

MODELIZACION DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN GRANOS ALMACENADOS EN SILOS

Rita Abalone^{a,c}, Analía Gastón^{a,b}, Armando Cassinera^d, Miguel A. Lara^{c,d}

^aFacultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Av. Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina, rabalone@fceia.unr.edu.ar

^bConsejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario, analiag@fceia.unr.edu.ar,

^cInstituto de Física Rosario (FCA-CONICET-UNRosario), 27 de Febrero 210 bis, 2000 Rosario, Argentina, cassiner@ifir.edu.ar

^dFacultad de Ciencias Agraria, Campo Experimental Villarino, C.C. N° 14 (S 2125 ZAA), Santa Fe, Argentina, malara@fceia.unr.edu.ar

Palabras claves: Almacenamiento de granos, Transferencia de calor y materia, Simulación numérica.

Resumen. En este trabajo se describe un modelo bidimensional para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de la humedad de una masa de granos almacenados en un silo cilíndrico por efecto de los gradientes térmicos generados por las variaciones de las condiciones climáticas estacionales. Empleando valores promedio de la temperatura ambiente, de radiación solar incidente sobre el silo y del viento, se calcula la distribución promedio de la temperatura y de humedad del grano ensilado. El modelo propuesto fue resuelto por el método de elementos finitos y aplicado para evaluar la evolución de la temperatura y la migración de humedad que tiene lugar durante el período otoño-primavera (soja almacenada desde Mayo a Diciembre) y el período verano-invierno (trigo almacenado de Diciembre a Julio) para las condiciones climáticas de la zona de Rosario. Las predicciones indican que la temperatura de la zona central del silo es la menos sensitiva a los cambios estacionales, mientras que la zona cercana a la pared registra importantes variaciones generando zonas propicias para el desarrollo de plagas. La migración de humedad se concentra en una zona estrecha pegada a la pared lateral. La humedad relativa del aire en los espacios intergranarios no supera el 70% límite superior a partir del cual pueden desarrollarse microorganismos en el caso del trigo pero si en la soja. Los resultados numéricos obtenidos para trigo son consistentes con mediciones de campo y resultados numéricos disponibles en la literatura.

1 INTRODUCCION

La temperatura y la humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el periodo de almacenamiento.

La temperatura del grano ensilado puede ser modificada tanto por fuentes internas como externas de calor alterando localmente las condiciones de equilibrio del grano con su medio ambiente. Las fuentes internas están asociadas a la respiración propia del grano, a la proliferación de insectos y hongos, siendo estas fuentes dependientes de la temperatura del grano, de su contenido de humedad y de la humedad relativa del aire intergranario. Las fuentes externas dependen principalmente de la variación de las condiciones climáticas estacionales durante el tiempo de almacenamiento.

Gradientes de temperatura dentro de la masa de granos producen la migración de la humedad desde las zonas más calientes a las más frías y esta redistribución puede generar focos con condiciones propicias para el deterioro del grano almacenado.

La metodología empleada para reducir estos riesgos es enfriar los granos por medio de sistemas de aireación. El conocimiento preciso de cómo evoluciona la distribución de temperatura y humedad durante largos períodos es fundamental para el diseño y mejoramiento de estos sistemas. La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el deterioro potencial en comparación con un costoso monitoreo permanente de la temperatura y de la humedad de los granos almacenados.

La predicción de la distribución de temperatura y humedad involucra la resolución acoplada de las ecuaciones de conservación de masa, de momento y de energía con diversos grados de complejidad según las hipótesis consideradas. Algunos autores sólo modelizaron la evolución de la distribución de temperatura durante el almacenamiento de trigo (Alagusundaram et al., 1990; Jayas et al., 1994; Jia et al, 2000b, a; Jiang et al., 2005). Abbouda et. al.(1992b, a) estudió el almacenamiento de sorgo con un modelo 2D de transferencia de calor y masa que incluye la generación de calor debido a la respiración de los granos. Chang et al. (1993, 1994) modelizó el almacenamiento de trigo con aireación incluyendo términos que representan la convección forzada de energía y materia. Para arroz, Iguaz et al. (2004b, a) analizó el almacenamiento sin aireación y para los períodos con aireación propuso un modelo acoplado de transferencia de calor y masa entre el aire intergranular y la masa de granos; Abe y Basunia (1996) propusieron un modelo que mediante la predicción de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo analizan los cambios de temperatura y humedad debido a factores climáticos. El efecto de la convección natural generada por gradientes de temperatura durante el almacenamiento sin ventilación de los granos fue abordado en los trabajos de Singh et al. (1993), Jiménez-Islas et al. (2004), Khankari et al. (1995b, a), pero ninguno considera las variaciones de las condiciones climáticas durante el período de análisis. Montross et al. (2002b, a) incluye estos efectos en el modelo anterior y lo extiende a los casos de convección forzada.

Son escasas las referencias bibliográficas sobre la modelización del almacenamiento de granos para las condiciones climáticas características del hemisferio sur (Andrade et al., 2002) y particularmente para la zona agrícola argentina.

En este trabajo se describe un modelo bidimensional para predecir la evolución de la distribución de temperatura y humedad de una masa de granos almacenados en un silo cilíndrico (Khankari et al., 1994) teniendo en cuenta las variaciones climáticas en las condiciones de contorno asociadas (Montross et al., 2002a). Empleando valores promedio de la temperatura ambiente, de radiación solar incidente sobre el silo y del viento, se calcula la distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado. El modelo propuesto fue resuelto por el método de elementos finitos y aplicado para evaluar la evolución de la

temperatura y la migración de humedad que tiene lugar durante el período otoño-primavera (soja almacenada desde Mayo a Diciembre) y el período verano-invierno (trigo almacenado de Diciembre a Julio) para las condiciones climáticas de la zona de Rosario.

2 MODELO MATEMATICO

Se introdujeron las siguientes hipótesis en la modelización de la distribución de temperatura y de humedad del lecho de granos dentro del silo:

1. en cada punto del lecho el aire intergranular se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos
2. se considera el lecho de granos ensilados como un continuo, con la fases aire y grano distribuidas uniformemente
3. no se considera la respiración de los granos
4. no se incluye la transferencia de energía y masa por convección
5. se desprecia el cambio de volumen del lecho por encogimiento, manteniéndose constante la porosidad
6. se considera una simetría axial

2.1 Balance de energía

Planteando el balance de energía para los granos y el aire intergranular en un volumen de control se tiene:

$$(1-\varepsilon)c_g\rho_g\frac{\partial T}{\partial t}=(1-\varepsilon)\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left[rk_g\frac{\partial T}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[rk_g\frac{\partial T}{\partial z}\right]\right]+(1-\varepsilon)\rho_gL_g\frac{\partial W_g}{\partial t} \quad (1)$$

$$\varepsilon c_a\rho_a\frac{\partial T}{\partial t}=\varepsilon\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left[rk_a\frac{\partial T}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[rk_a\frac{\partial T}{\partial z}\right]\right] \quad (2)$$

