

SECADO DE ZANAHORIA EN UN SECADERO SOLAR COMPACTO

García Victor¹, Bistoni Silvia¹, Iriarte Antonio¹, Rugani Ana²

¹Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET

²Becaria estudiantil

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca

M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. victorgarcia958@gmail.com

Recibido 14/08/19, aceptado 21/10/19

RESUMEN: El secadero solar compacto es un secadero indirecto en convección forzada. Está formado por dos módulos, uno sobre otro y conectados entre sí en uno de sus extremos. La parte superior contiene la placa absorbidora de la radiación solar; la parte inferior es la cámara de secado propiamente dicha, donde se ubican las bandejas con el producto a deshidratar. En el presente trabajo se muestran los resultados del secado de zanahoria en el secadero solar compacto. Se analizan las temperaturas del aire dentro del secadero, la cinética de secado y mediante ocho modelos matemáticos. Se ajustan los datos experimentales de las curvas de secado. De acuerdo a los criterios estadísticos (R^2 , RMSE y χ^2) el modelo que mejor ajustó las curvas de secado fue el logarítmico. Se calculó la eficiencia global del sistema para el primer y segundo día obteniéndose valores de 32 % y 26 % respectivamente. El secadero compacto resultó técnicamente adecuado para el deshidratado de zanahorias.

Palabras clave: deshidratado, zanahoria, secadero solar forzado

INTRODUCCIÓN

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es conocida por su contenido de nutrientes, además de cantidades apreciables de B1, B2, B6 y B12 vitaminas y minerales. Es una hortaliza que tiene uno de los más altos niveles de carotenoides, siendo éste un precursor de la vitamina A, con gran interés por su papel como antioxidante.

La zanahoria deshidratada se utiliza como ingrediente en sopas instantáneas y en diferentes tipos de comidas, por lo que es importante que el valor nutricional se conserve durante el secado (Liu et al., 1992).

En los últimos años, Iriarte et al. (2013, 2014, 2015) ensayaron secaderos formados por tendaleros de 10 m de longitud, ancho de 1,8 m y de 16 m de longitud por el mismo ancho. Una desventaja que presenta este tipo de secadero, por ejemplo, cuando los productos a secar son aromáticas, es que provoca un cambio de color al recibir radiación solar directa. A fin de darle una solución a este inconveniente se decidió ensayar un secadero indirecto que estuviera formado básicamente por un tendalero que actuara como colector solar y la cámara de secado construirla debajo del colector, ambos con igual superficie.

En esta línea de investigación, Iriarte y Bistoni (2016) presentaron el diseño y simulación de un tendalero solar indirecto con flujo forzado. En la parte superior se ubicó el colector y debajo la cámara de secado, lo cual permite el secado de productos que se vean afectados por la radiación directa. El diseño fue analizado mediante el software Simusol. Este modelo permitió ajustar la longitud óptima del colector en 5,5 m. Siguiendo las pautas de diseño obtenidas por la simulación numérica se construyó un secadero solar compacto y se instaló en el campo experimental del INTA, Sumalao. Se realizaron ensayos sin carga de producto y se comparó los datos experimentales con los simulados por el mismo modelo de simulación que se utilizó para el diseño del equipo y se sugieren modificaciones en el ducto que une colector y secadero y en las aislaciones (Iriarte y Bistoni, 2018).

En el presente trabajo se muestran los resultados del secado de zanahoria en el secadero solar compacto, clasificado como secadero indirecto en convección forzada. Se analizan las variaciones de temperatura del aire dentro del secadero, la cinética de secado y se ajustan las curvas de secado mediante un modelo matemático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del secadero solar

El secadero está ubicado en el campo experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Valle Viejo, Provincia de Catamarca (28,4732 S; 65,7307 O).

Está formado por dos módulos uno sobre otro y conectados entre sí en uno de sus extremos. El módulo superior contiene la placa absorbadora de radiación solar, ventiladores y las cubiertas que la aíslan del exterior; el módulo inferior es la cámara de secado propiamente dicha, donde se ubican las bandejas con el producto a deshidratar. En la Fig. 1 se muestra un esquema con los detalles de su diseño.

