

## MODELADO Y SIMULACION DEL SECADO DE MAIZ COLORADO DURO EN LECHO FIJO CON AIRE NATURAL BASADO EN DATOS CLIMATICOS DE RIO CUARTO

Martinello.Miriam<sup>a</sup> A. Giner, Sergio A<sup>b,c,d</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Tecnología Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nac. 36 - Km. 601 - Código Postal X5804BYA Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Correo electrónico: [mmartinello@ing.unrc.edu.ar](mailto:mmartinello@ing.unrc.edu.ar)

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 47 y 116, (1900), La Plata, Argentina, e-mail: [saginer@ing.unlp.edu.ar](mailto:saginer@ing.unlp.edu.ar)

<sup>c</sup>Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

<sup>d</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA)- UNLP-CONICET

Palabras clave: secado natural, modelado, maíz, pérdida de materia seca, efecto ventilador

### Introducción

El secado a bajas temperaturas se lleva a cabo en silos de almacenamiento ó celdas especialmente acondicionadas usando aire ambiente. Se caracteriza por emplear sólo la energía eléctrica para el ventilador que mueve el aire, puesto que el mismo aire aporta la energía térmica necesaria para evaporar la humedad y conducirla hacia el exterior del sistema (Hansen y col., 2008). En el secado a bajas temperaturas, resulta fundamental la predicción de las curvas de humedad de los granos en función del tiempo como las historias térmicas en distintas condiciones operativas, a efectos de conocer en detalle el desarrollo del proceso, en particular en condiciones de alta humedad, que puedan promover el deterioro biológico (Sauer, 1992). La disponibilidad de un modelo matemático adecuado para el secador permitirá mejorar el diseño del equipo y optimizar su operación (Sun y col., 1995).

Como el comportamiento de un secadero de granos a bajas temperaturas depende fuertemente de las condiciones ambientales, las técnicas de simulación que incluyen el modelo matemático del proceso de secado y los datos meteorológicos proveen un método apropiado para su estudio (Sharp, 1984). En particular resulta interesante estudiar el efecto del calentamiento del aire al pasar por el ventilador y pronosticar como afecta el deterioro del grano a través del cálculo de la pérdida de materia seca.

Usualmente el aire se calienta al pasar por el ventilador, lo que aumenta su potencial para secar y la velocidad de secado, si el secado se realiza, como es habitual, con el ventilador ubicado "aguas arriba" del equipo de secado (tiro forzado). En caso de utilizar ventiladores axiales, toda la energía eléctrica absorbida por el ventilador se traduce en calor que pasa al aire (Wilcke y Morey, 1997). Algunos autores, como Biondi y col. (1988), usan un incremento fijo de temperatura del aire por efecto del ventilador de 1°C y otros lo calculan a partir de la energía eléctrica consumida por el ventilador. Schoenau y col. (1995), analizando ventiladores centrífugos, consideraron que el 50% de la energía requerida por el ventilador se transforma en calor y aumenta la temperatura del aire, porque el aire no se pone en contacto físico con el motor, a diferencia de lo que sucede cuando se usan ventiladores axiales. Wilcke y col. (1993), asumen que para ventiladores axiales el 57,5% de la energía eléctrica alimentada al mismo se usa para calentar el aire y que el 42,5 % restante se convierte en energía calorífica que se distribuye uniformemente en todo el lecho. Smith y Bailey (1983), Sun y col. (1995) consideran que el aire se hace pasar por el motor del ventilador y por lo tanto que toda la potencia suministrada al ventilador está disponible para

el calentamiento del aire. Hansel y col. (2008) especifican que si el ventilador es axial el aire pasa por el motor.