Sumando m.a.m las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la ecuación de transferencia de energía considerando la masa de granos y el aire como un componente de una fase:

$$c_b\rho_b\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left[rk_b\frac{\partial T}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[rk_b\frac{\partial T}{\partial z}\right]\right]+\rho_bL_g\frac{\partial W}{\partial t} \quad (3)$$

donde el último término de la ecuación (3) da cuenta de la energía necesaria para evaporar el agua en la masa de granos. Se definen (Rahman, 1995):

$$c_b\rho_b=(1-\varepsilon)c_g\rho_g+\varepsilon\rho_a c_a\approx(1-\varepsilon)c_g\rho_g \quad (4)$$

$$\rho_b=(1-\varepsilon)\rho_g+\varepsilon\rho_a=(1-\varepsilon)\rho_{gs}(1+W_g)+\varepsilon\rho_{as}(1+W_a)\approx(1-\varepsilon)\rho_{gs0}(1+W_g) \quad (5)$$

$$k_b=(1-\varepsilon)k_g+\varepsilon k_a \quad (6)$$

La densidad del aire puede despreciarse y al considerarse los cambios de volumen despreciables la concentración de sólidos resulta igual a la densidad del grano seco.

La ecuación (3) tiene asociada las siguientes condiciones inicial y de contorno:

$$T(r, z, t=0)=T_0(r, z) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ en } r = 0 \text{ en } \Gamma_1 \quad (8)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c2}(T - T_{amb}) \text{ en } \Gamma_2 \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c3}(T - T_{amb}) + \alpha G - \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \text{ en } \Gamma_3 \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c4}(T - T_{silo}) \text{ en } \Gamma_4 \quad (11)$$

Para calcular la radiación solar incidente, el silo cilíndrico fue aproximado por un prisma de 32 caras (Jiang, 1987). Con el objetivo de analizar la influencia de las variaciones estacionales se calculó el promedio diario de la radiación incidente sobre cada cara y el promedio sobre todas las caras fue asignado como la radiación solar sobre la pared lateral G . La irradiancia solar global sobre una superficie horizontal fue calculada en base al modelo C (Iqbal, 1983) de transferencia radiativa de la atmósfera, utilizando parámetros atmosféricos estándares para la zona.

Respecto a las condiciones climáticas, se emplearon valores diarios de la temperatura y humedad relativa ambiente y de la velocidad del viento, obtenidos a partir de promedios estadísticos mensuales del período 1981-1990 en la ciudad de Rosario.

2.2 Balance del contenido de agua

En forma similar puede plantearse el balance de agua en el volumen de control para los granos y el aire intergranario:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial(\rho_g W_g)}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left[r D_g \frac{\partial(\rho_g W_g)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r D_g \frac{\partial(\rho_g W_g)}{\partial z} \right] \right] \quad (12)$$

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial t} = \varepsilon \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{D_v}{\tau} \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \frac{D_v}{\tau} \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial z} \right] \right] \quad (13)$$

Si se considera despreciable la difusión de agua grano a grano, sumando m.a.m las ecuaciones (12) y (13) se obtiene la ecuación de transferencia de agua:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial(\rho_g W_g)}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial t} = \varepsilon \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{D_v}{\tau} \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \frac{D_v}{\tau} \frac{\partial(\rho_{aire} W_a)}{\partial z} \right] \right] \quad (14)$$

Esta última ecuación establece que la variación del contenido de agua total en el volumen de control es igual a la difusión neta de vapor a través del espacio intergranario de la masa de granos.

Si se desprecia el término de acumulación de humedad en el aire, se supone que el mismo se comporta como un gas ideal, y se considera la densidad del lecho constante (ver ecuación (5)):

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_{ef} \left(\frac{\partial p_v}{\partial r} - \frac{p_v}{T_k} \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r D_{ef} \left(\frac{\partial p_v}{\partial z} - \frac{p_v}{T_k} \frac{\partial T_k}{\partial z} \right) \right] \quad (15)$$

donde $D_{ef} = \frac{D_v \varepsilon}{R_v \tau T_k}$ es la difusividad efectiva del vapor de agua a través del lecho de granos (Keey, 1975).

Haciendo uso de la hipótesis de equilibrio termodinámico local puede relacionarse la presión de vapor p_v con el contenido de humedad de grano W_g a través de la curva de sorción-desorción:

$$p_v = f(W_g, T) \quad (16)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial x} = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial W_g} \right|_T \frac{\partial W_g}{\partial x} + \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial T} \right|_{W_g} \frac{\partial T}{\partial x} = \eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \quad (17)$$

Haciendo $x = r$, $x = z$ en la ecuación (17) y reemplazando las derivadas en (15) se obtiene:

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial r} + \left(\omega - \frac{p_v}{T_k} \right) \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial z} + \left(\omega - \frac{p_v}{T_k} \right) \frac{\partial T_k}{\partial z} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

Expresando (16) por medio de la ecuación de Henderson-Thompson (Brooker et al., 1992):

$$p_v = p_s \left\{ 1 - \exp \left[-K_H (C_H + T) (100 W_g)^N \right] \right\} \quad (19)$$

se obtienen las expresiones correspondientes para η y ω :

$$\eta = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial W_g} \right|_T = p_s \exp \left[-K_H (C_H + T) (100 W_g)^N \right] \left[-K_H (C_H + T) (100 W_g)^{N-1} (100 W_g) \right] \quad (20)$$

$$\omega = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial T} \right|_{W_g} = \frac{p_v}{p_s} \frac{dp_s}{dT} + p_s \left(K_H (100 W_g)^N \right) \left(1 - \frac{p_v}{p_s} \right) \quad (21)$$

Para el rango de análisis, los valores de $\frac{p_v}{T_k}$ respecto a ω pueden despreciarse con lo cual la ecuación de balance de agua en el volumen de control resulta:

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial r} + \omega \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial z} + \omega \frac{\partial T_k}{\partial z} \right) \right] \right\} \quad (22)$$

La ecuación (22) tiene asociada las siguientes condiciones inicial y de contorno:

$$W_g(r, z, t=0) = W_0(r, z) \quad (23)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{en } \Gamma \quad (24)$$

Esta condición implica que el silo es hermético a la transferencia de masa y que la redistribución de la humedad en el lecho se debe a los gradientes de temperatura.