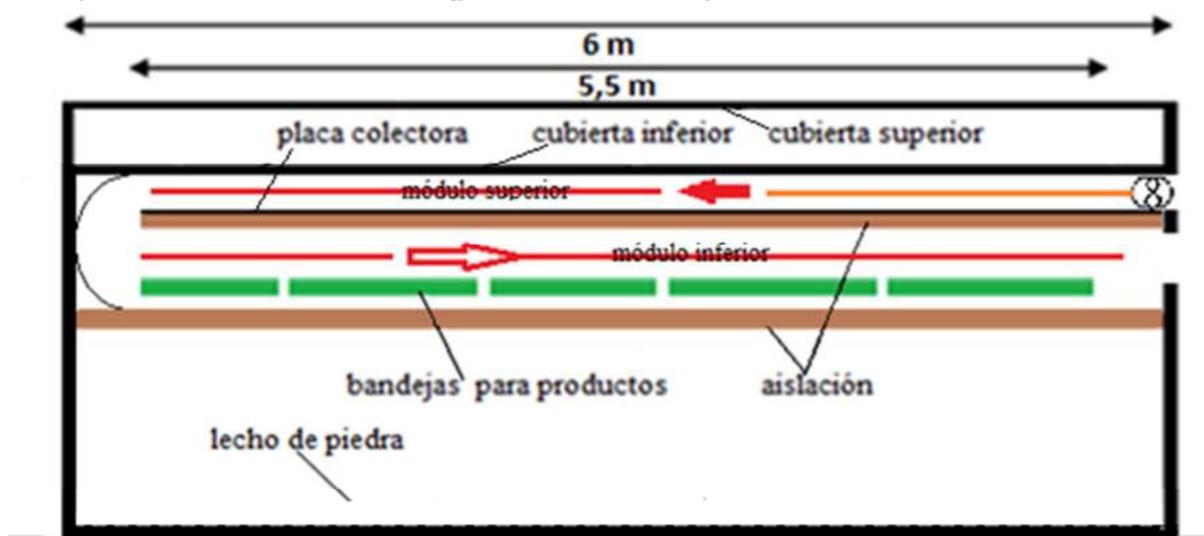


Figura 1. Corte longitudinal del secadero solar compacto

La placa absorbadora de 5,5 m de longitud y 1,8 m de ancho, está formada por una capa de lana de vidrio que posee una de sus caras aluminizada y está pintada de negro. Posee dos cubiertas: la inferior, plana, está a 10 cm de la placa colectora; la superior es una cubierta semicircular de altura máxima de 0,20 cm, cuyo eje es paralelo al flujo de aire y está en contacto con el exterior. La doble cubierta permite proteger al colector de los vientos de la zona y obtener mayor aislación en la parte superior. Ambas son de plástico (LDT). El aire, con un flujo promedio de 0,17 Kg/s, es impulsado por tres ventiladores de 45 W cada uno, a través del ducto que forma la placa absorbadora y la cubierta inferior.

La cámara de secado es un conducto de 1,8 m de ancho y aproximadamente 0,13 m de alto, delimitada en la parte superior por la aislación de la placa y en la inferior por la aislación de la cámara de secado ubicada debajo de las bandejas. Las 10 bandejas están a 5 cm de la parte superior de la cámara y se colocan en la cámara por ambos laterales. Estos espacios son cerrados mediante puertas rebatibles de placas cementicia de “super board” de 4 mm.

En el suelo, debajo del secadero, se colocó un plástico negro para evitar el crecimiento del pasto y sobre el mismo se puso ripio, con el propósito de acumular parte del calor que pierde el sistema en la parte inferior. Desde las puertas de acceso a las bandejas hasta la superficie de tierra se cubrió con un plástico negro para protegerlo de los vientos. En la figura 2 se muestra el secadero construido.



Figura 2: Vista del secadero solar compacto

Instrumentos utilizados para las mediciones experimentales

Las mediciones de temperatura del aire de entrada y salida del secadero se midieron con termopares de cobre-constantán y se usaron HOB0 4- canal thermocouple Logger, que permiten medir temperaturas en el rango de - 40 °C a 75 °C (precisión de ± 0,5 °C, resolución de 0,02 °C). Los sensores se ubicaron a lo largo del sistema en la dirección del flujo de aire. Los registros fueron cada 15 minutos durante el ensayo.

