

## EFFECTO DE LA CONVECCIÓN NATURAL EN LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y MIGRACIÓN DE HUMEDAD EN GRANOS ALMACENADOS EN SILOS

Ulises Balzi<sup>a</sup>, Analía Gastón<sup>a,b</sup> Rita Abalone<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Av. Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina, [ubalzi@terniumsiderar.com](mailto:ubalzi@terniumsiderar.com)

<sup>b</sup>Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario, [analiag@fceia.unr.edu.ar](mailto:analiag@fceia.unr.edu.ar),  
<sup>c</sup>Instituto de Física Rosario (FCA-CONICET-UNRosario), 27 de Febrero 210 bis, 2000 Rosario, Argentina, [rabalone@fceia.unr.edu.ar](mailto:rabalone@fceia.unr.edu.ar)

**Palabras claves:** Almacenamiento de granos, Transferencia de momento, energía y materia, Simulación numérica.

**Resumen.** En este trabajo se analizó el efecto de la convección natural en la distribución de temperatura y migración de la humedad en una masa de granos almacenados en un silo cilíndrico de base plana debido a los gradientes térmicos generados por las variaciones de las condiciones climáticas estacionales, durante períodos sin aireación. Se consideró al granel como un medio poroso isotrópico saturado con un fluido newtoniano. El flujo se modeló con la ecuación de Darcy y se utilizó la aproximación de Boussinesq, que considera constante a la densidad del aire en los balances de masa y energía, pero variable en el término de fuerzas volumétricas de la ecuación de momento. Se empleó la definición de la función corriente para satisfacer la ecuación de continuidad y el sistema de ecuaciones resultante fue resuelto por el método de elementos finitos. Las simulaciones numéricas se realizaron para el almacenamiento de trigo durante el período verano - invierno (de Enero a Julio) en un silo de 10.6 m de diámetro con una altura de grano de 13 m. Estas dimensiones son representativas de silos que se emplean en acopios de granos en la zona de agrícola de Rosario. Se emplearon valores promedio de la temperatura ambiente, de radiación solar incidente sobre el silo y del viento, para calcular los patrones de flujo, distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado. Se analizó el efecto de la temperatura de almacenamiento y de la permeabilidad del grano. El análisis de los resultados permitió definir condiciones de almacenabilidad durante el período analizado que contribuyan a definir estrategias de manejo. Los resultados numéricos obtenidos para trigo son consistentes con mediciones de campo y resultados numéricos disponibles en la literatura.

## 1 INTRODUCCION

La metodología empleada para reducir los riesgos de deterioro de los granos almacenados en silos convencionales es enfriarlos 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 pérdida de materia seca ligada a los procesos respiratorios, el desarrollo de insectos, hongos y micotoxinas son factores muy importantes que afectan la calidad de los granos y dependen fuertemente de la temperatura y la humedad de los mismos durante el almacenamiento.

La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el deterioro potencial y las condiciones de almacenabilidad basadas en las características climáticas de cada zona agrícola en particular. El costo de ensayos a campo con una gran variedad de condiciones resultan económicamente inviables.

Una revisión de los modelos publicados para analizar la transferencia de energía, masa y momento en sistemas de almacenamiento de granos puede consultarse en [Navarro y Noyes \(2002\)](#). 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 emplean condiciones de contorno simplificadas en el análisis. [Montross et al. \(2002b, a\)](#) y [Montross y Maier \(2001\)](#) incluyen las fluctuaciones diarias y estacionales de las condiciones climáticas, para cuantificar las diferencias que se obtiene en las predicciones al considerar condiciones de contorno realistas. Además, aunque en forma simplificada, extiende el modelo a los casos de convección forzada para analizar períodos de aireación de los granos.

Son escasas las referencias bibliográficas sobre la modelización del almacenamiento de granos para las condiciones climáticas características del hemisferio sur ([Andrade et al., 2002](#); [Sinicio y Muir, 1998](#); [1996](#)) y no existen para la zona agrícola argentina. Dada la relevancia económica que tiene la producción de granos en Argentina es importante implementar los modelos de simulación mencionados que contribuyan a definir estrategias de almacenaje seguro en silos convencionales y silos-bolsa basadas en el análisis de los procesos de transferencia de energía, masa y momento.

Con este objetivo, se avanzó en la modelización incorporando los efectos de la convección natural y la respiración de los granos al modelo previamente desarrollado por [Abalone et al., \(2006\)](#) para predecir los patrones de flujo, distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado durante los períodos sin aireación.

El modelo fue resuelto por el método de elementos finitos y aplicado para evaluar la evolución de la temperatura y la migración de humedad de trigo ensilado durante el período verano-invierno (de Enero a Julio) para las condiciones climáticas de la zona de Rosario.

## 2 MODELO MATEMATICO

Se considera al granel como un medio poroso isotrópico saturado con un fluido newtoniano con propiedades de transporte efectivas, resultado del promedio ponderado de las propiedades termodinámicas del sólido y del fluido (**Promedio Volumétrico** ([Whitaker, 1977](#); [Slattery, 1972](#))). Los granos presentan valores de permeabilidad  $K$  del orden de  $10^{-8}$  m<sup>2</sup> ([Singh y Thorpe, 1993](#)) resultando el número de Darcy  $Da$  del orden de  $10^9$  y el rango del número de Rayleigh  $Ra \approx 10$ -100. En consecuencia, los efectos inerciales y viscosos son pequeños en comparación con los efectos de presión y fuerzas de flotación en la ecuación de momento ([Nield y Bejan, 1999](#)), por lo que el flujo se modela con la ecuación de Darcy,

empleando la aproximación de Boussinesq, que considera a la densidad constante, excepto en el término de fuerzas volumétricas.

