

SECADO DE PIMIENTO *Capsicum annuum* L., EN UN TENDALERO SOLAR ACTIVO TIPO TÚNEL #

Silvia Bistoni y Adolfo Iriarte¹

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. sbistoni@gmail.com

Recibido:30-6-2016; Aceptado:31-7-2016.

RESUMEN.- En el oeste de las Provincias de Catamarca y La Rioja, República Argentina, el principal sustento de la gente es la agricultura y la ganadería extensiva. En agricultura las aromáticas son los productos que principalmente se producen, destacándose el pimiento para pimentón, anís, ajo y comino. Durante el período de cosecha, el rendimiento económico no es adecuado debido al bajo precio en el mercado, por lo que el deshidratado constituye una vía importante de desarrollo, sobre todo si la calidad final del producto es buena. En los últimos años se trabaja en mejorar los secaderos tipos tendaleros, convirtiéndolos en secaderos solares de bajo costo. El propósito del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de un nuevo diseño del secador solar tipo tendalero túnel activo con mayor longitud de los sectores colector-secadero y empleando otros materiales para su construcción. Se describen los componentes y materiales utilizados para el nuevo sistema tendalero túnel solar activo como así también los resultados experimentales del secado de pimiento para pimentón (*Capsicum annuum* L., Cultivares del INTA) y la simulación numérica del secadero. Se muestran las curvas de secado, la variación de la velocidad de secado, el ajuste de las curvas de secado empleando los modelos matemáticos de Newton y Henderson-Pabis y se calcula el coeficiente de difusión de la humedad.

Palabras claves: secado solar, cinética de secado, simulación secadero

PEPPER DRYING, *Capsicum annuum* L., IN A FORCED SOLAR TENDALERO TÚNEL TYPE

ABSTRACT.- In the west of the provinces of Catamarca and La Rioja, Argentina, people's main way of living is through agriculture and livestock. During the harvest period, economic performance is not suitable due to the low market price, so that the dehydrated products are an important development path, especially if the final product's quality is good. In recent years there has been works to improve "tendaleros", transforming them in low-cost solar dryers. The purpose of this work was to study the behavior of a new design for a tunnel solar dryer, "tendalero" type. The collector and dryer chamber are lengthier and they use more durable building materials. Components and materials used for the new design are described. Experimental results of drying pepper for paprika (*Capsicum annuum* L., Cultivars of INTA) and the simulation of dryer are analyzed. The drying data were fitted to ten different mathematical models. Among the models, the Newton model and Henderson – Pabis were considered the best for predicting the drying characteristic. The diffusion coefficient of moisture for each cultivar is also calculated.

Keywords: solar drying, drying kinetics, dryer simulation

1. INTRODUCCION

En el oeste de las Provincias de Catamarca y La Rioja, República Argentina, el principal sustento de la gente es la agricultura y la ganadería extensiva. En agricultura principalmente se producen las aromáticas, destacándose el pimiento para pimentón, anís, ajo y comino.

Durante el período de cosecha, el rendimiento económico no es adecuado debido al bajo precio en el mercado por la abundancia del producto. De ahí que el deshidratado de productos constituya una vía importante de desarrollo, lo que exige asegurar una buena calidad final del producto.

El método tradicional de secado es distribuir los productos en el suelo o en canchones con ripio, al aire libre y expuesto al sol. Algunos productores han incorporado los tendaleros, que mejoran notablemente el proceso. Si bien estos métodos de secado requieren poca inversión, tienen las desventajas de que el producto se contamina por suciedad, insectos y bacterias. Por otro lado se tienen pérdidas, a veces

Parcialmente financiado UNCa, INTA
1. Investigador del CONICET

importante, como consecuencia de las lluvias. La mejora en la tecnología de secado podría resolver una parte importante del problema, más aun si se emplea tecnología solar de bajo costo.

Una opción es el uso de secaderos solares naturales o pasivos, de bajo costo, que pueden ser construidos a nivel local y no requieren energía eléctrica (Bala y Woods, 1989, Jairay et al., 2009, Iriarte et al., 2010). Este tipo de secadero condiciona el secado por cuanto para días nublados o seminublados, el flujo de aire caliente es bajo y fluctuante (Bala y Woods, 1994, Duran y Condori, 2009, Iriarte et al., 2011). Por lo tanto, presentan un riesgo importante que condiciona la calidad del producto.

En este sentido, es interesante disponer de una opción de bajo costo con convección forzada de baja potencia. Trim (1982) diseñó y construyó un secadero tipo “carpa” con un ventilador en uno de sus lados para forzar el movimiento del aire a través del producto. Philip *et al.* (1993), diseñaron un secador de circulación forzada con un ventilador de 0,75 kW, para “chiles rojos” (carga de 65 kg). En la última década, en los países asiáticos se ha comenzado a usar un sistema de secado de bajo costo, en convección forzada, mediante pequeños ventiladores alimentados por un módulo fotovoltaico.

Iriarte et al. (2012) hicieron una primera experiencia mediante la transformación de un tendalero tradicional en un colector – secadero solar activo de 10 m de largo. Consiste en un tendalero de 0,80 m de alto, 1,80 m de ancho y 10 m de largo, construido con postes de madera, dividido en dos partes; una parte es el colector solar y la otra el secador, estando ambas en el mismo plano. El primer sector del colector, por donde entra el aire del exterior, tiene una lámina de plástico negro (1,8 m x 5 m) como placa colectora. El segundo sector (1,8 m x 5 m) inicia donde termina el colector y posee una media sombra al 80 %, sobre la cual se colocan las bandejas. Por debajo de las bandejas, a 0,20 m de la media sombra, se ha instalado un plástico negro para favorecer la absorción de la radiación solar que pasa entre los intersticios del producto cuando éste comienza a secarse. Tanto el colector como el secador tienen a 0,25 m una primera cubierta plana de plástico UV térmico. El aire circula por el canal que queda formado entre esta cubierta y la placa colectora y las bandejas. Todo el sistema tendalero colector y tendalero secadero, tiene una segunda cubierta semicircular de plástico.

