

ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE SECADO DE PASTAS OBTENIDAS CON MEZCLAS DE HARINAS A PARTIR DE UN MODELO DE EVAPORACIÓN

D. Villa¹, V. Passamai², A. Bonomo³ y J. Bravo.

Consejo de Investigaciones de la UNSa – CIUNSa C.P. 4400 – Salta

1, 3. Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI)

2. Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO)

2, 3. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. 0387-4255346 E-mail: davilla7@hotmail.com

Recibido: 08/08/12; Aceptado: 04/10/12

RESUMEN: En el presente trabajo se modifica un modelo de secado presentado previamente por Passamai y Saravia (Passamai y Saravia, 1997) y más tarde aplicado al secado solar de Pimientos (Passamai y Saravia, 1998). Las modificaciones introducidas al modelo permiten utilizarlo para la simulación del secado de pastas alimenticias nutricionalmente mejoradas, que se elaboran con harina de trigo, soja y quinoa. El modelo permite representar el secado de pastas con elevada exactitud y esto se evidencia en la comparación de resultados del modelo con datos experimentales. Las variables involucradas son la humedad libre de la muestra, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de secado. Las principales variables que se estudian son el tiempo de secado y la velocidad del mismo. El tiempo modelado solo difiere en 22 minutos de los datos experimentales para un proceso de 7 horas. Las velocidades de secado modeladas se ajustan a los datos experimentales con bajos errores relativos.

Palabras clave: Secado, modelo, pastas, temperatura, humedad.

INTRODUCCIÓN

La pasta tiene su origen en Italia, en el año 1700. Se trata de un producto sumamente digestible debido a que sus carbohidratos sufren un proceso de fisión que favorece su digestión y asimilación en nuestro organismo (Sannino et al., 2004). Las particularidades del proceso de producción de las pastas han promovido su consumo y su remarcable desarrollo (Andrieu y Stamatopoulos, 1985). Debido a la creciente demanda del mercado, la producción de pasta se incrementó sin perder de vista su calidad. Los daños producidos por efectos térmicos y mecánicos, que se presentan como pérdida de color, textura y formación de grietas, deben ser minimizados (Migliori, et al., 2005). Por lo tanto, un conocimiento profundo de las propiedades de la pasta y de su proceso de fabricación, es de suma importancia.

Desde un punto de vista nutricional, la pasta de trigo es reconocida como una fuente de carbohidratos complejos, con poca grasa y de baja calidad proteica debido a que el trigo, su principal constituyente, es pobre en lisina (Antognelli C, 1980). En países en vías de desarrollo como Argentina, donde los problemas nutricionales afectan a una proporción considerable de sus habitantes, el mejoramiento nutricional de alimentos altamente consumidos por la población como la pasta, puede representar una alternativa que tienda a mejorar la calidad nutricional y funcional de la dieta. Las mezclas de harinas para la producción de pastas, contribuye a elevar su valor nutricional al producirse una complementación aminoacídica e incrementarse el contenido de minerales y fibra dietética (Granito y Ascanio, 2009).

El presente trabajo estudia el proceso de secado de pastas de trigo, soja y quinoa debido a que la calidad del producto final es determinada por dicho proceso. Muchos ejemplos confirman que el proceso de secado tiene una fuerte influencia en las características organolépticas y mecánicas de la pasta. La temperatura de secado de las pastas afecta la calidad de cocción de las mismas (Güler, Köksel y Ng, 2002). El comportamiento mecánico de las pastas varía con el contenido de humedad y la temperatura de secado y es comúnmente expresado con un Módulo de Young efectivo. Esta resistencia mecánica es influenciada por el secado y el nivel de estrés obtenido debe ser mucho menor que su valor límite (Ponsart et al., 2003.)

El secado es también la operación unitaria más importante durante la producción de pastas debido a los costos operativos y al costo de los equipos de secado. El secado se realiza utilizando aire húmedo calentado a temperaturas que varían entre 40°C y 100°C y humedades relativas que varían entre 40% y 95%. Con el objeto de reducir el riesgo microbiológico, el máximo contenido de humedad permitido es del 14,3% (base seca) (Callejo González M. J., 2002).

