz Viera: Ingeniero Químico (UH, 1971). Especialista en Industria Alimentaria (ISPJAE, 1979). Doctor en Ciencias Técnicas (Cuba, 1989). Profesor Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Química, Jefe del Grupo de Alimentos y coordinador de la Maestría en Ingeniería Alimentaria en el ISPJAE. Desarrolla investigaciones en el campo de la conservación y el procesamiento de alimentos, destacándose las correspondientes a productos de origen vegetal. Coordinador de proyectos internacionales.*

diseño, análisis y control del proceso, lo que resulta especialmente importante en el caso de materiales de origen biológico debido a su carácter heterogéneo y complejo (3).

El objetivo del presente trabajo fue determinar la cinética del secado del orujo de uva y la influencia de esta operación sobre la extracción de polifenoles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El orujo empleado correspondió a uvas (*Vitis vinifera* L.) de la var. Tempranillo, cosechadas en la provincia de Pinar del Río, el cual se mantuvo congelado hasta el momento de su utilización para evitar su deterioro.

Para cada experiencia se tomaron 45 g de muestra dispuestos en una malla de acero inoxidable de 16 cm de largo y 8 cm de ancho, depositándose de manera lo más compacta posible para semejar una lámina de 2 cm de espesor, aproximadamente. La bandeja con la muestra se colocó en un secador de laboratorio por convección forzada operando de manera discontinua. El aire se alimentó a razón de 32 800 kg/(m<sup>2</sup>h) el cual corresponde al máximo posible a suministrar por el equipo. La velocidad del aire en el tubo de salida se midió con un termomanómetro. El secado se llevó a efecto a las temperaturas del aire de 40, 50 y 60 °C, fijadas mediante el control de temperatura que posee el secador. El peso de las muestras fue registrado durante el secado cada 30 min con una balanza de 0,1 g de precisión, acoplada a la bandeja con la muestra. El secado se dio por concluido cuando la diferencia entre pesadas consecutivas resultó menor que 0,5 g.

Las humedades de la muestra fueron calculadas a partir de los registros correspondientes a la evolución del peso del orujo con el avance del proceso y el peso de sólido seco.

Para cada temperatura de secado se elaboraron gráficas de humedad vs. tiempo, a partir del ajuste a un modelo estadístico empleando el asistente matemático Statgraphics Plus 5.1 (Statpoint, Technologies Inc. Warrenton, USA ).

La incidencia de la resistencia externa a la transferencia de masa se determinó a partir de la representación gráfica de la ecuación 1, la que se corresponderá con una línea recta siempre que dicha resistencia prevalezca (4).

$$\frac{d \ln \psi}{dt} = \frac{(a + b \psi)^{0.5}}{\psi} \quad (1)$$

donde  $\psi$ : humedad media adimensional; t: tiempo, s; a y b: coeficientes

La humedad adimensional  $\psi$ , se expresa como:

$$\psi = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} \quad (2)$$

donde:  $W_o$ : humedad inicial, kg agua/kg de sólido seco;  $W_e$ : humedad de equilibrio, kg agua/kg sólido seco;  $W$ : humedad en un tiempo dado, kg agua/kg sólido seco.

La modelación del proceso de secado se efectuó a partir un modelo fenomenológico y otro empírico. En el primero se consideró que el transporte de agua desde el interior del sólido hacia la superficie tenía lugar principalmente por difusión. A partir de la segunda ley de Fick, para una lámina plana infinita de espesor 2 L con transporte de masa en una sola dirección (5):

$$\psi = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[ - (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_e}{4L^2} t \right] \quad (3)$$

donde  $\psi$ : humedad media adimensional;  $D_e$ : difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s);  $W_e$ : humedad de equilibrio (kg/kg de sólido seco);  $W_o$ : humedad inicial (kg/kg de sólido seco);  $W$ : humedad media (kg/kg de sólido seco);  $L$ : semiespesor (m); t: tiempo (s).

En la expresión anterior la humedad de equilibrio puede considerarse igual a cero debido a su valor relativamente pequeño en comparación con las humedades inicial y media (6).

Se realizó además el ajuste del modelo simplificado de la ecuación 3, el cual comprende solo el primer término del desarrollo, partiendo de que el error al despreciar el segundo término es de 9 % a los 5 min de iniciada la operación y que disminuye con el avance del tiempo. Asimismo, se tomó como la unidad el factor que multiplica al término exponencial para adaptarse a la condición inicial, pues cuando el tiempo toma valor cero, la humedad media adimensional es igual a uno (7). De acuerdo con ello:

$$\psi = \frac{W}{W_o} = \exp \left[ -\pi^2 \frac{D_e}{4L^2} t \right] \quad (4)$$

Para el ajuste a la ecuación 3 se aplicó el método de Newton disponible en el programa Microsoft Office Excel, minimizando la suma de las diferencias de cuadrado entre las humedades experimentales y las calculadas. Para ello se consideraron los primeros 50 términos del desarrollo y se empleó como parámetro de optimización el propio coeficiente de difusividad efectiva. La optimización se llevó a cabo con una precisión de 10<sup>-12</sup> y un criterio de convergencia de 10<sup>-10</sup> (4).