Por otro lado se consideró que en cada punto del lecho el aire intersticial se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos y que el cambio de volumen del lecho por encogimiento es despreciable, manteniéndose constante la porosidad.

El análisis se realizó para una simetría axial.

## 2.1 Balance de momento, energía y materia

Las ecuaciones que gobiernan los procesos de transporte son las ecuaciones de continuidad, momento, energía y materia. Planteando los balances para las fases grano y aire intersticial en un volumen de control se obtienen las ecuaciones para un medio efectivo:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\mu}{K} v_r = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

$$\frac{\mu}{K} v_z = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_0 g [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

$$\rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a c_a \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_b \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r k_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + \rho_b L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H \frac{d Y_{CO_2}}{dt} \quad (4)$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} + \frac{\eta \cdot}{R_v \cdot T_k} \left[ \left( v_r \frac{\partial W_g}{\partial r} \right) + \left( v_z \frac{\partial W_g}{\partial z} \right) \right] = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_M \frac{\partial W_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r D_M \frac{\partial W_g}{\partial z} \right) \right\} + \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\omega}{R_v T_k} \left[ \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left( v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \rho_{bs} q_w \frac{d Y_{CO_2}}{dt} \quad (5)$$

donde:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \rho_g + \varepsilon \rho_a \approx \rho_{bs} (1 + W_g) \quad (6)$$

$$k_b = (1 - \varepsilon) k_g + \varepsilon k_a \quad (7)$$

$$D_M = D_{ef} \eta \quad (8)$$

$$D_T = D_{ef} \omega \quad (9)$$

$$D_{ef} = \frac{D_v \varepsilon}{R_v \tau T_k} \quad (10)$$

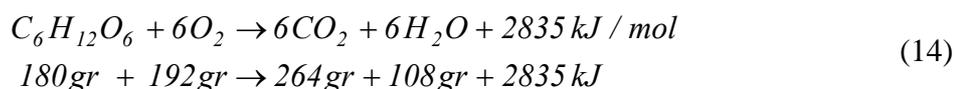
$$\eta = \frac{\partial f}{\partial W_g} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{\partial f}{\partial T} \quad (12)$$

$$p_v = f(W_g, T) = p_s \left\{ 1 - \exp \left[ -K_H (C_H + T) (100W_g)^N \right] \right\} \quad (13)$$

La ecuación de continuidad (1) representa la conservación de la masa de aire en el volumen de control; la ecuación (2) y (3) la componente radial y axial de la ley de Darcy.

La ecuación (4) representa el balance de energía en la cual los últimos términos dan cuenta de la energía necesaria para evaporar el agua en la masa de granos y el calor generado en los procesos metabólicos de respiración (oxidación de la hexosa):



La ecuación (5) representa el balance de contenido de humedad. La masa de granos actúa como una fuente o sumidero de vapor de agua que es transportado por conducción y convección a través del espacio intersticial. Esta fuente/sumidero está vinculada con la condición de equilibrio sorpcional entre el grano y el aire. Una deducción detallada de las ecuaciones de balance considerando sólo el transporte difusivo fue presentado en [Abalone et al. \(2006\)](#). El último término de la ecuación representa el aporte de humedad generada en los procesos metabólicos de respiración (ecuación (14)).

La ecuación (10) define la difusividad efectiva del vapor de agua a través del lecho de granos ([Keey, 1975](#)). La ecuación (13) es la relación de sorpción-desorción de Henderson-Thompson ([Brooker et al., 1992](#)) que vincula la presión de vapor  $p_v$  del aire intersticial con el contenido de humedad de grano  $W_g$ .

## 2.2 Condiciones iniciales y de contorno

Las ecuaciones de transporte tienen asociadas las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

$$T(r, z, t=0) = T_0(r, z) \text{ en } \Omega \quad (15)$$

$$W_g(r, z, t=0) = W_0(r, z) \text{ en } \Omega \quad (16)$$

$$\bar{n} \cdot \bar{v} = 0 \text{ en } \Gamma \quad (17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ en } \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (18)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{eq} (T - T_{amb}) - \alpha G + \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \text{ en } \Gamma_3 \quad (19)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c4} (T - T_{silo}) \text{ en } \Gamma_4 \quad (20)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \text{ en } \Gamma \quad (21)$$

Sobre la pared lateral del silo se consideraron las pérdidas por convección y radiación al medio ambiente así como la radiación solar incidente  $G$  (ecuación (19)).

Por simplicidad, se consideró que la superficie de los granos intercambia energía por convección con el aire de la cavidad superior del silo (ecuación (20)), desacoplando los balances de energía, materia y cantidad de movimiento del aire de esta cavidad así como la interacción con el techo del silo. Las ecuaciones (17) y (21) implican que la masa ensilada es hermético a la transferencia de masa.

