

Caracterización de un secadero tipo túnel a convección forzada

Silvia Bistoni¹, Adolfo A. Iriarte¹, Víctor H. Luque¹ & Víctor O. García¹

(1) Grupo de Energías Renovables Catamarca, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca, Catamarca, Argentina
silviabistoni@gmail.com

RESUMEN: En la Provincia de Catamarca, existen numerosos grupos familiares cuyo único sostén es la comercialización de productos agrícolas deshidratados como ser: el pimiento para pimentón, pasas de uva, pasas de higos, pelones, orejones de durazno, manzana, peras, etc. Tradicionalmente los productos son secados directamente al sol, lo que implica que los productos no sean de óptima calidad, lo que conlleva que los precios de comercialización sean bajos. Este problema se solucionaría si se optara por secaderos solares que sean económicamente viables para estos productores. En el presente trabajo se propone un secadero solar mixto de 10 m de largo por 1,80 m de ancho, construido sobre un tendalero cubierto con un plástico y con convección forzada. Está formado por dos partes: un colector solar y a continuación la cámara de secado. La circulación del aire se realiza mediante dos ventiladores de baja potencia. En el presente trabajo se caracteriza térmicamente el secadero y se analizan el proceso de secado de pimiento para pimentón; se grafican las variaciones de temperaturas y humedades, la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo. Los tratamientos mejoraron el color del producto seco y disminuyeron el tiempo de secado.

1 INTRODUCCIÓN

En la provincia de Catamarca se encuentran unidades económicas familiares dedicadas a la producción y comercialización de frutas, hortalizas y/o esencias aromáticas desecadas (pasas de uva, higo, pimiento para pimentón, orégano, etc.) que en muchos casos, constituye su primordial fuente de subsistencia (Orell, 2006, Caeiro R., 2009). Estos pequeños productores, en su gran mayoría, secan sobre el terreno natural constituido por suelo pedregoso o tierra apisonada en los tradicionales canchones. Los productos secos, usando este método de secado directo al sol, suelen ser de baja calidad, lo que hace que algunos de los productos en cuestión no sean negociables en los mercados nacionales o internacionales.

Otro inconveniente que presenta el secado directo al sol es que la velocidad de secado es muy lento; por ejemplo para el pimiento para pimentón el producto demora en secarse entre 15 a 30 días, dependiendo de las condiciones climáticas (Carabajal, 2002).

Por otro lado, para obtener un producto de calidad, es necesario realizarle pre-tratamientos. Su empleo mejora la textura, retarda los procesos de pardeamiento y preserva nutrientes y vitaminas.

El aumento de la calidad de los productos, mediante el empleo de alguna tecnología de secado solar, redundará en la economía familiar de la mayoría de estos productores que viven de su comercialización.

El uso de dispositivos para secado solar se ha ido incrementando en los últimos años. Se han desarrollado diferentes tipos de secadores solares de diseños más o menos sofisticados y para diferentes tipos de productos (Condori *et al.*, 2006; Forson *et al.*, 2007; Ghazanfari y Sokhansanj S., 2002; Jairaj *et al.*, 2009; Janjaia *et al.*, 2008; Khalil *et al.*, 2007; Sethi Y Sadhana Arora, 2009; Yalduz O. y Ertekyn C. 2001).

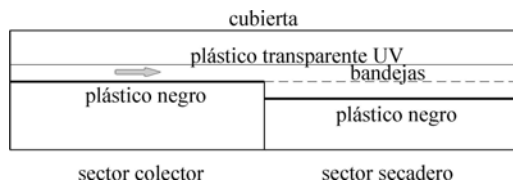
Entre los secaderos sencillos se destacan los secaderos tipos tendaleros. Carabajal D. (2002) utilizó un secadero de este tipo y propuso cubrir el producto durante parte del día y la noche, con plásticos transparentes o negros con la finalidad de darle cierta protección al producto. Investigaciones previas realizadas por Bala y Woods (1989), Jairay *et al.* (2009), Iriarte *et al.* (2010), han demostrado que los secaderos solares naturales o pasivos de bajo costo, pueden ser construidos a nivel local y no requieren energía convencional. Sin embargo tienen algunas limitaciones importantes debido a que el flujo de

