



Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4, pp. 03.67-03.76, 2016. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5

OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DIFUSIVO DE CARNE DESHIDRATADA (CHARQUI).

F. Albesa¹, F. Altobelli², G. Durán³, M. Condorí⁴

Grupo de Investigación y Desarrollo para la Agroindustria (GIDAI)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387-4258709 – Fax 0387-4255489 e-mail: federico.j.albesa@gmail.com

Recibido 13/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: La simulación del secado de productos agrícolas requiere disponer de información sobre el comportamiento del producto y las variables del proceso, entre diferentes parámetros se incluyen los correspondientes a los coeficientes difusivos y convectivos. Ambos coeficientes, vinculados a las propiedades de transporte de flujos, se obtienen mediante el análisis de escala; o mediante el uso de correlaciones previstas a tal fin, o de manera experimental. A escala de laboratorio se ensayó el deshidratado de carne para la obtención de Charqui, con control y seguimiento de las principales variables del proceso: temperatura, peso y humedad. Se efectuó también, mediante análisis de imágenes, el cálculo de las áreas de los productos frescos y secos. Los resultados alcanzados posibilitaron obtener los parámetros $AtHd$ (coeficiente de difusión) y $AtHc$ (coeficiente convectivo), para el secado de carne. La importancia de la obtención de los mencionados parámetros radica en la posibilidad de incorporación de los mismos en modelos de simulación con ajuste al producto bajo estudio. Quedan aún por realizarse las mencionadas simulaciones y evaluar el ajuste para secadores solares pasivos.

Palabras clave: secado, Charqui, simulación.

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de secadores solares para el deshidratado de productos agrícolas es para el norte argentino un trabajo de larga data. Los fines perseguidos son siempre similares: la conservación, preparación y posterior comercialización de los productos obtenidos, ya sean de origen animal, como vegetal. En este contexto se ubica el secado de carne para la obtención de Charqui. Desde hace algunos años el INENCO viene realizando aportes al diseño, construcción, ensayo y simulación de secadores solares pasivos para carne (Duran, Condorí, & Altobelli, 2015; Duran & Condorí, 2006, 2007).

La simulación del secado de productos agrícolas requiere disponer de información sobre el comportamiento del producto secándose y su interacción con el flujo de aire que interviene en el proceso, necesitándose para ello conocer las variables que intervienen, (pérdida de masa de agua del producto, temperatura y humedad del aire caliente y temperatura del producto), como así también las ecuaciones que las vinculan. (Saravia, 2010). Estas últimas han sido poco estudiados para productos de escala rural y escasa comercialización (tales como el Charqui) (Duran y Condorí, 2006), por este motivo su determinación experimental es de interés, debido a la posibilidad de lograr un mayor ajuste en los modelos de secadores de carne (Duran *et.al*, 2008). Se permitiría entonces optimizar aspectos como dimensión, posibilidades de carga; así como disminución en los tiempos de secado, mejoras en

¹ CPA CONICET

² Becario CONICET

³ Docente UNSa

⁴ Director INENCO

la calidad final y reducción de pérdidas. A escala del productor, estos aspectos redundan en mejoras económicas (Cruz y otros, 2014).

El objeto del presente trabajo es determinar experimentalmente los coeficientes convectivos $AtHc$ y difusivos $AtHd$ que intervienen en el deshidratado de carne vacuna. Para lograr este objetivo, se realizaron una serie de ensayos de deshidratado de carne a escala de laboratorio, presentándose los resultados obtenidos mediante gráficos.

METODOLOGÍA

Para la confección del modelo se siguieron los trabajos realizados por (Saravia *et al.*, 2007) y por (Durán y Condorí, 2009); se tomaron los siguientes parámetros que definen los aspectos geométricos y masas del producto:

- At = área total de la superficie aproximada de la carne, en función del tiempo (t)
- Mt = masa total del producto en función del tiempo (t)
- Mti = masa total inicial del producto
- Ms = masa seca del producto
- Ml = masa total del líquido contenido en el producto en función del tiempo ($Mt - Ms$)
- $X = Ml/Ms$ = contenido de humedad del producto en función del tiempo
- ΔMl = disminución de la masa de líquido del producto en función del tiempo
- $R = \Delta Ml / \Delta t = Ms * \Delta X / \Delta t$ = velocidad de secado del producto

Mientras que dentro de los parámetros térmicos se encuentran:

- Tp = Temperatura del producto
- Tce = Temperatura de entrada del aire a la cámara de secado
- Tcs = Temperatura de salida del aire de la cámara de secado
- Cpa = Calor específico del agua líquida
- Cps = Calor específico de la masa seca
- Hfg = calor de cambio de fase del líquido
- Hc = coeficiente de convección térmica de la superficie de las hojas
- Hd = coeficiente de difusión del líquido por la superficie de las hojas
- Wc = humedad absoluta de la cámara de secado
- Wa = humedad absoluta del aire ambiente
- Wps = humedad absoluta de saturación del producto
- Hrc = humedad relativa del aire de la cámara
- Pa = presión atmosférica ambiente
- Ps = Presión de saturación de la mezcla vapor – agua

El modelo físico de secado que se ha seguido en este trabajo, en sintonía con Saravia *et al.* 2007 se basa en el planteo de los balances de energía en flujo de aire y producto, con el objetivo de obtener en laboratorio y de manera experimental los coeficientes combinados de convección $AtHc$ y difusión de vapor de agua, $AtHd$.