2.3 Solución numérica

La resolución numérica del sistema acoplado formado por las ecuaciones (3) y (22) con sus

correspondientes condiciones iniciales y de contorno se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando un software de uso profesional. La formulación puede consultarse en (Montross et al., 2002). La discretización del dominio se realizó con una densificación en la zona cercana superficie del grano y en la pared del silo. Se empleó una malla de 3569 elementos Lagrangianos de orden dos, e integración numérica de cuarto orden.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó el modelo para analizar la variación de la temperatura y la migración de la humedad, debido a los gradientes térmicos ocasionados por los cambios climáticos, en trigo almacenado a 30C y 13.5% bh (base húmeda) de contenido de humedad (15.6% bs, base seca) durante 250 días desde el 12 de Diciembre y soja almacenada a 13.0% bh (14.9% bs) durante 200 días a partir del 15 de Mayo. Para la soja se tomó una temperatura inicial de almacenamiento de 20C que corresponde al límite inferior de temperatura necesaria para la reproducción de plagas e insectos. Se consideró un silo metálico de acero galvanizado de 6 m de diámetro y 8.5 m de altura, y con un nivel de granos de 7.1 m.

La Figura 1 muestra la geometría y dominio de cálculo. Por simplicidad, en el modelo propuesto se consideró que la superficie de los granos intercambia energía por convección con el aire de la cavidad superior del silo. Un modelo más elaborado debe incorporar los balances de energía y materia en el aire de esta cavidad, así como la interacción con el techo del silo.

En la Tabla 1 se listan expresiones y los valores de los parámetros térmicos del modelo de transferencia de calor. Como el espesor de la carcasa del silo es de aproximadamente 2 mm, en la modelización ésta se incluyó como una conductancia en serie con las conductancias por convección listadas. En la Tabla 2 y en la Tabla 3 figuran los parámetros relacionados con la transferencia de masa.

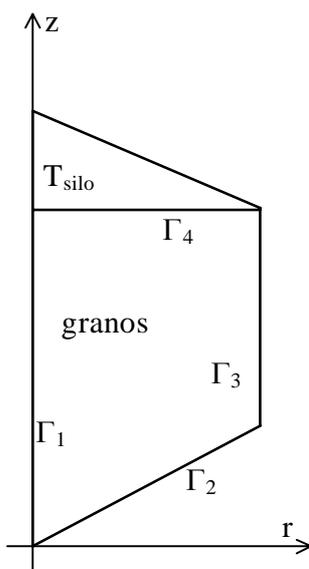


Figura 1: Dominio de cálculo

Coef. de trans. de calor [W/m ² C] (Duffie y Beckman, 1980)	$h_{c3} = 8.6 \frac{V^{0.6}}{L^{0.4}}$
Coef. de trans. de calor [W/m ² C] (Chang et al., 1993)	$h_{c2} = 0.5h_{c3}$
Coef. de trans. de calor [W/m ² C] (Alagusundaram et al., 1990)	$h_{c4} = 1$
Temperatura del aire dentro del silo (Alagusundaram et al., 1990)	$T_{silo}(t) = T_{amb}(t) + 5$
Temperatura de cielo (Mills, 1995)	$\sigma T_c^4 = \xi_c \sigma T_{amb}^4$
Emisividad del cielo (Mills, 1995)	$\xi_c = 0.82$
Emisividad del acero (Kreith, 1965)	$\xi = 0.28$
Absortividad del acero	$\alpha = 0.89$

Tabla 1: Parámetros del modelo térmico

Densidad del lecho de soja [kg/m ³] (ASAE, 2003a)	$\rho_b = 734.5 - 219M + M^2$
Porosidad del lecho (ASAE, 2003a)	$\varepsilon = 0.338$
Cond. térmica del grano de soja [W/mK] (Haghighi y Segerlind, 1988)	$k_g = 0.1 - 0.25$
Calor esp. de grano de soja [J/kg K] (ASAE, 2003b)	$c_g = 1699 + 0.017M$
Ecuación de Henderson (19) [Pa] (Brooker et al., 1992)	$K_H = 30.532710^{-5}$; $C_H = 134.136$ $N = 1.2164$
Densidad del lecho de trigo [kg/m ³] (Giner, 1999)	$\rho_b = 824$
Porosidad del lecho (Giner, 1999)	$\varepsilon = 0.38$
Cond. térmica del grano de trigo [W/mK] (Keey, 1975)	$k_g = 0.14 + 0.68W$
Calor esp. de grano de trigo [J/kg K] (Nellist, 1987)	$c_g = 1300 + 4187W$
Ecuación de Henderson (19) [Pa] (Brooker et al., 1992)	$K_H = 2.31 \cdot 10^{-5}$; $C_H = 55.813$ $N = 2.2857$
Tortuosidad (Keey, 1975)	$\tau = 1.53$

Tabla 2: Propiedades de los granos y lecho de soja y trigo

Difusividad del vapor de agua [m ² /s] (Thorpe, 1980)	$D_V = \frac{9.1 \cdot 10^{-9} (T_k)^{2.5}}{(T_k + 245.18)}$
Presión de saturación del vapor [Pa] (Giner et al., 1996)	$p_s = \exp \left\{ 54.12 - \frac{6547.1}{T_k} - 4.230 \ln T_K \right\}$

Tabla 3: Propiedades del vapor de agua

Como materiales biológicos, los granos presentan una gran dispersión en los valores de las propiedades termofísicas; en el caso de la soja se encontraron valores de conductividad térmica que varían de 0.1 a 0.25 W/mC. Por lo tanto se realizó una comparación de los resultados obtenidos para estos dos valores extremos.

En la [Figura 2](#) para $k_g = 0.1$ W/mC se muestra la evolución de la temperatura para distintas posiciones radiales y para distintas alturas cercanas a la superficie del grano y en la [Figura 3](#) para $k_g = 0.25$ W/mC.

Los resultados numéricos muestran que la temperatura varía rápidamente para una capa cercana a la superficie del grano y a la pared lateral del silo. La temperatura de la capa sobre la pared lateral ($r = 3$ m) sigue las fluctuaciones de la temperatura ambiente con valores aproximadamente 2C mayores durante el período de almacenamiento, debido a la radiación

solar incidente. Como consecuencia de la baja conductividad de los granos, la amplitud de la oscilación de la temperatura disminuye hacia el interior del silo, aumentando el tiempo de retardo entre los valores pico de temperatura ambiente y de los granos. Para la $k_g = 0.1 \text{ W/mC}$, prácticamente la zona central del silo no se ve afectada por la evolución de la temperatura exterior durante el período analizado. Para $k_g = 0.25 \text{ W/mC}$, se registra una disminución de aproximadamente 4C en la zona central del silo al cabo de 150 días.

