ANALISIS DE UN SECADERO SOLAR TENDALERO CON TORRE CENTRAL EN CONVECCION NATURAL [#]

A. Iriarte[1], **S. Bistoni, M. Watkins**[2], **V. Luque, H. Sanchez**[3] **y L. Brizuela**[3]
Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. iriarteadolfo@gmail.com

RESUMEN: El trabajo muestra los resultados de los ensayos realizados en un secadero solar tendalero mixto con chimenea solar, en convección natural, y la simulación del funcionamiento de la chimenea solar. El sistema está constituido por un colector solar, una cámara de secado y chimenea solar con ganancia directa. Los ensayos se realizaron sin producto y con pimiento para pimentón. Para la simulación numérica se utilizó el software SIMUSOL. Los resultados muestran que esta configuración de secadero incrementa el flujo de aire de 0,5 a 0,7 kg s^{-1}, respecto al modelo anterior. Se analiza el proceso de secado de pimiento para pimentón, verificándose que para el producto cortado la duración del proceso fue de 58 horas. El ajuste del modelo se realizó con respecto a las temperaturas de salida de la chimenea, obteniéndose un error del 2 %.

Palabras clave: secado solar, eficiencia de secado, convección natural, contenido de humedad

INTRODUCCIÓN

El método tradicional de secado de frutas y hortalizas consiste en extender los productos en el suelo, “canchas”, con exposición directa al sol y al aire libre, método que actualmente se sigue aplicando en las zonas rurales de los países tropicales y subtropicales. Esta forma de secado es eficaz y barata, pero presenta las desventajas de contaminación por suciedad, insectos, animales y microorganismos y las pérdidas importantes debido a la descomposición y la humectación del producto por las lluvias. Debido a estos problemas la calidad de los productos secos suele ser muy baja, lo que hace que algunos de los productos no sean negociables en los mercados nacionales o internacionales. Se ha informado pérdidas post-cosecha de entre 12 % y 37 % para diversos cultivos (Killock, 1966).

A los largo del tiempo se han ido introduciendo modificaciones en las “canchas” tales como la incorporación de ripio, asfalto y últimamente tendaleros rudimentarios, que permitieron avanzar en la mejora de los productos deshidratados. Estas mejoras han dado origen a diferentes tipos de secadores solares (Exell, 1980; Janjaia *et al.*, 2008; Khalil *et al*, 2007; Roa y Macedo, 1976; Yaldyz y Ertekyn, 2001).

Sin embargo, en la mayoría de los diseños, las soluciones son para pequeñas producciones del tipo familiar y no satisfacen las expectativas de los pequeños productores del noroeste argentino, cuyas producciones superan las posibilidades de uso de esos prototipos.

Los secadores solares se pueden clasificar en varias categorías, dependiendo del modo de calefacción o el modo de operación. Generalmente se clasifican en: secadores directo, secadores indirectos y secadores mixtos. En los secaderos solares directos el producto se coloca en el sistema utilizado para calentar el aire, de esta forma la radiación solar, luego de atravesar una cubierta transparente incide directamente sobre el producto. Los secaderos indirectos tienen un sistema para calentar el aire y éste pasa a través del producto que se encuentra en otro recinto.

En los secaderos mixtos además de circular el aire caliente, que provine de un colector solar, a través del producto, éste recibe radiación a través de la cubierta del recinto en donde está colocado. Los secadores solares también pueden ser divididos en secadores de activos y pasivos, de acuerdo al modo de flujo de aire: natural o forzado.

En los secaderos a convección natural, los bajos niveles del flujo aire en circulación natural son un gran obstáculo para lograr un desempeño eficiente de los mimos, y en la mayoría de los casos las temperaturas en la cámara secado son excesivas produciendo el quemado del producto. La mejora del flujo ascendente es por los tanto fundamental para el diseño de este tipo de los secaderos. Una de las alternativas posibles es el agregado de una chimenea solar.

Parcialmente financiado por: PFIP, INTA, UNCa
1 Investigador del CONICET
2 Fac. de Ciencias Exactas y Naturales - UNCa
3 INTA, Catamarca

Las chimeneas solares deben ser diseñadas de tal manera que la pérdida de presión sean pequeña comparada con la diferencia de presión generada por las temperaturas en la chimenea. A veces la cámara de secado puede estar cerca de la temperatura de bulbo húmedo saturado y por lo tanto, estar a una temperatura menor que la temperatura ambiente. En estas circunstancias, la contribución de la fuerza de empuje es insignificante, a menos que el aire se caliente dentro de la chimenea. Por lo tanto un aporte de calor externo a chimenea cortas evitaría que el aire dentro de la chimenea se enfrié y se iguale con el ambiente.