Actualmente, el secado es diseñado sobre una base empírica a través del método de prueba y error, basándose en la experiencia de los productores antes que en conocimientos ingenieriles (Migliori, et al., 2005). Para desarrollar un sistema de control de la producción, es indispensable desarrollar un modelo global capaz de simular el proceso de secado. Cabe aclarar que, dicho proceso de secado se basa, además de la acción del aire caliente, fundamentalmente en su baja humedad, lo que crea el potencial impulsor de la humedad desde el producto hacia dicho aire, resultando en una disminución de la humedad de la muestra (Villeneuve y Gélinas, 2007). Los datos experimentales son obtenidos en un equipo de laboratorio cuyo desarrollo y características fueron oportunamente presentados en un trabajo anterior (Villa, et al., 2011).

Las propiedades del aire (temperatura y humedad relativa) deben ser fijadas y relacionadas con las propiedades de las pastas que se quieren obtener, a fin de tener un conocimiento acabado del proceso de secado. El objetivo de este trabajo es, por lo tanto, utilizar un modelo desarrollado por Passamai y Saravia (Passamai y Saravia, 1997) aplicado al secado de pimientos bajo la premisa de que el secado se trata fundamentalmente de un proceso de evaporación de agua, con una resistencia interna acorde con el producto que se seca. No se considerará aquí el término referido al efecto de la radiación solar, por lo que la ecuación del “estado de secado” estará dada por una expresión de la forma:

$$n = f(X, T, H, v)$$

En esta expresión, una de las cuatro variables independientes es interna e inherente al sistema, X , y las otras tres son externas, correspondientes al medio ambiente que rodea al producto. La derivada de la variable X respecto al tiempo está vinculada con n a través de su definición, dada por:

$$n = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (0)$$

La acción de las variables externas, T , H y v se pone de evidencia escribiendo explícitamente la expresión de la cinética, tal como fue presentada por Passamai y Saravia (Passamai y Saravia, 1997):

$$n = c_p(X)P_s(T)(1 - H)v^{0,5} + c_i(X)v^{0,2}I \quad (1)$$

A lo largo del presente trabajo se analiza y explicita gráficamente la dependencia de n con las variables que la definen dentro de los rangos de aplicación de cada una y se compara con los datos experimentales para las mismas condiciones de operación.

MATERIALES Y METODOS

Si bien el equipo de laboratorio (Villa, et al, 2011) posee la capacidad de operar como un sistema híbrido (solar-tradicional), por tratarse el presente estudio de un secado tradicional de pastas alimenticias, no se considerará la radiación I , por lo tanto, el segundo término de la ecuación (1) no se tendrá en cuenta, siendo el modelo a considerar el siguiente:

$$n = c_p(X)P_s(T)(1 - H)v^{0,5} \quad (2)$$

Preparación de las muestras

Las muestras de pasta para las mediciones de secado fueron pre-acondicionadas en tres etapas, a saber: (1) Mezcla de harina de: trigo blando, soja completa desgrasada y quinoa con huevo, sal y agua destilada. (2) Armado de los tallarines. (3) Conservación en refrigerador a 4°C y 80% de humedad. El primer paso en la producción de las muestras de pastas fue la mezcla de los ingredientes en un mezclador de paletas. El agua destilada se añadió gradualmente a la mezcla resultando una masa de 50% de contenido de humedad en base seca. Después de 15 minutos de mezcla, la masa se laminó en una pequeña sobadora de laboratorio y los tallarines cortados se envasaron en bolsas impermeables y se colocaron en refrigerador para estabilizarlos durante 24 horas a 4°C y 80% de humedad relativa.

Las muestras de sección rectangular fueron obtenidas luego de una laminación en rodillos de acero inoxidable, calibrados para obtener pastas de un espesor de 2 mm. Los rodillos de corte seleccionados definieron un ancho de 6 mm y finalmente las muestras fueron cortadas a una longitud de 90 mm. Por cada experiencia de secado se colocaron 7 muestras, cada una, con las medidas anteriores.