Como consideraciones generales, se establece que el flujo de aire caliente sobre el producto a secar es laminar y de tipo forzado, incidiendo de manera tangencial sobre el producto. Además, se considerará despreciable la acumulación de calor en el flujo de aire. Respecto a la cámara de secado, se considera adiabática, y lo suficientemente estanca como para considerar válida la conservación de la masa de aire que se mueve dentro de ella. No se tomará en cuenta su inercia térmica, ni se considerarán para ella efectos conductivos de calor. En cuanto al producto, se considerará que el secado se produce por evaporación del contenido de agua libre, y se tienen en cuenta la transferencia de calor desde el aire caliente, además del enfriamiento evaporativo que se produce como consecuencia del secado. A tal fin, consideraremos variable la capacidad calorífica del producto, en función del flujo de agua evaporado hacia el aire. De la misma manera, supondremos que el área del producto cambia como consecuencia del proceso de secado, de igual manera que los coeficientes de convección de calor y difusión de vapor de agua, Hc y Hd , respectivamente.

Entre las ecuaciones que rigen el secado del producto se pueden mencionar dos: la velocidad de secado R y la ecuación diferencial del balance térmico del producto, siguiendo el trabajo de Saravia, et al, 2007.

$$R=hd*At*(Wps(Tp)-Wc) \quad (1)$$

Se supone que el proceso de pérdida de vapor del producto hacia el aire de la cámara se realiza entre la superficie del líquido del producto donde el aire húmedo en contacto con el líquido se encuentra saturado a la temperatura del producto y el aire húmedo de la cámara con una humedad absoluta Wc.

$$(Cps+Cpa*X)*Ms*(\Delta Tp/\Delta t)-hfg*R=At*hc*(Tc-Tp) \quad (2)$$

A la derecha de la ecuación se expresa la transmisión de calor desde el aire al producto a través de la superficie de las hojas para esta transferencia. El primer término de la izquierda de esta misma expresión se refiere al calor acumulado en la masa del producto, mientras que el segundo término representa el calor utilizado en el cambio de fase de la evaporación del agua.

Según (Threkeld, 1973), la humedad absoluta de una mezcla de aire W puede ser expresada en función de su temperatura T (°C) y humedad relativa Hr:

$$Ps(T)=610,7*10^{(7,5*T/(273+T))} \quad (3)$$

$$Ws(ps,Pa)=0,622*ps/(Pa-ps) \quad (4)$$

$$W=Hr*Ws(ps) \quad (5)$$

Despejando y reordenando términos, en base a las ecuaciones (1) y (2) se pueden hallar las expresiones de los productos combinados del área – coeficiente convectivo Athc y área – coeficiente difusivo Athd.

$$Athd = -Ms * \Delta X/\Delta t * (Wps(Tp)-Wc)-1 \quad (6)$$

$$Athc = ((Cps+Cpa*X)*Ms*(\Delta Tp/\Delta t) + hfg* Ms * \Delta X/\Delta t) * (Tc-Tp)-1 \quad (7)$$

SISTEMA DE SECADO Y EQUIPO DE MEDIDA UTILIZADO

El secador de laboratorio utilizado consta de un ventilador que introduce aire a temperatura y humedad ambiente, éste aire es calentado por medio de una resistencia eléctrica, a la que se le hace circular una corriente variable consiguiendo distintos valores de potencia disipada y controlando de esta forma la temperatura a la que el aire ingresa a la cámara de secado. Al salir del conducto e ingresar a la cámara, el aire pasa a través de un deflector poroso que homogeniza su temperatura y velocidad.

La cámara se encuentra aislada térmicamente con lámina de espuma de polietileno (TBA) de 5cm de espesor, y sellada con silicona en sus laterales para lograr un mayor hermetismo. En la tapa superior de la misma se ha practicado una pequeña perforación ($\varnothing=2\text{mm}$) por donde pasa un hilo que cuelga de la balanza y sostiene la bandeja donde se coloca el producto a secar. La salida del aire cargado de humedad está en la cara opuesta a donde ingresa (*Figura 1*).