aire es bajo y fluctuante, por su dependencia directa de la temperatura (Bala y Woods, 1994; Duran y Condori, 2009; Iriarte *et al.*, 2011). Esto trae un riesgo de deterioro del producto cuando hay cambios de las condiciones climáticas o cuando la humedad relativa exterior es mayor que la necesaria para secar. En este sentido, es interesante disponer de otra opción para transformar un tendalero tradicional en uno tendalero solar activo, es decir con circulación forzada.

Bala *et al.* (2003) han diseñado, para el secado comercial de frutas, y verduras, un sistema de secado de bajo costo, con convección forzada, mediante el uso de pequeños ventiladores alimentados por módulos fotovoltaicos.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de un secador solar tipo tendalero túnel, activo, usando dos ventiladores de bajo consumo. Se describen las componentes del sistema y los resultados experimentales de un ensayo de secado de pimiento para pimentón. Se muestran las curvas de secado y la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo.

2 MATERIALES Y MÉTODO



2.1 Descripción del secadero solar

El secadero consiste en un tendalero de 0,80 m de alto, 1,80 m de ancho y 10 m de largo, dividido en dos partes; una parte es el colector solar y la otra el secador que también recibe radiación solar. Ambas partes están 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 coollectora. 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.

A 0,25 m sobre placa coollectora (sector colector) y sobre las bandejas (sector secadero) hay una cubierta plana de plástico UV térmico, formando un ducto por donde circula el aire, succionado por dos ventiladores axiales de 45 W cada uno, colocados en el ingreso al colector. Todo el sistema, colector y secadero, tiene una segunda cubierta semicircular de plástico. La carga y descarga de los productos se realiza por los costados del módulo de secado, Fig.1.

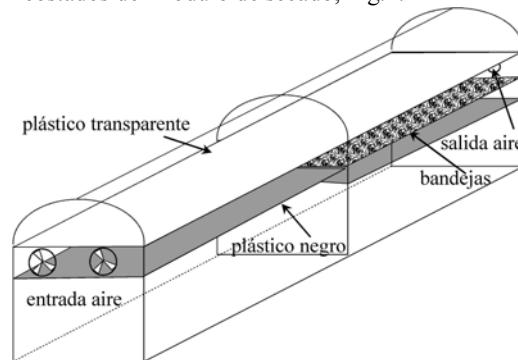


Figura 1. Corte y vista del secadero tendalero túnel

En el suelo, debajo del tendalero, se colocó un plástico negro para evitar el crecimiento del pasto; sobre el mismo se pusieron piedras pintadas de negro para acumular parte de calor que gana el sistema en la parte inferior. El secadero tiene capacidad para diez bandejas de 1m x 0.80 m, construidas de madera y media sombra.

La radiación solar que pasa a través de las cubiertas transparentes del secador también aporta calor al producto (colector secundario), contribuyendo al aumento de la velocidad de secado.

2.2 Experiencias de secado

El secadero se cargó con pimiento para pimentón de diferentes variedades, cosechado en la Estación Experimental del INTA, Sumalao, en el mes de Junio.

Se realizaron dos pretratamientos: blanqueado a 80°C durante 3 minutos y baño de metabisulfito de sodio al 4% durante 30 minutos. Para comparar la velocidad de secado se colocaron pimientos al aire libre. El seguimiento del proceso de secado se basó en el método estático de aproximación gravimétrica determinándose la diferencia de masa debido a la pérdida de agua en

muestras de aproximadamente iguales, colocadas en diferentes sectores del secadero. Se seleccionaron 11 muestras de aproximadamente 25 gr cada una, 8 de ellas se ubicaron en el secadero y tres al aire libre sobre un tendalero cargado con pimienta, con el objeto de comparar la velocidad y tiempo de secado.

