

## **PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DE GRANOS ALMACENADOS EN SILOS**

**A. Gastón<sup>1,2</sup>, R. Abalone<sup>2,3</sup>, A. Cassinera<sup>3</sup>, M. A. Lara<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>-Consejo de Investigaciones (UNR).

<sup>2</sup>-Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR).

<sup>3</sup>-Instituto de Física Rosario - IFIR - (CONICET- UNR).

<sup>4</sup>-Facultad de Ciencias Agrarias (UNR).

e-mail: [analiag@fceia.unr.edu.ar](mailto:analiag@fceia.unr.edu.ar) / [rabalone@fceia.unr.edu.ar](mailto:rabalone@fceia.unr.edu.ar) / [cassiner@ifir.edu.ar](mailto:cassiner@ifir.edu.ar) / [malara@fceia.unr.edu.ar](mailto:malara@fceia.unr.edu.ar)  
Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario. Argentina.

**RESUMEN:** La distribución de temperatura y humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el periodo de almacenamiento. En este trabajo se presenta un modelo bidimensional para predecir la evolución de la distribución de temperatura de una masa de granos almacenados en un silo cilíndrico de 140 toneladas teniendo en cuenta las variaciones estacionales de la temperatura ambiente, la radiación solar y el viento. Se empleó el modelo para evaluar la evolución de la temperatura de trigo almacenado desde Diciembre a Julio para las condiciones climáticas de Rosario. Las predicciones indican que la zona central es la menos sensitiva a los cambios estacionales, que sí tendrán una gran influencia en la calidad de los granos cercanos a la superficie y a la chapa galvanizada. Esta zona equivale aproximadamente a un volumen de 40 toneladas de granos que representa un 28% del total almacenado.

**Palabras clave:** almacenamiento de granos, transferencia de calor, simulación numérica, energía solar.

### **INTRODUCCIÓN**

Luego de la cosecha, el grano es secado hasta un contenido de humedad de aproximadamente 11% para asegurar su conservación. La distribución de temperatura y humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el periodo de almacenamiento en silos.

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 y del contenido de humedad del grano y del aire intergranular. 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.

Una metodología empleada para reducir estos riesgos es enfriar los granos por medio de sistemas de aereación. El conocimiento preciso de cómo evoluciona la distribución de temperatura y humedad durante largos periodos 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.

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.

Este trabajo presenta la modelización y resolución numérica de la transferencia de energía para determinar la distribución de temperatura dentro del silo teniendo en cuenta las variaciones climáticas durante el periodo de almacenamiento.

### **MODELIZACION TERMICA DE LOS SILOS**

La Figura 1 muestra el dominio de cálculo. Se introdujeron las siguientes hipótesis simplificadoras en la modelización de la distribución de temperatura de los granos dentro del silo:

1. en cada punto del silo el aire intergranular se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos
2. la transferencia de energía se produce en dirección axial y radial
3. el grano ensilado se considera como un material homogéneo con propiedades térmicas constantes

---

<sup>4</sup> Investigador CONICET

4. en el balance energético no se considera el consumo de energía debido a la evaporación de agua dentro de la masa de granos
5. no se considera la generación interna de energía debido a la respiración de los granos.

Con estas hipótesis, el balance de energía en la masa de granos se reduce a la resolución de la ecuación de transferencia de calor en un dominio bidimensional con simetría axial que se detalla a continuación:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[ rk\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[ rk\frac{\partial T}{\partial r}\right] \quad (1)$$

sujeta a la condición inicial:  $T(r, z, t=0) = T_0(r, z)$  (2)

y con las condiciones de contorno:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ en } r = 0 \text{ en } \Gamma_1 \quad (3)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_{c2}(T - T_a) \text{ en } \Gamma_2 \quad (4)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_{c3}(T - T_a) + \alpha G_3 - \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4) \text{ en } \Gamma_3 \quad (5)$$