El deterioro biológico de los granos ("grain spoilage") es una variable que debe ser controlada, tanto para el secado como en el almacenamiento. Este deterioro es una función de la respiración de los granos y depende fuertemente de su temperatura y contenido de humedad, así como del tiempo al que los granos permanecen expuestos a esas condiciones. El deterioro biológico puede disminuirse secando los granos hasta humedades inferiores a los valores establecidos como seguros para el almacenamiento y acopiándolos en estructuras adecuadas a temperaturas razonablemente bajas. Los valores de humedad seguros dependen del tipo de grano, de la duración del almacenamiento y de las condiciones climáticas del lugar de acopio. La norma de calidad para el maíz en Argentina fija un valor del 14,5% b.h (0,17 dec.b.s.) como humedad base para las transacciones comerciales. La estimación del deterioro del grano es esencial en la simulación de la operación del secadero, y el deterioro del grano es la consecuencia directa de no poder completar el secado lo suficientemente rápido. Se pueden emplear ecuaciones específicas para predecir parámetros relacionados con el deterioro biológico del grano, como el nivel de CO<sub>2</sub> intergranular. Este es una medida conjunta de la respiración de los granos, los microorganismos, e incluso de los insectos (Jayas y White, 2003), es decir, del ecosistema formado durante el secado de los granos a bajas temperaturas.

Es esencial incluir en la simulación el modelado del tiempo seguro; es decir, el lapso de tiempo que transcurre hasta que empieza a aparecer daño en el grano. Los modelos utilizados para el deterioro de maíz se basan en el trabajo de Steele y col. (1969), que proponen el cálculo de pérdida de materia seca debido al metabolismo del grano, estimada a partir de la producción de CO<sub>2</sub>. Thompson (1972) presenta un modelo de almacenamiento para predecir cambios en la temperatura, contenido de humedad y pérdida de materia seca (PMS) de maíz, empleando las ecuaciones propuestas por Steele. Para el secado, donde las condiciones de temperatura y humedad del grano y del aire cambian con la altura del lecho, el cálculo de PMS se realiza en cada capa para los distintos tiempos, y el valor final (acumulado) se obtiene mediante una sumatoria de las pérdidas ocurridas en cada intervalo de tiempo para esa capa (Schoneau y col., 1995). El valor límite de PMS usado por la mayoría es de 0,5%.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto del calentamiento del aire a través del ventilador y determinar el deterioro del grano mediante la estimación de la pérdida de materia seca, durante el secado de maíz en condiciones meteorológicas, aplicando un modelo matemático no-estacionario de no-equilibrio para representar el secado natural de maíz en lecho fijo. Las ecuaciones diferenciales resultantes fueron resueltas mediante el método numérico de las líneas.

## Materiales y métodos

### Modelo matemático

El modelo no estacionario de no equilibrio másico ni térmico (NEst-NEQ), está conformado por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (ec.1), balance de masa para el agua en el aire (ec. 2), balance de energía para el sólido (ec. 3) y el balance de energía para el aire (ec. 4).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{G_a}{\epsilon_0 \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\epsilon_0 \rho_a} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_v (T_a - T_s) - n_w L_g \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = - \frac{h_v a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} \left[ n_w a C_{pv} (T_s - T_a) \right] \quad (4)$$

La resolución numérica de este modelo se realizó con el método de las líneas, usando diferencias finitas atrasadas para reemplazar las derivadas espaciales. Se obtuvo así un sistema ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs) cuyo tamaño depende del valor del número de intervalos espaciales,  $N_z$

Se considera el siguiente caso base: altura de lecho,  $Z_{max}=3$  m; caudal de aire  $Q_{vv}= 0,03$  m<sup>3</sup>/(s m<sup>3</sup>) y condiciones iniciales del grano, temperatura,  $T=20^\circ\text{C}$  y humedad,  $X=0,20$  kg agua/kg materia seca).

#### Cálculo del incremento de temperatura que se produce en el ventilador

Para calcular el aumento de temperatura del aire, se considera que toda la potencia suministrada al ventilador se traduce en un incremento en la temperatura del aire, lo que corresponde al diseño de ventilador axial. La ec. 5, que se obtiene a través del balance de energía en el ventilador, permite calcular el salto de temperatura del aire.

$$\Delta T_a = \frac{\Delta p Z_{max}^2 Q_{vv} 1,5 \ 1,3 \ 2}{G_a C_{pa}} \quad (5)$$

Este aumento de temperatura ocasiona una disminución en la humedad relativa del aire que entra al lecho, lo actúa como un efecto favorable para el proceso de secado.