La radiación solar se midió con un piranómetro horizontal Kipp & Zonen (± 5 %). Las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia. La velocidad del aire dentro del secadero fue medida con un anemómetro de hilo caliente TSI 8345 (±0,05 m s⁻¹), en diferentes puntos en dirección transversal y a lo largo del colector y secadero.

Determinación de curvas de secado

Para la evaluación del secadero se utilizó zanahoria de la variedad Chantenay, fueron adquiridas en un comercio local; se cortaron manualmente en rodajas circulares de aproximadamente 5 mm de espesor y no se las sometió a ningún tratamiento.

Para determinar el contenido inicial de humedad de la zanahoria se colocaron tres muestras en estufa a 104 °C hasta obtener peso constante. Para determinar las curvas de secado se colocaron dos muestras por cada bandeja, se las pesó cada hora retirándolas del secadero y se consideró el promedio por bandeja. Para pesar las muestras se utilizó una balanza electrónica con apreciación 0,1g.

Se calculó la eficiencia global del sistema para un secadero en convección forzada mediante la ecuación 1 (Augustus Leon et al., 2002):

$$\eta = \frac{W L_v}{I A t + P_f} \quad (1)$$

Donde:

- P_f: es la energía consumida por los ventiladores en kWh;
- W: es la masa de agua evaporada (kg) en el tiempo t,
- L_v: calor latente de evaporación del agua (kJ kg⁻¹),
- I: radiación solar por unidad de área de colección (W m⁻²)
- A: es el área de colección (m²)
- t: es el tiempo de secado (s).

Para la determinación de los modelos que ajustan las curvas de secado experimentales, se utilizaron las expresiones matemáticas detalladas que se muestran en la Tabla 1 (Seiiedlou et al., 2010).

Nombre Modelo	Ecuación del modelo
Newton	$MR = \exp(-k t)$
Page	$MR = \exp(-k t^n)$
Page modificado	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson – Pabis	$MR = a \exp(-k t)$
Logarítmico	$MR = a \exp(-k t) + c$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Aghbashlo	$MR = \exp[-k_1 t / (1 - k_2 t)]$

Tabla 1. Modelos matemáticos empleados para describir la cinética de secado

La relación de humedad se calculó mediante la ecuación (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

donde M_t es el contenido de humedad en el tiempo t en base seca (bs) y M_0 contenido de humedad inicial en base seca.

El análisis de regresión se realizó con el software estadístico Infostat versión 2018. El coeficiente R^2 fue uno de los criterios para la selección de la mejor ecuación. Además, para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido (χ^2), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo más adecuado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de R^2 y los valores más bajos de χ^2 y RMSE. Por otro lado, se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y aquellos en que la correlación de los coeficientes estimados no fue superior a 0,80. Los índices estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$MSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

RESULTADO

El secado se realizó durante el mes de mayo. Se colocaron 46 kg de zanahoria cortadas rodajas, distribuidas en 10 bandejas, cinco del lado N (identificadas con números pares) y cinco del lado Sur (identificadas con números impares) del secadero, obteniendo 4,9 kg de zanahoria deshidratada, figura 3. Los ventiladores funcionaron durante la noche.

Durante la experiencia de secado la temperatura del aire exterior, T_{ext} , varió en el primer día entre 10,1 °C y 26,4 °C a las 15,45 h; el segundo día entre 14 °C y 24,5 °C a las 14,30 h, el tercer día entre 16 °C y 24,4 °C y entre 16 °C y 23,4 °C el cuarto día. La irradiación fue aproximadamente de 12 MJ m⁻² para los cuatro días de secado, valor aceptable para el mes de mayo. Como se advierte en la figura 4 el valor máximo de la temperatura del aire a la entrada del secadero, $T_{e,S}$, fue en promedio de 48 °C. En los dos primeros días la variación de temperatura del aire entre entrada, $T_{e,S}$, y salida del secadero, $T_{s,S}$, fue de 11,85 °C y 12,5 °C, respectivamente y en el tercero y cuarto día esta variación fue de 10,17 °C y 9,70 °C respectivamente. Si bien es de esperar que por enfriamiento evaporativo haya una disminución en la temperatura del aire cuando circula sobre el producto, se considera que es necesario disminuir la variación de la temperatura del aire entre entrada y salida del secadero.



