

APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS AL PROCESO DE SECADO ASISTIDO POR INFRARROJOS DE DESCARTES DE LIMÓN (*Citrus limon (L.) Burm. F. Cv. Genova*)

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO INFRARED ASSISTED DRYING PROCESS OF LEMON WASTE (*Citrus limon (L.) Burm. F. Cv. Genova*)

LUIS PUENTE-DÍAZ

Dr- Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas – Universidad de Chile, lpuente@ciq.uchile.cl

ERIC ECHEGARAY- PACHECO

Ing - Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas – Universidad de Chile, eechegaray@ciq.uchile.cl

EDUARDO CASTRO- MONTERO

McS., – Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas – Universidad de Chile, ecastro@ciq.uchile.cl

KARINA DI SCALA

Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. kdiscala@fi.mdp.edu.ar

Recibido para revisar Mayo 12 de 2012, aceptado Mayo 17 de 2013, versión final Agosto 27 de 2013.

RESUMEN: Los desechos agroindustriales son uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial. Debido a las altas exigencias de calidad, la comercialización de limones de exportación genera grandes cantidades de desechos. Los descartes de limón contienen fibra, pectina, potasio, calcio y vitamina C. Por lo tanto, es importante desarrollar alternativas de procesamiento de estos sub-productos para agregarles valor y aumentar su vida útil. El objetivo de la presente investigación fue la aplicación del secado asistido por infrarrojos, como tecnología emergente, para estudiar el efecto de la temperatura de proceso sobre las cinéticas de secado de descartes de limón a 30, 40 y 50°C. Se utilizaron seis modelos matemáticos de capa fina encontrados en literatura para representar la cinética experimental. Basándose en análisis estadístico, el modelo Logarítmico presentó el mejor ajuste. Los valores de la difusividad efectiva del agua se estimaron en el rango de $9.45 \times 10^{-10} - 3.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. El valor de la energía de activación fue 55.90 kJ/mol.

PALABRAS CLAVE: secado por infrarrojos, modelamiento matemático en capa fina, coeficiente de difusividad efectiva, sub-productos, limón.

ABSTRACT: Agroindustrial wastes are a major environmental problem worldwide. Due to high quality requirements, commercialization of export lemons generates huge amounts of wastes. Lemon wastes have fiber, pectin, potassium, calcium and vitamin C. Therefore, it is important to develop alternative processing methods to add value and improve their shelf life. The aim of this work was to apply infrared drying, as an emergent technology, to study the effect of drying temperature on the drying kinetics of lemon waste at 30, 40 and 50°C. Six thin layer models found in literature were used to represent the experimental drying kinetics. Based on statistical tests, the Logarithmic model presented the best fit. Values of moisture effective diffusivities were in the range of $9.45 \times 10^{-10} - 3.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The value of activation energy was 55.90 kJ/mol.

KEYWORDS: infrared drying, thin layer mathematical modeling, effective diffusion coefficient, by-products, lemon.

1. INTRODUCCIÓN

El destino de los desechos agroindustriales es uno de los grandes problemas ambientales a nivel mundial. El uso de estos descartes como sub-productos se ha convertido en uno de los desafíos más importantes

en la industria alimentaria, ya que no sólo permite otorgarles un nuevo uso como materia prima, sino que además permite abaratar costos y contribuir a reducir el impacto ambiental [1].

En el año 2011 Chile exportó aproximadamente 171 000 toneladas de limones, ubicándolo en el lugar 14

del mundo [2]. En el caso de los limones, se pueden considerar como descartes todos aquellos frutos que tengan daño por frío, manchas, magulladuras, falta o excesiva madurez, entre otros. Dentro de las propiedades que poseen, se encuentra su alto contenido de fibra, pectina (principalmente en su cáscara), potasio, calcio y por sobre todo vitamina C [3]. Sin embargo, estos desechos son altamente perecibles, debido a la alta humedad que presentan, por lo cual el secado es una alternativa para aumentar la vida útil de los mismos [4]. El secado se puede realizar utilizando diferentes métodos, entre ellos, se encuentra el secado por infrarrojos. La radiación es un método de transferencia de calor que permite el secado de alimentos producida por la interacción entre las ondas electromagnéticas originadas por el generador de infrarrojos (IR), y el agua presente en el alimento, originando vibraciones mecánicas de las moléculas o de un conjunto molecular particular en un fenómeno muy complejo de superposición [5], generando un calentamiento volumétrico.