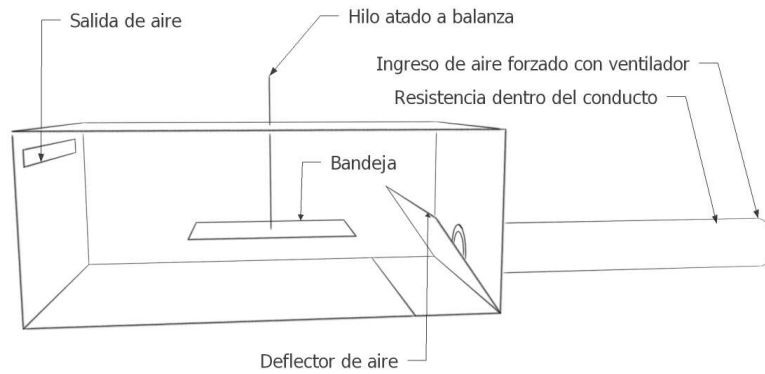


Figura 1 Esquema del secador de laboratorio empleado en las experiencias.

Para el registro de las variables temperatura y humedad en la cámara de secado, se utilizaron sensores arduino DHT22. Para el caso del peso del producto, se empleó una balanza digital OHAUS Scout PRO, de 400g con resolución de 0.1g. La temperatura del producto fue medida con una termocupla conformada por hilos de cobre y constantan recubiertos de teflón, para lograr la máxima flexibilidad y no alterar las medidas del peso. Los datos se registraron cada 1 minuto durante toda la experiencia con un script realizado en Scilab mediante uso de la librería Serial.

PROTOCOLO DE LOS ENSAYOS

Con el fin de estandarizar los ensayos, se emplearon bifés de carne, provenientes todos de un mismo corte, siguiendo el protocolo de trabajo que se detalla a continuación:

1. Estabilizar la temperatura deseada en el interior del secador.
2. Salar el bife con exceso de sal entrefina
3. Dejar orear la carne por 30 minutos
4. Raspar el excedente de sal
5. Cargar el bife en la bandeja
6. Pinchar el bife con la termocupla
7. Realizar el secado y registro de datos hasta conseguir peso constante
8. Obtener peso seco de la muestra en estufa a 102°C

Sistema de medición

Para el registro de las variables temperatura y humedad en la cámara de secado, se utilizaron módulos sensores de temperatura y humedad relativa con salida digital modelo DHT22. El rango de las medidas es: 0-100 %HR y -40.0 a 80.0 °C y el error es ± 2 %HR y ± 0.5 °C. Las señales digitales se registraron con una placa Arduino Nano. La tecnología Arduino debido a su licencia Open-Hardware se destaca por su amplia gama de sensores y módulos de intercomunicación disponibles, su robustez, bajo costo y disponibilidad de librerías Open-Source. Para el caso del peso del producto, se empleó una balanza digital OHAUS Scout PRO, de 400g con resolución de 0.1g. La balanza tiene salida a puerto serial con el valor instantáneo del peso registrado. La temperatura del producto fue medida con una termocupla conformada por hilos de cobre y constantan recubiertos de teflón, para lograr la máxima flexibilidad y no alterar las medidas del peso. La señal en microvoltios se registra y expresa automáticamente a través de un datalogger NOVUS FieldLogger de 24 bits. Esta lectura es finalmente corregida con una curva de calibración realizada sobre la termocupla previamente con el Bloque Calibrador Dual de Cole-Parmer S/N: A56898.

Los datos de peso, humedad y temperatura se registraron cada 1 minuto durante toda la experiencia con un script realizado en Scilab mediante uso de la librería Serial, el cual lee la información que le llega a través de los puertos USB – Serial.

La medida de velocidad de flujo de aire fue realizada de manera manual con anemómetro de hilo caliente TSI VelociCalc S/N: 99070123. Las medidas se realizaron al final del ducto para conseguir un mayor desarrollo del flujo, con una grilla en forma de cruz tomando cinco valores en los extremos y centro del área transversal del mismo.

Estimación del área de los bifés

El área de los bifés se calcula de manera indirecta utilizando imágenes digitalizadas. El procedimiento consiste en comparar la imagen del producto que se quiere medir con la imagen de una superficie de área conocida, en nuestro caso una hoja A4. Conociendo la cantidad de píxeles que abarca una hoja A4 en una imagen digitalizada también puede conocerse el área de otra superficie contenida en la misma imagen por simple regla de tres. Con las herramientas de selección que provee el Software GIMP se cuenta la cantidad de píxeles de la hoja, luego se cuenta la cantidad de píxeles del producto a medir, la relación (división) entre la cantidad de píxeles contenidos en la hoja respecto de la cantidad de píxeles del producto es equivalente a la relación entre las respectivas áreas. En estos ensayos fueron despreciadas las deformaciones geométricas en las imágenes tomadas. Siendo posible aplicar transformaciones ulteriores a las imágenes para conseguir mayor precisión en las medidas.