La transferencia de energía en la zona superior del silo se analizó proponiendo dos alternativas. En la primera, se considera que el aire entre el techo y los granos tiene una conductividad efectiva que tenga en cuenta en alguna medida los efectos de las corrientes de convección presente. En este caso se tiene:

(caso CC1)  $-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_{c4}(T - T_a) + \alpha G_4 - \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4) \text{ en } \Gamma_4$  (6)

En la segunda, el intercambio de calor por convección y radiación entre la superficie de los granos ensilados ( $\Gamma_5$ ) y la superficie interna del techo del silo se modeliza mediante el circuito equivalente que se muestra en la Figura 2. Entre la superficie exterior del techo y el medio ambiente la condición de contorno (6) sigue siendo válida.

(caso CC2)  $-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_{c5}(T - T_a) + \varepsilon_g\sigma F_{gt}(T_g^4 - T_{techo}^4) \text{ en } \Gamma_5$  (7)

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  $G_3$ . Un tratamiento similar se propuso para calcular la radiación solar sobre el techo  $G_4$ .

La irradiancia solar global sobre una superficie horizontal  $G$  fue calculada en base al modelo C (Iqbal, 1983) de transferencia radiativa de la atmósfera, utilizando parámetros atmosféricos estándares para la zona.

La temperatura de cielo  $T_c$  en las ecuaciones (5) y (6) se expresó en función de la temperatura ambiente (Mills, 1995),

$$\sigma T_c^4 = \varepsilon_c\sigma T_{amb}^4$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en la pared exterior y el techo del silo debido al efecto del viento se estimó mediante la expresión (Duffie y Beckman, 1980):

$$h_{c3} = 8.6\frac{V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (7)$$

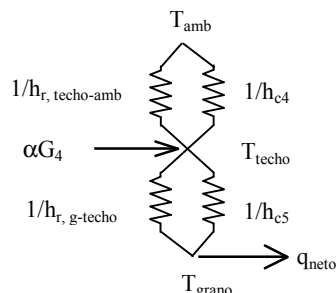
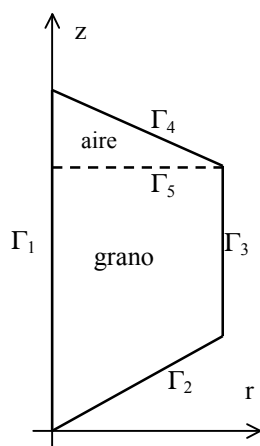
siendo  $V$  la velocidad del viento en m/s y  $L$  la raíz cúbica del volumen del silo.

Se adoptó  $h_{c2} = 0.5h_{c3}$ ,  $F_{gt} = 0.3$ ,  $\varepsilon_g = 0.9$  (Chang et al., 1993) y el coeficiente  $h_{c5} = 1 \text{ W/m}^2\text{C}$  (Alagusundaram et al., 1990). Para el acero galvanizado sucio se consideró una emisividad de onda corta y larga de 0.28 y 0.89, respectivamente (Kreith, 1965) y para la emisividad del cielo  $\varepsilon_c = 0.82$  (Mills, 1995). En la Tabla 1 se listan los valores de los parámetros térmicos del trigo, del aire y del acero galvanizado.

Respecto a las condiciones climáticas empleadas, en la Figura 3 se grafican las variaciones anuales del promedio diario de la radiación solar sobre el plano horizontal y la temperatura ambiente. En la Figura 4 se muestran los promedios mensuales de

la humedad relativa ambiente y la velocidad del viento. Estos datos corresponden a los promedios estadísticos del período 1981-1990 en la ciudad de Rosario.

La resolución numérica se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando el software ALGOR, 2001 Ver 13.06.



Material	Acero	Trigo	Aire
k (W/ m°C)	45.8	0.159	0.0267
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	7790	863	1.177
c <sub>p</sub> (J/KgC)	470	1757	1005

Figura 1: Dominio de cálculo

Figura 2: Circuito eléctrico equivalente

Tabla 1. Propiedades térmicas de los materiales

## RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó el modelo para analizar la evolución de la temperatura de trigo almacenado a 28C, durante 250 días desde el 12 de Diciembre. El silo tiene 6 m de diámetro y 8.5 m de altura y el nivel de granos se consideró de 7.1 m que corresponde a un volumen de trigo de 140 toneladas.