Los IR corresponden a una radiación con una longitud de onda que se encuentra entre los 0,78 y 1000 μm , situándose entre el espectro de la luz visible y microondas. La radiación infrarroja penetra directamente en los productos a secar con una transferencia directa de energía térmica, donde la profundidad de penetración depende generalmente de la absorbancia del producto, siendo el agua el componente que más absorbe la radiación infrarroja, cumpliendo la Ley de Lambert-Beer en relación a la absorción de energía de un cuerpo con respecto a una determinada emisión de luz [6]. Dentro de las ventajas del IR se encuentran la protección del producto de contaminación (con respecto al secado solar), su versatilidad, simplicidad del equipamiento requerido, rápida respuesta de calentamiento y secado, fácil instalación de la cámara de secado y bajo costo de capital [7]. Varias aplicaciones de IR se han publicado en diversas investigaciones en frutas y vegetales como: apios [7], castañas [8], pimientos rojos [9], cebollas [10] y duraznos [11].

Por otro lado, el uso de modelos matemáticos que representen la cinética de secado de los alimentos contribuye a predecir tiempos de procesamiento y así optimizar la eficiencia del secado [12]. El objetivo de este trabajo es estudiar el proceso del

secado por infrarrojos para descartes de limón como posible tecnología de preservación. Para ello se prevé, determinar las cinéticas de secado a cada una de las temperaturas empleadas aplicando modelos matemáticos de capa fina y evaluar la bondad del ajuste de los mismos a los datos experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia prima

La materia prima utilizada fue descartes de limón, obtenidos a través del proyecto FIA-VERAGRO (EST-2008-0208), procedentes del sector de Talagante, Melipilla, Padre Hurtado e Isla de Maipo, Chile.

Las muestras fueron seleccionadas, descartando aquellas con presencia de hongos y/o características organolépticas alteradas. Luego, cada una de las muestras fue separada en cuatro partes y molida hasta formar una pasta homogénea. Se almacenaron en bolsas de polietileno a temperatura de congelación (-24°C) para su posterior uso.

2.2. Dispositivo experimental

La Fig. 1 muestra el secador a escala de laboratorio utilizado. El mismo consiste en una cámara de secado formada por un material aislante, recubierto internamente con material refractante, cuyas dimensiones son 300 x 370 x 270 mm. En la parte superior de la cámara se encuentra una balanza con precisión de 0.01 g (Radwag WTB3000, Polonia) para medir el peso de la muestra distribuida en una rejilla de 130 x 120 x 20 mm. La balanza está conectada a través de una conexión RS232 a un computador que registra los valores obtenidos en el tiempo. En la parte inferior de la cámara, se encuentra un foco infrarrojo de 250W de potencia máxima (OSRAM Siccatherm 220-230V, Alemania), para efectos del secado, se regula la potencia a través de un potenciómetro, el que permite entregar distintas temperaturas de secado. En la parte lateral, la cámara posee un ventilador (Garrity YF52209, 130 m^3/h , China) que permite ingresar flujo de aire desde el ambiente para arrastrar el vapor formado por el secado y bajar la temperatura de los valores deseados.