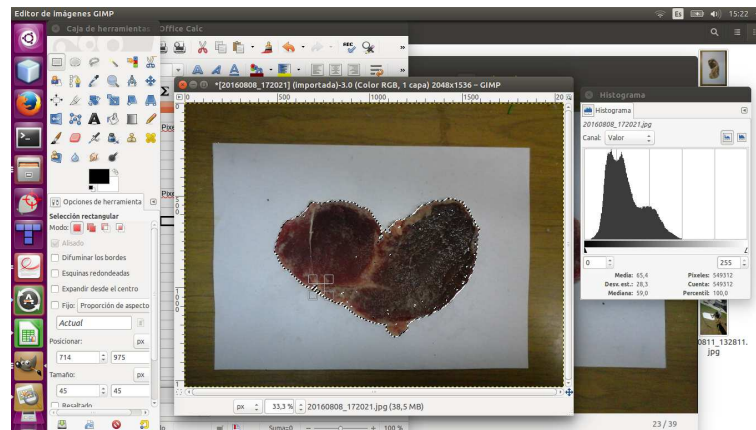


Figura 1 Cálculo del área de producto fresco correspondiente al segundo ensayo.

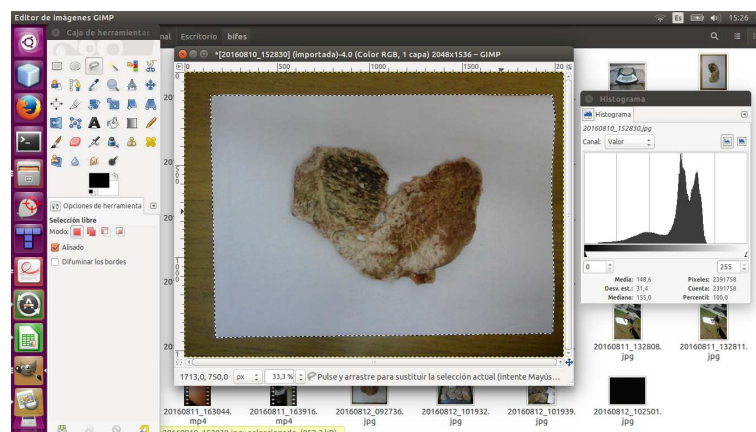


Figura 2 Cálculo del área de producto seco correspondiente al segundo ensayo.

RESULTADOS

Se efectuaron tres ensayos, en los que se registraron las variables: Temperatura a la entrada de la cámara, Temperatura del aire de la cámara de secado y Temperatura de producto. Para los tres casos se efectuó el registro correspondiente a los valores mínimos, medios y máximos. Por su parte, se registró también la humedad relativa (%) tanto del aire al ingreso de la cámara como del aire de la cámara de secado (Tabla 1). Cada ensayo concluyó cuando el peso de la muestra de carne se mantuvo constante, lo que generó tiempos de secado diferentes.

Resumen	3-Ago			7-Ago			9-Ago		
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima
Tent (°C)	80,99	86,90	58,90	53,47	54,20	50,30	83,44	96,10	58,90
Tcam (°C)	34,46	39,10	5,10	38,85	40,80	34,70	51,18	56,30	27,30
Tprod (°C)	28,26	32,24	18,68	36,13	39,72	26,29	45,26	53,03	19,30
HR ent (%)	1,01	3,50	1,00	5,51	6,80	5,00	1,00	3,50	1,00
HR cam (%)	24,39	25,90	23,90	16,66	24,90	15,70	8,40	33,40	6,30
Peso inicial	0,11 kg			0,12 kg			0,10 kg		
Área inicial (cm ²)	161,19			168,31			136,31		
Peso final	0,05 kg			0,05 kg			0,04 kg		
Área final (cm ²)	108,95			151,9			116,35		
Tiempo de secado	23,97 hs			42,28 hs			33,38 hs		
Peso seco (10 h de mufla a 100 °C)	0,0393 kg			0,042 kg			0,036 kg		
Flujo de aire (kg/s)				0.00675					

Tabla 1 Resumen de los ensayos de secado

Los resultados de las medidas de peso y de contenido de humedad en base seca, Xbs, se describen en las Figuras 3 y 4.

El primer ensayo, correspondiente al día 3-8, se realizó con una media de temperatura en cámara de secado de 34.46 °C, y 28 °C promedio de temperatura de producto, en un tiempo cercano a las 24 horas de secado, con flujo de aire constante de 0.00675 kg/s y 81 °C medidos en el ducto del ventilador. Se observa en base a la gráfica que la muestra disminuyó su peso final a un 48% del valor inicial, por lo que se puede considerar evaporado el contenido de agua libre de la muestra, considerado cercano al 50% del peso inicial de la misma (ASHRAE, 1989, Cap. 30). La curva que representa la variación del contenido de humedad en función del tiempo, Figura 4, muestra un comportamiento similar a la de peso, indicando también que no se ha llegado a un punto óptimo de secado durante el primer ensayo. El producto final obtenido, aunque seco, presenta una cierta maleabilidad, y turgencia, señales que indican un secado incompleto.