Se considerarán dos casos: (1) SCa: no hay incremento en la temperatura del aire por efecto del ventilador. Esto se corresponde a la situación de tiro inducido, en la que el ventilador se coloca aguas abajo del secadero, o sea el aire no pasa por el ventilador antes de entrar al lecho. (2) CCa: el aire se calienta al pasar por el ventilador, antes de entrar al secadero y el incremento de temperatura se relaciona con toda la potencia aportada al ventilador. Esto corresponde como se ha mencionado a la situación de tiro forzado y ventilador axial.

#### Cálculo de la pérdida de materia seca

En la mayor parte de los casos el proceso de respiración se considera como la oxidación completa de carbohidratos para dar dióxido de carbono y agua, según la estequiometría de la reacción por cada gramo de carbohidrato se producen 1,47 g de CO<sub>2</sub> y 0,6 g de H<sub>2</sub>O.

La pérdida de materia seca (PMS) se define como los gramos de materia perdidos por el grano mediante la reacción de respiración por kilogramo de materia seca, expresada en porcentaje, por ej. una PMS del 0,1% indica una pérdida de 1 g por cada kg original.

Teniendo en cuenta la definición de PMS y la relación estequiométrica, se deduce la ecuación que relaciona la PMS y la  $m_{CO_2}$ :

$$PMS(\%) = \frac{m_{CO_2}}{14,7} \quad (6)$$

Donde  $m_{CO_2}$  es la masa de dióxido de carbono producido (en g) por kg de materia seca, que en función del tiempo equivalente  $t_{eq}$  (en horas), según la aproximación de Steele (Thompson, 1972) es:

$$m_{CO_2} = 1,3(\exp(0,006 t_{eq}) - 1) + 0,015 t_{eq} \quad (7)$$

Según lo enunciado el valor límite de PMS usado en la mayor parte de los casos es de 0,5%.

Para el caso base y condiciones de entrada del aire, temperatura,  $T_a=20^\circ\text{C}$  y humedad relativa,  $h_{ra}=0,60$  y para las 263 horas de secado que predice el simulador, se obtiene:  $m_{CO_2}=1,18$  y  $PMS=0,08\%$ .

En el caso del secado en el lecho T y X dependen de la posición en el lecho y del tiempo de secado. Por ello, se calcula un tiempo equivalente total para cada una de las capas definidas en la discretización numérica, que será la suma de los  $\Delta t_{eq}$ , cada uno de ellos calculado con los factores de corrección (Thompson, 1972) para los valores de X y T correspondientes a cada tiempo. Se obtiene así la PMS para cada capa del lecho al finalizar el secado, y el promedio de estos valores da la PMS media del lecho ( $PMS_{pr}$ ).

### Resultados y discusión

Se el caso base se analiza el efecto del calentamiento del aire en el ventilador en el comportamiento del secadero (tiempo de secado, humedad promedio final en el lecho, humedad de la última capa y consumo específico de energía) para los meses de febrero y Junio, extremos del período de cosecha, en Río Cuarto (Tabla 1).

Tabla 1. Influencia del calentamiento del aire al pasar por el ventilador. Condiciones del aire variables. Febrero y Junio Río Cuarto  $Z_{max}=3$  m.,  $Q_{VV}=0,03$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> min.

Mes	$t_s$ (h)	$X_{prf}$ (dec. b.s.)		$E_{esp}$ (MJ/ kg agua evaporada)		$X_f$ última capa (dec. b.s.)		
		Sca	CCa	Sca	CCa	Sca	CCa	
Febrero	670	406,57	0,173	0,162	6,39	2,77	0,175	0,163
Junio	700	700	0,179	0,167	8,40	5,38	0,182	0,171

Para el mes de Febrero se observa que el efecto del ventilador es muy relevante, ya que, para el caso CCa se logra llegar a la humedad deseada ( $X_f$  última capa=0,17 dec. b.s.) en poco más de 400 h mientras que en el caso Sca no se logra llegar a la humedad deseada en todo el mes. El detalle de lo que sucede puede analizarse a través de la evolución de la humedad promedio del sólido y su relación con la temperatura y la humedad del aire de entrada al lecho. En la Fig. 1 se presenta la humedad del sólido; se observa que para el caso Sca, a partir de las 500 h la humedad ya no desciende y tiende a permanecer constante en un valor superior al deseado.