En la Figura 5a se muestra la evolución de la temperatura a la altura  $z = 4.5$  m, para distintas posiciones radiales. En la Figura 5b se muestra la evolución de la temperatura en el centro del silo ( $r = 0$ ) para distintas alturas cercanas al nivel del grano.

Los resultados numéricos muestran que la temperatura varía lentamente salvo 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 7 C mayores que ésta durante los meses de verano y 4 C durante los meses de otoño-invierno, debido a la radiación solar incidente. Como consecuencia de la baja conductividad de los granos, la amplitud de la oscilación de las temperaturas disminuye hacia el interior del silo, aumentando el tiempo de retardo entre los valores pico de temperatura ambiente y de los granos. El pico de temperatura alcanza el centro del silo durante los meses fríos. Durante los meses cálidos la máxima diferencia de temperatura en la dirección radial es del orden de 9C mientras que en los meses fríos se produce una inversión del sentido del gradiente térmico aumentando la máxima diferencia a unos 20C.

En el sentido axial, la evolución de temperatura presenta un comportamiento similar al radial. Los gradientes de temperatura se localizan en una capa de aproximadamente 25cm por debajo de la superficie del grano. En este caso (caso CC1) la superficie alcanza una temperatura menor que la de la capa en contacto con la pared lateral. Esto se debe a que si bien se duplicó la conductividad del aire para simular los efectos de la convección debido a la circulación, esta capa ofrece mayor resistencia a la transferencia de energía y amortigua las fluctuaciones de la temperatura ambiente.

En las figuras 6a y 6b se presentan los resultados obtenidos considerando un intercambio radiativo y convectivo entre la superficie de los granos y el techo (caso CC2). Comparando con la figura 5a, se observa que en sentido radial los resultados prácticamente no se modifican. Sin embargo en sentido axial, al disminuir la resistencia térmica entre los granos y el techo del silo, la amplitud de la fluctuación de la temperatura superficial resulta del orden de 23C. Ambos casos pueden considerarse como límites de la variación de la temperatura superficial de los granos durante el período de almacenamiento.

En la Figura 7 se muestra la distribución de isotermas al cabo de 30, 60, 120, 180, 210 y 250 días de almacenamiento para el caso CC1. En este conjunto de gráficas se puede apreciar las variaciones de temperatura de las capas cercanas a la pared lateral y en la parte superior del silo, así como el efecto aislante del aire por encima del nivel de granos. En el cono inferior, debido a la pérdida por convección, se registra una disminución de la temperatura del orden de 6C respecto a la zona central al cabo de 120 días de almacenamiento que aumenta hasta 15C a los 250 días. La zona central resulta ser la menos afectada por las condiciones ambientales.

En la Figura 8 se muestra las isotermas correspondientes al caso CC2. No se incluye la parte superior del silo, porque sólo resulta de interés analizar la distribución de temperatura en la masa de granos. Se observa que la zona superior es fuertemente afectada apareciendo pronunciados gradientes de temperatura en dirección axial, tanto durante los meses cálidos como en los fríos.

Los resultados obtenidos en este trabajo son comparables con los presentados por otros autores para almacenamiento de

diversos granos (Alagusundaram *et al.*, 1990; Chang *et al.*, 1993, Jia *et al.*, 2000)