Los primeros resultados mostraron que este tipo de diseño es de fácil construcción por lo que no necesita mano de obra especializada y es fabricado con materiales locales y de bajo

costo. Sin embargo, se advirtió que las temperaturas diarias promedio del aire en contacto con el producto no presentaban niveles óptimos para el secado, con lo cual el tiempo para su deshidratación era superior al previsto. Asimismo, los postes soportes del tendalero se deterioraron con el tiempo,

Con el objetivo de subsanar estos inconvenientes se construyó un secadero – tendalero forzado con un nuevo diseño. Para optimizar el diseño se lo simuló usando el software SIMUSOL

El propósito del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de un nuevo diseño del secador solar tipo tendalero túnel activo con mayor longitud de los sectores colector-secadero y empleando otros materiales para su construcción. Se describen los componentes y materiales utilizados para el nuevo sistema tendalero túnel solar activo como así también los resultados experimentales del secado de pimientón para pimientón. Los datos del secado fueron ajustados empleando los modelos matemáticos de distintos autores descriptos por Kavak Akpınar y Bicer (2008). Se muestran las curvas de secado, la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo y se calcula el coeficiente de difusión de la humedad para este tipo de pimientón.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Descripción del secadero.

El secadero solar fue instalado en Chilecito, Provincia de la Rioja. Consiste en un tendalero de 0,80 m de alto, 1,80 m de ancho y 16 m de largo, dividido en dos partes: una parte colector solar y la otra el secadero, ambas están en el mismo plano. Se realizaron tres modificaciones importantes respecto al diseño anterior: a) la estructura soporte del tendalero fue construida con tubos cuadrados de hierro de 2,5 cm, b) se incorporó aislación de lana de vidrio de 5 cm de espesor, con papel de aluminio en una de las caras, en ambos sectores. Esta lámina, expuesta al sol, fue pintada de negro mate y c) el espacio entre la placa colectora y la cubierta plana de plástico UV térmico fue disminuida a 0,20 m.

El sector de secado (1,8 m x 8 m), inicia donde termina el colector y allí se colocan las bandejas. Por debajo de las bandejas queda un espacio de 0,07 m por donde circula aire. El aire circula por el canal que queda formado entre esta cubierta y la placa colectora (sector colector) y las bandejas (sector secador). Todo el sistema tiene una segunda cubierta semicircular de plástico, también de UV térmico, Figura 1.

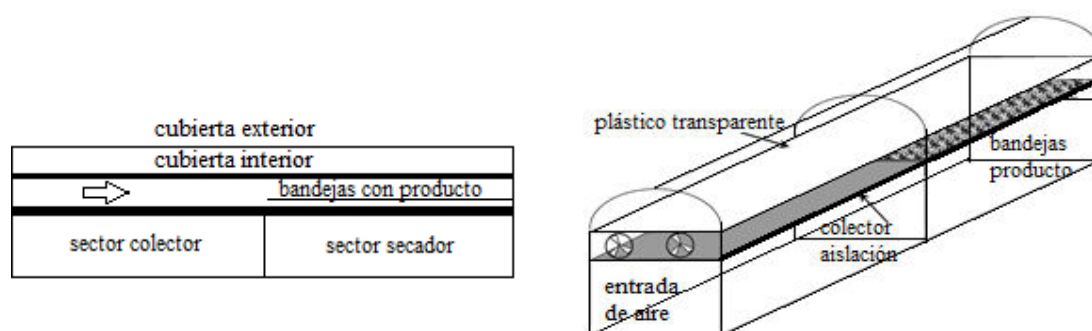


Fig. 1: Corte y vista del secadero tendalero túnel.

El producto se ubica sobre bandejas de 0,85 de ancho y largo de 0,98 m, de estructura de madera y cubiertas con media sombra. Entran 8 bandejas de cada lado, lo que hace una superficie para el producto de 13,3 m². La carga y descarga de los productos se realiza por los costados del módulo de secado. Se colocó un plástico negro cubriendo la estructura del tendalero para evitar pérdidas de calor y protegerlo de los animales. Sobre el suelo, se colocó otro plástico negro para evitar el crecimiento del pasto y se colocaron sobre él piedras para acumular parte de calor que gana el sistema en la parte inferior.

El aire ambiente es forzado a circular a través del sistema mediante dos ventiladores axiales de 45 W cada uno, absorbiendo en el sector de secado la humedad del producto. Estos ventiladores están ubicados en sector colector, pared este. La radiación solar que pasa a través de las cubiertas transparentes del colector y del secador, en este último aporta calor al producto y contribuye a un aumento de la temperatura del producto. Hay que tener en cuenta que algunos productos no admiten radiación directa.

2.2. Sistema de medición

Para medir la temperatura y humedad en los ensayos de secado 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, resolución de 0,02°C) y humedad relativa del aire entre 10 - 90 % (precisión de ± 2,5 %, resolución de 0,1 %). Los sensores para medir temperatura son termistores y para la medición de humedad son semiconductores HUM-RHPCB-2. Ambos están en una sola unidad contenidos por una funda de PVC modificado con una membrana de polietersulfona hidrofóbicas (PES). También se usaron Data Logger tipo HOBOS U12 con sensores internos y externos; temperatura (± 0,5 °C) y humedad (±1 %).

Los sensores de temperatura y humedad del aire se ubicaron a lo largo del sistema en la dirección del flujo de aire en tres puntos del colector y en tres del secadero, se registraron cada 15 minutos durante el proceso de secado. 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 se midió con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 (± 0,05 m s⁻¹), en diferentes puntos en dirección longitudinalmente y transversalmente. Las muestras se pesaron con una balanza electrónica (Mettler ± 0,1g) y la pesada inicial y final de todo el producto con una balanza de plato (±1g). El peso seco del producto se obtuvo llevando una muestra a estufa a 102 °C hasta obtener peso constante.

2.3. Cinética de secado

Las muestras se pesaron con una balanza electrónica (Mettler ± 0,1g) y la pesada inicial y final de todo el producto con una balanza de plato (±1g). El peso seco del producto se obtuvo llevando una muestra a estufa a 102 °C hasta obtener peso constante. El material utilizado para estudiar el proceso de secado fueron cuatro cultivares de pimiento para pimentón (*Capsicum annuum* var.) Yokavil INTA (M1), Encalilla alargado INTA (M2), Experimental "D" (M3) y Lautaro INTA (M4), cosechadas en la E.E. INTA Chilecito, La Rioja. Se realizaron pesadas horarias durante los tres días de secado.

2.4. Modelo matemático de las curvas de secado

La relación de humedad (MR) se define por la ecuación (1):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad [1]$$

Donde M es el contenido de humedad instantánea; M₀ contenido inicial y M_e contenido de humedad de equilibrio. Como M_e generalmente es bajo para los productos alimenticios (Togrul y Pehlivan, 2004), se lo considera despreciable, por lo tanto, la relación de humedad (ec. 1) se simplifica a ec. (2):

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad [2]$$

Para la determinación de los modelos que ajustan las curvas de secado experimentales se utilizaron las expresiones matemáticas detalladas por Kavak Akpinar y Bicer (2008), y que se muestran en la tabla 1. Estos modelos fueron aplicados a los datos experimentales usando la técnica de regresión.