El segundo ensayo se ha realizado durante el 7-8, con temperaturas medias de 39 °C para la cámara de secado, 36 °C para el producto, 54°C en ducto de ventilador y mismo flujo que en ensayo anterior. El tiempo de secado fue de casi 42 horas, llegando la muestra a un peso equivalente al 42% del peso inicial. En este segundo ensayo se observa que la muestra se encuentra cerca de llegar a valores estacionarios, cercanos a la asíntota de 0.05 kg de peso de la Figura 3, o de 0.2 kg/kg para la curva de Xbs, Figura 4. Los resultados de los dos primeros ensayos muestran que es necesario incrementar la temperatura de producto con objeto de disminuir el peso final de la muestra a los valores de referencia para charqui. La apariencia del producto obtenido es correcta, notándose más rígido al tacto que en el primer ensayo. Los valores de peso final y peso seco, Tabla 1, ratifican que el secado no ha sido completo.

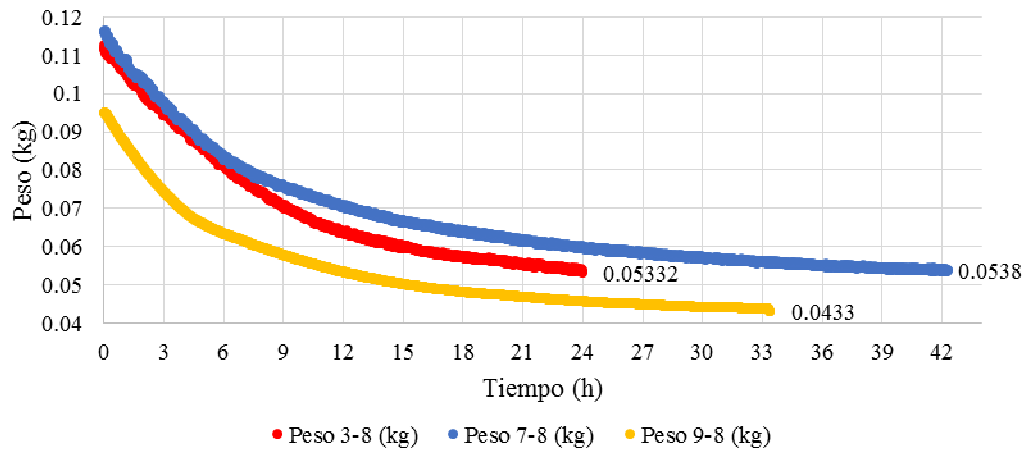


Figura 3 Evolución del peso de las muestras.

Para el tercer ensayo se decidió incrementar la temperatura de flujo, a un valor medio de 83°C en ducto, 52 °C en cámara y 45 °C de temperatura de producto, manteniendo constante el flujo de aire en 0.00675 kg/s. El ensayo se realizó durante un tiempo de 33 horas, partiendo de un peso de 0.1 kg, el cual se redujo hasta el 40 % del peso inicial. El incremento en la temperatura del aire permitió llegar a un contenido de humedad equiparable al del segundo ensayo, Figura 4, pero disminuyendo en nueve horas el tiempo de secado. El análisis de valores de peso final y peso seco de la Tabla 1 muestra un secado más satisfactorio que el realizado en los anteriores ensayos, lo que se traduce en una muestra rígida al tacto, y de aspecto, olor y color adecuados al secado de charqui.

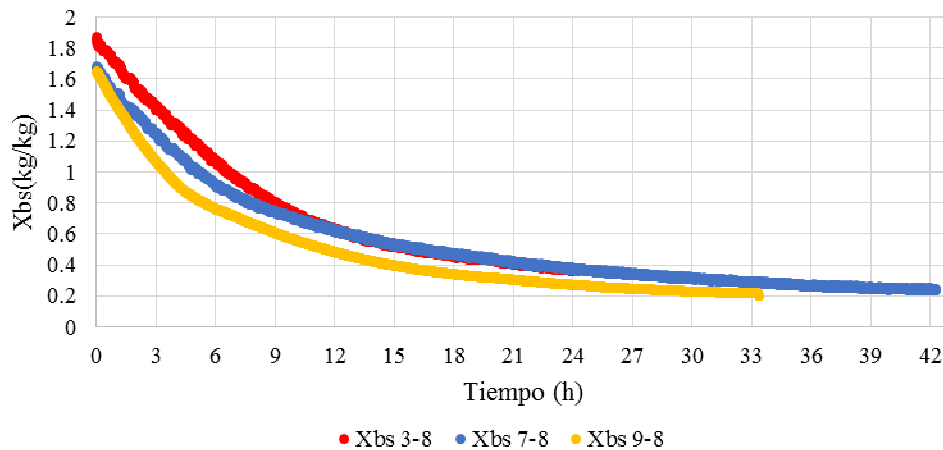


Figura 4 Contenido de Humedad en base seca, Xbs.