### 2.3 Definición de la función de Corriente

Introduciendo la definición de la función de corriente  $\Psi$ :

$$v_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (22)$$

$$v_z = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (23)$$

se satisface la ecuación de continuidad (1). Reemplazando esta definición en las ecuaciones (2) y (3) se deriva la ecuación para la función de corriente:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\frac{K}{\mu} g \rho_0 \beta \frac{\partial T}{\partial r} \quad (24)$$

donde la condición de impermeabilidad (17) se expresa mediante:

$$\Psi = 0 \quad \text{en } \Gamma \quad (25)$$

### 2.4 Solución numérica

La resolución numérica del sistema acoplado formado por las ecuaciones (4), (5) y (24) con sus correspondientes condiciones iniciales ((15) y (16)) y de contorno ((18) a (21) y (25)) se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando COMSOL Multiphysics 3.4. La discretización del dominio se realizó con una densificación en la zona cercana superficie del grano y en la pared del silo. Se emplearon elementos Lagrangianos triangulares cuadráticos y un esquema de integración de cuatro puntos de Gauss.

## 3 RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó el modelo para analizar la variación de la temperatura y la migración de la humedad ocasionadas por los cambios climáticos en trigo almacenado durante 210 días desde el 1 de Enero con las siguientes condiciones: humedad inicial 13.5% bh (base húmeda; 15.6% bs, base seca) y temperatura de almacenamiento 15, 20, 25, 30 y 35°C.

Se consideró un silo de diámetro  $D = 10.6$  m con una altura  $H$  de grano de 13m (razón de aspecto  $2H/D \sim 2.5$ ). Estas dimensiones son representativas de silos que se emplean en acopios de granos en la zona agrícola de Rosario.

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  $G$  sobre la pared lateral.

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, de la 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.

La Figura 1 muestra la geometría y dominio de cálculo.

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

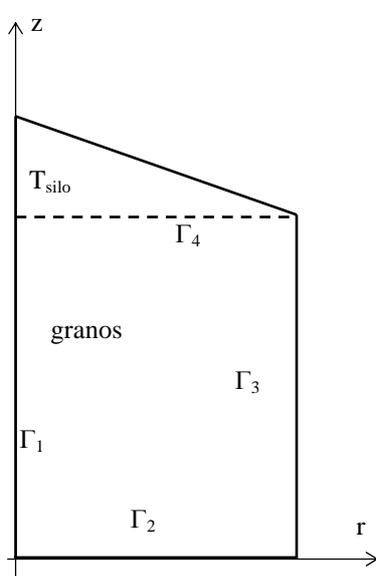


Figura 1: Dominio de cálculo

Coef. de trans. de calor [W/m <sup>2</sup> C] (Duffie y Beckman, 1980)	$h_{c3} = 8.6 \frac{V^{0.6}}{L^{0.4}}$
Coef. de trans. de calor [W/m <sup>2</sup> C] (Alagusundaram et al., 1990)	$h_{c4} = 1$
Conductancia de la carcasa (Kreith, 1965)	$h_{silo} = 2 \cdot 10^4 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
Conductancia equivalente [W/m <sup>2</sup> K]	$h_{eq} = (h_{c3}^{-1} + h_{silo}^{-1})^{-1}$
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

En la Figura 2 se grafica la temperatura media del grano obtenida con el modelo conductivo (Abalone et al., 2006) y el que incluye transporte convectivo para valores de la permeabilidad  $K_1 = 5.96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  (Khankari et al., 1995b) y  $K_2 = 2K_1 = 11.92 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  a fin de considerar la variabilidad que presenta en general este parámetro en las diferentes variedades de granos (maíz  $K = 3.5\text{-}16.1 \cdot 10^{-9}$ , soja  $K = 18.5 \cdot 10^{-9}$ ).

Globalmente el efecto de la convección no es muy significativo en el enfriamiento global del trigo almacenado. Para la  $T_i = 35^\circ\text{C}$  y  $K_2$  recién comienza a manifestarse en los últimos meses fríos (Julio y Agosto). A  $25^\circ\text{C}$  el efecto convectivo casi no se manifiesta. Para temperaturas menores a  $20^\circ\text{C}$ , durante los meses de verano el calentamiento que producen las condiciones climáticas es levemente mayor por el efecto convectivo. El almacenamiento a  $15^\circ\text{C}$  representa una temperatura óptima ya que evita el desarrollo de insectos. En este caso la temperatura media crece hasta  $21^\circ\text{C}$  alcanzando condiciones de riesgo. En todos los casos será necesario recurrir a la aireación porque las condiciones climáticas no alcanzan a enfriar el

grano naturalmente o mantenerlo en condiciones seguras de almacenamiento (temperaturas inferiores 18°C evitan el desarrollo de insectos).