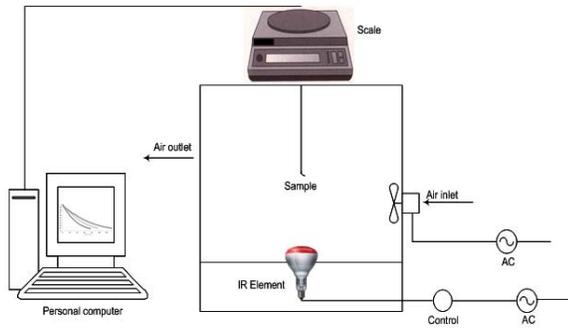


Figura 1. Esquema del Secador por Infrarrojos

2.3. Experimentos de Secado

La muestra fue descongelada a temperatura de refrigeración (5°C) durante 24 horas previas al secado. La humedad inicial se determinó en estufa a 105°C por 5 horas según norma AOAC 934.06 [13]. En el secador las muestras fueron distribuidas en la rejilla formando una capa de 0.5 cm de espesor con un peso aproximado de 65 ± 2g, obteniendo una densidad de carga de 0.06 g/cm². Durante la experiencia de secado, se trabajó a tres temperaturas diferentes: 30, 40 y 50°C, con una velocidad de aire de 1 m/s. La variación de peso de la muestra durante el secado fue registrada en el computador, desde donde se obtuvieron los datos cada 15 minutos durante la primera hora, 30 minutos durante las dos horas posteriores y finalmente cada una hora hasta que la muestra llega a una humedad del 5% (base seca). Las mediciones se realizaron por triplicado.

2.4. Cálculo del Coeficiente de Difusividad Efectiva y Energía de Activación

Para el cálculo del coeficiente de difusividad efectiva, se utilizó la solución analítica de la segunda ecuación de Fick, la cual resulta adecuada para fenómenos difusivos durante la transferencia de masa en el alimento durante el secado hasta alcanzar el equilibrio [12]. Asumiendo que los descartes de limón se asemejan a una lámina infinita, que la transferencia de masa es unidimensional y los tiempos de secado son largos, la expresión matemática del modelo se puede escribir como:

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi} * \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L_0^2} \right) \quad (1)$$

Donde: D_{eff} es el coeficiente de difusividad efectiva (m/s²) y L₀ es el semiespesor de la capa a secar (m). D_{eff}

es determinado a través de la gráfica de los datos experimentales de ln(MR) versus tiempo, a través de la pendiente $\frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L_0^2}$ de la Ec.1.

En general, la influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva del agua en los alimentos sigue una tendencia tipo Arrhenius, la relación descrita por la ecuación (2) y al representar el ln D_{eff} vs 1/T se obtiene una línea recta de cuya pendiente se obtiene la E_a y de la ordenada al origen se obtiene el factor de Arrhenius (D₀).

$$D_{eff} = D_0 \exp \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

Donde: D₀ es el factor de Arrhenius, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta.

2.5. Modelamiento Matemático

Se utilizaron seis modelos matemáticos de capa fina de los más utilizados en la literatura para representar la cinética de secado experimental de descartes de limón. La Tabla 1 muestra las expresiones de los modelos seleccionados: Newton (Ec. 3), Page (Ec. 4), Page modificado (Ec. 5), Henderson-Pabis (Ec. 6), Henderson-Pabis modificado (Ec. 7) y Logarítmico (Ec. 8). En estos modelos, la variable dependiente es MR la cual representa la relación de humedad ($MR = \frac{M}{M_0}$).

Donde: M es la humedad del producto en un tiempo determinado, M₀ la humedad en tiempo inicial, t es el tiempo de secado y k, n, a, b, c, g y h son parámetros o constantes de los modelos.

Tabla 1. Modelos Matemáticos Utilizados

Ec.	Modelo	Ref
3	$MR = \exp(-kt)$	[14]
4	$MR = \exp(-kt^n)$	[15]
5	$MR = \exp(-kt)^n$	[16]
6	$MR = a * \exp(-kt)$	[17]
7	$MR = a * \exp(-kt) + b * \exp(-gt) + c * \exp(-ht)$	[18]
8	$MR = a * \exp(-kt) + c$	[18]