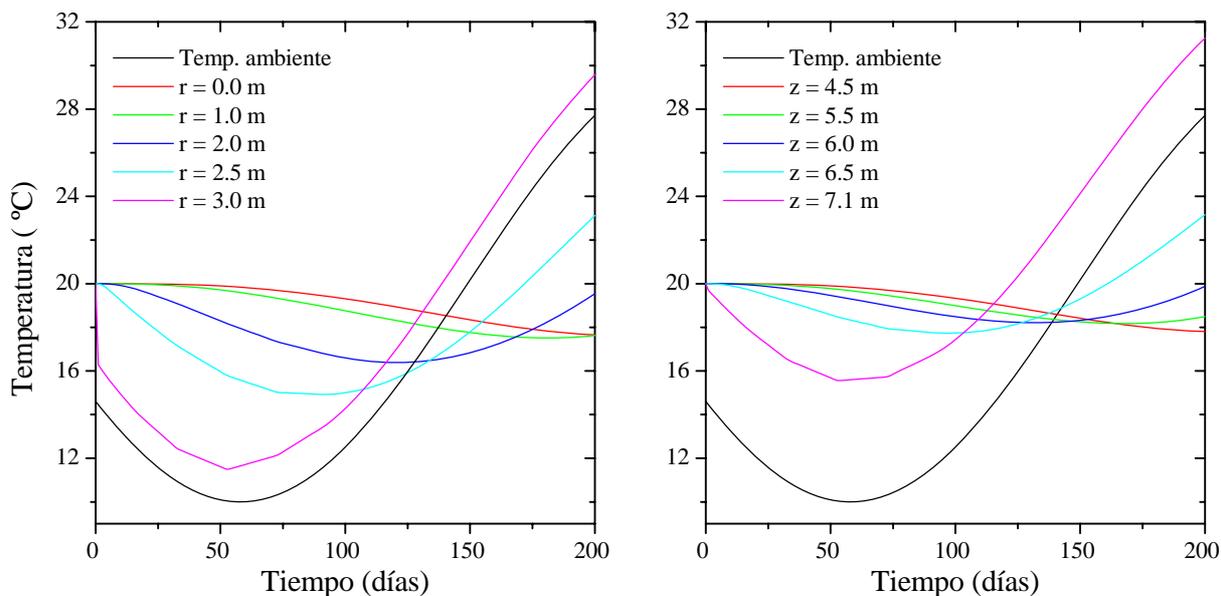


Figura 2: Evolución de la temperatura del grano de soja, $k_g = 0.1 \text{ W/mC}$. a) en dirección radial, para $z = 4.5 \text{ m}$; b) en dirección axial, para $r = 0.0 \text{ m}$

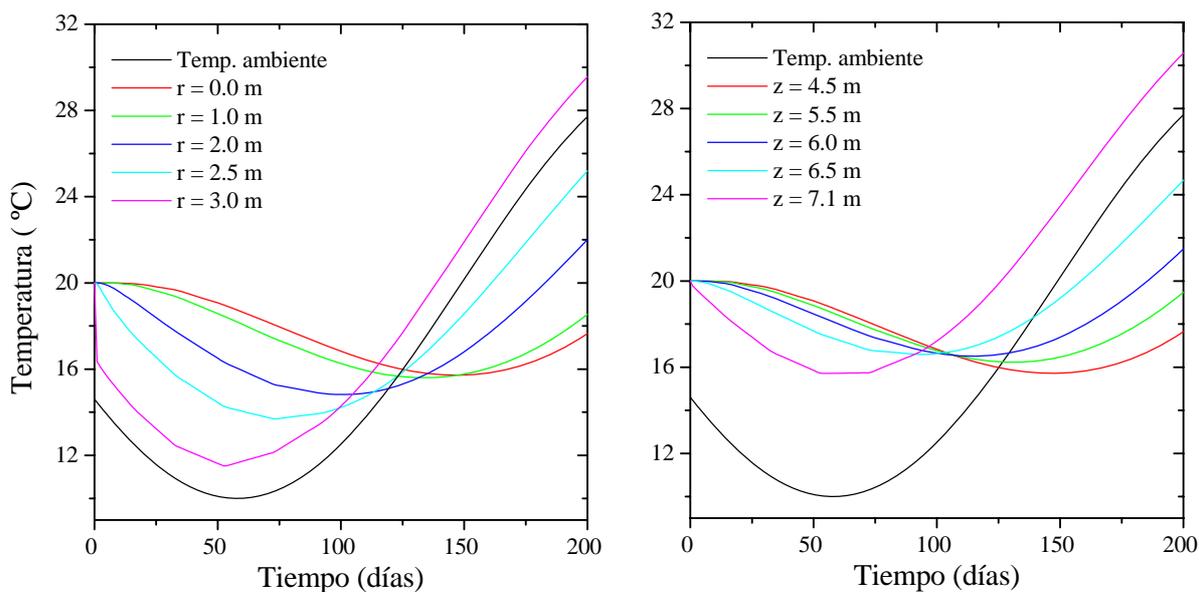


Figura 3: Evolución de la temperatura del grano de soja, $k_g = 0.25 \text{ W/mC}$. a) en dirección radial, para $z = 4.5 \text{ m}$; b) en dirección axial, para $r = 0.0 \text{ m}$

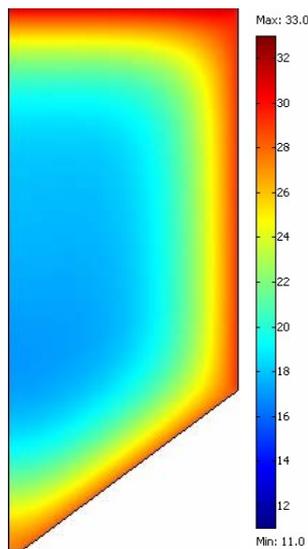


Figura 4: Distribución de temperatura de la soja para $k_g = 0.1$ W/mC, 200 días.

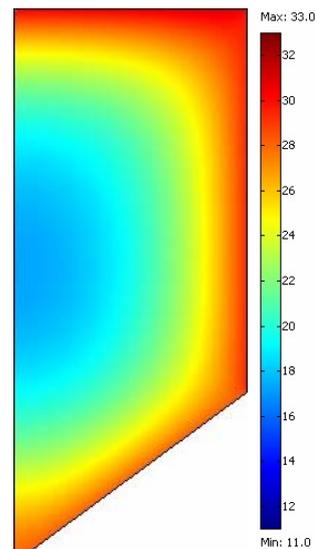


Figura 5: Distribución de temperatura de la soja para $k_g = 0.25$ W/mC, 200 días.

La Figura 4 y la Figura 5 presentan la distribución de la temperatura del grano de soja al final del almacenamiento. De estas graficas se concluye que la disminución de la temperatura ambiente durante el período invernal no alcanza a propagarse hacia la zona central del silo logrando que el grano alcance temperaturas más bajas y más seguras para el almacenamiento. Así mismo, al cabo de 120 días de almacenamiento (Figura 2 y Figura 3) la temperatura supera ampliamente los 20C en la zona cercana a la superficie del grano y a la pared lateral del silo, haciéndose necesaria la aireación del mismo para controlar la posible proliferación de insectos.

La Figura 6 y la Figura 7 muestran la distribución del contenido de humedad de los granos de soja en dirección radial y axial, para diversos tiempos durante el período de almacenamiento.

Para $k_g = 0.1$ W/mC, los gradientes térmicos son más pronunciados produciendo una mayor migración de humedad hacia la pared lateral. Esto genera una capa de aproximadamente 10cm de espesor de grano con 0.5% de humedad sobre la humedad de almacenamiento seguro.