Densidad del lecho de trigo [kg/m <sup>3</sup> ] (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 (13) [Pa] (Brooker et al., 1992)	$K_H = 2.31 \cdot 10^{-5} ; C_H = 55.813 ; N = 2.2857$
CO <sub>2</sub> producidos en la respiración del trigo [mg CO <sub>2</sub> /kg materia seca en 24 hs] (White et al., 1982)	$Y_{CO_2} = 10^{RCO_2}$ $\log RCO_2 = -4.054 + 0.0406T -$ $0.0165\theta + 0.0001\theta^2 + 0.2389M$ $\theta = \text{tiempo de almacenamiento (días)}$
Tortuosidad (Keey, 1975)	$\tau = 1.53$

Tabla 2: Propiedades de los granos y lecho de trigo

Difusividad del vapor de agua [m <sup>2</sup> /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

Con los valores medios de la temperatura y del contenido de humedad del grano se determinó la humedad relativa de equilibrio del aire intersticial (ERH) empleando la relación de Henderson Thompson. La Figura 3 muestra la evolución de la ERH para la temperatura inicial de 35°C que representa la condición de almacenamiento más desfavorable. El valor se mantiene por debajo del 67.5%, inferior al umbral para el desarrollo de hongos de 75%. Para un dado contenido de humedad, la ERH disminuye con la temperatura por lo cual para las temperaturas de almacenamiento inferiores los riesgos de desarrollo de hongos serán aún menores.

Los resultados anteriores corresponden a condiciones globales de almacenamiento. Localmente dentro del silo se generan zonas de deterioro más críticas. A continuación se presentan los patrones de flujo, distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado que permiten identificar estas zonas para los casos extremos de temperatura de inicial de almacenamiento y el valor de permeabilidad  $K_I = 5.96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ .

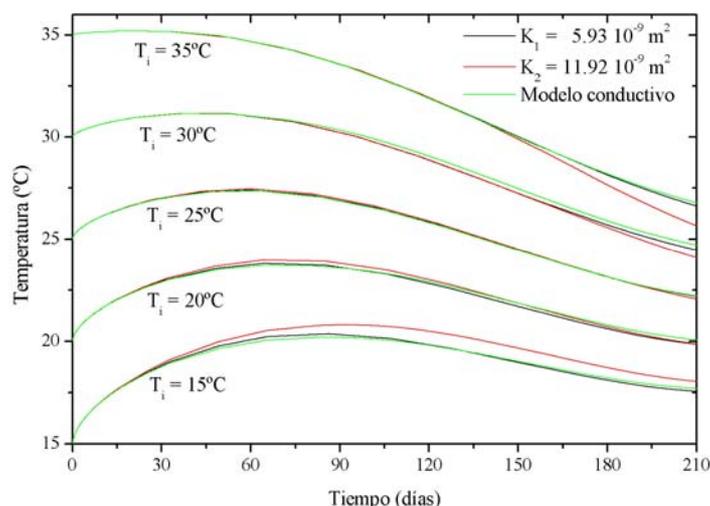


Figura 2 Comparación de la temperatura media de grano predicha con un modelo conductivo ( $K=0$ ) y el modelo convectivo para distintas temperaturas iniciales de almacenamiento

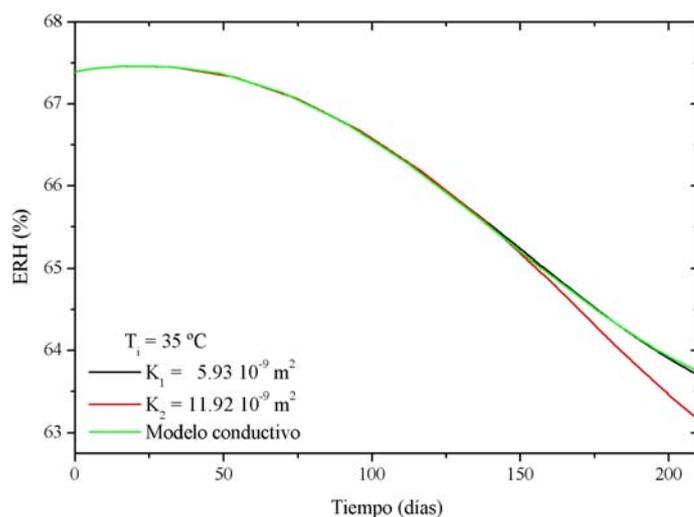


Figura 3 Comparación de la humedad de relativa de equilibrio (ERH) predicha con un modelo conductivo ( $K=0$ ) y el modelo convectivo para la temperatura inicial de almacenamiento de  $35^\circ\text{C}$

La Figura 4a muestra la distribución de la función de corriente al cabo de algunos meses para  $T_i = 35^\circ\text{C}$  (un valor positivo de la función de corriente corresponde a una circulación en sentido horario). Al cabo de un mes (fin de Enero) se establece una circulación en sentido antihorario con un valor máximo de la función de corriente de  $\psi_{\max} = -2.2 \text{ m}^3/\text{d}$  y de la velocidad vertical  $v_z = 0.8 \text{ m/d}$  sobre la pared lateral. A mediados de febrero se observan dos celdas con sentidos opuesto de circulación, característico de la etapa de inversión que se completa en Marzo ( $\psi_{\max} = 3.7 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $v_z = -2.4 \text{ m/d}$ ). Al final del mes de Julio las corrientes alcanzan los valores máximos ( $\psi_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $v_z = -12.3 \text{ m/d}$ ).

La Figura 4b muestra la distribución de isoterma. Los gradientes de temperatura se concentran sobre la pared lateral y en la superficie de los granos. Al cabo de un mes (fin de Enero) el aumento de temperatura es sólo del orden de  $1^\circ\text{C}$  sobre la pared lateral, porque la temperatura inicial es elevada. El efecto de la convección natural en sentido antihorario se manifiesta en la distribución de las isoterma de la capa superior. A fines del mes de Julio la convección natural logra enfriar unos pocos grados la parte inferior del silo. Condiciones

favorables para el desarrollo de insectos se mantienen en la zona central ( $r < 4\text{m}$ ;  $0\text{m} < z < 12\text{m}$ ).