Figura 3.- Carga de zanahoria cortada en rodajas

La humedad relativa ambiente exterior, HR,ext, estuvo en promedio a 28 % durante las horas de sol y mientras que durante la noche del primer día alcanzó un valor promedio de 80 %, durante la segunda noche 60 % y durante la tercera noche un valor promedio de 65 %.

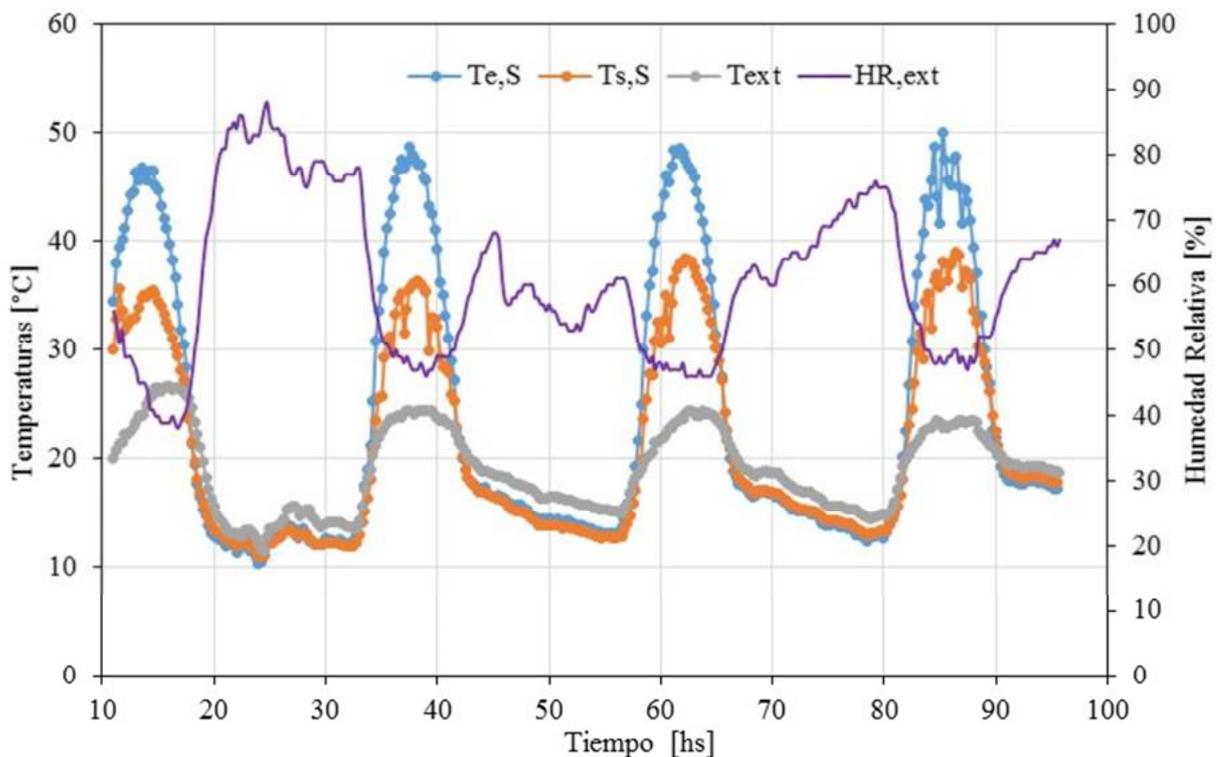


Figura 4.- Temperaturas del aire exterior, entrada y salida de secadero y humedad relativa exterior

En la figura 5 se muestran las curvas de secado, excluyendo la noche, para las muestras colocadas en las bandejas 1,2, 3, 5, 8, 9 y la curva de secado promedio.