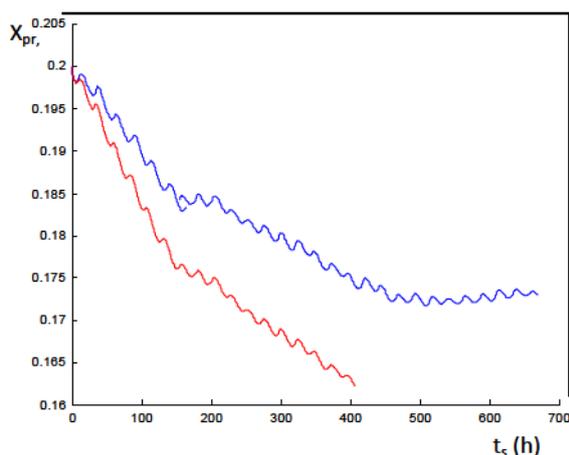


Figura 1. Humedad promedio del sólido en el lecho en función del tiempo de secado para Febrero Río Cuarto con calentamiento (líneas rojas) y sin calentamiento (líneas azules) del aire por efecto del ventilador.

Este comportamiento se explica considerando la humedad relativa del aire de entrada al secadero: al final del periodo (500-700 h) el valor superior es del orden de 0,92 para SCa, mientras que para CCa ese valor desciende a aprox. 0,85. En esos altos niveles, la humedad relativa incide mucho sobre la humedad de los granos en equilibrio y por tanto en la disminución de humedad en el secado. El aumento de temperatura del aire que causa tal descenso de humedad relativa, es de aprox. 1,2°C. Para el mes de junio también se aprecia una diferencia importante en la humedad promedio del lecho por el efecto del ventilador, aunque el efecto parece ser más parejo en todo el mes (Fig. 2). Además se observa que si bien no se alcanza el valor deseado de última capa (0,170) en todo el mes (700hs) en ninguno de los casos, CCa el valor es aproxima mucho (0,171) mientras que no es así para el caso SCa (0,180).

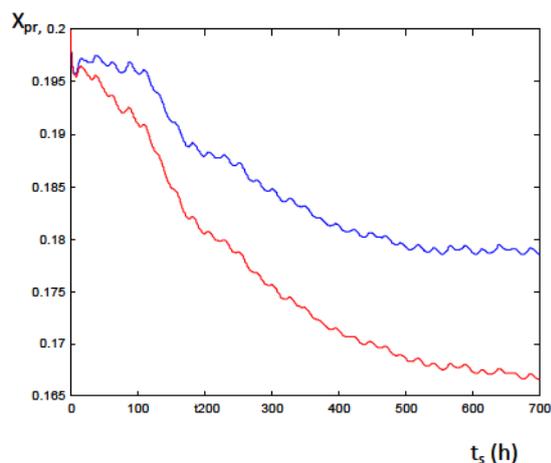


Figura 2. Humedad promedio del sólido en el lecho en función del tiempo de secado para Junio Río Cuarto con calentamiento (líneas rojas) y sin calentamiento (líneas azules) del aire por efecto del ventilador.