Obtención de las curvas experimentales de secado

Las muestras de pastas de 90mm de largo x 6mm de ancho x 2mm de espesor fueron colocadas en el soporte del secadero experimental (Villa, Bonomo, Passamai, 2011) para cada experiencia de secado. Se toman las lecturas con los sensores de humedad (Termohigrómetro Tes – modelo: 1364) y temperatura (Data logger HOB0 de temperatura, serie U12). Los niveles deseados de cada variable se establecen por ajuste manual, fijando las condiciones de secado. Como respaldo del sensor electrónico de humedad, se utiliza un termómetro de mercurio para medir la temperatura de bulbo húmedo. Una vez fijadas las variables de secado, se procede a tarar el soporte en una balanza digital de precisión (Ohaus Traveler - modelo TA302) y colocar las muestras de producto para luego posicionar el soporte dentro de la cámara de secado, que está vinculada a la balanza mediante un cable metálico. A continuación se da inicio al registro de temperatura y peso de la muestra, a través del datalogger y la balanza, conectados a una PC. La variación de la humedad se controla a través de la lectura directa en el visor del termohigrómetro pero no se registra automáticamente este valor.

ANÁLISIS DEL MODELO DE SECADO PROPUESTO

Observando la expresión de la cinética, sin considerar el término de radiación, se percibe que la densidad superficial de pérdida de agua es función de las variables X , T , H y v , esto es:

$$n = n_p(X, T, H, v) \quad (3)$$

lo que representa el efecto térmico del aire, la presión de vapor del agua, la humedad del aire y la acción de la velocidad del mismo. Se observa por la ecuación (2) la imposibilidad de secado con aire quieto. La expresión (3) representa, por lo tanto, la cinética de secado en ausencia de radiación incidente sobre el producto.

Para comenzar con el análisis de n en término de sus variables independientes, se debe tener en cuenta que para graficar se deberán evaluar alguna de las siguientes cuatro funciones

- $n_1(T)$ donde X , H y v se mantienen fijos
- $n_2(X)$ donde T , H y v se mantienen fijos
- $n_3(H)$ donde T , X y v se mantienen fijos
- $n_4(v)$ donde T , X y H se mantienen fijos

En la Tabla 1 se presentan las combinaciones de variables utilizadas y los valores medios de las variables que se mantienen constantes en cada caso:

	n1(T)	n2(X)	n3(H)	n4(v)
T	Variable	40	40	40
X	0,3	Variable	0,3	0,3
H	0,2	0,2	Variable	0,2
v	1	1	1	Variable

Tabla 1: variables involucradas en el proceso de secado

En la Tabla 1 se han tomado los siguientes criterios para los valores que se mantienen fijos: $X = 0,3$ kg/kg en (base seca y humedad libre) por ser un valor de contenido medio de agua, en base seca, esperable para el producto en estudio; $T = 40^\circ C$, temperatura típica para procesos de secado de fideos; $H = 20\%$ humedad adecuada para el proceso y $v = 1m/s$, valor óptimo para la velocidad del aire. Se dan los rangos en los ejes coordenados.

En todos los casos se trabajó con la humedad libre, X , es decir la humedad que efectivamente se puede evaporar de una muestra de producto. El tamaño de cada muestra fue de 25 gramos totales y la superficie expuesta al secado fue de 60 cm^2 . De acuerdo a la preparación estandarizada de la muestra y a los resultados obtenidos, la humedad libre inicial con la que se trabajó en todos los casos fue de 7,59 gramos de agua/gramos de muestra.

La curva experimental de secado, obtenida para pastas de trigo, soja y quinoa, se presenta a continuación:

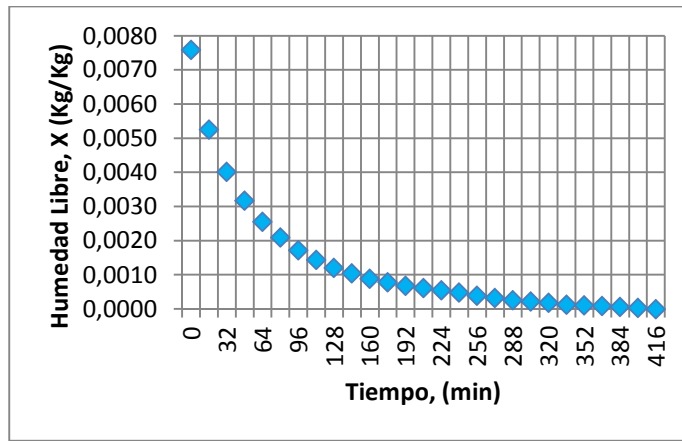


Figura 1: Curva experimental de variación de la humedad libre vs el tiempo

Para obtener la curva equivalente a partir del modelo desarrollado por Passamai y Saravia (1997), se debe despejar el intervalo de tiempo, a partir de la igualación de las ecuaciones (0) y (2):

$$\Delta t = - \frac{m_s}{A} \frac{\Delta X}{[c_p(X)P_s(T)(1-H)v^{0,5}]} \quad (4)$$