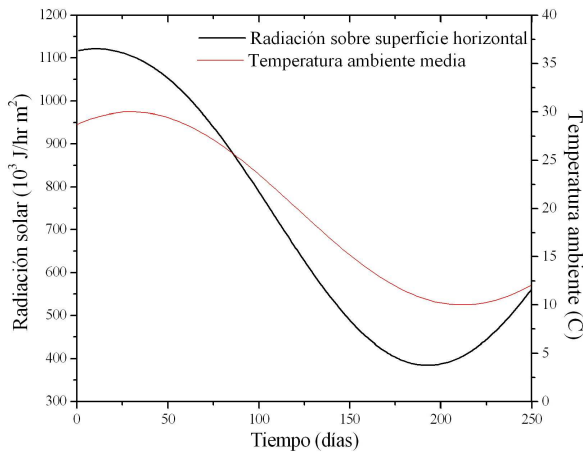


Figura 3: Variación de la temperatura ambiente y de la radiación solar incidente sobre un plano horizontal durante el periodo de almacenamiento, a partir del 12 de Diciembre

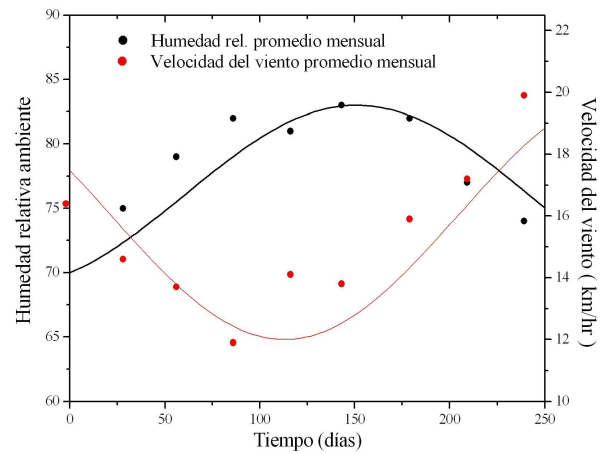


Figura 4: Variación de la humedad relativa ambiente y del viento horizontal durante el periodo de almacenamiento a partir del 12 de Diciembre

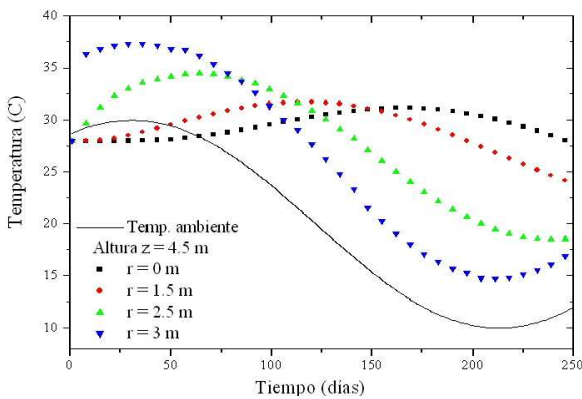


Figura 5a: Variación de la temperatura de los granos en puntos ubicados en sentido radial durante el periodo de almacenamiento, a partir del 12 de Diciembre. (Sección media del silo). Caso CC1.

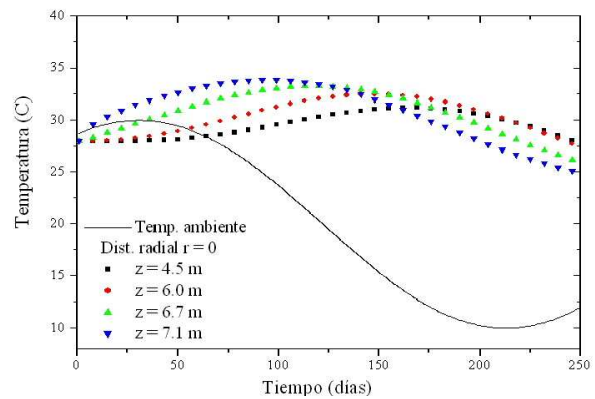


Figura 5b: Variación de la temperatura de los granos en puntos ubicados en sentido radial durante el periodo de almacenamiento a partir del 12 de Diciembre. (Sección media del silo). Caso CC1.