Iriarte *et al.* (2009, 2010) realizaron estudios sobre la posibilidad de modificar un tendalero tradicional en un secadero solar mixto, con el solo hecho de agregar plásticos y los soportes correspondientes. El primero de ellos, estaba conformado por un colector solar y cámara de secado en donde la salida del aire se ubicaba en la parte superior, arriba de la cámara, en forma de rendija de 0,12 m a lo largo de la misma. El segundo prototipo, con iguales características constructivas que el anterior, disponía en un extremo sur de la cámara, a lo largo del secadero, una chimenea solar, con la finalidad de aumentar el flujo de aire a través del producto. Los ensayos con los dos prototipos se efectuaron sin producto y con pimiento para pimentón, tomate y membrillo. El comportamiento de este tipo de secadero con chimenea solar fue razonable y sus resultados dentro de los niveles de eficiencias que se plantean en los distintos trabajos sobre el tema (Murthy, 2009; Jairaj, *et al.*, 2008).

En el presente trabajo, se analiza, experimentalmente y mediante simulación numérica, el comportamiento del secadero solar mixto, tipo tendalero, en convección natural, sin y con producto. El mismo consiste en un calentador solar de aire, junto a una cámara de secado de geometría trapezoidal con captación de radiación directa y una chimenea central, también con ganancia directa. Se muestran los resultados del secado de pimiento para pimentón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del secadero

El secadero solar está constituido por tres partes principales: a) el colector; b) la cámara de secado y c) la chimenea solar. En la Fig. 1 se muestra un esquema del secadero tendalero solar con torre central, donde se detallan las alturas de precámara, cámara, poscámara y chimenea.

El colector tiene 6 m de largo y se extiende 1,50 m hacia adelante de la cámara de secado. En su extremo frontal inferior, una abertura de 0,15 m de alto, por toda su longitud, permite la entrada del aire desde el exterior. Una capa de piedras graníticas seleccionadas, pintadas de negro, de un espesor aproximado de 0,10 m, ubicadas a nivel del suelo, hace las veces de superficie absorbedora.

La cámara o recinto de secado está por encima del pleno (0,80 m de alto; 1,20 m de profundidad, 6 m largo) que recibe el aire caliente del colector; tiene 0,20 m de alto, con la misma profundidad y largo que el pleno de conexión con el colector. La parte superior del pleno, tiene un enrejado de alambre tensado, sobre el cual se apoyan las bandejas.

El secadero posee seis bandejas de 1,20 m de ancho y 1 m de largo. Están construidas de malla de media sombra del 60% doble con marco de madera. Para cargar o descargar el producto las bandejas se retiran por una pequeña abertura practicada en la pared posterior del plástico negro.

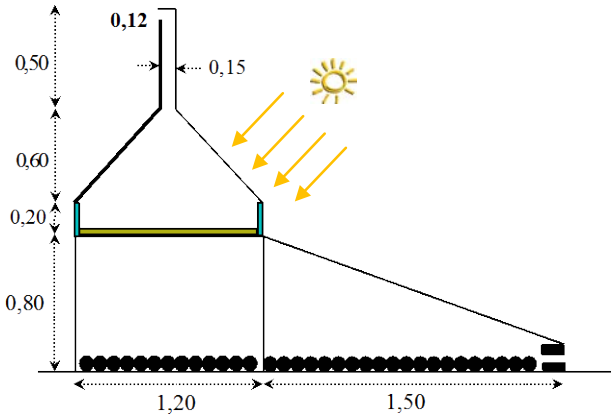

Fig. 1. Esquema del colector, cámara y chimenea del secadero solar

En la Fig. 2 se aprecian las vistas frontal y posterior del sistema construido en el predio del INTA Sumalao, Catamarca.

Análisis teórico del flujo de aire

Para la determinación teórica del flujo másico $\dot{m}$, se usó la ecuación 1, (Iriarte *et al.*, 2010):

$$\dot{m} = G_s\,\rho_s = C_D \rho_s A_e [2gH(\Delta T/T_e)]^{1/2}\,[(1 + A_r^2)]^{-1/2} \qquad (1)$$

donde G_s [$m^3 . s^{-1}$] es el flujo volumétrico de aire a la salida del secadero; C_D es el coeficiente de descarga; ρ_s densidad del aire a la salida, $A_r = A_s/A_e$ relación entre las áreas de entrada A_e y de salida A_s; H es la distancia entre la entrada y salida de la chimenea [m]; T_e es la temperatura promedio de entrada del aire [ºC] y T_s es la temperatura a la salida del aire de la chimenea [ºC]. Para el cálculo de la densidad del aire en los puntos en cuestión se usó la ecuación 2:

$$\rho = \rho_{st} \left[\frac{1}{(1+T/273)}\right](1+w) \qquad (2)$$

w: humedad específica [kg kg^{-1} a.s.]
$\rho_{st} = 1{,}293\ kg/m^3$

Fig. 2. Vista frontal y posterior del secadero tendalero solar con torre central

Análisis térmico de la chimenea

El modelo para determinar las temperaturas en los distintos puntos de la chimenea se derivó de las siguientes ecuaciones para el balance térmicos sobre tres puntos característicos, según se muestra en el esquema de la fig. 3:

Cubierta: $$\alpha_c \tau_c S_c + h_{c,f-c}(T_f - T_c) + h_{r,p-c}(T_p - T_c) - U_c(T_c - T_a) = 0 \qquad (3)$$

Colector de la chimenea: $$\alpha_p \tau_p S_{ch} - h_{c,p-f}(T_p - T_f) + h_{r,p-c}(T_p - T_c) - U_b(T_p - T_a) = 0 \qquad (4)$$

Flujo térmico en la chimenea: $$q_u = h_{c,p-f}(T_p - T_f) - h_{c,f-c}(T_f - T_c) = \frac{\dot{m} c_p}{A_c}(T_f - T_a) \qquad (5)$$

donde: U_c: coef. global de pérdida por cubierta; U_b: coef. global de pérdida por la base; hc,f-c: coef. convectivo entre luido y cubierta; hc,p-f: coef. convectivo entre placa y fluido; hr,p-c: coef. radiativo entre placa y cubierta; $\alpha_p \tau_p$: producto absorbancia - transmitancia de placa; S_c: radiación incidente sobre cubierta; S_{ch}: radiación incidente sobre chimenea; q_u: calor útil; $\dot{m}\ c_p\ A_c$.

El balance de energía se resuelve usando el SCEPTRE con la interface gráfica SIMUSOL (Saravia *et al.* 2000), mediante el circuito eléctrico – térmico de la Fig. 4.

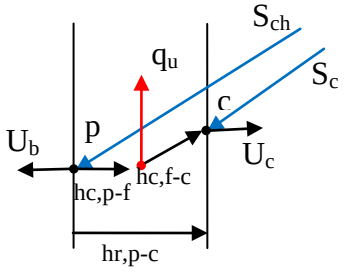

Fig. N° 3. Diagrama de intercambio de calor convectivo y radiativo

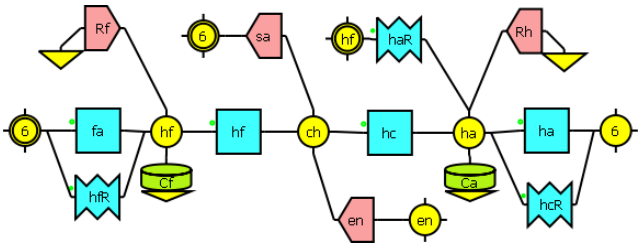

Fig. 4. Circuito equivalente eléctrico - térmico para el entorno SIMUSOL

Para el estudio, la chimenea fue dividida en tres sectores, coincidiendo el centro de cada uno con los puntos donde se hicieron las mediciones experimentales. El circuito de la figura 4 representa a la chimenea completa.

Con el propósito de interpretar el esquema de la Fig. 4 se detallan a continuación los nodos más importantes y su representación en el equipo real: el nodo "6" representa el aire del ambiente exterior; el "ha" la superficie de la cubierta de la chimenea; el "ch" el aire dentro de la chimenea; el "hf" la superficie posterior de la chimenea; el "en" el aire a la entrada de la chimenea. La resistencia convectiva entre el aire exterior y la cubierta es "ha"; entre la cubierta y el aire de la chimenea es "hc"; entre el aire de la chimenea y la superficie posterior de la chimenea es "fa". La resistencia radiativa entre la superficie "ha" y el exterior es "hcR"; entre ambas superficies, posterior y cubierta; entre la superficie posterior de la chimenea y el ambiente exterior es "hfR". Las resistencias convectivas y radiativas, en su forma de coeficientes de transferencia, se observan en la fig. 3, diagrama de intercambio de calor convectivo y radiativo. El flujo de radiación S_c y S_{ch} se representan con "Rh" y "Rf" respectivamente. El flujo másico de aire a la entrada es "en" y de salida "sa". Este último representado en la Fig. 3 por q_u.