Las curvas de secado se realizaron teniendo en cuenta el contenido de humedad en base seca (M) en función de las horas que demandó el secado. Estas curvas fueron ajustadas matemáticamente; mediante derivación se determinaron las velocidades de secado correspondientes.

El peso seco del producto se obtuvo llevando una muestra a estufa a 102 ° C hasta obtener peso constante.

2.3 Estudio del sistema solar

El estudio térmico del equipo solar se realizó comparando las temperaturas en distintos puntos del mismo. La eficiencia instantánea del colector se calculó mediante la ecuación (1):

$$\eta = \frac{m cp (ts-t)}{I Ac} \quad (1)$$

Para evaluar el comportamiento del sistema colector y la cámara de secado, se determinó la capacidad evaporativa (kg/s) (Pontín et al, 2009) según la ecuación (2):

$$E = G \frac{ws-we}{1+wa} \quad (2)$$

donde G es el flujo másico de aire (kg/s), ws, we, y wa son las humedades absolutas del aire (kg/kg aire seco) a la entrada, salida del secadero y ambiente respectivamente.

2.4 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, 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 polietersulfonahidrofóbicas (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.

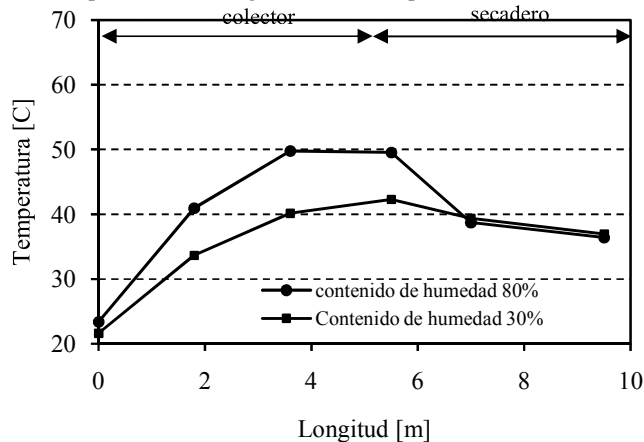
La velocidad del aire se midió con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 (± 0,05 m s⁻¹), en diferentes puntos en dirección longitudinalmente y transversalmente.

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).

3 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Fig. 2 muestra que el perfil de temperatura a lo largo del secadero.

Figura 2. Perfil de temperatura a lo largo del secadero para diferentes contenidos de humedad



Como se aprecia ésta no solo depende de la radiación solar que incide sobre el sistema, sino también del contenido de humedad que presenta el producto. Al comienzo del secado, cuando el contenido de humedad en base húmeda es del 80%, la temperatura del aire disminuye a lo largo del secadero debido al enfriamiento evaporativo sobre la superficie del pimiento. Esta disminución de la temperatura es menor, cuando el contenido de humedad en el producto es más bajo (30 %), porque la cantidad de agua a evaporar es menor.

En la Fig.3 se muestra el aumento de la temperatura a la salida del colector sobre la temperatura ambiente en función de la radiación solar durante los 6 días del ensayo de secado.

La variación de temperatura (ΔT) aumenta linealmente con la radiación solar incidente sobre superficie horizontal (Rad). La ecuación (3) expresa la correspondiente ecuación de regresión:

$$\Delta T = 0,0522 \text{ Rad} - 5,3146 \quad (3)$$

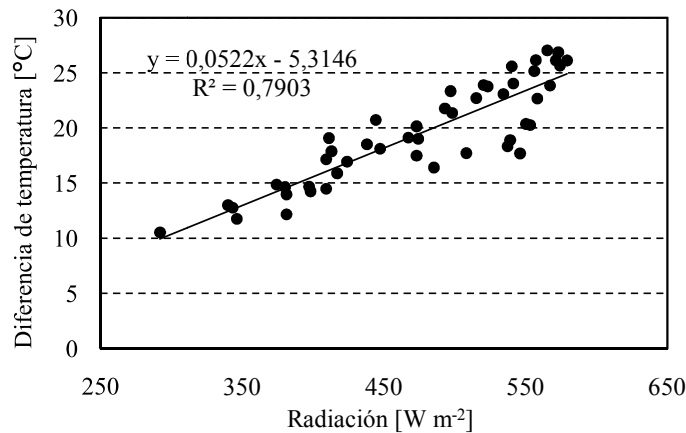


Figura 3. Diferencia de temperatura interior y exterior del colector en función de la radiación incidente

La eficiencia instantánea máxima del colector para el primer día de ensayo fue de 41,9 % para un flujo de $0,10 \text{ kg s}^{-1}$. La eficiencia promedio del colector durante los seis días de secado fue del 37%.

El coeficiente evaporativo promedio durante los días de secado fue de $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg de agua/s}$, es decir que por hora, en promedio, se evaporaron 1,4 kg de agua.

El contenido de humedad inicial del pimiento para pimentón utilizado fue de 78% y 80%, según la variedad. Se cargaron en el secadero túnel 100 kg de pimiento, con una densidad de carga de aproximadamente 10 kg por bandeja. A 95 kg no se le realizaron ningún tratamiento, a 2,5 kg se les hizo blanqueado y a otros 2,5 kg se les aplicó el tratamiento con metabisulfito. En un tendalero al aire libre se coloraron 9 kg sin ningún tratamiento. Fig. 4 y Fig.5.



Figura 4. Vista del colector túnel



Figura 5. Secadero túnel cargado con pimiento

En la Fig. 6 se grafica el contenido de humedad, expresado en kg kg^{-1} referido a base seca (bs), en función del tiempo, para cuatro muestras características del proceso de secado y durante las primeras 40 horas. Se omiten las otras muestras

porque muestran comportamientos similares. La muestra de pimiento sin tratamiento es M_6 , con tratamiento de metabisulfito M_9 y blanqueado M_{10} y M_2 la expuesta al sol directo.

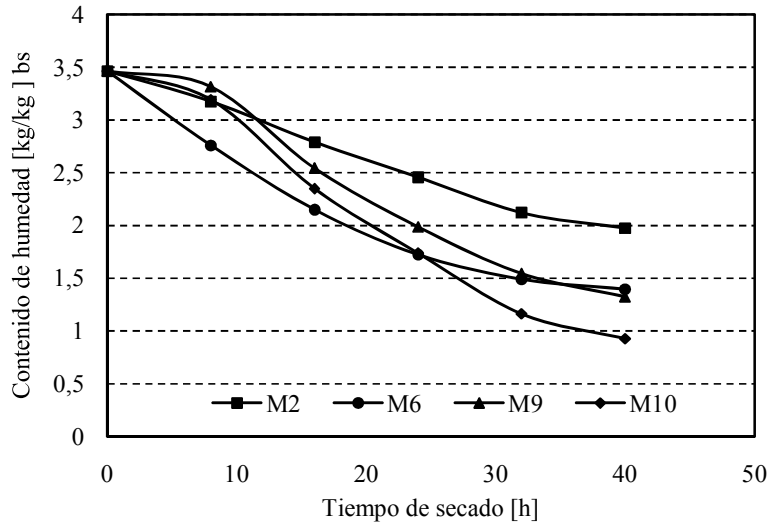


Figura 6. Contenido de humedad de las muestras con y sin tratamiento dentro del secadero y al aire libre

Del análisis de la Fig. 6 se desprende que las muestras con tratamiento, aumentaron su contenido de humedad durante las primeras horas de secado, como consecuencia de la absorción de agua durante el tratamiento. El contenido de humedad inicial (bs) de las muestras de pimiento fue de $3,46 \text{ kg kg}^{-1}$. La muestra con tratamiento de blanqueado, después de 40 h de secado, llegó a un contenido de humedad de $0,92 \text{ kg kg}^{-1}$, la con tratamiento de metabisulfito a $1,32 \text{ kg kg}^{-1}$ y la sin tratamiento a $1,39 \text{ kg kg}^{-1}$. Mientras que las muestras expuestas al aire libre disminuyeron su contenido de humedad hasta $1,98 \text{ kg kg}^{-1}$ a las 40h.