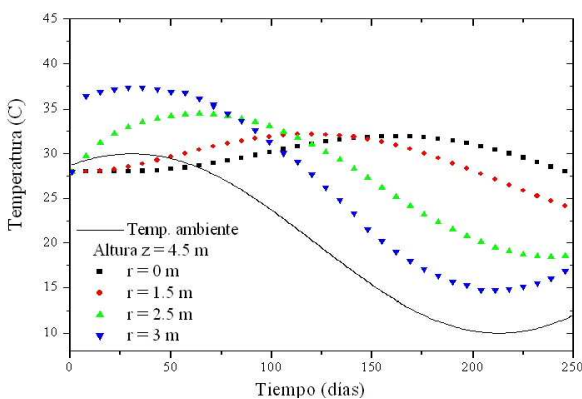


Figura 6a: Variación de la temperatura de los granos en puntos ubicados en sentido radial durante el periodo de almacenamiento, a partir del 12 de Diciembre. (Sección media del silo). Caso CC2.

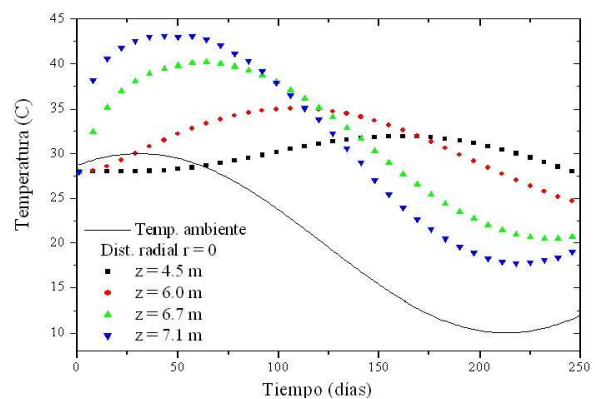


Figura 6b: Variación de la temperatura de los granos en puntos ubicados en sentido radial durante el periodo de almacenamiento, a partir del 12 de Diciembre. (Sección media del silo). Caso CC2.