Proceso de secado

Para seguir el proceso de secado, se colocaron muestras de pimientos en distintos puntos de las bandejas. Algunos pimientos se colocaron en trozos (cubeteados), otros con cortes transversales y otros se colocaron enteros. El peso seco del pimiento se obtuvo manteniendo las muestras en estufa a una temperatura de 104 ºC hasta obtener peso constante.
El contenido de humedad en base seca se calculó mediante la ecuación (Saravia *et al.*1992):

$$\text{Contenido de humedad (bs)} = \frac{(m(t)-ms)}{ms} \quad (\text{kg . kg}^{-1}) \tag{6}$$

donde "bs" significa base seca, m (t): masa inicial [kg]; ms: masa seca [kg]

Para la determinación de la eficiencia del secadero solar se evaluó conjuntamente el funcionamiento térmico del sistema solar: eficiencia del absorbedor y de la cámara de secado y se calculó mediante la ecuación (7):

$$\eta = \frac{(P_0-P_d).L_v}{I_d A_c} . 100\ \% \tag{7}$$

donde: I_D es la irradiación diaria (MJ), L_v el calor latente de vaporización del aguas para la temperatura del aire en el secadero (kJ/kg), P_o peso inicial del material sin secar (kg) y P_d peso del material al final del día de secado.

Sistema de medición

Para medir la temperatura y humedad se utilizaron Data Logger tipo HOBOS inalámbricos con sensores externos "Smart sensor" que permite medir temperatura en el rango de -40 °C a 75 °C, precisión de ± 0,2 °C, con una resolución de 0,02°C y humedad relativa del aire entre 10 - 90 %, precisión de ± 2,5 %, con una resolución de 0,1 %.

Los sensores para la medición de temperatura son termistores y para la medición de humedad semiconductores HUM-RHPCB-2. Ambos están contenidos por una funda de PVC modificado con una membrana de polietersulfona hidrofóbicas (PES). Fueron distribuidos en diferentes puntos del colector, cámara de secado y chimenea.

La humedad relativa y temperatura a la entrada, sobre bandejas, en el producto, la salida del secadero y puntos estratégicos. También se usaron medidores Datalogger tipo HOBOS U12 con sensores internos y externos; temperatura (± 0,5 ºC) y humedad (± 1%;).

La radiación solar se midió con un piranómetro inclinado Kipp & Zonen (± 5 %) y datalogger tipo Adam. Las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia. Las muestras de productos testigo se pesaron con una balanza electrónica (± 0,1g) y el producto con una balanza de plato (± 1g).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis térmico del secadero

El secadero sin producto se ensayó durante el mes de noviembre. En la Fig. 5 se muestran las temperaturas de chimenea, ambiente exterior y radiación sobre superficie horizontal para cinco días del ensayo. La diferencia de la temperatura promedio de chimenea respecto a la de entrada durante los cinco días analizados fue de 6 ºC, llegando a picos de 10 ºC durante los dos primeros días.

La temperatura de chimenea llegó a valores próximos a 50 ºC, mientras que las temperaturas promedio de la cámara de secado fueron, entre las 10 y 18 horas, en el primer día 40,49 ºC, en el segundo 36,45ºC, de 41,28 ºC en el tercer día, en el cuarto 44,90 ºC y de 43,51 ºC en el quinto día. La radiación se mantuvo dentro de los niveles normales para esta época del año. Mediante la ecs. (1), se calculó el flujo másico Mpa,b-sCh, obteniéndose en promedio para los 5 días de ensayo 0,7 kg s^{-1}.