Siendo $m_s = 0,015 \text{ kg}$ y $A = 0,006 \text{ m}^2$. La figura 2 muestra la curva obtenida.

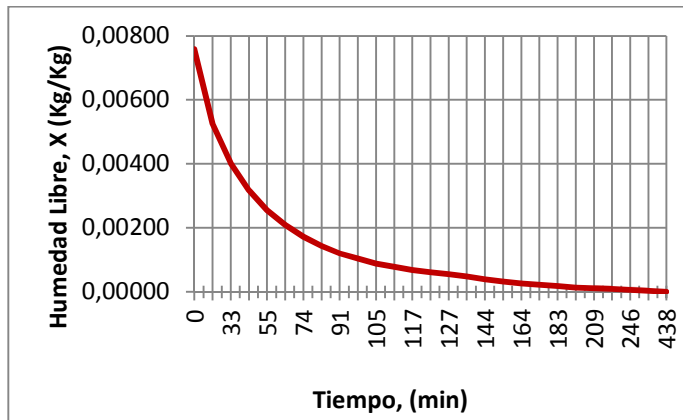


Figura 2: Curva modelada de variación de humedad libre vs el tiempo.

Como puede observarse, las Figuras 1 y 2 en los dos casos la humedad libre fue la misma y los tiempos de secado obtenidos son similares: 416 minutos en laboratorio y 438 minutos según el modelo.

A continuación se presentan datos de velocidad de secado manteniendo constantes tres de las variables involucradas (según el criterio de la Tabla 1) y haciendo variar solo una. En todos los casos se comparan los datos de velocidad de secado modelados con los obtenidos mediante experimentación llevada a cabo en el equipo desarrollado por Villa, Bonomo y Passamai (Villa et al, 2011).

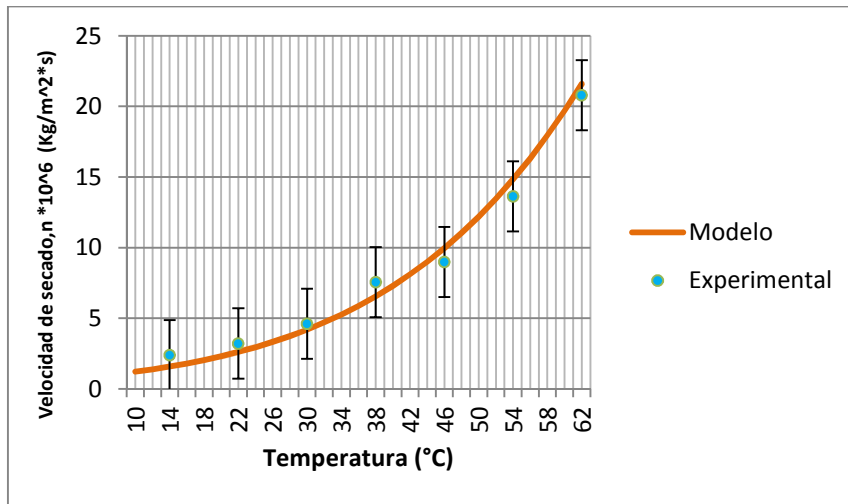


Figura 3: Variación de n con T . (X , H y v fijos)

En la Figura 3 se observa la variación de la velocidad de secado con la temperatura en grados centígrados donde se puede observar que el modelo propuesto por Passamai y Saravia (Passamai y Saravia, 1997) es representativo de los datos experimentales. Los valores de n se elevan a la sexta potencia a fin de obtener una gráfica más clara. En el modelo a medida que la temperatura asciende, la velocidad de secado también asciende de $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ hasta $21,5 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. En este caso el error relativo promedio entre los puntos experimentales y los modelados fue del 9.5%.