Tabla N° 1. Modelos matemáticos para describir la cinética de secado

Nombre Modelo	Ecuación del modelo	Nombre Modelo	Ecuación del modelo
Newton	MR = exp(-kt)	Wang and Singh	MR = 1+at+bt ²
Page	MR = exp(-kt ⁿ)	Page modificado	MR = exp[-(kt) ⁿ]
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	Verma et al.	MR=a exp(-kt)+(1-a) exp(-bt)
Logarítmico	MR = a exp(-kt)+c	Thomson	t=a ln(MR)+b (ln(MR))^2
Dos Términos	MR = a exp(-k ₀ t)+b exp(-k ₁ t)	Midilli y Kucuk	MR=a exp(-kt ⁿ)+bt

El análisis se realizó con el programa SPSS (Statistical Package for Social Scientists) versión 22 software package, para una regresión no lineal. El coeficiente R² fue uno de los principales criterios para la selección de la mejor ecuación. Además para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido (χ²), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo seleccionado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de R² y los valores más bajos de χ², MBE 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:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad [3]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i}) \quad [4]$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad [5]$$

Donde: MR_{exp} : relación de humedad experimental; MR_{pred} : relación de humedad predicha; z : número de constantes en el modelo; N : número de datos

2.5. Determinación de la difusividad efectiva de humedad

Durante el proceso de secado, conforme el agua se evapora de la superficie del producto, ocurre la migración de agua desde el interior del sólido; cuando esta migración no es suficientemente rápida como para mantener la superficie saturada, la migración interna del agua se vuelve un factor que controla la velocidad de secado. Para modelizar el proceso de deshidratación es necesario suponer, para simplificar, que la resistencia a la migración de humedad se distribuye uniformemente por todo el interior del material.

El coeficiente difusión D se puede determinar utilizando la segunda ley de Fick (ec.6), que relaciona las variaciones del contenido de humedad (en este caso agua) con el tiempo y el espacio, durante el proceso de secado (Panchariya et al., 2002).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad [6]$$

donde X es el contenido de humedad, t es el tiempo en segundos y r es la distancia en metros.

El modelo de Fick (ec.6) fue utilizado considerando que la muestra es una placa plana infinita, con una distribución de humedad inicial uniforme, sin considerar el encogimiento de la muestra y cualquier resistencia al transporte de masa (Crank, 1975).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2} \right] \quad [7]$$

Donde D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectiva [$m^2 s^{-2}$], L es el espesor de la placa (m), t tiempo en segundos y n es un número positivo entero. Para tiempos de secado suficientemente largo, se puede tomar $n = 1$, con un error pequeño y se obtiene:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2} \right) \quad [8]$$

Se considera un coeficiente de difusividad efectiva (D_{ef}) para englobar los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua y su valor se calcula a través de modelo matemático de la tabla 1, ajustados con los valores experimentales. En este trabajo, por tratarse de datos obtenidos durante el proceso de secado solar, se considera un coeficiente de difusividad efectiva promedio durante las horas de secado (D_{ef-m}).

2.6. Modelo de simulación del secadero

Para utilizar el programa SIMUSOL y ajustar con mayor precisión el prototipo se dividieron longitudinalmente, tanto el colector como la cámara de secado, en 3 partes iguales. Por razones de espacio se muestra el circuito correspondiente al sector secador, teniendo en cuenta que ambos circuitos (colector y secador) desde el punto de vista térmico son similares, Fig.2. Los principales elementos

constitutivos del circuito son: nodo [Ac] representa la entrada del flujo másico del colector, el nodo [1cp] la bandeja para carga del producto, el nodo [2ca] a la cubierta interna, el [4ca] a la cubierta externa, el [5ca] al cerramiento de plástico negro de la parte inferior, la cama de piedras [7ca], el suelo o piso de la cámara [8ca] y la tierra [9ca], además el ambiente exterior [A1].

Se incluyen los aportes de los intercambios térmicos por procesos convectivos, conductivos o radiativos entre los diferentes elementos, así como el aporte de energía por la radiación solar [R4] sobre la cubierta exterior y [R4a] interior y sobre la cubierta negra [R6]. La acumulación de energía en el aire, en el lecho de piedras y en el piso de la cámara, está considerada con la incorporación de los acumuladores [3ca], [1ca], [2ca], [6ca], [7ca] y [8ca]. El aire caliente que sale del colector es introducido en la cámara de secado mediante flujo de masa [J1s] en el nodo [1ca], su desplazamiento a través del producto está dada por la fuente [4s]. El proceso de intercambio térmico y la pérdida de humedad del producto están representados en dos circuitos independientes pero relacionados con el principal por intermedio de los nodos [1ca] y [WP].

En el primer circuito identificado como: "intercambio térmico en el producto", el elemento producto está representado por el nodo [P], que recibe energía proveniente de la radiación solar [Rp] y también del aire caliente que está circulando sobre la bandeja [1cp]. Mediante un proceso convectivo indicado, con la resistencia [Pa], se produce evaporación de la humedad superficial y cambios en su temperatura. La masa del producto se representa con el acumulador [P]. En el circuito de pérdida de humedad "identificado como: Intercambio de humedad aire - producto", se considera la humedad inicial que posee tanto el producto como el aire que circula por el secadero y las variaciones en su contenido durante el proceso de secado a causa de la interacción entre ellos. Los valores iniciales son introducidos para el aire mediante la fuente (HP) asociada a la humedad específica del aire del colector