La Figura 8 muestra los resultados obtenidos para el almacenamiento de trigo. Se observa que el pico de temperatura alcanza el centro del silo durante los meses fríos. Recién al cabo de 150 días (mediados de Mayo) el enfriamiento natural logra disminuir la temperatura de la pared lateral por debajo de los 20C pero la zona central no logra enfriarse finalizado el invierno. La capa de 2.5 m por debajo de la superficie de granos registra temperaturas más elevadas como consecuencia del bajo intercambio convectivo considerado.

Durante los meses cálidos la máxima diferencia de temperatura en la dirección radial es del orden de 2C a los 50 días, mientras que en los meses fríos, se produce una inversión del sentido del gradiente térmico aumentando la máxima diferencia a unos 12C a los 200 días de almacenamiento (ver Figura 9). Estos resultados numéricos son consistentes con mediciones de campo disponibles en la literatura (Casada et al., 2002) .

La Figura 10 muestra la migración de humedad generada por estos gradientes térmicos. En este caso, la zona más afectada se extiende hasta 25cm de la pared del silo.

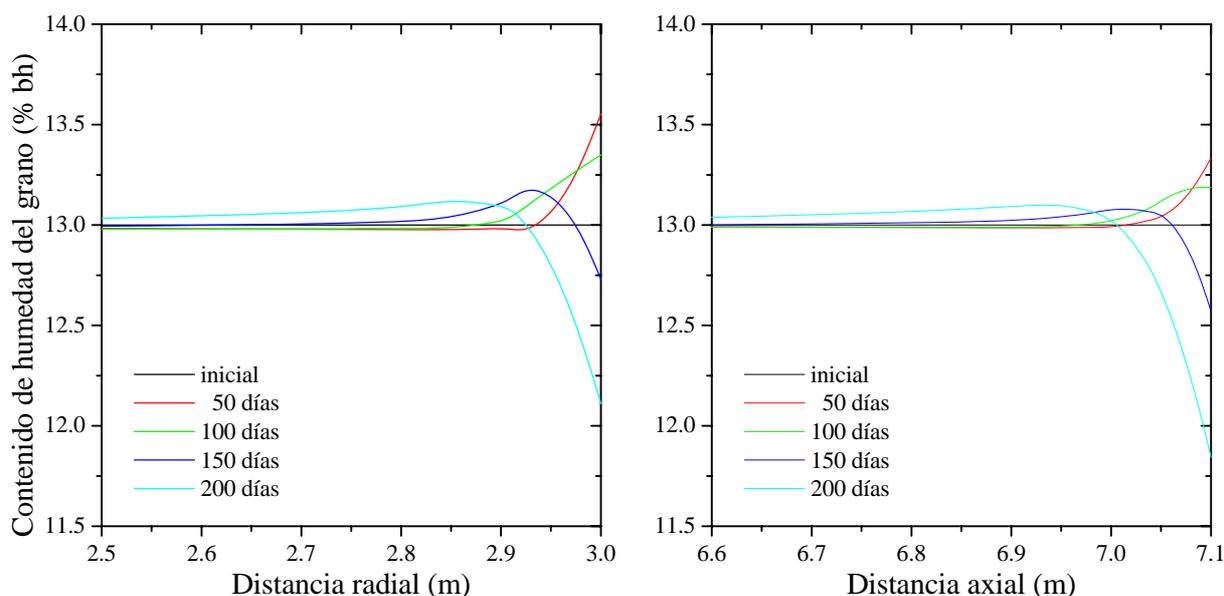


Figura 6: Distribución del contenido de humedad del grano de soja, $k_g = 0.1$ W/mC.
a) en dirección radial, para $z = 4.5$ m; b) en dirección axial, para $r = 0.0$ m

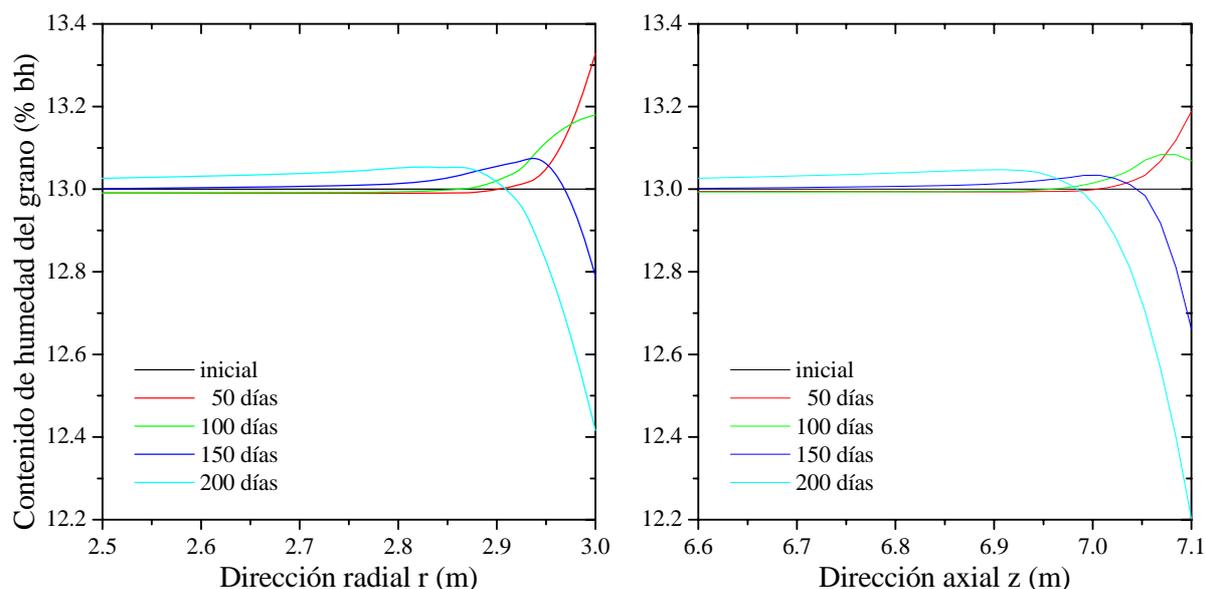


Figura 7: Distribución del contenido de humedad del grano de soja, $k_g = 0.25$ W/mC.
a) en dirección radial, para $z = 4.5$ m; b) en dirección axial, para $r = 0.0$ m

Estos resultados pueden interpretarse analizando el comportamiento de los coeficientes ω y η obtenidos a partir de las curvas de equilibrio sorpcional de cada grano, que se muestran en la Figura 11 y en la Figura 12.

En el caso de la soja almacenada a 20C y 13% bh (14.9% bs), las variaciones de temperatura se registran entre 10 y 20C. Esto produce cambios del coeficiente ω menores que en el caso del trigo inicialmente a 30C y 13.5% bh (15.6% bs), cuya temperatura varía entre 20 y 30C durante el almacenamiento. Además la influencia del coeficiente η ligado a la migración por gradientes de humedad es mayor en el caso del trigo que en la soja.