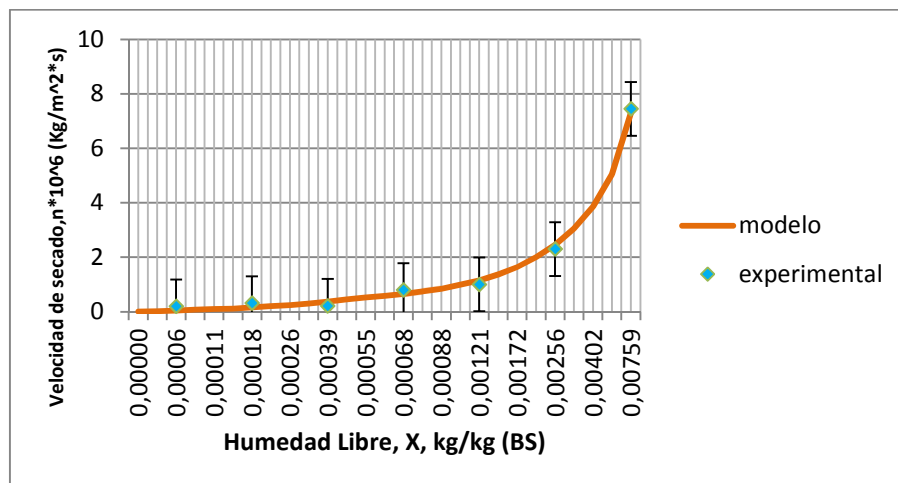


Figura 4: Variación de n con X . (T , H , y v fijos)

La Figura 4 representa la variación de la velocidad de secado con la Humedad Libre en base seca. Las demás variables involucradas se mantienen constantes según el criterio de la Tabla 1, es decir $T=40^\circ\text{C}$, $H=20\%$ y $v=1\text{m/s}$. El error relativo promedio entre puntos experimentales y modelados es del 11,5%. Como puede observarse la curva modelada finaliza en 0 tanto en abscisas como en ordenadas ya que al evaporarse la totalidad de la humedad libre, la velocidad de secado se vuelve cero indicando el fin del proceso de secado.

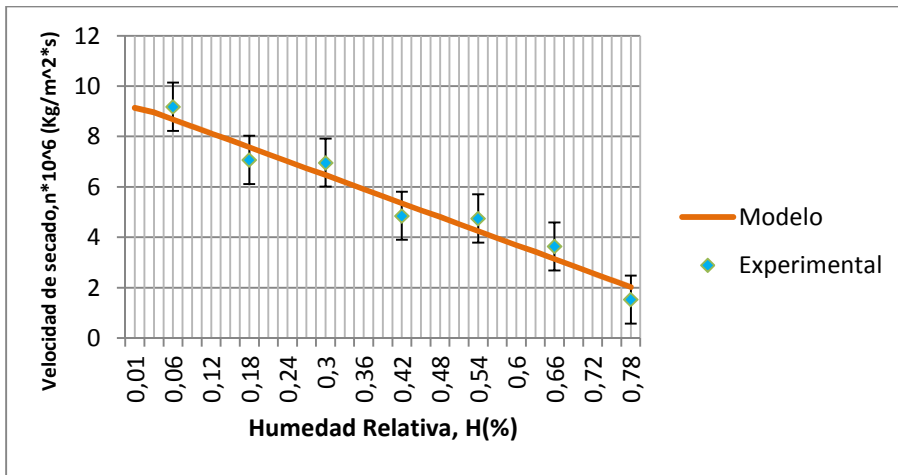


Figura 5: Variación de n con H. (T, X y v fijos)

En la Figura 5 se observa la variación de la velocidad de secado con la humedad relativa indicando que a menores humedades relativas del ambiente mayor será la velocidad de secado. A medida que utilizamos un aire más húmedo la velocidad de secado desciende de $9,14 \cdot 10^{-6} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ hasta $2,03 \cdot 10^{-6} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. En este caso se observa un comportamiento lineal y una buena correlación del modelo con los datos experimentales. El error relativo promedio entre puntos modelados y experimentales es del 7,4%.