La Figura 4c muestra la distribución del contenido de humedad de los granos. La migración de humedad predicha incluyendo el efecto de las corrientes de convección natural no provoca una redistribución que comprometa el límite de seguridad en relación al desarrollo de hongos ya que la humedad de equilibrio (ERH) resulta en todo el silo inferior al 75%. La migración de humedad es del orden de 0.5% bh. A fin de Julio se observa una leve disminución en la parte inferior y una acumulación en la superior, característico del período invernal.

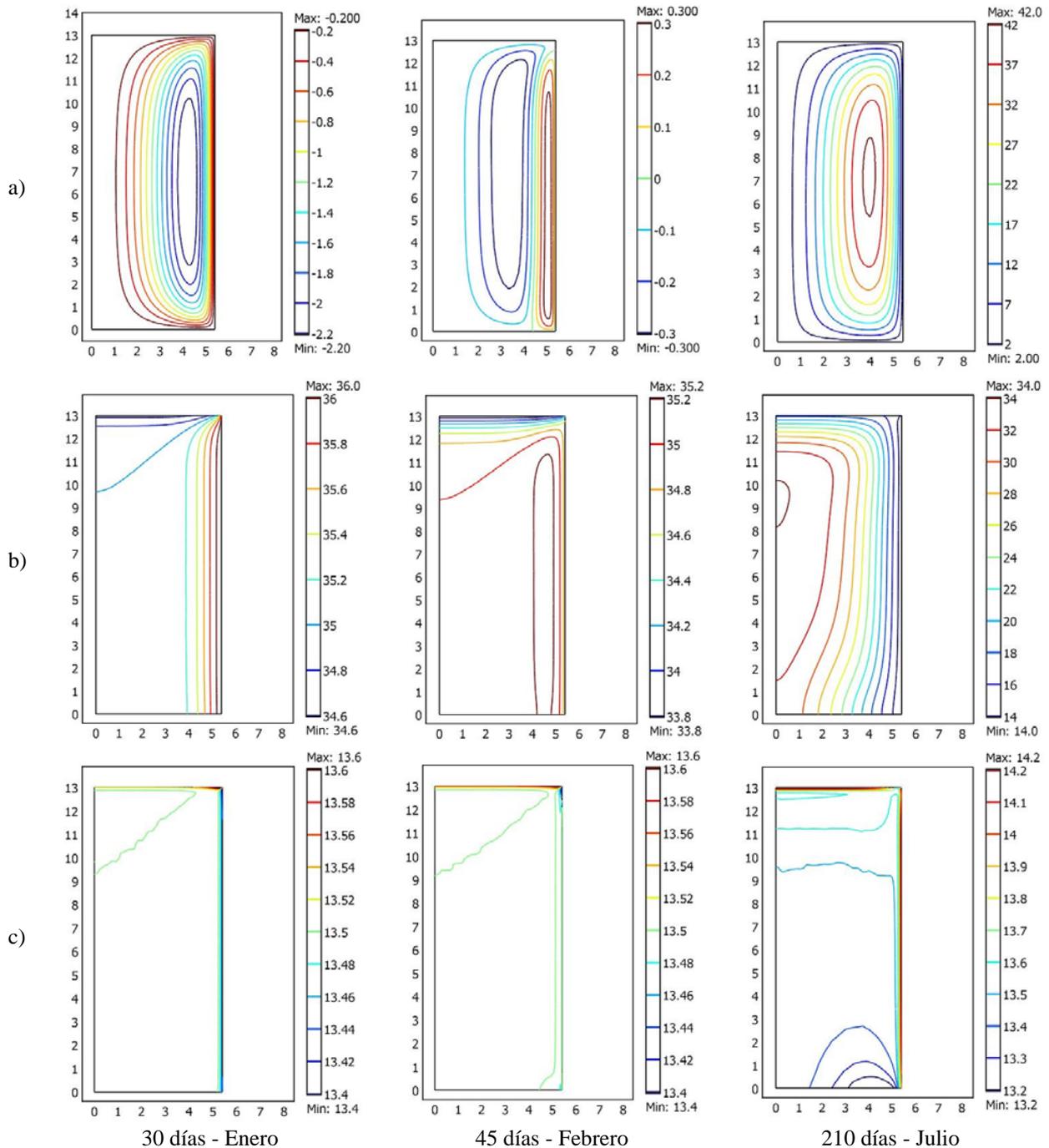


Figura 4: Valores predichos para trigo almacenado a 35°C y 13.5% b.h y  $K_1 = 5.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .  
 (a) Función de corriente; (b) Temperatura; (c) Contenido de humedad % bh