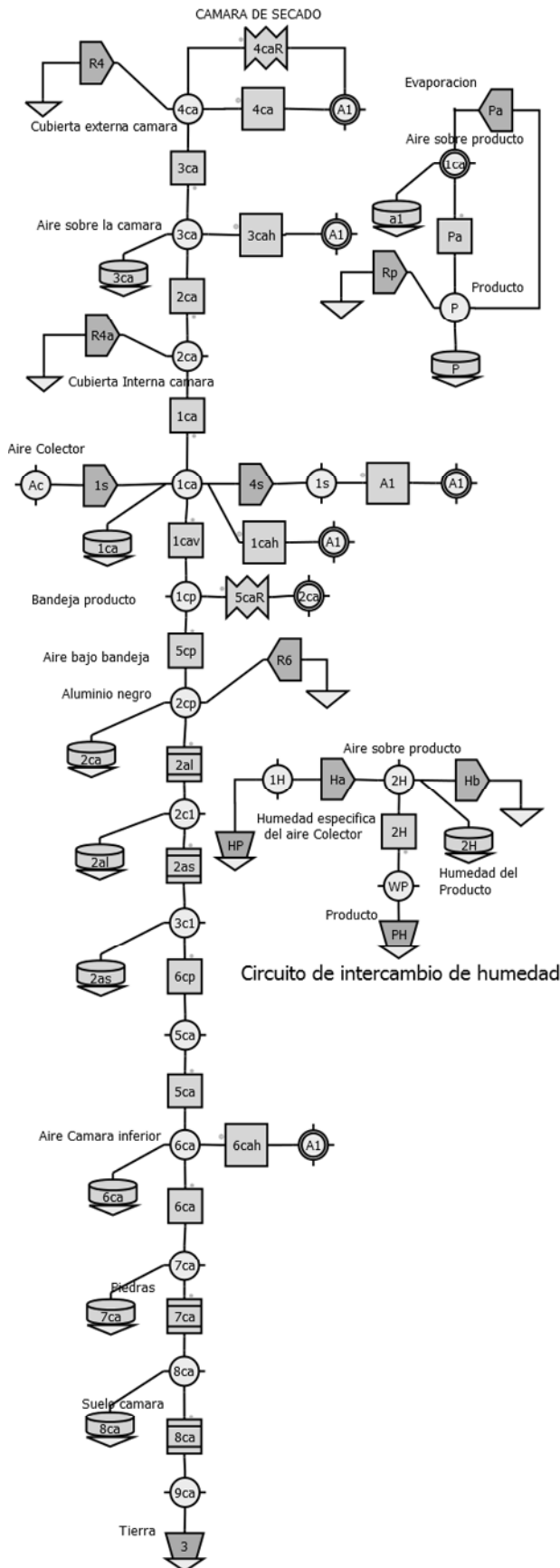
3. RESULTADOS

3.1. Análisis del ensayo de secado

El secadero se cargó 100 kg de pimiento para pimentón de diferentes variedades, en la segunda quincena de marzo. Se colocó el producto cubriendo la superficie de las bandejas y con una sola capa. La determinación de los parámetros de secado se realizó a través de nueve muestras de cada variedad, de aproximadamente 100 gr cada una, ubicadas en diferentes lugares del secadero y respetando las variedades de pimiento para pimentón.

3.2. Colector y cámara de secado

Del análisis de los datos obtenidos del colector se desprende que la temperatura del aire a la entrada del mismo, coincidente con la temperatura del aire ambiente exterior, se mantuvo a partir de las 11,4 h y hasta 16,2 h por encima de 40 °C y obtiene su valor máximo de 43,4 °C a las 13 h. En ese mismo intervalo la temperatura del aire a la salida del colector fue superior a 48 °C, con un máximo a las 15,5 h de 54,3 °C, siendo el valor promedio de 52 °C. La eficiencia máxima para el primer día de ensayo del colector (energía útil/energía incidente) fue de 53,3 % para un flujo de 0,51 $kg s^{-1}$. La eficiencia promedio diaria del colector para el mismo día fue 38 %, mientras que para los 3 días de secado fue del 31,8 %.



DATOS	DATOS
<p>#Datos de circuito termico secador</p> <p>J1s=JM,1000,PFlujo*PVal J4s=JM,1000,PFlujo*PVal</p> <p>#Camara RA1=0.000 E3=18 JR4=JQ,PACU,(0.10*Prad) JR6=JQ,PAB,(0.10*Prad)</p> <p>R1ca=V1,PAB,PH1ca R2ca=V1,PAB,PH2ca R3ca=V1,PAB,PH3ca R3cah=V1,PAF,PH3cah R4ca=V1,PACU,PH4ca</p> <p>R1cah=V1,PALCa,PH1cah R1cav=V1,PAB,PH1cav R5ca=V1,PAB,PH5ca R5cp=V1,PAB,PH5ca R6cp=V1,PAB,PH5ca R6ca=V1,PAB,PH6ca R6cah=V1,PABCA,PH6cah</p> <p>R2al=D1,PAC,PeC,209.3 R2as=D1,PAC,PeAi,0.03 R7ca=D1,PAB,P6,0.06 R8ca=D1,PAB,0.60,0.05</p> <p>R4caR=R1,PACU,0.9,1 R5caR=R1,PAB,0.9,1</p> <p>C1ca=Ca1=C1,1000,PMcam #Camara C2ca=C1,1000,1*PAB*0.20 C3ca=C1,1000,1*PAB*P5 C6ca=C1,1000,PAB*1*(P7-0.20) C7ca=C1,900,1200*PAB*P6 C8ca=C1,900,1000*PAB*0.6</p> <p>C2al=C1,878,(2698*P1*PeC) C2as=C1,1000,(16*P1*PeAi)</p>	<p>#Camara - Producto</p> <p>Cp=C1,Pcpp,PMt JRp=JQ,PAB,(0.42*Prad) # supProd JPa=2400000*JR2H #Lvapor Rpa=V1,PAB,12</p> <p>#Datos del circuito de humedad</p> <p>EHP= PHP #humedad especific. aire JHa=EHP*PFlujo JHb=VC2H*PFlujo C2H=VC2H*PMcam R2H=V1,PAB,QHD(EHP) #h masa EPH=PPH #Humed aire prod agua</p>
PARAMETROS	
<p># PARAMETROS ADICIONALES</p> <p>PTemp=TABLA Tamb(tiempo) Prad=TABLA Rad(tiempo)</p> <p>PVcam=PAB*P5 #m3 PMcam= 1*PVcam #kg PCpa=4186 PH1c=12 #Hcolect aire-cubi int PH2c=PH1c #Hcol cub int-aire PH3c=PH1c #Hcol aire-cub ext PH4c=PH3ch=(2.8+3.7*2) PH1cv=PH1c #Hcol aire-plast neg PH1ch=PH4c PH5c=PH1c #Hcol plast-aire PH6c=PH4c #Hcol aire-ext PH6cv=PH1c #Hcol aire-piedra</p> <p>PH1ca=PH1cav=PH1c PH1cah=PH4c PH2ca=PH1c #H cub int-aire PH3ca=PH1c PH3cah=PH4c #H aire-cub ext PH4ca=PH4c #H cub ext-ext PH5ca=PH1c #H plast-aire PH6cah=PH4c #H aire-ext PH6ca=PH1c #H aire-piedra</p>	
PARAMETROS	
<p># Parametros del circuito de hum</p> <p>#PFlujo PFlujo= 0.30*PVal #kg/s PVal=1 #Tabla Val(Pdif) Pdif=(Temp 1ca-25)</p> <p>PHeS= TABLA HeS(tiempo) #EXP PHs= TABLA HsS(tiempo) #EXP</p> <p>PMTI=80 #kg masa humeda inicial PMs=15 #kg masa seca</p> <p>#Hr Salida PH3=QWs(PPs,PPa) PHa=VC2H PHsa=PHa/PH3</p> <p>Pcpps=3000 #Cp Prod. seco Pcpw=4180 PPa=87000 #Pa</p> <p>PWsa=QWs(PPs,PPa) PHP=PHeS*QWs(PPs,PPa) PPs=Qpsat(Temp 1ca) PPH=QWs(PPsp,PPa) PPsp=Qpsat(Temp p) #Temp P</p> <p>DPAgu= -(FLUJO R2H)</p> <p>Px=(PAgu)/(PMb) PMt=(PAgu+(PMs)) #kg m humedad Pcpp=Pcpps+Pcpw*Px PXX=PMt/PMTI PXX1=(PMt-PMs)/(PMTI-PMs)</p>	
PARAMETROS	
<p># PARAMETROS CONSTRUCTIVOS SIST</p> <p>P1=8 #LARGO_COLECTOR P2=8 #LARGO_CAMARA_DE_SECADO P3=1.8 #ANCHO_COLECTOR_Y_CAM P4=0.2 #ALTO_COLECTOR P5=0.2 #ALTO_CAMARA P6=0.15 #ESPESOR_CAMA_DE_PIEDRA P7=0.50 #ALTO_PATAS PeC=0.001 PeAi=0.05</p> <p>PAC=P3*P1 #AREA_COLECTOR PAB=P3*P2 #AREA_BANDEJA PATC=P3*P4 #AREA_TRANSV_COL PATS=P5*P3 #AREA_TRANSV_CAM PALC=P4*P1 #AREA_LATERAL_COL PAF=3.14*(P3**2)/2 #AREA_SEMICIRC PACU=3.14*P3/2*P1 #AREA_CUBTA COL PABC=P3*P7+2*P1*P7 #AREA_LAT_B_COL PABCA=((P2*2*(P7-P5/2))+P1*(P7-P5/2)) PALCa=((2*P5*P2)+(P3*P5/2)) #LAT_CAM</p>	
FUNCIONES	
<p>#Funciones para circuito de humedad</p> <p>QWs(xx,yy)=0.622*xx/(yy-xx) Qpsat(TT)=610.7*10**((7.5*(TT)/(273+TT)) QHD(xx)=13/(958+1796*xx)</p>	