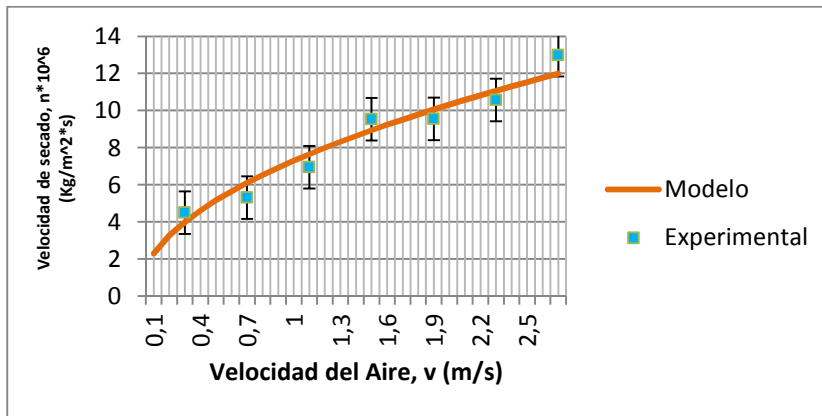


Figura 6: Variación de n con v. (T=X=H=cte.)

La Figura 6 expone la variación de la velocidad de secado con la velocidad del aire indicando que a mayores velocidades del aire de secado también se obtienen mayores velocidades de secado. La curva presenta un comportamiento no lineal con una variación de la velocidad de secado desde $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ hasta $1,19 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. En este caso el error relativo promedio entre los puntos del modelo y los puntos obtenidos experimentalmente, es del 6,6%, indicando una buena correlación del modelo.

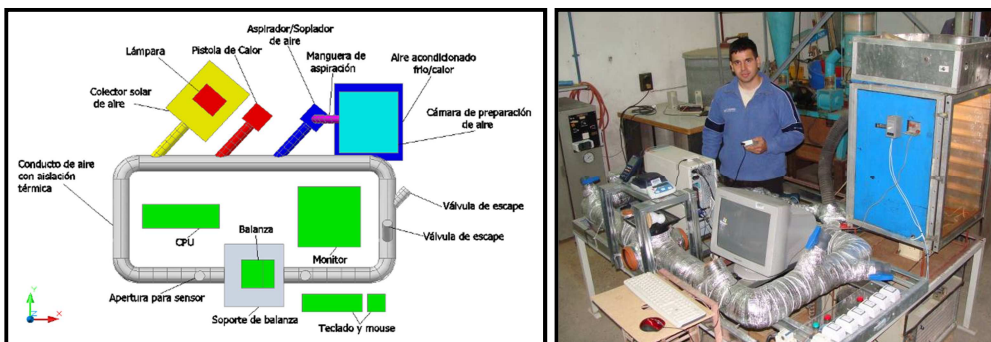


Figura 7: Esquema y fotografía del equipo experimental utilizado

Dado que el trabajo ha tenido un fuerte tratamiento de datos experimentales, y a instancia de un evaluador, se presente en la Figura 7 el equipo experimental tanto en forma esquemática como una fotografía del mismo. Los autores agradecen la sugerencia recibida.

CONCLUSIONES

La modificación del modelo de secado originalmente desarrollado para el secado solar de pimiento permitió simular el secado de pastas alimenticias obtenidas con mezcla de harina de Trigo, Soja y Quinoa. Se obtuvo una excelente aproximación del modelo con los resultados reales para dicho secado de pastas. Las modificaciones introducidas con respecto al modelo se relacionaron con el uso de la humedad libre en base seca para todos los cálculos y la adecuación del término de conductancia global por tratarse de un producto muy diferente al pimiento. Los errores relativos promedio entre los datos modelados y experimentales son bajos comparados con otros modelos estudiados, pues no superan el 11%, lo que permitió validar aceptablemente el modelo para secado de pastas alimenticias. Esto también se constató como lo muestran las figuras 1 a 6, para el caso particular de este trabajo.

Como trabajo futuro, se propone la investigación de la influencia de la radiación solar en el secado de pastas alimenticias.

NOMENCLATURA

A área, m²

$c_p(X) = 1,65 \cdot 10^{-5}(x - 1 \cdot 10^{-5})$ conductancia global que modifica el término de presión en la ecuación de secado.