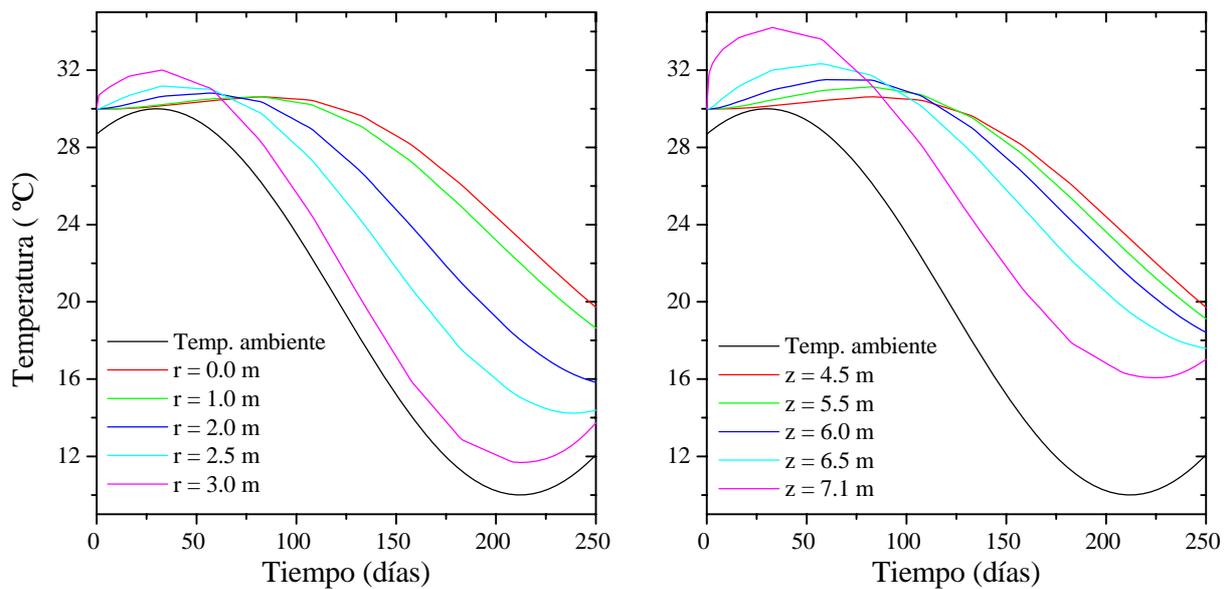


Figura 8: Evolución de la temperatura del grano de trigo.
a) dirección radial, para $z = 4.5$ m; b) dirección axial, para $r = 0.0$ m

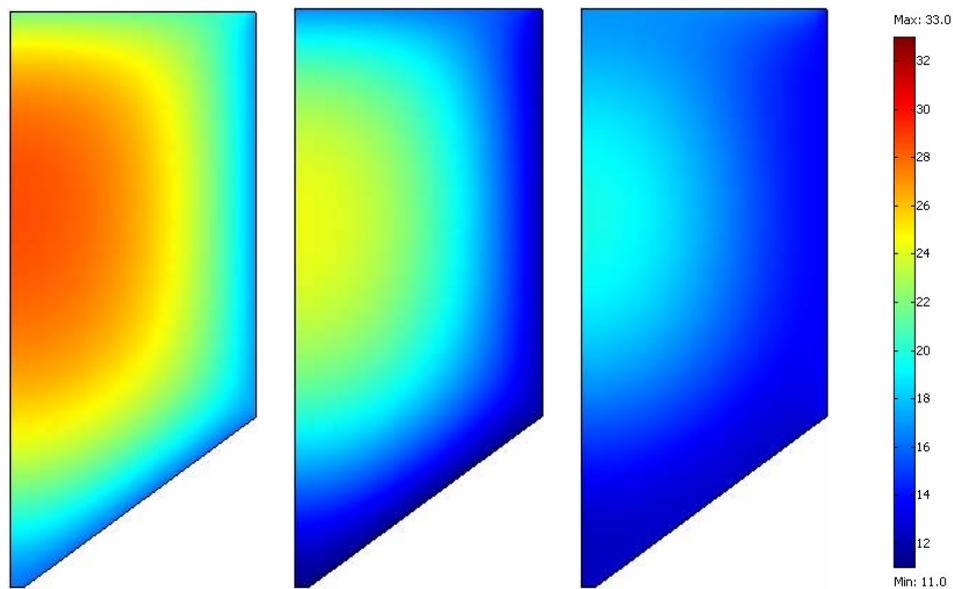


Figura 9: Distribución de temperatura del trigo para 100, 150 y 200 días de almacenamiento.

Finalmente, haciendo uso de la relación de Henderson Thompson se determina la humedad relativa del aire en equilibrio sorpcional con el grano, en cada punto del silo, empleando los valores predichos de la temperatura y el contenido de humedad del grano. En el caso de la soja, las condiciones de almacenamiento corresponden a un 70% de humedad relativa, límite inferior para la proliferación de hongos en el granel. Durante el almacenamiento, la migración de humedad hacia los bordes provoca un aumento de este valor hasta un 75% creando una zona de potencial deterioro. En el caso de trigo, dado que la temperatura de almacenamiento es mayor, la humedad relativa intergranaria se mantiene por debajo del 65%, por lo cual no hay riesgo de proliferación de hongos.