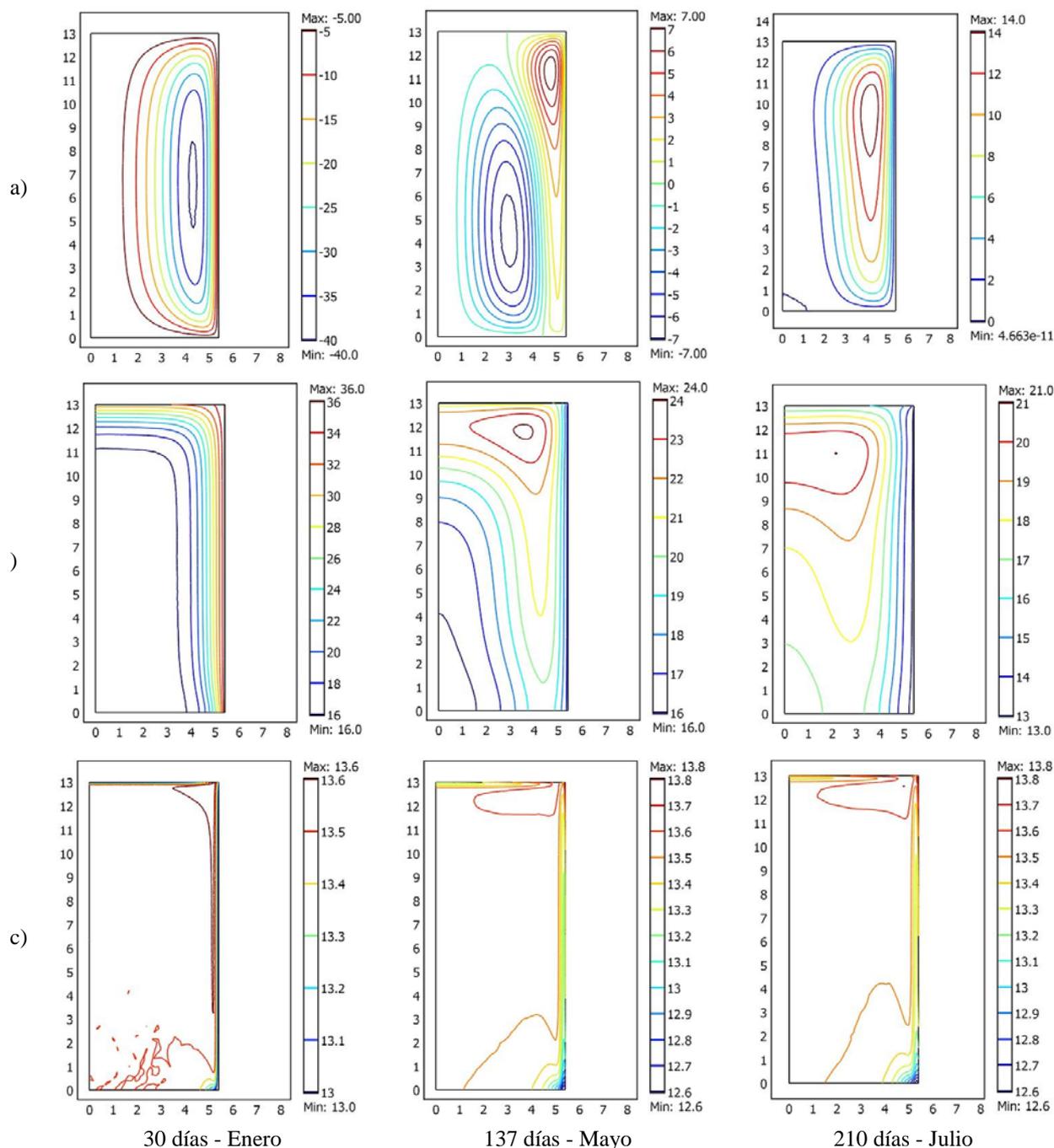


Figura 5: Valores predichos para trigo almacenado a  $15^{\circ}\text{C}$  y 13.5% b.h y  $K_1 = 5.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .  
(a) Función de corriente; (b) Temperatura; (c) Contenido de humedad % bh.

Un aumento en un factor 10 en el valor de la permeabilidad incrementa los valores máximos al final del mes de Julio a  $\psi_{\text{max}} = 195 \text{ m}^3/\text{d}$ , provocando una migración que aumenta el contenido de humedad de la zona superior del silo por encima del 17% bh. (ERH > 75%) convirtiendo la zona en foco propicio para el desarrollo de hongos.

La Figura 5 resume los resultados para  $T_i = 15^{\circ}\text{C}$ . Esta condición inicial sólo podría alcanzarse en verano sometiendo al grano a un proceso aireación con aire acondicionado con equipos de refrigeración, práctica de poca aplicación en nuestro país por el alto costo involucrado. El análisis siguiente permite evaluar por cuanto tiempo perdura esta condición

adecuada de almacenamiento.

La Figura 5a muestra la distribución de la función de corriente. De Enero a Mayo la convección natural es en sentido antihorario. Los valores máximos de la función de corriente se producen durante el primer mes. La menor temperatura de almacenamiento y la radiación solar sobre la superficie lateral incrementan el gradiente de temperatura en dirección radial aumentando la fuerza impulsora de las corrientes de convección ( $\psi_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $v_z = -16.4 \text{ m/d}$ ). Durante el mes de Mayo se produce el proceso de inversión del flujo, pero a fin de Julio las corrientes desarrolladas son menores ( $\psi_{\max} = 14 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $v_z = -5.0 \text{ m/d}$ ).