El tiempo necesario para el secado, desde un contenido de humedad inicial de 8,47 g de agua/g materia seco a un contenido de humedad final de 6 % (bs) estuvo entre tres y cuatro días, según la ubicación de las muestras. Si se excluyen las horas de noche, el tiempo de secado para bandeja 1 fue 18 h y entre 21 y 23 h para las bandejas 8 y 9. Esta diferencia en los tiempos de secado entre las bandejas ubicadas

próximas a la entrada al secadero y a las de las salidas se debe principalmente a la diferencia de temperatura del aire entre entrada y salida del secadero, observada en la figura 4.

Para el ajuste del modelo matemático se consideró la relación de humedad (MR) para el promedio de las 10 bandejas. En la Tabla 2 se muestran los modelos que cumplieron los criterios fijados anteriormente. En todos los casos los valores de R^2 variaron entre 0,976 y 0,986 y los de χ^2 , RMSE y MBE entre 0,00138 y 0,00211 y entre 0,03485 y 0,04502 respectivamente.

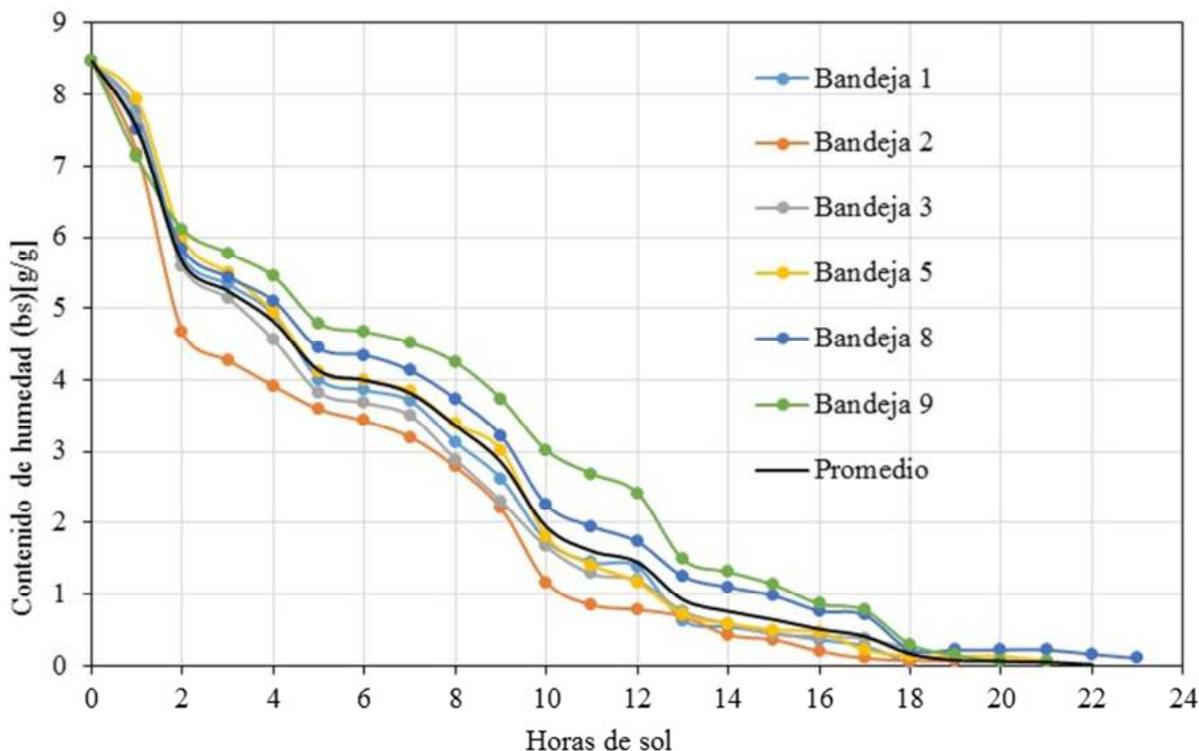


Figura 5. Curvas de secado por bandejas

Modelos	R^2	χ^2	RMSE
Newton	0,976	0,00211	0,04505
Henderson y Pabis	0,976	0,00221	0,04502
Wang & Singh	0,977	0,00215	0,04439
Logarítmico	0,986	0,00138	0,03485

Tabla 2 Resultados del análisis estadístico

Los coeficientes obtenidos a partir del ajuste logarítmico $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$ fueron:

$$k = 0,113 \pm 0,010$$

$$a = 1,071 \pm 0,032$$

$$c = -0,102 \pm 0,034$$

Como la eficiencia de secado varía significativamente con el contenido de humedad del producto, se calculó la eficiencia del global del secadero para el primer día y el segundo día de secado dando los valores de 32 % y 26 % respectivamente. El producto deshidratado presentó una buena calidad sensorial.