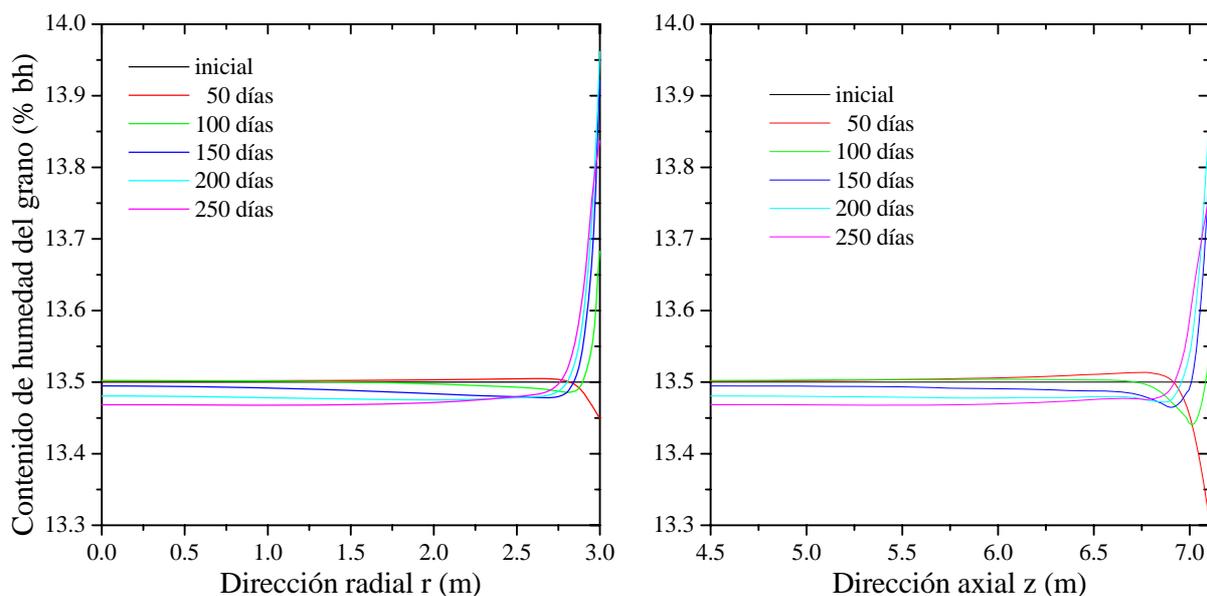


Figura 10: Distribución del contenido de humedad del grano de trigo.
a) dirección radial, para $z = 4.5$ m; b) dirección axial, para $r = 0.0$ m

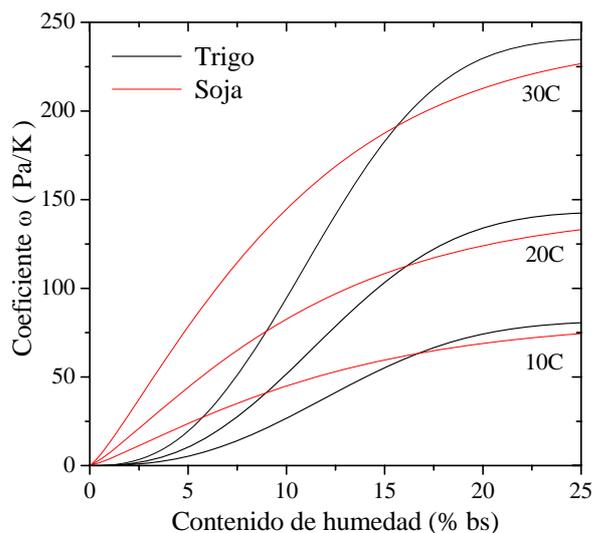


Figura 11: Derivada de la presión parcial del vapor respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, para 10, 20 y 30C.

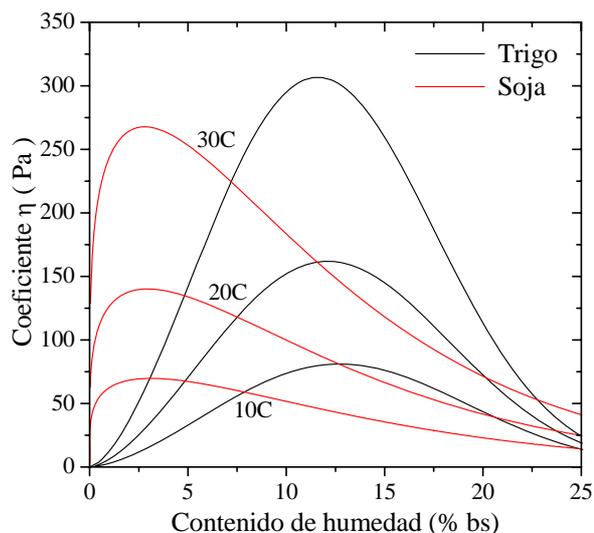


Figura 12: Derivada de la presión parcial del vapor respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, para 10, 20 y 30C.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un modelo bidimensional axisimétrico de transferencia de calor y masa en granos almacenados, para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de la humedad por efecto de las variaciones de las condiciones climáticas estacionales. Este modelo tiene como principal hipótesis el equilibrio sorpcional entre la masa de granos y el aire intergranario.

El modelo fue resuelto mediante el método de elementos finitos y utilizado para analizar el almacenamiento de trigo a 30C y 13.5% bh (15.6% bs) durante 250 días desde el 12 de Diciembre y soja a 20C y 13.0% bh (14.9% bs) durante 200 días desde el 15 de Mayo.

Los resultados de la simulación indican que las capas de granos superficial y cercana a la pared metálica sufren grandes cambios de temperatura siguiendo las fluctuaciones de las

condiciones ambientales con cierto retardo. Hacia el interior del silo los cambios de temperatura decrecen rápidamente y aumenta el tiempo de retardo.

La zona central resulta ser la menos sensitiva, por lo tanto si la temperatura inicial de los granos es alta, difícilmente pueda disminuir por efecto de los cambios ambientales. Será necesario recurrir a la aireación para evitar su deterioro ya que se registran temperaturas superiores a 20C que corresponde al límite inferior de la temperatura para la cual la reproducción de plagas e insectos es factible.

Se observa una mayor migración en el caso del trigo, llegando a registrarse pequeños cambios en toda la masa de granos, mientras que en la soja se encuentran más concentrados en una zona estrecha sobre la pared del silo. Los cambios registrados en el contenido de humedad son del orden de 0.5% bh en ambos casos.

La migración de humedad por acción exclusiva de los gradientes térmicos no provoca una redistribución de la humedad que comprometa el límite de seguridad en el caso del trigo pero sí para el grano de soja.

Para mejorar el modelo de transferencia y masa, debe incorporarse el efecto de las corrientes de convección natural que generan los gradientes de temperatura así como la influencia de la masa de aire sobre la superficie de los granos y el techo del silo.

NOMENCLATURA

r, z	coordenadas cilíndricas (m)
c_a	calor específico del aire (J/kg K)
c_b	calor específico del lecho de granos (J/kg K)
c_g	calor específico del grano (J/kg K)
C_H	constante de la ecuación de Henderson Thompson
D_g	difusividad másica efectiva del grano (m ² /s)
D_v	difusividad del vapor de agua en el aire (m ² /s)
D_{ef}	difusividad efectiva del vapor de agua en el lecho (m ² /s)
$f(W_g, T)$	curva de sorción-desorción
G	radiación solar incidente sobre la superficie del silo (W/m ²)
k_a	conductividad térmica del aire (W/mK)
k_b	conductividad térmica del lecho de granos (W/mK)
k_g	conductividad térmica del grano (W/mK)
K_H	constante de la ecuación de Henderson Thompson
L	longitud característica, raíz cúbica de volumen del silo (m)
L_g	calor de desorción del agua en el grano (J/kg)
M	contenido de humedad del grano (bh, base húmeda, kg / kg grano húmedo)
n	dirección normal
N	constante de la ecuación de Henderson Thompson
p_s	presión de saturación del vapor de agua (Pa)
p_v	presión parcial del vapor de agua en el aire intergranario (Pa)
R_v	constante de vapor de agua, 416.52 J/kgC
t	tiempo (s)
T	temperatura (C)
T_k	temperatura absoluta (K)
T_{amb}	temperatura ambiente (C)
T_{cielo}	temperatura de cielo (C)
T_0	temperatura inicial del lecho de granos (C)
T_{silo}	temperatura en la cavidad superior del silo (C)