Como se ve de los datos de la Tabla 1, la velocidad de secado del pimiento en el secadero, en todos los casos, fue mayor que la de cielo abierto, siendo las muestras tratadas las que evidenciaron mayor velocidad de secado. Este aumento de la velocidad se debe a que los tratamientos modifican los tejidos superficiales del producto haciéndolos más permeable a la difusión del agua.

Las ecuaciones (4), (5) y (6) son los ajustes de las curvas de secado que se muestran en la Fig. 6 para las muestras 6, 9 y 10 respectivamente.

$$y = 0,00004 x^2 - 0,0657 x + 3,2598 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,98$$

$$y = 2,10^{-7} x^3 + 0,00005 x^2 - 0,0769 x + 3,6319 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,99$$

$$y = -4,10^{-6} x^3 + 0,0012 x^2 - 0,1071 x + 3,685 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,98$$

Las ecuaciones (6) (7) y (8) son las velocidades de secado de las muestras 6, 9 y 10, respectivamente, en función del contenido de humedad para pimiento para pimentón, obtenidas al derivar las curvas de secado y ajustarlas por mínimos cuadrados.

Tabla 1 Pérdida de agua según tratamientos

Muestras Tratamientos	Pérdida de agua en 40 hs (%)
Blanqueado	73,4
Metabisulfito de sodio	61,8
Sin tratamiento	59,8
Muestra al aire libre	42,8

$$v_6 = 0,0334 \ln(M_6) + 0,0254 \quad R^2=0,997 \quad (7) \quad v_{10} = 0,0587 \ln(M_{10}) + 0,0258 \quad R^2 = 0,996 \quad (9)$$

$$v_9 = 0,0426 \ln(M_9) + 0,0217 \quad R^2=0,996 \quad (8)$$

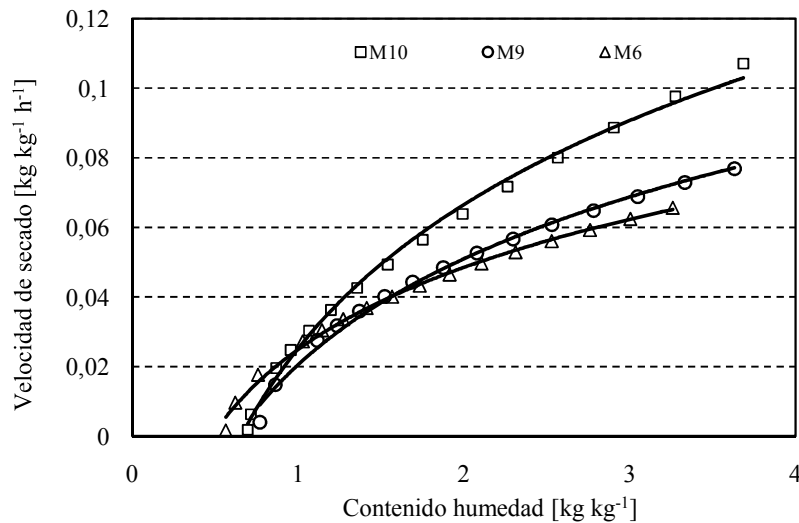


Figura 7. Velocidad de secado en función del contenido de humedad

En la Fig. 7 se muestra la velocidad de secado de las muestras con tratamientos M9 y M10, y sin tratamiento M6. Se observa que una mayor velocidad de secado para un mayor contenido de humedad, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad se va reduciendo.