Fig. 2. Uno de los tres circuitos del secador y tablas de datos para la simulación numérica con SIMUSOL

En la figura 3 se aprecian las variaciones temporales de las temperaturas a la entrada ($T_{a,eS}$), salida ($T_{a,sS}$) del sector de secado, en contraste con la temperatura del aire en el ambiente exterior ($T_{a,ex}$) y la irradiancia incidente sobre superficie horizontal ($I_{h,ex}$) correspondiente a los tres días de secado. Se evidencia un aumento de la temperatura del aire al pasar por el sector de secado; esto se visualiza en los

valores máximos de cada zona. La temperatura del aire a la salida del secadero se mantuvo, para el mismo intervalo, en valores superiores a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un valor máximo de $70,1^{\circ}\text{C}$ a las 14,8 h con un valor promedio de $63\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como se aprecia en la figura para los tres días de secado, entre las 11hs y las 18 hs las diferencias de temperatura entre el interior del secadero y el ambiente exterior fue igual o mayor a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

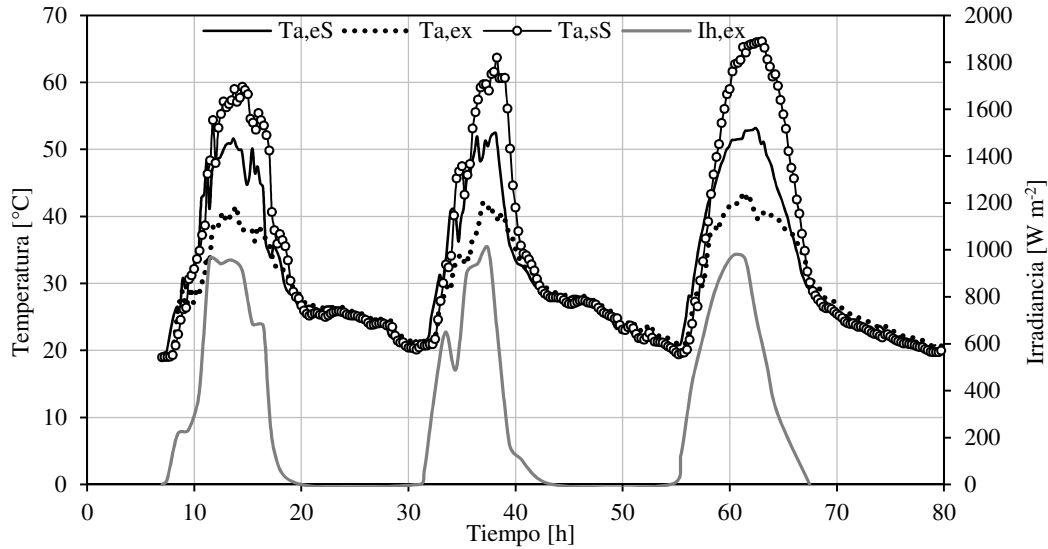


Fig. 3. Variación de temperatura en distintos puntos del secadero y la Irradiancia sobre superficie horizontal para tres días de ensayo en función del tiempo.

La humedad del aire exterior durante las horas de secado fue menor que $35,2\%$, la mínima de 22% (el último día) y el promedio durante el periodo de secado fueron de 44% . La humedad mínima del aire a la salida del colector fue $24,6\%$, $23,9\%$ y $16,2\%$ para cada uno de los días de secado,

mientras que a la salida del secadero fueron $15,4\%$, $13,3\%$ y $8,2\%$. En la Fig. 4 se grafica el contenido de humedad, expresado en kg kg^{-1} , referido a base seca (bs), en función del tiempo para cuatro muestras seleccionadas.