V	velocidad del viento (m/s)
W_a	contenido de humedad del aire (bs, base seca, kg / kg aire seco)
W_g	contenido de humedad del grano (bs, base seca, kg / kg grano seco)
W_0	contenido inicial de humedad del grano (bs, base seca, kg / kg grano seco)
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 C$)
α	absortividad del acero galvanizado
ε	porosidad (m^3 de aire/ m^3 de lecho)
ξ	emisividad del acero galvanizado
τ	tortuosidad del lecho de granos
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$
η	cambio de p_v respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, (Pa)
ω	cambio de p_v respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, (Pa/K)
Γ	frontera del dominio de cálculo
ρ_a	densidad del aire húmedo (kg/m^3)
ρ_{as}	densidad del aire seco (kg/m^3)
ρ_b	densidad del lecho de granos (kg/m^3)
ρ_g	densidad de grano húmedo (kg/m^3)
ρ_{gs}	concentración de sólidos en el grano (kg grano seco / m^3 (volumen grano húmedo))
ρ_{gs0}	densidad de grano seco (kg grano seco / m^3 (volumen grano seco))

REFERENCIAS

- S. K. Abbouda, D. S. Chung, P. A. Seib y A. Song. Heat and mass transfer in stored milo. Part I: Heat transfer model. *Trans. of ASAE*, 35(5): 1569-1573, 1992a.
- S. K. Abbouda, D. S. Chung, P. A. Seib y A. Song. Heat and mass transfer in stored milo. Part II: Mass transfer model. *Trans. of ASAE*, 35(5): 1575-1580, 1992b.
- T. Abe y M. A. Basunia. Simulation of temperature and moisture content changes during storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. *J. Agric. Engng. Res.*, 65: 223-233, 1996.
- ASAE Standards D241.4. *Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage* American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA, 2003a.
- ASAE Standards D243.4. *Thermal Properties of Grain and Grain Products*. American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA, 2003b.
- E. Andrade, S. M. Couto, D. Queiroz y L. Faroni. Three dimensional simulation of the temperatura variation in corn stored in metallic bin. *ASAE Annual Meeting*. Paper N°02-3150, 2002.
- K. Alagusundaram, D. S. Jayas, N. D. G. White y W. E. Muir. Three dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 33(2): 577-584, 1990.
- D. Brooker, F. W. Bakker-Arkema y C. W. Hall. *The Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, Avi Book, New York, 1992.
- M. E. Casada, F. H. Arthur y H. Akdogan. Temperature monitoring and aeration strategies for stored wheat in the central plains. *ASAE Annual Meeting*. Paper N°02-6116, 2002.
- C. S. Chang, H. Converse y J. L. Steele. Modeling of temperature of grain during storage with aeration. *Trans. of ASAE*, 36(2): 509-519. 1993.
- C. S. Chang, H. Converse y J. L. Steele. Modeling of moisture content of grain during storage with aeration. *Trans. of ASAE*, 37(6): 1891-1898, 1994.
- J. Duffie y W. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 1980.

- S. A. Giner, R. H. Mascheroni y M. N. Nellist. Cross flow drying of wheat. A simulation program with a diffusion-based deep-bed model and kinetic equation for viability loss estimations. *Drying Technology*, 14(7&8): 1625-167, 1996.
- S. A. Giner. Diseño de secadoras continuas de trigo. Simulación de la transferencia de calor y materia y pérdida de calidad. *Tesis Doctoral*. Depto de Ingeniería Química. UNLP, 1999.
- K. Haghighi y L. Segerlind. Modeling simultaneous heat and mass transfer in an isotropic sphere. A finite element approach. *Transactions of the ASAE*, 31(2): 629-237, 1988.
- A. Iguaz, C. Arroqui, A. Esnoz y P. Vírveda. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration. *Biosystem Engineering*, 88(4): 429-439, 2004a.
- A. Iguaz, C. Arroqui, A. Esnoz y P. Vírveda. Modelling and simulation of heat transfer in stored rough rice with aeration. *Biosystem Engineering*, 89(1): 69-77, 2004b.
- M. Iqbal. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, 1983.
- D. S. Jayas, K. Alagusundaram, G. Shunmugam, W. E. Muir y N. D. G. White. Simulated temperatures of stored grain bulks. *Canadian Agric. Eng.*, 36(4), 239-245, 1994.
- C. Jia, D. W. Sun y C. Cao. Finite element prediction of transient temperature distribution in a grain storage bin. *J. Agric. Eng. Res.*, 76: 323-330, 2000a.
- C. Jia, D. W. Sun y C. Cao. Mathematical simulation of temperature fields in a stored grain bin due to internal heat generation. *J. Food. Engineering*, 43: 227-233, 2000b.
- S. Jiang y J. C. Jofriet. Finite element Prediction of Silage Temperature in Tower Silo. *Trans. of ASAE*, 30(6): 1744-1750, 1987.
- S. Jiang, D. S. Jayas, N. D. G. White y K. Alagusundaram. A three-dimensional, asymmetric, and transient model to predict grain temperatures in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 48(1): 263-271, 2005.
- H. Jiménez-Islas, J. Navarrete-Bolaños y E. Betello-Alvarez. Estudio numérico de la convección natural de calor y masa 2D en granos almacenados en silos cilíndricos. *Agrociencia*, 38: 325-342, 2004.
- K. K. Khankari, R. V. Morey y S. V. Patankar. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. *Trans. of ASAE*, 37(5): 1591-1604, 1994.
- K. K. Khankari, S. V. Patankar y R. V. Morey. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, 38(6): 1777-1787, 1995a.
- K. K. Khankari, R. V. Morey y S. V. Patankar. Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, 38(6): 1789-1804, 1995b.
- F. Kreith. *Principles of Heat Transfer*. P.A. International Textbook Co, Scranton, PA, 1973.
- R. B. Keey. *Drying Principles and Practice*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- A. F. Mills. *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin, 1995.
- D. M. Montross, D. E. Maier y K. Haghighi. Development of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1455-1464, 2002a.
- D. M. Montross, D. E. Maier y K. Haghighi. Validation of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1465-1474, 2002b.
- M. E. Nellist. Modelling the performance of a cross-flow grain drier. *J. Agric. Eng. Res.*, 37(1): 43-57, 1987.
- S. Rahman. *Food Properties Handbook*. CCR Press, USA, 1995.
- A. K. Singh, E. Leonardi y G. R. Thorpe. A solution procedure for the equations that govern three-dimensional free convection in bulk stored grains. *Trans. of ASAE*, 36(4): 1159-1173, 1993.
- G. R. Thorpe. Moisture diffusion through bulk grain. *J. Stored Products. Res.*, 18: 9-12, 1980.