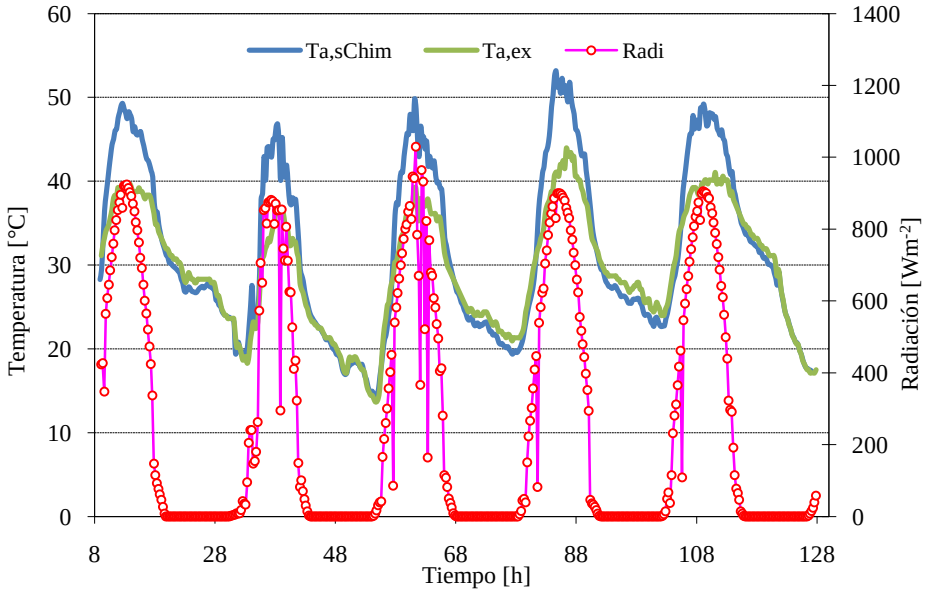

Fig. 5. Variación de la temperatura del aire exterior en contraste con la temperatura del aire a la salida de la chimenea y la radiación sobre superficie horizontal

En la Fig. 6 se aprecia la variación del flujo másico (Mpa,b-sCh) entre la base y salida de la chimenea, calculado por la diferencia de temperatura del aire a la salida y del aire a la entrada de la chimenea, en función del tiempo y la variación de la radiación sobre superficie horizontal (Radi), durante tres días de ensayo.

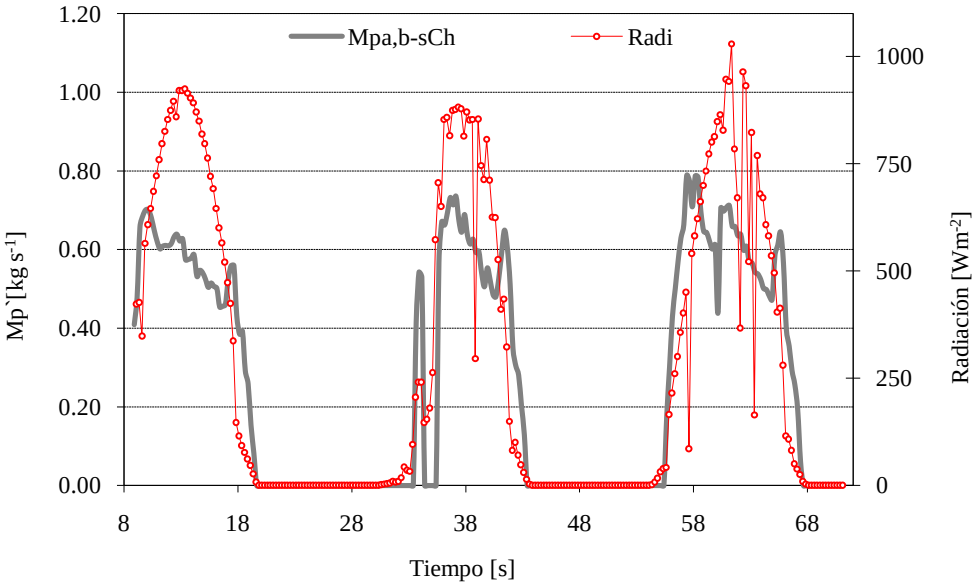

Fig. 6. Flujo másico calculado y radiación solar sobre superficie horizontal en función del tiempo

El incremento de temperatura en la chimenea respecto a la temperatura ambiente para los cincos días del ensayo sigue una la regresión lineal de acuerdo a la ecuación (8), con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0{,}82$:

$$\Delta T_{a,sCh-a,ex} = 0{,}0083\, x + 0{,}1131 \qquad R^2 = 0{,}8189 \tag{8}$$

donde x es la radiación solar en W m^{-2}

En la Fig. 7 se advierte que entre los 400 - 800 Wm^2 se encuentra la mayor cantidad de puntos que tiene mejor correlación con la diferencia de temperatura entre el aire de la chimenea y del ambiente exterior. A partir de los 900 Wm^2 hay una mayor dispersión de puntos que se puede interpretar por un aumento en las perdidas de la chimenea. Este hecho implica que no aumenta significativamente el flujo másico del aire en su interior para radiaciones superiores a este valor.