4 CONCLUSIONES

El secadero cumple con la premisa inicial de ser de construcción sencilla, bajo costo y mano de obra no especializada, lo que facilita su adopción por parte de los pequeños productores.

Las dimensiones del secadero permiten una capacidad de carga (100 a 120 kg) que es razonable teniendo en cuenta el volumen de producción que manejan estos productores.

Se observó que el secado en esta época del año es lento por el nivel de la temperatura ambiente y la baja radiación sobre superficie horizontal. A pesar de ello se disminuyó el período de secado si se compara con el secado tradicional. Una alternativa a estudiar es incorporar un sistema de calentamiento auxiliar para usar durante las noches o cuando la radiación solar no sea suficiente para lograr temperaturas óptimas para el secado.

Los pretratamientos resultaron eficientes para mantener el color y aumentar la velocidad de secado, recomendándose el blanqueado frente a tratamiento con metabisulfito.

5 REFERENCIAS

- Bala K.K, Mondola M., Biswasa B., Das Chowdury B. & S. Janjaic, Solar drying of pineapple using solar tunnel drier, *Renewable Energy*, 28,183 – 190, 2003
- Bala B. & J.Woods, Simulation and Optimization of natural convection solar drier. *Journal of Agricultural Engineering*. 27, 419-424, 1989.
- Bala, B.K. & J.L Woods, Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy* 53 (3), 259–266,1994.
- Caeiro R., Análisis de las transformaciones del sector agropecuario de la provincia de Catamarca a raíz de la implementación de la ley 22.702 de desarrollo económico: Efectos territoriales e institucionales en el sistema olivar *Tesis Doctoral Universidad de Córdoba España*, 2009.
- Carabajal D. Secadero tendalero con cubierta plástica. *Folleto de divulgación de INTA Catamarca*, 2002.
- Condori M, Echazú R. & L.Sartavia, Secadero solar indirecto con flujo de aire forzado para Huacalera, Quebrada de Humahuaca, *Avances en Energía renovables y medio ambiente*, 10, 247-254, 2006.
- Duran G. & M. Condori, Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. *Avances en Energías renovables y medio ambiente*, 13, 121 – 129, 2009.
- Forson F.K., Nazha M., Akuffo F.O. & H. Rajakaruna. Design of mixed-mode natural

- convection solar cropdryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*, 32, 2306–2319, 2007.
- Ghazanfari A. & S. Sokhansanj, Experiments on solar drying of Pistachio nuts. *AIC meeting CASA/SCGR program Saskatoor*, 14-17, 2002.
- Iriarte A., S. Bistoni, V. Luque, M. Lara & L. Brizuela, Secadero tendalero con chimenea solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 201- 208, 2010.
- Iriarte A., Bistoni S., Watkins M., Luque V., Sánchez H., & L. Brizuela. Análisis de un secadero solar tendalero con torre central en convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 225 – 232, 2011.
- Jairaj K., Singh S. & K. Srikant, A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy* 83, 1698-1712, 2009.
- Janjaia S., N. Srisittipokakuna & B. Balab, Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. *Journal of Energy* 33: 91–103. 2008.
- Khalil E., Al-Juamily A., Khalifa N. & T. Yassen, Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Journal of Desalination*, 209, 163–170, 2007.
- Orell, R. E. Proyecto específico de investigación y extensión PNHFA 4162. Desarrollo de bases para la producción y comercialización de aromáticas-condimenticias de fruto diferenciadas, por su calidad de producto y proceso. INTA 2006-2009
- Pontin M, Masetto J., Lema A & L. Ruetsch, La capacidad evaporativo utilizada como un índice de comportamiento de un sistema de secado integrado por un ventilador, colector solar y cabina de secado, *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente*, 13, 243 – 250, 2009.
- Sethi V.P. & Sadhna Aroram. Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy* 83, 1472-1484, 2009.
- Yaldyz O. & C. Ertekyn, Thin layer solar drying of some vegetables. *Journal of Drying Technology*, 19 (34), 583–597, 2001.