2.6. Análisis estadístico

Para evaluar el ajuste de los modelos matemáticos con los datos experimentales, se utilizaron los siguientes coeficientes estadísticos: CHI-cuadrado (χ^2), suma de los errores al cuadrado (SSE) y raíz cuadrada de los errores al cuadrado (RMSE). Los mejores ajustes serán de aquellos modelos que presenten los valores más bajos valores de χ^2 , SSE y RMSE [13]. Las ecuaciones (9-11), expresan como calcular los valores estadísticos mencionados.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (9)$$

$$SSE = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (11)$$

Donde $MR_{exp,i}$ representan la relación de humedad obtenida experimentalmente, $MR_{pre,i}$ son las predicciones hechas por los modelos matemáticos, N es el número de datos y z el número de constantes. El ajuste y los cálculos de estos análisis estadísticos se realizaron con el programa Microsoft Excel 2010.

2.7. Consumo energético

Para el secador por infrarrojos, el consumo de energía está dado por la suma de la lámpara infrarrojos y el ventilador usado para arrastrar el vapor producido por el secado de la muestra dentro de la cámara. Para el cálculo se tomará en cuenta la ley de Stefan-Boltzmann, la energía proporcionada por la irradiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del material (Ec. 12) [19]

$$E_1 = \sigma * T^4 \quad (12)$$

E_1 es la energía expresada en kW/m², T la temperatura del material refractante (K) y σ la constante de Stefan-Boltzmann ($56.7 * 10^{-12}$ kW/m²K⁴). Para expresar la energía en unidades de kW.h, se necesita el tiempo total de secado (h) y la superficie a secar (m²). Para calcular la energía consumida con el ventilador (E_2), se utilizará la Ec. 13 [19].

$$E_2 = \frac{V^3}{16,600} \quad (13)$$

E_2 es la energía consumida por el ventilador en cada ciclo de secado (kW) y V es la velocidad del aire (m/s). Para obtener el valor en kW/h, se debe multiplicar por el tiempo total de secado (h).

Finalmente, el consumo total de energía estará dado por la suma de E_1 y E_2 (Ec. 14).

$$E_3 = E_1 + E_2 \quad (14)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características del secado por infrarrojos a diferentes temperaturas.

La humedad inicial de la materia prima fue de $88.29 \pm 0.5\%$ (base húmeda). La Fig. 1 muestra las curvas experimentales de secado de los descartes de limón a las tres temperaturas estudiadas. Los tiempos de secado para alcanzar la humedad establecida del 5% fueron de 660 ± 109 , 480 ± 23 y 420 ± 38 minutos para las temperaturas de 30, 40 y 50°C, respectivamente. La forma exponencial de las curvas de secado se ha evidenciado en trabajos similares de secado por IR de frutas [9] y de subproductos agroindustriales tales desechos de uva [21] y para la elaboración de subproductos en base de tomate [15].

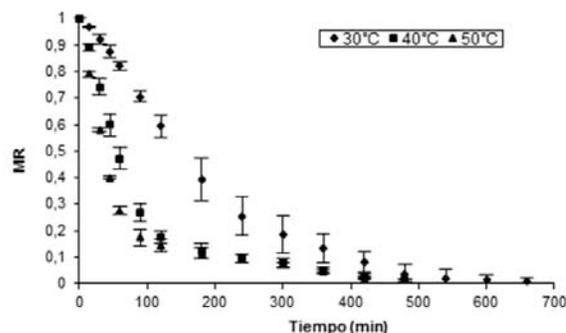


Figura 2. Curvas de secado experimentales de los descartes de limón para las tres temperaturas empleadas.

Si bien la temperatura de 30°C es la que presenta menores velocidades de secado, se han publicado trabajos donde se utiliza esta condición del aire de secado para evitar fenómenos de endurecimiento de la capa externa del descarte [20].