Después de 21 horas de secado, sin contar el periodo nocturno, las muestras perdieron el $68,5\%$, $89,9\%$, 97% y 96% de agua respectivamente.

Estas diferencias se deben fundamentalmente a las características de cada variedad. Una vez finalizado el proceso, los pimientos fueron retirados del secadero y acondicionados para lograr la homogeneización de 1 producto respecto al contenido de humedad. Las velocidades de secado de cada variedad, en función del contenido de humedad y del tiempo durante el proceso secado en el túnel solar, se detallan en la Tabla 2, ajustadas por cuadrados mínimos. En la Fig. 4,5 y 6 se muestran las gráficas correspondientes.

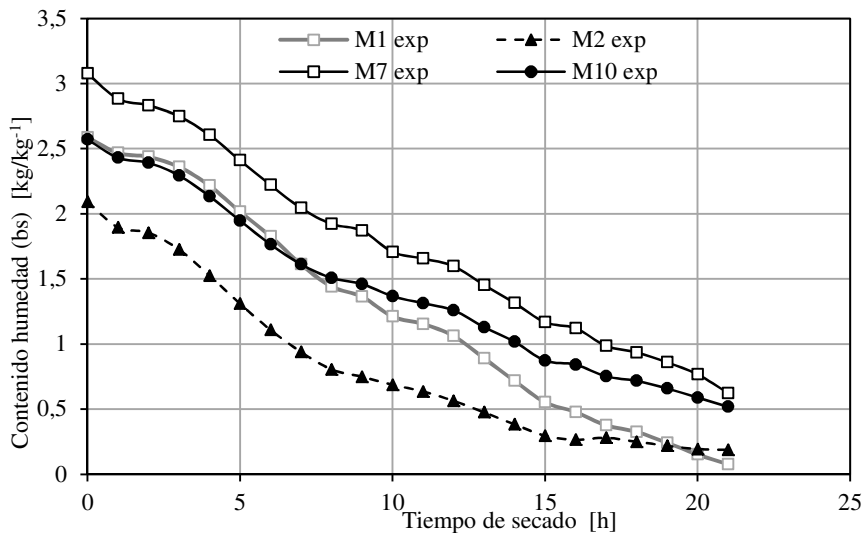


Fig. 4. Variación temporal del contenido de humedad (bs) para muestras de diferentes variedades.

Tabla N° 2. Ecuaciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y el tiempo.

$V_{S1} = 0,0727 \ln (Mh_1) + 0,0809$ $R^2 = 0,9927$	$V_{S1} = - 0,004 t + 0,1605$ $R^2 = 0,9264$
$V_{S2} = 0,0733 \ln (Mh_2) + 0,1305$ $R^2 = 0,9934$	$V_{S2} = - 0,0097 t + 0,1954$ $R^2 = 0,9998$
$V_{S7} = 0,0488 \ln (Mh_7) + 0,0917$ $R^2 = 0,9851$	$V_{S7} = - 0,0035 t + 0,1515$ $R^2 = 0,9999$
$V_{S10} = 0,0609 \ln (Mh_{10}) + 0,0841$ $R^2 = 0,9943$	$V_{S10} = - 0,0046 t + 0,1471$ $R^2 = 1$
$V_{S12} = 0,0587 \ln (Mh_{12}) + 0,0258$ $R^2 = 0,9956$	$V_{S12} = - 0,0017 t + 0,1006$ $R^2 = 0,9855$

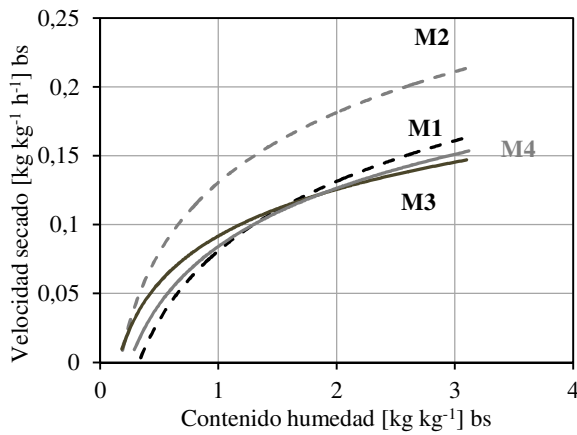


Fig. 5: Velocidad de secado en función del contenido de humedad

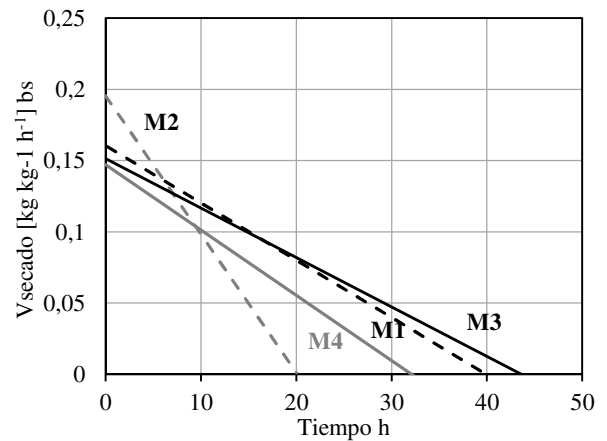


Fig. 6: Velocidad de secado en función del tiempo

Se observa que la velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso de secado, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad va disminuyendo, como era de esperar.

Se advierte, en comparación con trabajos anteriores (Iriarte et al. 2012), que la velocidad de secado del nuevo diseño aumentó en forma significativa, aun en las primeras horas del proceso. Siendo la velocidad de secado de la variedad M2, variedad que más rápido se secó en este ensayo, aproximadamente el doble de la velocidad obtenida en los ensayos de secado utilizando el diseño del anterior.

En la Foto 1 y 2, se muestran las bandejas con pimiento recién cargado y luego del secado.

3.3. Modelo de ajuste de las curvas de secado

La cinética de secado expresada en términos de los modelos matemáticos de la tabla 1, se detallan en la tabla 3. Donde se

muestran los resultados para los modelos de Newton y Henderson-Padis.

El resto de los modelos fueron desechados porque las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y/o la correlación de los coeficientes estimados fue superior a 0,80.

De estos dos modelos se advierte que para la variedad *Yokavil*, el R^2 para el modelo de Newton es menor que el de Henderson-Pabis y χ^2 , MBE, RMSE son menores.

Por otro lado, el criterio estadístico indica que ante la similitud en los ajustes, es preferible elegir el modelo que tenga menos variables (parsimonia del modelo).