En la Figura 5b se puede apreciar que al cabo del primer mes una capa de aproximadamente 1m de espesor pegada a la chapa metálica sufre un aumento del orden de  $15^\circ\text{C}$  por efecto de la radiación. La convección natural en sentido antihorario favorece el calentamiento de masa de granos en la zona superior del silo. Durante la etapa de inversión del flujo esta zona y una capa longitudinal entre  $4\text{m} < r < 5\text{m}$  se mantiene por encima del  $18^\circ\text{C}$ . A fines de Julio la parte inferior del silo se enfría por debajo del  $16^\circ\text{C}$  por efecto de la convección pero persiste el núcleo caliente en la parte superior. Estos resultados muestran que será necesario recurrir a la aireación a pesar del enfriamiento inicial.

La Figura 5c muestra que la migración de humedad es menor que para  $T_i = 35^\circ\text{C}$ . Esto se debe a que los coeficientes  $\eta$  y  $\omega$  que afectan los términos de transporte difusivo y convectivo disminuyen con la temperatura como se muestra en las Figura 6 y Figura 7.

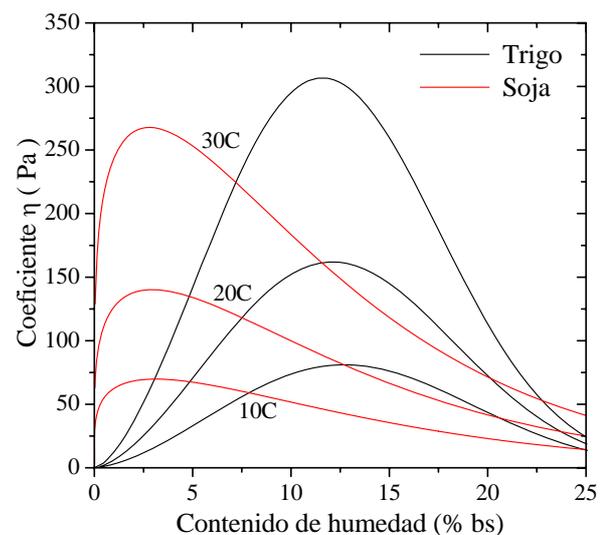
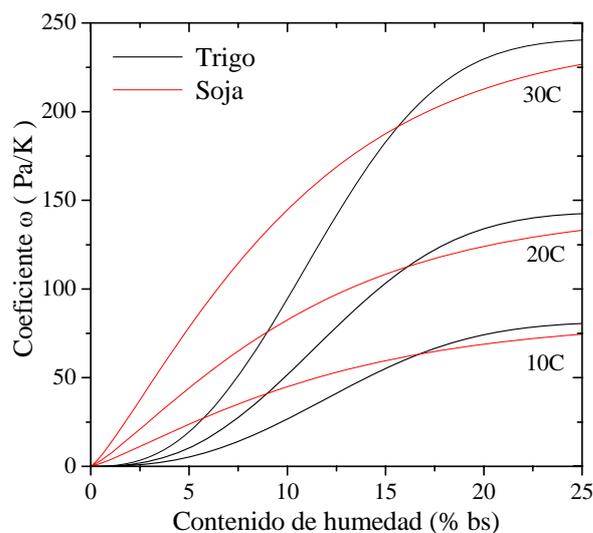


Figura 6: Derivada de la presión parcial del vapor respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, para 10, 20 y  $30^\circ\text{C}$ .

Figura 7: Derivada de la presión parcial del vapor respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, para 10, 20 y  $30^\circ\text{C}$ .

#### 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un modelo bidimensional axisimétrico de transferencia de calor, masa y momento en granos almacenados. Permite predecir la evolución de la distribución de temperatura, la migración de la humedad y la humedad relativa de equilibrio del aire intergranario como consecuencia de la variación de las condiciones climáticas estacionales.

El modelo fue resuelto mediante el método de elementos finitos y utilizado para analizar el almacenamiento de trigo a 13.5% bh (15.6% bs) con temperaturas iniciales en el rango de 15 a  $35^\circ\text{C}$ , durante 210 días en el período verano-invierno.

En el caso particular del trigo, debido a la baja permeabilidad, la evolución de los valores

promedio de la temperatura, contenido de humedad y humedad relativa de equilibrio intergranario obtenidos considerando las corrientes de convección natural no difieren significativamente de los obtenidos con un modelo de transporte conductivo. Estos valores globales generalmente se emplean para evaluar parámetros de calidad como son la pérdida de materia seca, tiempo de almacenamiento seguro, desarrollo de colonias de insectos, etc.

Localmente, para el rango de temperaturas de almacenamiento entre 20-35°C el enfriamiento natural es insuficiente para llevar al grano por debajo de los 18°C siendo necesario recurrir a la aireación. En el caso de partir con un grano acondicionado a 15°C al cabo del primer mes la zona periférica registra un aumento del orden de 15°C y si bien sobre el final del invierno el grano se enfría, en la zona superior persiste una zona caliente por encima de los 18°C. Esto indica que será necesario una aireación adicional.

En todos los casos la migración de humedad no provoca una redistribución de la humedad que comprometa el límite de seguridad (humedad relativa intergranaria (ERH) > 75%). Los cambios registrados en el contenido de humedad son del orden de 0.5% bh.