$c_i(X)$ coeficiente variable (conductancia) que modifica en término de radiación en la ecuación de secado (1).

H humedad relativa del aire, % tanto por uno.

n densidad superficial de pérdida de agua, Kg/(m² s).

n_i característica de la función n para su parametrización en función de T , X , H o v , para $i=1, 2, 3$ o 4 respectivamente.

m_s peso seco, Kg.

P_s presión parcial del vapor de aire húmedo, Pa.

t tiempo, s.

T temperatura de bulbo seco del aire, °C.

v velocidad del aire, m/s.

X contenido de agua libre en base seca, kg agua libre/Kg sólido seco.

Δt intervalo de tiempo, min.

ΔX variación de humedad libre, kg agua libre/Kg sólido seco.

REFERENCIAS

- Andrieu, J., Stamatopoulos, A., y Zafiropoulos, M. (1985). Equation for fitting desorption isotherm of durum wheat pasta drying. *Journal of Food Technology*, 20, 651-657.
- Antognelli, C. The manufacture and applications of pasta as a food and as a food ingredient: A review. *J Food Technol.* 1980; 15: 121-145.
- Callejo Gonzales, M. J. (2002). Industria de cereales y derivados, 1° edición, pp 299-311. Mundi-Prensa.
- Granito, M. y Ascanio, V. (2009). Desarrollo y transferencia tecnológica de pastas funcionales extendidas con leguminosas. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Volumen 59, Número 1.
- Güler, S., Köksel, H., y Ng, P. K. W. (2002). Effects of industrial pasta drying temperatures on starch properties and pasta quality. *Food Research International*, 35(5), 421-427.
- Migliori, et al., (2005). Modeling of high quality pasta drying: quality indices and industrial application. *Journal of Food Engineering* 71 (2005) 242-251.
- Passamai, V. J. y Saravia, L.: "Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation (parte I y II), *Drying Technology. An International Journal*, Vol. 15, N. 5, pp. 1419-1455 (I) y 1433-1455 (II). 1997.
- Passamai, V. J. y Saravia, L. Análisis de la influencia de temperatura, humedad, velocidad del aire o radiación en el secado de pimiento, 7° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, Vol. IV, 1998.
- Passamai, V., Valdez, S., Passamai, T., y Pareja, S. (2005). Experiencias comparativas de secado de tomate bajo distintas condiciones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 02.19-02.24.
- Ponsart, G., Vasseur, J., Frias, J. M., Duquenoy, A., y Méot, J. M. (2003). Modeling of stress due to shrinkage during drying of spaghetti. *Journal of Food Engineering*, 57, 277-285.

- Saravia, L., Alanís, E., Frigerio, E. y Fabris, A. (1978). Secado solar de tabaco: resultados experimentales. *ASADES*, 4, 83-98.
- Saravia, L., Alía, D. y 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.
- Sannino, A., Capone, S., Siciliano, P., Ficarella, A., Vasanelli, L., y Maffezzoli, A. (2004). Monitoring the drying process of lasagna pasta through a novel sensing device-based method. *Journal of Food Engineering*, 69(1), 51-59.
- Villa, D., Bonomo, A., Passamai, V. J. (2011). Diseño y dimensionamiento de un prototipo para el estudio del proceso de secado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 02.01-0.2.08.
- Villeneuve, S. y Gélinas, P. (2007). Drying kinetics of whole durum wheat pasta according to temperature and relative humidity. *LWT* 40 (2007) 465-471.

ABSTRACT

In this paper is modified a drying model presented previously by Passamai and Saravia (Passamai and Saravia, 1997) and later applied to the solar drying of peppers (Passamai and Saravia, 2001). The changes introduced allow the model to use for simulating the drying of nutritionally enhanced pasta as it is made with wheat flour, soy and quinoa. The model allows representing pasta drying with high accuracy and this is evident in the comparison of model results with experimental data. The variables involved include the free humidity, temperature, relative humidity and air velocity. The main variables to be studied are the drying time and the drying rate. Modeling time differs only 22 minutes from experimental data to a process of 7 hours. Drying rates modeled fit with low relative errors.

Keywords: Drying, model, pastas, temperature, humidity.