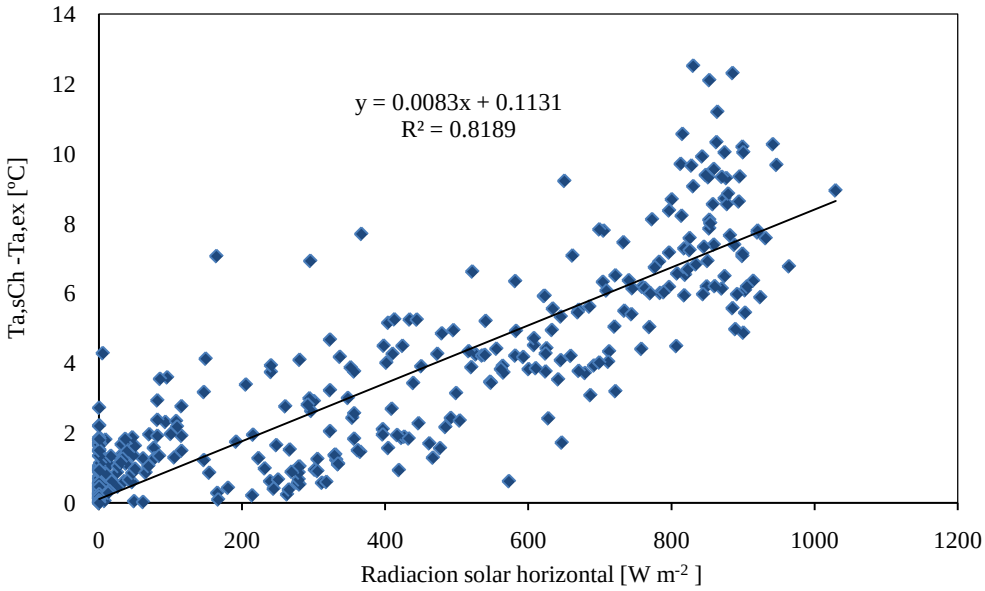

Fig. 7. Variación entre la temperatura del aire a la salida de la chimenea con la radiación solar sobre superficie horizontal.

Resultados de la simulación

En la simulación se utilizaron como datos de entrada al modelo la radiación exterior incidente, el flujo calculado con la ecuación (2), la temperatura experimental de entrada y salida a la chimenea y la temperatura ambiente exterior. Los puntos seleccionados para el ajuste fueron las temperaturas del aire a la entrada - salida de la chimenea.

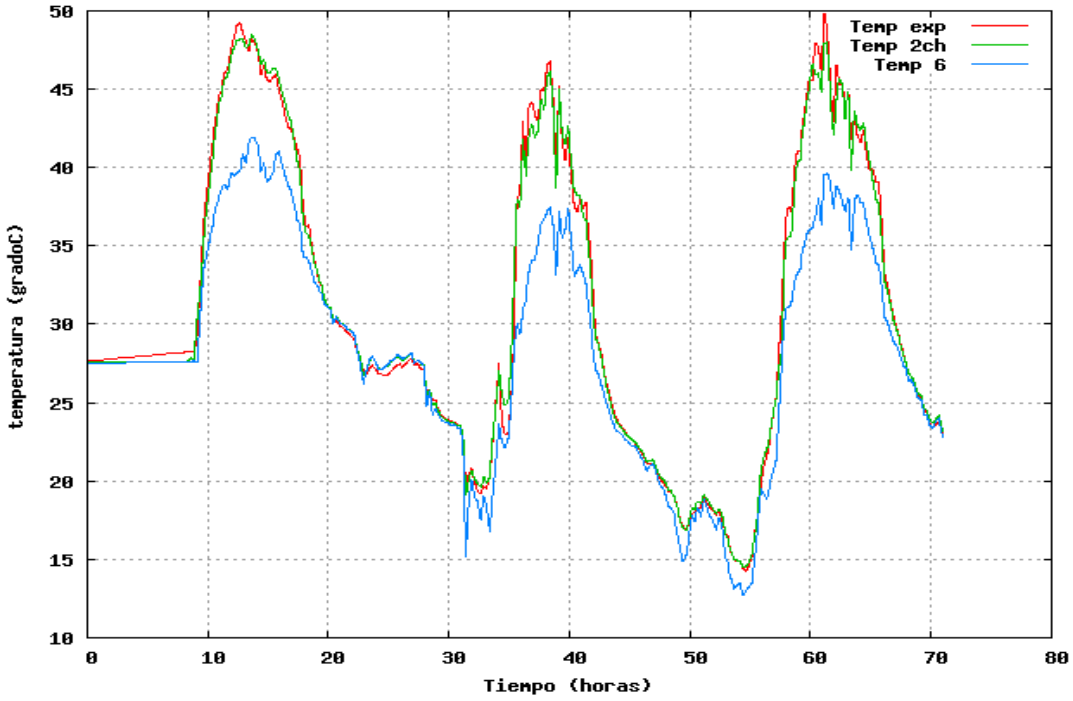

Fig. 8. Comparación entre las temperaturas del aire la salida de la chimenea experimental (Temp exp) y la simulada (Temp 2ch) en contraste con la temperatura ambiente (Temp 6).