El modelo empírico ajustado fue el propuesto por Peleg (8):

$$W = W_o \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (5)$$

donde W: humedad media, kg de agua/kg de sólido seco; W<sub>o</sub>: humedad inicial, (kg/kg de sólido seco); t: tiempo, h; k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>: parámetros del modelo.

El signo positivo o negativo queda en dependencia de que se trate de un proceso de sorción o desorción, respectivamente. La evaluación de la bondad del ajuste de ambos modelos se logró calculando el coeficiente de correlación de cada uno de los ajustes y el error medio relativo (9).

Con posterioridad al secado se efectuó la extracción de los polifenoles a partir del orujo deshidratado con el objetivo de comprobar la posible influencia de la temperatura de secado sobre la primera. El sistema de extracción consistió de un matraz de tres bocas al que se acoplaron un condensador, un agitador de vidrio y la toma para la extracción de muestras. El balón se

tuvo sumergido en un baño de agua (con precisión de 0,1 °C), a 55 °C. Como disolvente se empleó la mezcla etanol-agua en proporción 1:1 (v/v) y relación soluto-disolvente 1:10 (m/v), fijándose un tiempo de extracción de 4h y un nivel de agitación de 100 min<sup>-1</sup>.

Para la determinación de la actividad antioxidante se desarrolló una metodología que abarcó la determinación del poder antioxidante reductor del hierro (FRAP) (10).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de mejor ajuste a los datos experimentales del secado se presenta en la ecuación 6:

$$W = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (6)$$

El coeficiente de correlación fue superior a 0,99 y la desviación estándar inferior a 0,018 para todos los casos. La Fig. 1 muestra que las curvas correspondientes no indican la existencia de un período de velocidad de secado constante, lo que corrobora que la humedad inicial puede ser considerada como la humedad crítica, presentando un marcado período de velocidad decreciente, comportamiento que ha sido descrito en alimentos (11, 12). La cinética de secado a 60 °C resultó significativamente diferente de las de 40 y 50 °C, las que no resultaron significativamente diferentes entre sí.

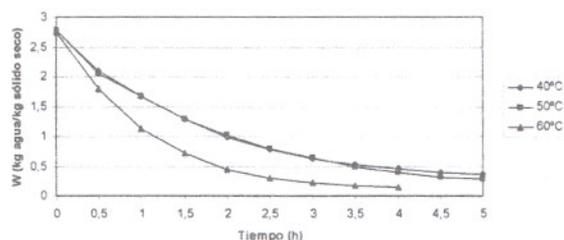


Fig. 1. Curvas de secado para cada temperatura.

La Fig. 2 refleja que la forma no lineal de las curvas indica la existencia de más de un período difusivo (13).

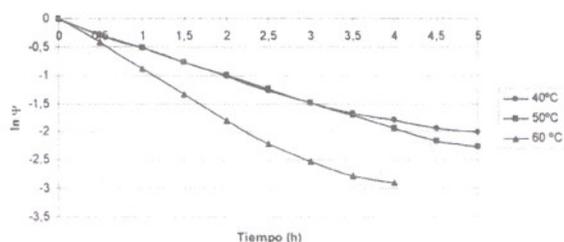


Fig. 2. Periodos de velocidad de secado decreciente en cada una de las temperaturas de secado.

La Fig. 3 muestra que para todas las temperaturas investigadas no existe una relación lineal en todo el rango de humedad adimensional, lo que permite concluir que la resistencia externa puede considerarse despreciable. Esta fue una suposición considerada en la resolución del modelo difusivo.

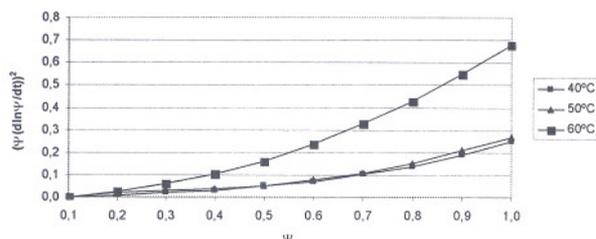


Fig. 3. Influencia de resistencia externa en cada temperatura de secado.

Cada grupo de datos correspondientes a cada uno de los períodos difusivos, se ajustó al modelo difusivo considerando el coeficiente de difusión constante, a partir de los modelos teórico (ecuación 3) y teórico simplificado (ecuación 4). La Tabla 1 reporta los valores de difusividad efectiva calculados a partir de cada modelo. Diversos autores han comprobado que el contenido de humedad puede influir significativamente en el coeficiente de difusividad efectiva (4, 12, 15).