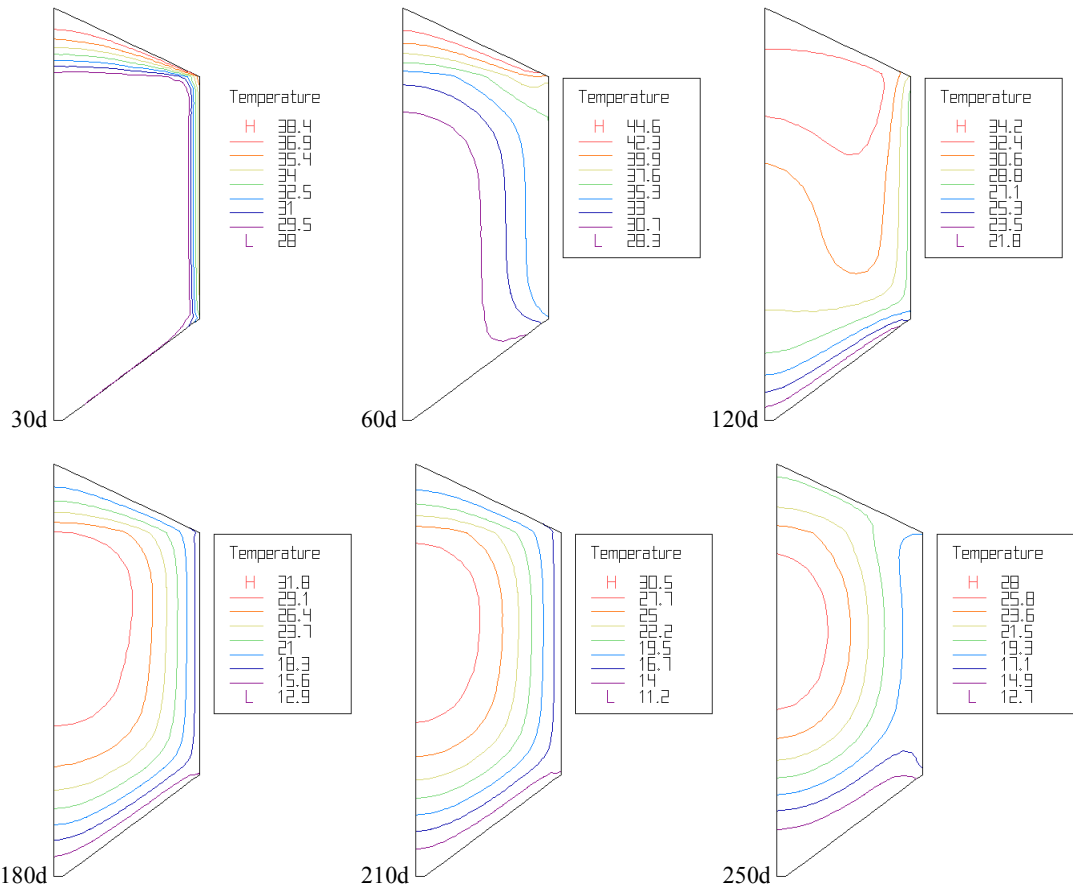


Figura 7: Distribución de isotermas al cabo de 30, 60, 120, 180, 210 y 250 días de almacenamiento para el caso CC1.