La figura 5 muestra los resultados de cálculo de la velocidad de secado, R, para los días ensayados. El análisis de la primera experiencia realizado en párrafos anteriores se ve reforzado al observar que la curva de velocidad de secado no llega a mostrar la asíntota asociada a la entrada al régimen estacionario. Las curvas de las experiencias 2 y 3, de comportamiento similar, muestran la existencia de mínimos en la velocidad de secado, asociados a la entrada al régimen estacionario esperado. Sin embargo, la forma de estas curvas lleva a pensar en que existe una etapa de rehidratación de las muestras, lo que puede ser ocasionado por filtraciones de aire ambiente en la cámara de secado.

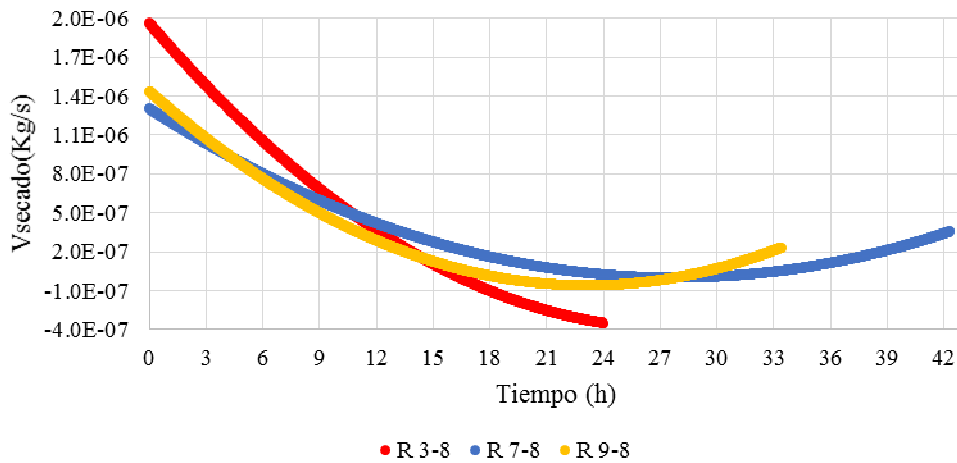


Figura 5 Velocidad de secado, $-MsdX/dt$

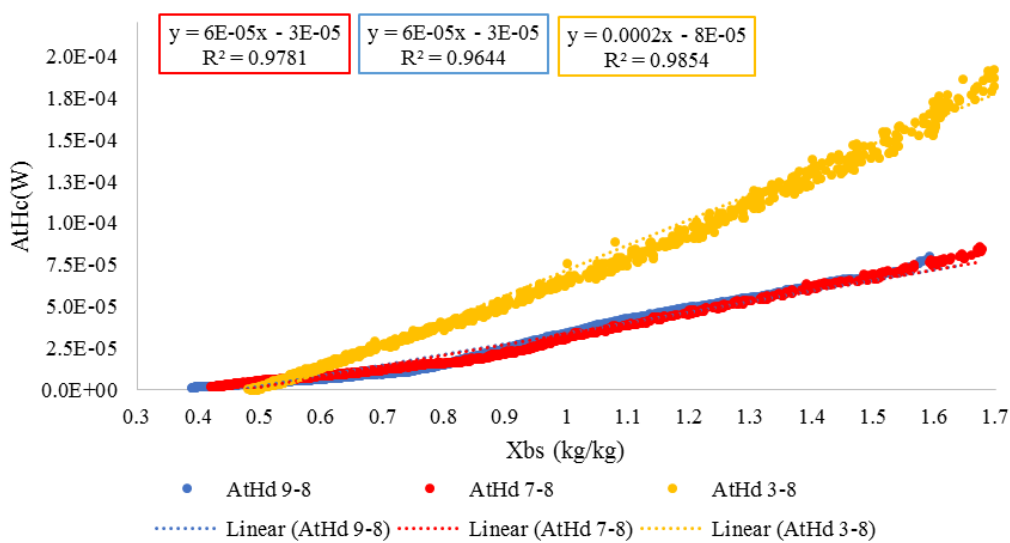


Figura 6 Coeficientes de difusión, $AtHd$

Los resultados del cálculo del producto $Athd(X)$ se realizan mediante la ecuación (6) y se presentan en la figura 6. Se puede observar similares comportamientos para los ensayos 2 y 3, y una tendencia diferente en el primer ensayo. Los resultados obtenidos se muestran acordes a los referenciados en Saravia, et al, 2007, en el sentido de que la variación de los parámetros es producida por cambios en el contenido de agua del producto a lo largo del secado. Ello corre la superficie de evaporación hacia el interior del producto dificultando el proceso de secado. De igual manera, si bien no se dispone del valor de hd , se puede obtener una idea aproximada dividiendo por el valor inicial del área At . Como se aprecia, los valores de $Athd$ disminuyen bastante a medida que se seca el producto.