Como se advierte en la Fig. 8 el ajuste entre la temperatura del aire a la salida del chimenea simulada (Temp 2ch) y la experimental (Temp exp), es buena, siendo su error promedio del orden del 2 %, para un flujo promedio de 0,7 kg s^{-1}.

En la tabla 1 se muestran los datos y parámetros utilizados en la simulación.

PARAMETROS
PareH1=PareH2=0.5*6/3 Pha=16 Phc=11 Phf=11 Phfa=16 Pcoef1=0.2 Pcoef2=0.8 PRad= tabla Ra(tiempo) PFLUJO=0.5*sqrt(abs(Tempsch-Tempech))*Pval1 Pdif1=(Tempsch-Tempech) Pval1=Tabla val(Pdif1)

DATOS
E6=tabla T6(tiempo); ambiente Eche=tabla che (tiempo); entrada Chim Rha=V1,PareH1,Pha Rhc=V1,PareH1,Phc Rhf=V1,PareH1,Phf Rfa=V1,PareH1,Phfa RhcR=R1,PareH1,0.2,1 RhfR=R1,PareH1,0.2,1 RhaR=R1,PareH2,0.2,1 JRh=JQ,PareH1,PCoef1*PRad JRf=JQ,PareH2,PCoef2*PRad Jch=JM,1000,PFLUJO

Tabla val
-100, 1 0, 1 0, 1 100, 1

Tabla 1. Datos y parámetros de la simulación

Resultados del proceso de secado

El secadero su utilizó para secar pimiento para pimentón con un contenido inicial de humedad del 82 %. Se hicieron dos cargas como se detalla en la Tabla 2.

Carga	**Peso fresco [kg]**	**Tratamiento**	**Peso seco [kg]**	**Tiempo de secado (días)**
21 marzo	36,500	En trozos y enteros	9,100	8
29 de marzo	36,000	En trozos	8,900	5

Tabla 2. Detalle de pesos durante las dos campañas de secado

En el presente trabajo se analiza el proceso de secado del 21 de marzo. Se cargaron 36,5 kilos de pimiento para pimentón variedad Yokavil: 10 kg de pimiento se cortaron en trozos (cubeteados) y se colocaron en una bandeja; a 5 kg se les hicieron cortes transversales y los demás pimientos enteros, completándose la carga de las seis bandejas. Los pimientos cubeteados estuvieron secos, al tercer día de secado, los con cortes transversales al séptimo día y los pimientos enteros al cabo del octavo día se los colocó en bolsas en sobre el piso del colector para que continuara allí el proceso de secado y poder cargar el secadero con producto fresco.

En la Fig. 10 se aprecia una vista del pimiento dentro de la cámara de secado durante el proceso (a); y en (b) el producto embolsado dentro de la precámara una vez secado para su homogeneización.

(a) (b)

Fig. N° 10. Vista en el interior del secadero: (a) cámara; (b) precámara de secado

La Fig. 9 muestra las curvas de secado de los pimientos cubeteados, con cortes y enteros. El pimiento cubeteado alcanzó 0,8 kg kg^{-1} (bs) desde un contenido de humedad en base seca de 5 kg kg^{-1} en 58 horas (3er día de secado), el pimiento con cortes a las 158 horas (6 1/2 días) y el pimiento entero llegó en este tiempo a un contenido de humedad en base seca de 1,2 kg kg^{-1}. Del análisis de la radiación solar durante los días de secado se aprecia que hubo buena radiación solamente durante los dos primeros días del ensayo.

Para determinar la eficiencia del secadero, ecuación 8, se consideró que todo el secadero estaba cargado completamente con el pimiento cubeteado. De esta forma la eficiencia para el primer día fue de 12 %, y para el segundo día de 8 %, considerando el área total de captación solar de 15 m^2. La disminución del valor de la eficiencia en el segundo día se debe a la disminución de la cantidad de agua evaporada.