3.2. Determinación del coeficiente de difusividad efectiva y Energía de Activación

A partir de la Ec. (2) se obtuvieron los siguientes valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua 9.45×10^{-10} , 2.36×10^{-9} y $3.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para 30, 40 y 50°C , respectivamente. Estos valores de D_{eff} pertenecen al rango de 10^{-12} y $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ correspondientes a alimentos o sistemas alimentarios [14] y son comparables con los valores hallados para el secado asistido por infrarrojos de murta, papa dulce y zanahorias [22, 23, 24].

Utilizando la Ec. (2) se determinó un valor de energía de activación de 55.9 kJ/mol . El valor encontrado es mayor que el valor informado durante la deshidratación del residuo de la torta de prensado de las olivas, zanahorias y pimiento rojo, pero menor que la menta y el té negro [14, 25, 26].

3.3. Modelado matemático de la cinética de secado

La Tabla 2 presenta los valores de los parámetros de ajuste de los modelos seleccionados. Se pudo observar que en los modelos de Newton, Henderson-Pabis y Logarítmico, la constante κ , correspondiente al valor exponencial decreciente es dependiente de la temperatura, pues mientras más alta sea ésta, su valor va aumentando. Con respecto al modelo de Henderson-Pabis modificado, los valores κ y g presentan el mismo comportamiento que se describió anteriormente. El mencionado efecto de la temperatura sobre las constantes cinéticas ha sido informado en trabajos previos de secado de diversas frutas [29, 30]. Caso contrario, pasa al revisar el modelo de Page modificado, donde no presenta una dependencia de temperatura.

Tabla 2. Valores de los parámetros de correlación de los modelos de secado seleccionados

	Newton		Page		Page Modificado		Henderson-Pabis		H-P Modificado					Logarítmico		
	κ	κ	n	κ	n	a	κ	a	κ	b	g	c	h	a	κ	c
30°C	0.0050	0.0008	1.3767	0.0052	1.3767	1.0763	0.0055	0.3664	0.0055	0.3608	0.0055	0.0440	0.0055	1.1264	0.0047	-0.0676
40°C	0.0122	$3.31\text{E-}03$	3.9836	0.0134	3.9836	1.0367	0.0128	0.5073	0.0142	0.4978	0.0142	0.0440	0.0005	1.0128	0.0141	0.0358
50°C	0.0186	0.0111	1.1529	0.0052	1.1529	1.0042	0.0188	0.4632	0.0244	0.4447	0.0244	0.1212	0.0023	0.9825	0.0223	0.0617

3.4. Análisis de ajustes de modelamiento.

La Fig. 3 muestra los valores promedios de los tests estadísticos aplicados. De la comparación de los

datos experimentales con los modelos matemáticos propuestos y apoyados en los valores entregados por los coeficientes estadísticos, se puede inferir que el modelo que presenta el mejor ajuste con los datos experimentales es el modelo Logarítmico. Los valores promedios de los estadísticos obtenidos por este modelo, empleados a cada temperatura presentan valores para SSE, RMSE χ^2 dan valores por debajo de 0.001, 0.08 y 0.003 respectivamente, presentando un buen valor de ajuste [16].

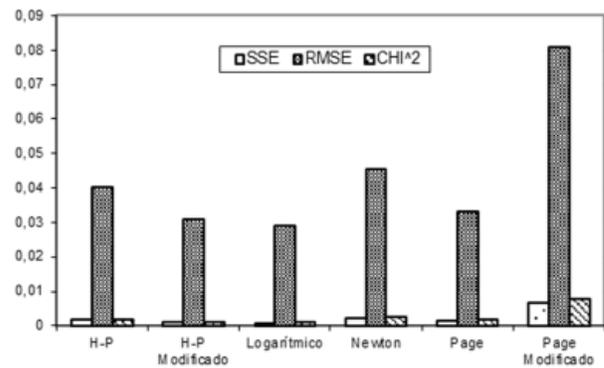


Figura 3. Valores estadísticos promedios para los modelos de capa fina seleccionados.

La Figura 4 muestra la comparación de los datos experimentales de MR con los estimados a través del modelo Logarítmico ($r^2 = 0.991$). En base a los resultados obtenidos, se recomienda utilizar este modelo para estimar tiempos de operación de descartes de limón secados mediante infrarrojos en el rango de temperatura de $30\text{-}50^\circ\text{C}$.