Foto 1. Secadero tendalero solar.



Foto 2. Bandejas con pimiento seco.

Tabla N° 3. Resultados del ajuste de los modelos de las curvas de secado

Modelo	Variedades	a	k	R ²	χ ²	MBE	RMSE
NEWTON	<i>Yokavil</i>		0,084	0,924	0,00072	-0,045 10⁻⁶	0,0263
	<i>Encalilla</i>		0,011	0,980	0,0018	-0,0033	0,0410
	<i>Experimental D</i>		0,061	0,979	0,0013	-0,0056	0,0353
	<i>Lautaro</i>		0,066	0,982	0,0012	-0,0059	0,0333
HENDERSON PABIS	<i>Yokavil</i>	1,135	0,096	0,950	0,0055	0,0101	0,0708
	<i>Encalilla</i>	1,069	0,118	0,987	0,00123	0,0030	0,0334
	<i>Experimental "D"</i>	1,049	0,065	0,985	0,00091	0,0018	0,0291
	<i>Lautaro</i>	1,052	0,071	0,989	0,00075	0,0015	0,0261

Para las variedades *Encalilla*, *Experimental "D"* y *Lautaro*, el análisis de los valores de la tabla 3 indica que el modelo que mejor ajusta es el de Henderson-Pabis. Con lo cual las ecuaciones de ajuste para cada variedad son:

$$MR_{(1)} = \exp(-0,084 t) \quad [9]$$

$$MR_{(2)} = 1,069 \exp(-0,118 t) \quad [10]$$

$$MR_{(3)} = 1,049 \exp(-0,065 t) \quad [11]$$

$$MR_{(4)} = 1,052 \exp(-0,071 t) \quad [12]$$

La performance de los modelos elegidos para todos los cultivares se ilustra en la figura 6. Como se aprecia los datos están distribuidos alrededor de la línea de ajuste por cuadrados mínimos, lo que indica que los modelos matemáticos seleccionados son adecuados para describir el comportamiento de los cultivares pimienta para pimentón.

3.4. Coeficiente de difusión efectiva

Al tomar logaritmo natural en ambos miembros de la ec. 8, se obtiene una ecuación que representa una recta, cuya pendiente depende de D_{ef} :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right) \quad [13]$$

Calculando el $\ln(MR)$ con los datos experimentales y graficando en función del tiempo, se determina el valor de la pendiente. Con el espesor de la lámina (L), se obtiene el coeficiente de difusión efectiva promedio de cada variedad, para una temperatura promedio del aire dentro del secadero de 40 °C durante el tiempo de secado:

$$D_{ef-m(1)} = 2,19226 \times 10^{-9} [m^2 s^{-1}] \quad R^2 = 0,9894 \quad [14]$$

$$D_{ef-m(2)} = 1,78364 \times 10^{-9} [m^2 s^{-1}] \quad R^2 = 0,9605 \quad [15]$$

$$D_{ef-m(3)} = 1,56844 \times 10^{-9} [m^2 s^{-1}] \quad R^2 = 0,9944 \quad [16]$$

$$D_{ef-m(4)} = 1,51737 \times 10^{-9} [m^2 s^{-1}] \quad R^2 = 0,9949 \quad [17]$$

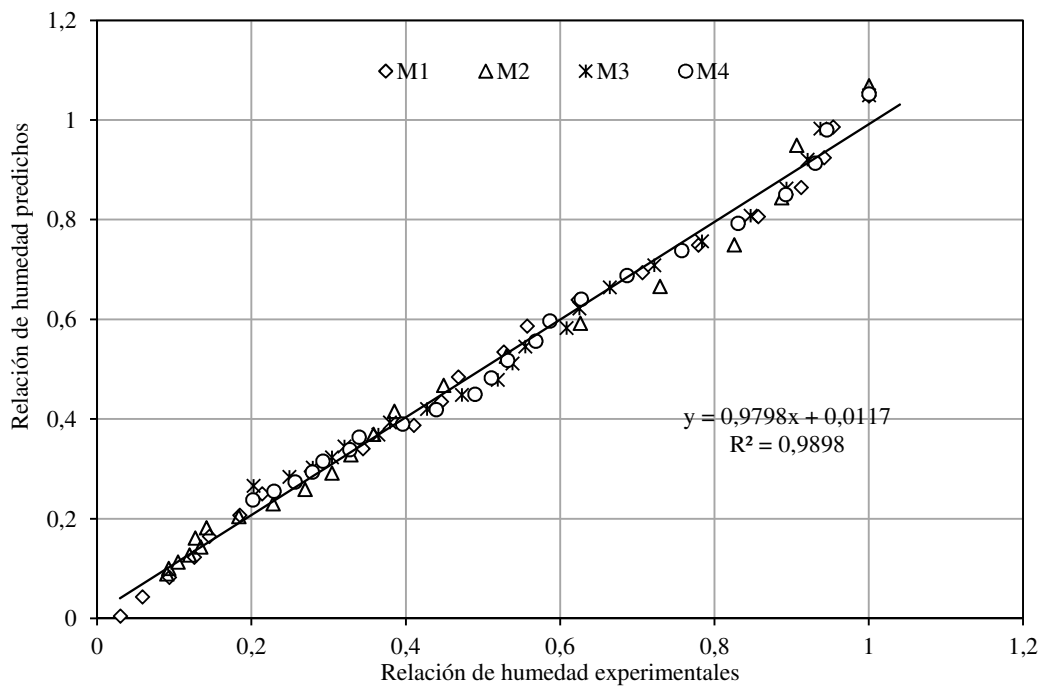


Fig. 6: Comparación de los valores de la relación de humedad experimentales y predichos para los modelos de Newton y Henderson - Pabis

3.5. Ajuste del modelo de simulación.

El ajuste del modelo de SIMUSOL se realizó con datos experimentales del ensayo de secado de pimiento para pimentón. Se realizó un ajuste del modelo en el sector colector y de la zona del secadero. Los coeficientes convectivos, conductivos y radiativos que se usaron en el modelo térmico fueron calculados teniendo en cuenta las propiedades físicas y térmicas de cada uno de los materiales que se utilizaron para su construcción.

Se utilizaron como variables de ajustes los coeficientes de absorción de la radiación en las cubiertas y la placa colector, teniendo en cuenta los datos medidos, como el flujo (velocidad promedio del aire medida en los tres nodos principales del aire) y la radiación obtenida experimentalmente sobre la placa colector. El ajuste se realizó comparando las temperaturas simuladas y experimentales del aire a la salida del colector.