El producto $Athc(X)$ se presenta en graficas individuales para cada día de ensayo, figuras 7, 8 y 9. El valor de $Athc(X)$ se encuentra mediante la expresión (7), donde se utilizan las derivadas de Tp y X respecto al tiempo. De la misma manera que con $Athd(X)$, se puede tener una idea del valor de hc dividiendo por el valor inicial del área de producto. Se constata que los valores de hc varían en forma importante, entre 5 y 35 W/m^2 . Cabe recalcar que a medida que se seca el producto, la diferencia entre la temperatura de la cámara y del producto es cada vez más pequeña, por lo que su medida puede tener un error considerable. Esto afecta directamente el cálculo de $Athc(X)$ donde esa diferencia aparece en el denominador de la ecuación (7). Por eso, se ha optado por realizar un filtrado de los valores asintóticos, los cuales no se representan en la gráfica.

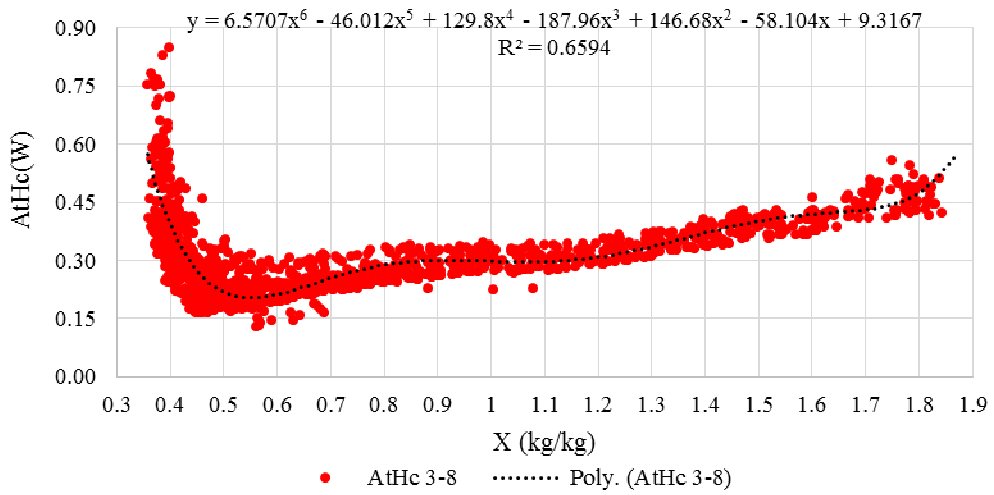


Figura 7 Coeficiente convectivo AtHc para el primer ensayo.