3.5. Cálculo del consumo energético

El consumo de energía para los descartes de limón fue de $0.886 (\pm 0.0016)$, $0.788 (\pm 0.0039)$ y $1.015 (\pm 0.031) \text{ kWh}$ para 30, 40 y 50°C , respectivamente. Al aumentar la temperatura del medio de secado se causa una disminución del tiempo de operación, sin embargo no se observó una tendencia definida entre la temperatura y el consumo de energía. A 40°C se observó el menor consumo de energía. Resultados similares fueron publicados en trabajos previos de alimentos secados por IR [29, 30]. Basándose en los resultados obtenidos, se sugiere secar los descartes de limón a 40°C .

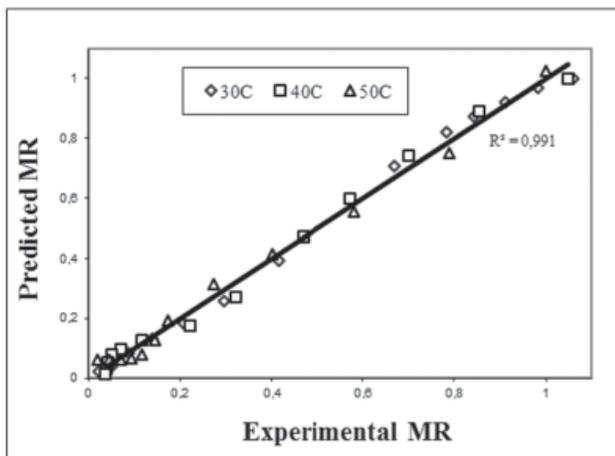


Figura 4. Valores de MR: experimentales y estimados con el modelo Logarítmico de la Relación de humedad.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de secado por IR de descartes de limón como alternativa de tecnología de preservación, permitió estudiar el efecto de la temperatura de proceso sobre la cinética de secado y consumo energético del mismo. El modelo que mejor representó las curvas de secado experimentales para las tres condiciones estudiadas fue el modelo Logarítmico. Por lo tanto, se recomienda utilizar este modelo para el secado de descartes de limón en finas capas por infrarrojos entre 30-50°C. Los valores de los coeficientes de difusividad efectiva del agua obtenidos fueron 9.45×10^{-10} , 2.36×10^{-9} y $3.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^2$ para 30, 40 y 50°C, respectivamente. La energía de activación se estimó en 55.90 KJ/mol. En cuanto al consumo energético, se recomienda deshidratar a los descartes de limón a 40°C ya que esta temperatura presentó el menor consumo de energía para llegar a un contenido de agua final de 5%.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración al proyecto de FIA-VERAGRO, financiado por la Fundación de Innovación Agraria (EST-2008-0208).

6. REFERENCIAS

[1] Rezzadori, A., Benedetti, S. and Amante, E.R., Proposals for the residues recovery: orange waste as raw material for

new product. Food and Bioproducts Processing, in press, 2012.

[2] FAOSTAT, Country Rank in the World by Commodity. Disponible: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, 2011.

[3] Jury, G., Urteaga, C. and Taibo, M., Porciones de intercambio y composición química de los alimentos de la pirámide chilena. LOM Ediciones, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 1997.

[4] López, A., Iguaz, A., Esnez, A. and Virseda, P. Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology*, 18 (4&5), pp. 995-1006, 2000.

[5] Ratti, C. and Mujumdar, A. S. Infrared Drying. En: *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition, Taylor & Francis Group, pp. 423-438, 2006.

[6] Chua, K. and Chou, S. Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 519-528, 2003.

[7] Ježek, D., Tripalo, B., Brnčić, M., Karlović, D., Rimac Brnčić, S. and Vikić-Topić, D., Dehydration of Celery by Infrared Drying, *Croatica Chemica Acta*, 81, pp. 325-331, 2008.