CONCLUSIONES

El secado de zanahoria utilizando energía solar, es una opción viable en zonas con características ambientales de elevada radiación solar, siendo un proceso de bajo costo operacional.

La temperatura y humedad del aire en un proceso de secado con energía solar, son variables dependientes de las condiciones meteorológicas, por lo cual es necesario un sistema de control durante el proceso de secado que permita encender y apagar los ventiladores.

El secadero compacto demostró ser apto para obtener productos deshidratados porque permitió reducir el tiempo de secado y mejorar la calidad del producto final.

Si bien los niveles de temperatura sobre las bandejas son aceptables, es conveniente mejorar el diseño a fin de aumentar la velocidad de circulación sobre el producto en la cámara de secado. Como el recorrido del aire desde los ventiladores del colector hasta la salida del secadero es de 12 m, conviene incorporar dos ventiladores - extractores a la salida. Además, será ventajoso considerar la incorporación de un sistema de calentamiento auxiliar para evitar el aumento de humedad dentro del secadero durante la noche.

El modelo de secado logarítmico, se consideró el mejor modelo para describir el comportamiento del secado de la zanahoria cortada en rebanadas por tener el valor más alto de R^2 y los valores más bajos de RMSE y χ^2 .

REFERENCIAS

- Augustus Leon M., Kumar S. y Bhattacharya, S.C (2002), A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food driers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(4), 367-393.
- Iriarte A. y Bistoni S. (2016). Diseño y simulación de un secadero solar doble paso para productos especiales. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación, Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, pp. 08.01-08.11.
- Iriarte A., Bistoni S., García V. y V. Luque, (2018) Ensayo y simulación de un secadero solar compacto, Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación, Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4.
- Iriarte A., Bistoni S., García V., Luque V. (2013). Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio de secado de manzanas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 17, pp. 21-28.
- Iriarte A., García V. y Bistoni S. (2015). Ensayos y simulación de un nuevo tendalero solar activo tipo túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 19, pp.02.29-02.38.
- Iriarte A., Rodríguez C., Bistoni S., Hall M. (2014). Simulación de un secadero solar tendalero túnel: Caracterización y optimización. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2014 Vol.18 pp. 825 – 834.
- Liu, J. R., Jeon, J. H., Yang, S. G., Lee, H. S., Song, N. H., & Jeong, W. J. (1992). Dry type of carrot (*daucus carota* L.) artificial seeds. *Scientia Horticulturae*, 51(1-2), 1-11.
- Seiiedlou S., GhasemzadehH., Hamdami N., Talati F.y Moghaddam M., 2010, Convective Drying of Apple : Mathematical Modelling and Determination of some Quality Parameters, *International Journal of Agriculture & Biology*, 12, 171-172. Recuperado de [http:// www. Fspublishers .org](http://www.Fspublishers.org).

CARROT DRYING IN A COMPACT SOLAR DRIER

ABSTRACT: Compact solar dryer is an indirect forced convection dryer. It consists of two modules connected to each other at one end. The upper part contains the solar radiation absorber plate; the lower part is the drying chamber itself, where the trays with the product to be dehydrated are located. This work shows the results of carrot drying in the compact solar dryer. Air temperature within the dryer and drying kinetics are analyzed. In order to select the appropriate drying model, eight mathematical drying models were fitted to the experimental data. According to the statistical criteria (R^2 , RMSE y χ^2) the Logarithmic model was found to be the best model to describe the drying curves. The overall efficiency of the system for the first and second day were calculated, obtaining values of 32 % y 26 % respectively. The compact dryer was found to be technically suitable for drying of carrots.

Keywords: drying, carrot, forced solar dryer