Tabla 1. Difusividades efectivas correspondientes al primer y segundo períodos de secado

Temperatura (°C)	Modelo teórico simplificado		Modelo teórico	
	De.10 <sup>-10</sup> (m²/s)		De.10 <sup>-10</sup> (m²/s)	
	Primer período	Segundo período	Primer período	Segundo período
40	5,4769	2,6145	3,7459	3,4612
50	5,6910	2,9976	4,2515	3,9819
60	8,8577	4,6204	6,6883	5,9201

La Tabla 2 muestra los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  correspondientes al modelo de Peleg para cada período difusivo.

Tabla 2. Coeficientes del modelo de Peleg

T (°C)	Primer período difusivo		Segundo período difusivo	
	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
40	0,64	0,25	0,33	0,34
50	0,56	0,26	0,29	0,34
60	0,39	0,26	0,16	0,34

Las descripciones de las cinéticas de secado mediante este modelo resultaron satisfactorias, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación y el EMR. El parámetro cinético  $k_1^{-1}$  mostró una tendencia creciente con la temperatura. La constante  $k_2$  no presentó variaciones significativas con la temperatura (Tabla 2). Este parámetro, considerado característico del material, no depende de las condiciones de operación (16-18).

Un aumento de la temperatura de secado provocó una degradación de los polifenoles, disminuyendo así la actividad antioxidante. La Tabla 3 muestra la actividad antioxidante a partir de las extracciones realizadas en el orujo secado a las temperaturas indicadas. El análisis estadístico arrojó diferencias significativas entre la actividad antioxidante del orujo secado a 40 y 50 °C respecto a la del secado a 60 °C.

Tabla 3. Actividad antioxidante de los extractos obtenidos a partir de muestras secadas a 40, 50 y 60 °C

Temperatura de secado (°C)	Actividad antioxidante (g Fe <sup>2+</sup> /g muestra)	
	x	s
40	0,05178 a	2,6.10 <sup>-4</sup>
50	0,05172 a	5,8.10 <sup>-4</sup>
60	0,05151 b	6,7.10 <sup>-4</sup>

## CONCLUSIONES

Tanto el modelo teórico, en sus dos variantes, como el modelo de Peleg, resultan adecuados para describir la cinética de secado. Los valores de la difusividad efectiva calculados a partir del modelo teórico, estuvieron entre 5,47.10<sup>-10</sup> m²/s y 8,85.10<sup>-10</sup> m²/s para el primer período de velocidad de secado decreciente y entre 2,61.10<sup>-10</sup> m²/s y 4,62.10<sup>-10</sup> m²/s.

La actividad antioxidante de los extractos secados a las temperaturas de 40 y 50 °C alcanzó el mayor valor, no resultando significativamente diferentes. Este resultado evidencia la influencia del secado como operación previa a la operación de extracción.

## REFERENCIAS

1. Maier, T.; Schieber, A.; Kammerer, D. y Carle, R. *Food Chem.* 112: 55-559, 2009.
2. Moure, A.; Cruz, J.; Franco, D.; Domínguez, J.; Sineiro, J.; Domínguez, H.; Núñez, M.; y Parajó, J. *Food Chem.* 72: 145-171, 2001.
3. Chou, S. *Trends Food Sci. Technol.* 12: 359-369, 2001.
4. Mulet, A. *J. Food Eng.* 22: 329-348, 1994.
5. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion.* Oxford, Clarendon Press, 1975.
6. Doymaz, I. *J. Food Eng.* 55: 331-335, 2002.
7. Rosselló, C.; Cañellas, J.; Simal, S.; Berna, A. *J. Agric. Food Chem.*, 40 (12): 2374-2378, 1992.
8. Peleg, M. *J. Food Sci.* 53 (4): 1216-1219, 1988.
9. Krokida, M.; Zogzas, N. y Maroulis, Z. *Int. J. Food Propert.* 4: 373-382, 2001.
10. Benzie, I. y Strain, J. *J. Analyt. Biochem.* (239): 70-76, 1996.
11. Mc Minn, W. y Magee, T. *Drying Technol.* 14 (9): 2025-2040, 1996.
12. Azzouz, S.; Guisan, A.; Jomaa, W. y Belghith, A. *J. Food Eng.* 55: 323-330, 2002.
13. Maskan, M. *J. Food Eng.* 37: 437-449, 1998.
14. Zogzas, N.; Maroulis, Z. y Marinos-Kouris, D. *Drying Technol.* 12 (3): 483-515, 1994.
15. Simal, S.; Rosselló, C.; Berna, A. y Mulet, A. *J. Food Eng.* 37: 423-435, 1998.
16. Sopade, P. y Kaimur, K. *Drying Technol.* 17 (4-5): 975-989, 1999.
17. García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Bon, J.; Carreras, J. y Mulet, A. *J. Sci. Food Agric.* 85: 1397-1404, 2005.
18. Blasco, M.; García-Pérez, J.; Bon, J.; Carreras, J. y Mulet, A. *Food Sci. Technol. Int.* 12 (4): 315-323, 2006.