Con respecto al deterioro del grano, para condiciones variables se analizó la PMS para  $Z_{\max}=3$  m,  $Q_w=0,02$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> min., para los mismos meses en Río Cuarto. Para Junio se obtuvo un valor promedio de 0,035% mientras que para febrero el valor promedio es de 0,1%. En las figuras 3 y 4 se presentan los valores de PMS para distintas alturas del lecho, para Febrero y Junio respectivamente

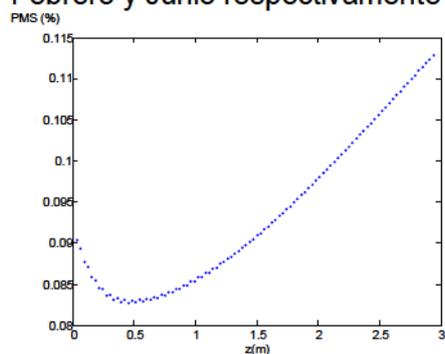


Figura 3. PMS para distintas alturas del lecho. Febrero Río Cuarto.

En la mayor parte del lecho el comportamiento es similar al de secado en condiciones constantes: la PMS aumenta con la altura del lecho, aunque se observa una disminución cerca de la entrada, comportamiento que se puede deberse a las variaciones de humedad y temperatura del aire de entrada, que en ocasiones producen un rehumedecimiento del sólido.

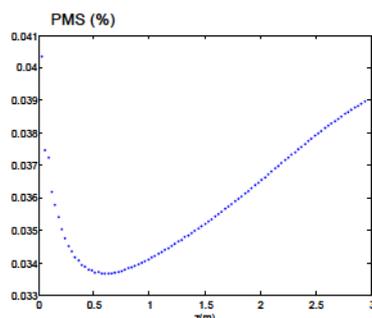


Figura 4. PMS para distintas alturas del lecho. Junio Río Cuarto.

### Conclusiones

El simulador obtenido mediante el modelado matemático del secadero permite estudiar el comportamiento del secadero. Los resultados obtenidos indican que el calentamiento que experimenta el aire al pasar por el ventilador produce efectos considerables en los parámetros de secado, por lo cual la disposición de tiro forzado (soplado de abajo hacia arriba) y el uso de un ventilador axial para el secado a bajas temperaturas es recomendable porque reduce el tiempo de secado y, asimismo, el período de permanencia del grano en condiciones no seguras (humedad superior a la segura para el almacenamiento) y conduce a un ahorro energético.

En lo que respecta a la pérdida de materia seca (PMS), en ningún caso supera el valor admisible (0,5%) con lo cual este no sería un problema para implementar el secado natural de maíz en la localidad de Río Cuarto, para los meses evaluados.

### Bibliografía

- Biondi, P. Biscarini, M. y Farina, G. (1988). Simulation of low temperature corn drying in three locations in Italy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 40, 103-111.
- Hansen, R. C. Troyer, E.; Keener, H.M. (2008). Success with natural-air grain drying. ASABE paper Number 084550.
- Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2003). Storage and drying in Canada: low cost approaches. *Food Control*, 14, 255-261.
- Sauer, D. (Editor). (1992). Storage of Cereal Grains and their Products, 4<sup>th</sup> Ed. American Association of Cereal Chemists, USA.
- Schoenau, G. J., Arinza, E. A. ; Sokhansanj, S. (1995). Simulation and optimization of energy systems for in-bin drying of canola grain (rapeseed). *Energy Conversion and Management*, 36 (1), 41-59.
- Sharp, J. R. (1984). The design and management of low temperature grain driers in England-A simulation study. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29, 123-131.
- Smith, E. A. & Bailey, P.H. (1983). Simulation of near ambient grain drying. II- Control strategies for drying barley in northern Britain. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28, 301-317
- Steele, J.L. ;Saul, W.V. ;Hukill, W.V. (1969).Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. *Transactions of the ASAE*. 12 (5), 685-689.
- Sun, Y., Pantelides, C.C. &Chalabi, Z. S. (1995). Mathematical modeling and simulation of near ambient grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 13, 243-271
- Thompson, T.L.(1972). Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 15(2), 333-337.
- Wilcke, W, Morey, R.V. & Hansen, D.J. (1993).Reducing energy use for ambient-air corn drying. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol 9(2):241-248.
- Wilcke, W, Morey, R.V. (1997). Natural-air corn drying in the upper midwest. <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC6577.html>