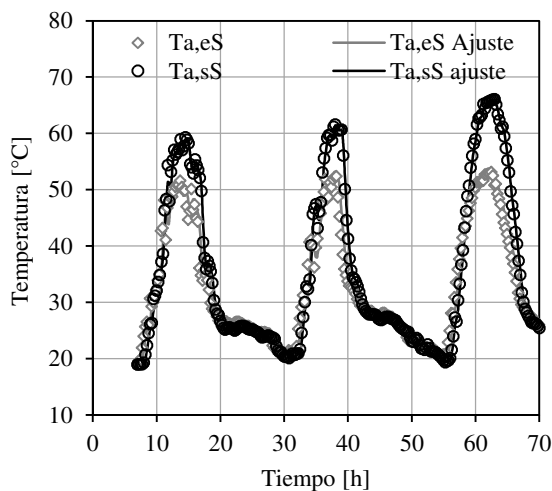


Fig. 7. Ajuste del modelo en las temperaturas del colector y secador

En lo que respecta a la simulación de la variación del contenido de humedad [(P-Ps)/Ps] respecto del tiempo, para la muestra 1, se advierte una buena concordancia (Fig.8), siendo el error relativo respecto de los valores experimentales del orden del 2 %. En las otras variedades de pimiento utilizadas para el secado, el ajuste también fue bueno.

4. CONCLUSIONES

Las modificaciones realizadas en el secadero tendalero túnel permitieron incrementos significativos, en el flujo másico, por disminución del área transversal, y en el calor disponible, al incorporar aislación en la placa colector. Esto produjo un aumento en la temperatura del aire sobre el producto, aumentando la velocidad de secado y disminuyendo el tiempo del proceso.

Al ser iguales, en este nuevo diseño, las configuraciones del colector y secadero es posible cambiar las longitudes de ambas partes a fin de adaptarlas a las necesidades del secado.

Los datos experimentales ajustados con los modelos matemáticos (Newton y Henderson – Pabis) permitieron caracterizar matemáticamente el proceso de secado de los cultivares de pimiento para pimentón utilizados.

Los coeficientes que intervienen en los cálculos se ajustaron a la temperatura media entre la temperatura de entrada y salida del colector y del sector de secado, según corresponda. En el procedimiento de ajuste se modificó un 2 % del coeficiente de absorción de la radiación solar incidente sobre superficie horizontal y sobre el producto, respecto del calculado teóricamente.

En la figura 7 se muestra la variación de la temperatura del aire a la entrada del secadero [Ta,eS] y salida del secadero [Ta,sS] experimentales y las ajustada con el modelo. Del análisis de los datos se obtiene que la desviación entre los datos experimentales y simulados, en promedio fue de 0,87°C y un error relativo respecto al valor experimental de 1,2%, para los tres días de secado.

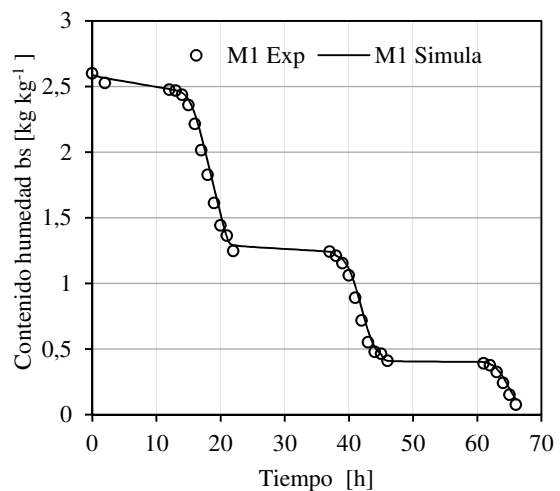


Fig. 8. Ajuste del modelo para el contenido de humedad en función del tiempo para muestra 1

Observándose una buena correlación entre los valores experimentales y los obtenidos por los modelos.

La difusividad efectiva promedio de los cultivares de pimiento para pimentón variaron entre 1,5 y 2,2 10⁻⁹ m² s⁻¹, será necesario investigar las variaciones de la difusividad en función de las etapas (tiempo), velocidad de secado y de la temperatura del producto.

La simulación del secado usando un modelo térmico - eléctrico resultó ser muy adecuado, los ajustes están en el orden de los errores esperados y resulta una herramienta importante para predecir el funcionamiento bajo otras condiciones ambientales.

Este secadero, si bien está construido en con estructura de hierro. Su construcción es sencilla, los materiales son locales, su costo no aumenta significativamente. La capacidad máxima de carga 140 kg, para el caso de pimiento para pimentón.

REFERENCIAS

Bala, B.K., Woods, J.L. (1994). Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*, 53 (3), 259–266.

- Bala B. y Woods J. (1989). Simulation and Optimization of natural convection solar drier. *Journal of Agricultural Engineering*, **27**, 419-424.
- Duran G. y M. Condori (2009). Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **13**, 121 – 129
- Crank, (1975). The Mathematics of diffusion. Oxford University Press, London.
- Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Lara y L. Brizuela. (2010). Secadero tendalero con chimenea solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **14**, 2.01-2.08.
- Iriarte A., S. Bistoni, M. Watkins, V. Luque, H. Sánchez y L. Brizuela. (2011). Análisis de un secadero solar tendalero con torre central en convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **15**, 225 - 232.
- Iriarte A., Bistoni S., Luque V., García V., Rodríguez C. y Brizuela L. (2012). Caracterización del secado de pimiento para pimentón en un tendalero solar activo tipo túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 895-899.
- Jairaj K., Singh S. and Srikant K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy* **83**, 1698-1712.
- Kavak Akpınar E. and Y. Bicer (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management*, **49**, 1367–1375.
- Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management* **44**, 1111-1122.
- Panchariya P. C., Popovic D., and Sharma A. L. (2002). Thin layer modelling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, **52**, 349-357.
- Philip, S.K., Sharma, S., Rao, C.S. (1993). Installation and performance monitoring of a commercial solar dryer for chillies. *Proceedings of the National Solar Energy Convention*, 11–13.
- Tecante A. (1998). Fundamentos de secado, extracción sólido - líquido y destilación. Ed. Reverté
- Togrul y Pehlivan, 2004. Togrul, I.T. & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, **65**, 413–425.
- Trim, D.S. (1982). Development of a forced convection solar drier for red chilli. *Tropical Agriculture (Trinidad)* **59** (4), 319–323.