[8] Hebbar, U.H. and Ramesh, M., Optimisation of processing conditions for infrared drying of cashew kernels with testa. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, pp. 865-871, 2005.

[9] Nasiroglu, S. and Kocabiyik, H., Thin-layer infrared radiation drying of red pepper slices. *Journal of Food Process Engineering*, 32, pp. 1-16, 2009.

[10] Praveen Kumar, D., Umesh Hebbar, H., Sukumar, D. and Ramesh, M., Infrared and hot air drying onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29 (2), pp. 132-150, 2005.

[11] Wang, J. and Sheng, K., Far-infrared and microwave drying of peach. *Swiss Society of Food Science and Technology*, 39, pp. 247-255, 2006.

[12] Vega-Galvez, A., Miranda, M., Puente-Díaz, L., Lopez, L., Uribe, E., Rodriguez, K. and Di Scala, K., Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresource Technology*, 101(19), pp. 7265-7270, 2010.

[13] AOAC INTERNATIONAL. *Official Methods Of Analysis AOAC International* (16^o edición), Gaithersburg.

- [14] Togrul, H., Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77 (3), pp. 610-619, 2006.
- [15] Ruiz-Celma, A., López-Rodríguez, F. and Cuadros Blazquez, F. Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and Bioprocess Processing*, 87 (4), 282-291, 2009.
- [16] Sharma, G., Verma, R. and Pathare, P., Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), pp. 282-286. 2005.
- [17] Shi, J., Pan, Z., Mchugh, T., Wood, D., Hirshberg, E. and Olson, D., Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT-Food Science and Technology*, 41 (10), pp. 1962-1972, 2008.
- [18] Morsetto, J., Lema, A., Pontin, M. y Paisio, G., Estudio preliminar sobre la cinética de secado para perejil en condiciones de secado solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, pp. 141-146, 2008.
- [19] Motevali, A., Minaei, S. and Khoshtagaza, M., H. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, 52, pp. 1192-1199, 2011.
- [20] Garcia-Perez, J., Cárcel, J. and Clemente, G., Mulet, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT-Food Science and Technology*, 41 (1), 18-25, 2008.
- [21] Ruiz-Celma, A., Lopez-Rodríguez, F. and Cuadros Blazquez, F., Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food and Bioprocess Processing*, 87 (4), pp. 247-253, 2009.
- [22] Puente-Diaz, L., Ah-Hen, K., Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, L. and Di Scala, K. Combined Infrared-Convective Drying of Murta (*Ugni molinae* Turcz) Berries: Kinetic Modelling and Quality Assessment. *Drying Technology*, in press, 2012. DOI: 10.1080/07373937.2012.736113
- [23] Doymaz, I., Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Science and Technology*, 49, pp. 760-766, 2012.
- [24] Botelho, F., Corrêa, P., Goneli, A., Marcio, A., Martins, A., Magalhães, F. and Campos, S., Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15 (8), pp. 845-852, 2011.
- [25] Celma, A.R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I. and Miranda, T., Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80, pp. 1261-1271, 2007.
- [26] Celma, A.R., Rojas, R. and Lopez-Rodriguez, F. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing*, 47, pp. 1810-1818, 2008.
- [27] Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Oyanadel, R., Saavedra Torrico, J. and Miranda, M. Characteristics of Convective Drying of Pepino Fruit (*Solanum muricatum* Ait.): Application of Weibull Distribution. *Food Bioprocess Technology*, 4(8), pp. 1349-1356, 2011.
- [28] Torres, R., Montes, E., Andrade, R., Pizarro, O., Pérez, M. y Toscano, H., Cinética de secado en dos variedades de ñame. *Dyna*, 171 (79), pp. 175-182, 2012.
- [29] Nowak, D. and Lewicki, P., Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, pp. 353-360, 2004.
- [30] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtagaza, M.H. and Amirnejat, H., Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energ pp,y*, 36, 6433-6441, 2011.