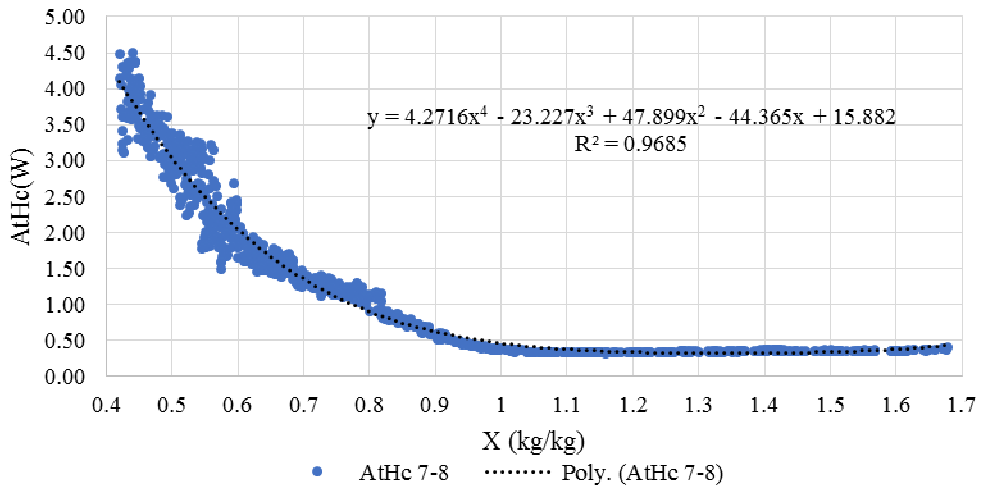


Figura 8 Coeficiente convectivo AtHc para el segundo ensayo

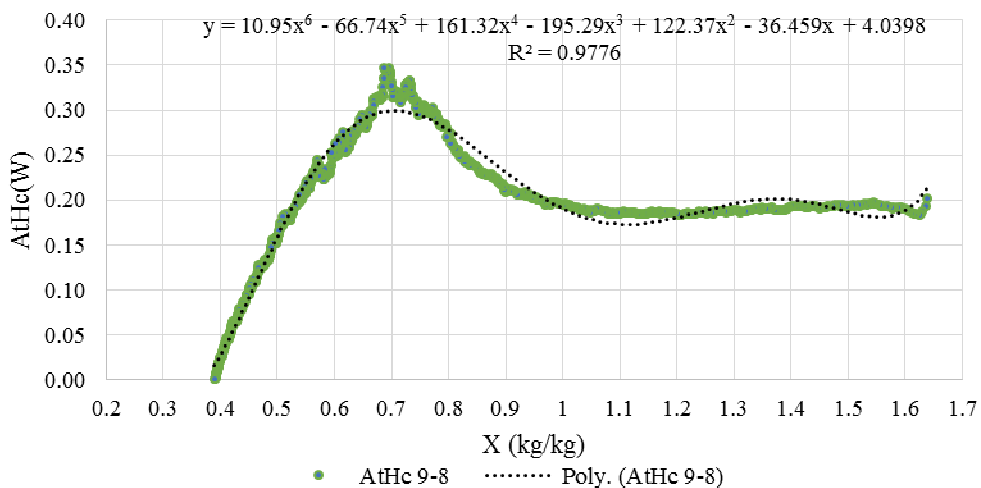


Figura 9 Coeficiente convectivo AtHc para el tercer día de ensayo.

CONCLUSIONES

El método experimental aplicado posibilitó la obtención de los coeficientes difusivos AtH_d y coeficientes convectivos AtH_c , parámetros de ajuste para simular el proceso de secado. En la determinación de estos se observa una fuerte dependencia con la temperatura, la humedad relativa y los flujos de aire en la cámara secado. Por este motivo, una determinación en laboratorio replicando las condiciones reales resulta fundamental para una posterior simulación representativa del proceso. Como trabajo futuro queda aún la inclusión de los parámetros aquí presentados para modelar adecuadamente el secado de carne en un secador solar pasivo. De esta manera se complementaría con el trabajo realizado por Durán y Condorí, 2010.

La relevancia de contar con la simulación del proceso de secado sirve no sólo para el dimensionamiento, diseño y posterior construcción de secadores, sino también para optimizar parámetros tales como flujo de aire y temperaturas. Dicha optimización culmina con el ajuste del presupuesto para la adquisición de estos dispositivos y posterior mejora en las condiciones de venta al obtener productos de buena calidad.

REFERENCIAS

- Cruz, I., Altobelli, F., Condorí, M. Á., & Durán, G. (2014). Análisis de escenarios para evaluar la implementación de medidas de ahorro energético en el sector tabacalero de la provincia de Salta. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 18, 53–62.
- Duran, G., & Condorí, M. (2006). Ensayo y modelización de un secador solar pasivo de uso doméstico mediante simulación. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 10(2), 165–172.
- Duran, G., & Condorí, M. (2007). Ensayo de un secador solar pasivo con chimenea concentrador y extractor eólico destinado a la producción diaria de charqui. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 11, 59–66.
- Duran, G., Condorí, M., & Altobelli, F. (2015). Simulation of a passive solar dryer to charqui production using temperature and pressure networks. *Solar Energy*, 119, 310–318. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.002>
- Duran, G., Molina, V., Condorí, M., & Buchler, P. (2008). Ensayo comparativo de un secador pasivo con chimenea y extractor eólico y secador activo con panel fotovoltaico. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 12, 87–94.
- Durán, G., & Condorí, M. (2009). Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 08.121-08.129.
- Saravia, L. (2010). Anexo 4. La simulación de secadores solares. En R. Espinoza, & L. Saravia (Edits.), *Secado de productos agroalimentarios en Iberoamérica* (págs. 343-357). Salta: CYTED Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Saravia, L., Alía de Saravia, D., & Sánchez, B. (2007). El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 02.01-02.07.

ABSTRACT

The agricultural products simulation requires information about the product behaviour, the diffusive and convective coefficients among others parameters. These coefficients can only be obtained experimentally. At a lab scale it was performed the drying of meat to obtain Charqui, with control and registration of the main variables of the process: temperature, humidity, product weight. It was also performed the estimation of the fresh product area and the dried one through image analysis. The results allowed obtaining the AtH_d (diffusive coefficient) and AtH_c (convective coefficient) for meat drying. The importance to obtain these parameters is that both can be used in simulation models of the studied process. It remains to perform the mentioned simulations and to evaluate the adjustment for passive solar dryers.

Keywords: drying, Charqui, simulation.