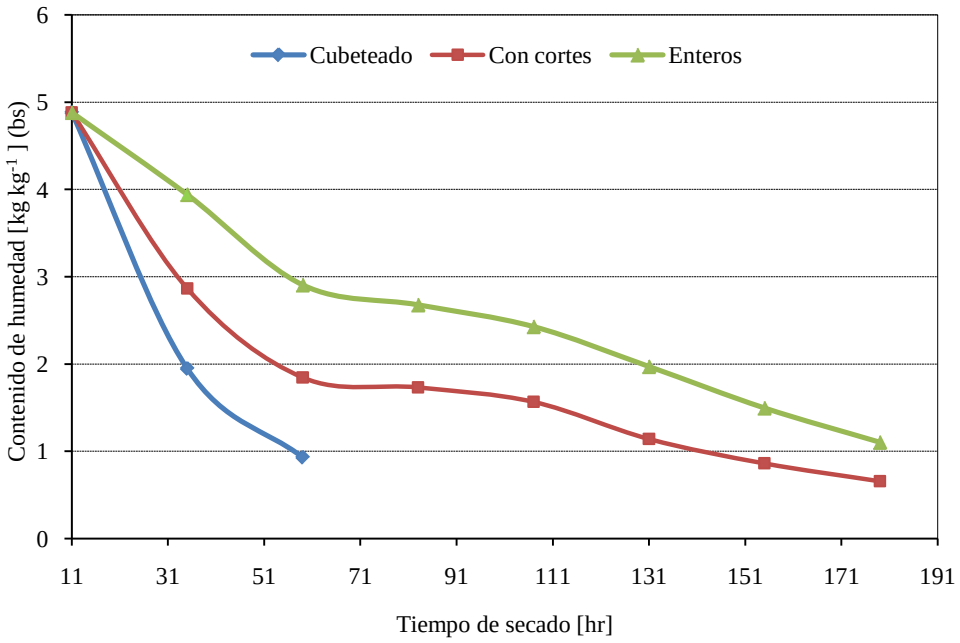

Fig. 9. Curva de secado para pimiento cubeteado, con cortes y enteros

CONCLUSIONES

El secadero es fácilmente construible y con materiales disponibles en el medio. Ha demostrado ser adecuado para el secado de pimiento. Es posible disminuir el tiempo de secado cortando el pimiento en trozos. Esto permite cargar el secadero varia veces si la producción supera la capacidad del mismo.

El secadero con chimenea central permitió aumentar el flujo másico de aire con respecto al modelo anterior en un 28,5 %. Se debe tener en cuenta, que si bien hay un aumento significativo en la velocidad de flujo dentro del secadero, el presente diseño requiere de mano de obra con una mayor especialización que la necesaria para la construcción del modelo anterior en donde la chimenea está ubicada en el extremo posterior de la cámara de secado.

El modelo matemático y la simulación ajustan con un error del 2 % en valores de temperaturas de la chimenea para el flujo de aire calculado teóricamente mediante la ecuación (1).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Exell R., 1980. A simple solar rice dryer: Basic design theory. Sunworld 4 (6): 186-191.

Iriarte A., C. Rodríguez, V. García y V. Luque., 2009. Secadero de productos agrícolas tipo tendalero transformado en secador solar pasivo. Avances en energías renovables y medio ambiente, Vol. 13, pág. 02.01-09.

Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Lara y L. Brizuela., 2010. Secadero tendalero con chimenea solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, pág. 2.01- 2.08.

Janjaia S., N. Srisittipokakuna and B. Balab., 2008. Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. Journal of Energy 33: 91–103.

Jairaj K., Singh S. and Srikant K., 2009. A review of solar dryers developed for grape drying, Solar Energy 83, 1698-1712

Khalil E., Al-Juamily A., Khalifa N. and Yassen T., 2007. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. Journal of Desalination. 209: 163–170.

Killock A., 1966.The economy of Ghana. UK: Allen and Union Publications.

Murthy M., 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (4), 835–844.

Roa G. y Macedo I., 1976. Grain drying in stationary bins with solar heated air. Journal of Solar Energy 18, 445-449.

Saravia L., R. Corvalán, M. Horn, R. Román. 1992. Ingeniería del secado solar. CYTED. Ed. Impresos Universitarios.

Saravia L. y Saravia D., 2000. Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. Avances en Energías Renovables, Vol. 4, pp. 8.17 - 8.23.

Yaldyz O. y Ertekyn C., 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. Journal of Drying Technology, 19 (34), 583–597.

ABSTRACT: This paper shows the results of the tests in a solar dryer type “tendalero” with solar chimney in natural convection, and the simulation of the solar chimney. The system consists of a solar collector, a drying chamber and a direct solar gain chimney. The system was tested without product and during the drying of pepper for paprika. The software SIMUSOL was used for the numerical simulation. The results shows that this configuration increases the air flow from 0,5 kg s^{-1} to 0,7 kg s^{-1} respect to the previous system. The drying process is analyzed and it is observed that the cut pepper dried in 58 hours. The simulation was fitted with the outlet chimney temperature with an error of 2 %.