El valor de la permeabilidad es el factor que más influye en la migración. Un aumento en un factor 10 puede producir una acumulación de humedad en la zona superior llegando a contenidos del orden del 17%, cuando el grano inicialmente se almacena con la humedad de recibo o comercialización del 13.5% bh.

## 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
$Da = \frac{K}{R^2}$	Número de Darcy
$D_g$	difusividad másica efectiva del grano (m <sup>2</sup> /s)
$D_v$	difusividad del vapor de agua en el aire (m <sup>2</sup> /s)
$D_{ef}$	difusividad efectiva del vapor de agua en el lecho (m <sup>2</sup> /s)
$f(W_g, T)$	curva de sorpción-desorción
$G$	radiación solar incidente sobre la superficie del silo (W/m <sup>2</sup> )
$H$	altura del lecho de granos
$h_c$	coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m <sup>2</sup> K)
$h_{silo}$	conductancia de la carcaza del silo (W/m <sup>2</sup> K)
$k_a$	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
$K$	permeabilidad del lecho de granos (m <sup>2</sup> )
$L$	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)

$q_H$	calor liberado en el proceso de respiración, 10.738 J/mg CO <sub>2</sub> producidos
$q_w$	vapor de agua generado en el proceso de respiración, 4.09 10 <sup>-5</sup> kg H <sub>2</sub> O/mg CO <sub>2</sub> producidos
$R$	radio del silo (m)

$$Ra = \frac{K \rho \beta g}{\mu \alpha_{eff}} (T_H - T_C) R = Ra_{fl} Da \quad \text{número de Rayleigh del medio poroso}$$

$$Ra = \frac{K \rho \beta g}{\mu \alpha_{eff}} (T_H - T_C) R^3 \quad \text{número de Rayleigh del fluido}$$

$R_v$	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)
$v_r, v_z$	componentes $r$ y $z$ de la velocidad del aire a través del lecho (m/s)
$V$	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)
$Y_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> producidos en la respiración del trigo (mg CO <sub>2</sub> /kg materia seca en 24 hs)

$\alpha$  absortividad del acero galvanizado

$$\alpha_{eff} = \frac{k_b}{\rho_a c_a} \quad \text{difusividad efectiva del medio poroso}$$

$\beta$  coef. de expansión térmica del aire (°C<sup>-1</sup>)

$\varepsilon$  porosidad (m<sup>3</sup> de aire/ m<sup>3</sup> de lecho)

$\xi$  emisividad del acero galvanizado

$\tau$  tortuosidad del lecho de granos

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann, 5.6697 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>

$\eta$  cambio de  $p_v$  respecto al contenido de humedad, a T constante, (Pa)

$\omega$  cambio de  $p_v$  respecto a la temperatura, a W constante, (Pa/K)

$\Gamma$  frontera del dominio de cálculo

$\Psi$  función de corriente (m<sup>3</sup>/s)

$\rho_a$  densidad del aire húmedo (kg/m<sup>3</sup> de aire)

$\rho_b$  concentración de grano húmedo en el lecho de granos (kg/m<sup>3</sup> de lecho)

$\rho_g$  densidad de grano húmedo (kg /m<sup>3</sup> de grano)

$\rho_{bs}$  concentración de grano seco en el lecho de granos (kg grano seco /m<sup>3</sup> de lecho)

$\mu$  viscosidad del aire (kg/ms)

## REFERENCIAS

R. M. Abalone, A. Gastón, A. Cassinera y M. A. Lara. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica computacional* Vol.

- XXV, 233-247, 2006.
- E. Andrade, S. M. Couto, D. Queiroz y L. Faroni. Three dimensional simulation of the temperature 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.
- 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.
- A. Iguaz, C. Arroqui, A. Esnoz y P. Vírseda. 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. Vírseda. 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.
- S. Jiang y J. C. Jofriet. Finite element Prediction of Silage Temperature in Tower Silo. *Trans. of ASAE*, 30(6): 1744-1750, 1987.
- 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 y D. E. Maier. A new equilibrium theory to predict moisture movement in a non-aerated grain mass. *ASAE Annual Meeting*. Paper N° 01-6110, 2001.
- D. M. Montross, D. E. Maier y K. Haghghi. 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. Haghghi. Validation of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1465-1474, 2002b.
- S. Navarro y R. Noyes. *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*, CRC Press, (2002).
- M. E. Nellist. Modelling the performance of a cross-flow grain drier. *J. Agric. Eng. Res*, 37(1): 43-57, 1987.
- D. A. Nield y A. Bejan. *Convection In Porous Media*. Springer-Verlag, USA, (1992).
- J. C. Slattery. *Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua*. McGraw-Hill, Kogakusha LTD, 1972.
- 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.
- R. Sinicio y W. E Muir. Aeration strategies for preventing spoilage of wheat stored in tropical and subtropical climates. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(5): 512-527, 1998.
- R. Sinicio y W. E Muir. Comparison of mathematical models to simulate aeration of wheat stored in Brazil. *J. Agricultural Engineering. Research*, 64: 119-130, 1996.
- G. R. Thorpe. Moisture diffusion through bulk grain. *J. Stored Products. Res.*, 18: 9-12, 1980.
- S. Whitaker. Simultaneous heat, mass, momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advance in Heat Transfer* 13, 119-203, 1977.
- N. D. G. White, R. N. Sinha y W. E. Muir. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Eng.*, 24(1): 35-42, 1982.