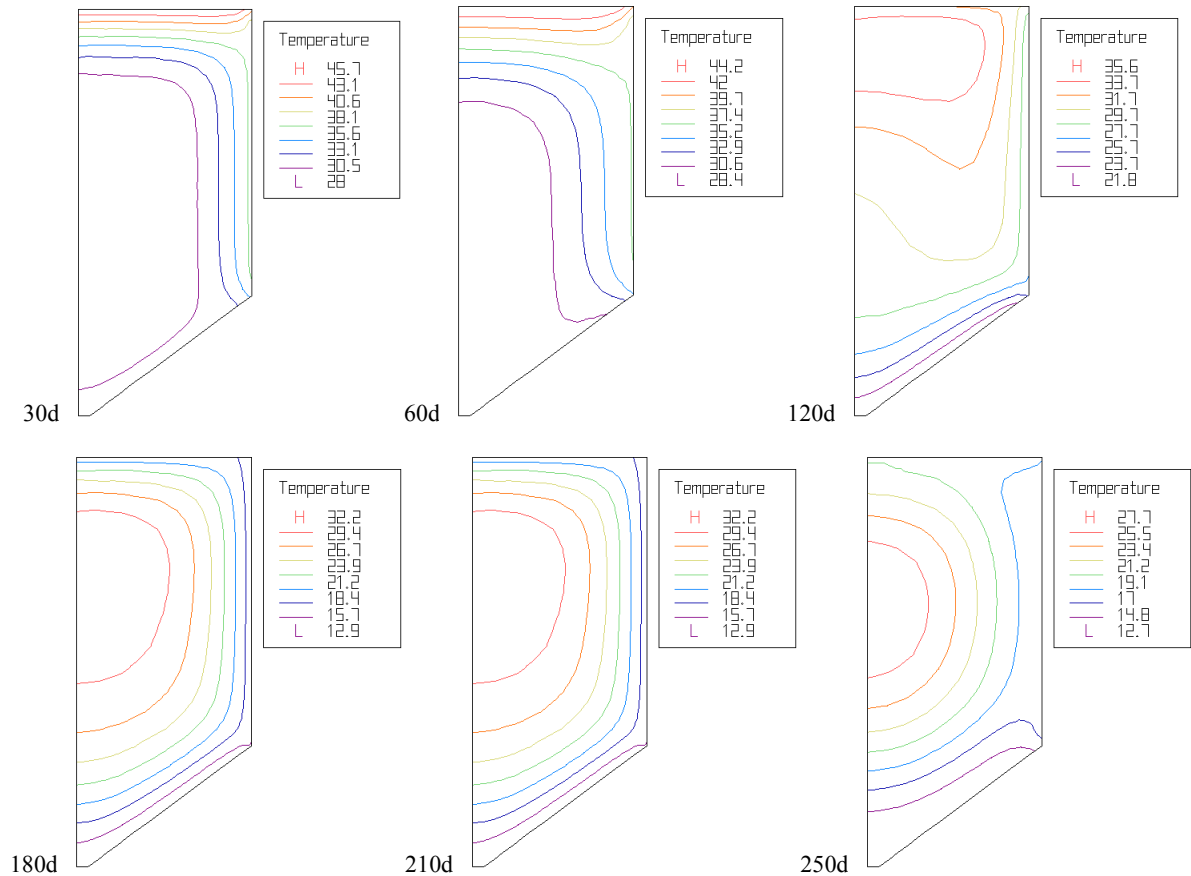


Figura 8: Distribución de isotermas al cabo de 30, 60, 120, 180, 210 y 250 días de almacenamiento para el caso CC2.

## CONCLUSIONES

Se describió un modelo matemático basado en el método de elementos finitos para determinar la evolución de la distribución de temperatura de los granos en un silo de base cónica de acero galvanizado teniendo en cuenta la variación diaria de factores climáticos tales como la temperatura ambiente, la radiación solar incidente y el viento, durante largos períodos de almacenamiento.

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 y será necesario recurrir a la aireación para evitar su deterioro.

Los cambios regulares en la temperatura ambiente y la radiación solar tendrán una gran influencia en la calidad de los granos cercanos a la superficie y a la chapa galvanizada lo que resulta ser una desventaja en este tipo de silo. Esta zona equivale aproximadamente a un volumen de 40 toneladas de granos que representa un 28% del total almacenado.

## NOMENCLATURA

		Subíndices
$c_p$	calor específico de la masa de granos, J/kg°C	a ambiente
$F_{gt}$	factor de forma entre la superficie de los granos y el techo	c cielo
$G$	irradiación solar normal en la superficie de la Tierra, W/m <sup>2</sup>	$c_i$ convección
$h$	coeficiente de transferencia de calor, W/m <sup>2</sup> °C	g granos
$k$	conductividad térmica de la masa de granos, W/m°C	i superficie
$L$	longitud característica	r radiación
$t$	tiempo, s	CC1 Caso 1 de modelización
$T$	temperatura en función de la variable espacial y temporal, °C o K	CC2 Caso 2 de modelización
$V$	velocidad del viento m/s	
$\alpha$	absorbancia de la pared del silo	
$\varepsilon$	emitancia	
$\rho$	densidad de la masa de granos kg/m <sup>3</sup>	
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	

## REFERENCIAS

- ALGOR (2001). Versión 13.06-WIN.
- Alagusundaram K., Jayas D.S., White N.D.G. y Muir W.E. (1990) Three dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. Transactions of the ASAE, 33(2), 577-584.
- Chang C.S, Converse H y Steele J.L (1993). Modeling of temperature of grain during storage with aeration. Transactions of the ASAE, 36(2), 509-519.
- Jia C., Sun D. W. y Cao C. (2000). Finite element prediction of transient temperature distribution in a grain storage bin. J. Agric. Res. , 76, 323-330.
- Duffie J. y Beckman W. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons.
- Jiang S y Jofriet J. C. (1987). Finite element Prediction of Silage Temperature in Tower Silo. Transactions of the ASAE, 30(6), 1744-1750
- Iqbal M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Kreith F (1973). Principles of Heat Transfer. P.A. International Textbook Co, Scranton, PA.
- Mills A. F. (1995). Transferencia de Calor. Editorial Irwin.

**ABSTRACT:** Temperature and moisture content are the two main factors that affect grain quality during storage. A two dimensional heat transfer model is presented to describe the transient temperature distribution in a cylindrical bin subjected to seasonal variations of ambient temperature, relative humidity, incident solar radiation and wind. For the weather conditions of Rosario, the numerical model was used to evaluate the temperature evolution of wheat stored from December to July. The predictions indicate that the silo central area is the least sensitive to seasonal ambient changes, which will strongly affect the quality of the grain near the surface and steel galvanized wall. This zone is equivalent to a volume of 40 tn representing the 28% of the total stored tonnage.

**Keywords:** grain storage, heat transfer, numerical simulation, solar energy.