

Modelo tridimensional para predecir la distribución de temperaturas durante el almacenamiento de granos en silos

Three-dimensional model to predict temperature distribution during grain storage in silos

Fernando Iván Molina Herrera^a, Luis Isai Quemada Villagómez^a, Mario Calderón Ramírez Martínez, Hugo Jiménez Islas^a.

^a Tecnológico Nacional de México en Celaya, Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental, Antonio García Cubas Pte #600 esq. Av. Tecnológico, Celaya, Gto, C.P.38010, México

^b Tecnológico Nacional de México, CRODE de Celaya, Departamento de Diseño de Equipo, Diego Arenas Guzmán 901, Zona de Oro, Celaya, Gto, C.P. 38023, México

fi.molina@ugto.mx

Resumen

El maíz es el cultivo más representativo de México por su importancia económica, social y cultural, lo que lo convierte en un cultivo de gran importancia para el país y su población. En particular, para el estado de Guanajuato, el cual es conocido por su diversidad agrícola y por ser uno de los principales productores de maíz blanco en el país, y su producción, en particular, en la zona del Bajío, contribuye directamente a la seguridad alimentaria tanto a nivel local como nacional. Por lo cual, para garantizar la seguridad alimentaria en México, que implica garantizar que los alimentos sean almacenados de manera que minimicen los riesgos de contaminación y asegurar su calidad nutricional, los productores de maíz utilizan varios métodos como son silos, bodegas, y graneros. Sin embargo, los silos son una de las estructuras más utilizadas debido a su eficiencia en el espacio, capacidad de almacenamiento, facilidad de carga y descarga, y proporcionan una solución confiable y conveniente para el almacenamiento a largo plazo de granos, tanto en pequeñas explotaciones agrícolas como en grandes operaciones comerciales. Por este motivo en este trabajo se desarrolla y se resuelve un modelo tridimensional basado en las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de fluidos en medios porosos, para predecir los patrones de flujo y la distribución de la temperatura de una masa de maíz almacenado en un silo cilíndrico por efecto de la variación de las condiciones climáticas del estado de Guanajuato y de los valores promedios de calor de respiración del grano. Las simulaciones muestran la formación de zonas calientes en la región central del silo, lo que propicia un ambiente óptimo para el desarrollo de plagas. También esta zona es la menos sensible a los cambios de temperatura del exterior, mientras que las zonas cercanas a las paredes superior y lateral registran variaciones importantes de temperatura lo cual también genera zonas propicias para el desarrollo de insectos y hongos. Los resultados numéricos obtenidos para el maíz son consistentes con mediciones de campo y resultados numéricos disponibles en la literatura.

Palabras clave: maíz, silos, modelo matemático.

Abstract

Maize is the most representative crop in Mexico due to its economic, social, and cultural significance, making it a crop of great importance for the country and its population. Particularly for the state of Guanajuato, known for its agricultural diversity and being one of the main producers of white maize in the country, its production, especially in the Bajío region, directly contributes to food security both locally and nationally. Therefore, to ensure food security in Mexico, which implies ensuring that food is stored in a way that minimizes contamination risks and ensures its nutritional quality, maize producers use various methods such as silos, warehouses, and granaries. However, silos are one of the most used structures due to their space efficiency, storage capacity, ease of loading and unloading, and they provide a reliable and convenient solution for long-term grain storage, both on small farms and large commercial operations. For this reason, this work develops and solves a three-dimensional model based on the fundamental equations governing fluid flow in porous media, to predict flow patterns and temperature distribution of a mass of maize stored in a cylindrical silo due to the variation of climatic conditions in the state of Guanajuato and the average values of grain respiration heat. The simulations show the formation of hot zones in the central region of the silo, which fosters an optimal environment for pest development. This central zone is also the least sensitive to changes in external temperature, while the areas near the upper and side walls show significant temperature variations, which also create suitable conditions for the development of insects and fungi. The numerical results obtained for maize are consistent with field measurements and numerical results available in the literature.

Keywords: maize, silos, mathematical model

Introducción

El presente período ha traído consigo cambios significativos en el medio ambiente. El cambio climático asociado al calentamiento global ha producido alteraciones en los patrones de precipitación, aumento de las temperaturas y fenómenos climáticos extremos como sequías e inundaciones. Estos cambios afectan la disponibilidad de agua para los cultivos de secano (cultivos que dependen del agua de lluvia) y cultivos de regadío, que dependen del agua de lluvia. La disponibilidad de agua es un factor crítico para los agricultores de granos (maíz, sorgo, trigo, avena, cebada, entre otros). La disponibilidad de agua es fundamental durante las etapas críticas del crecimiento y desarrollo del cultivo. La falta de agua reduce el rendimiento del cultivo, ya que el estrés hídrico afecta el desarrollo de las plantas. Esto puede resultar en un bajo rendimiento por hectárea cultivada. Por otro lado, el aumento de la población global implica una mayor demanda de alimentos^[1]. Esto puede conducir a una intensificación agrícola, es decir, a la producción de más alimentos en la misma área de tierra. Sin embargo, esta intensificación puede resultar en la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y un uso más intensivo de los recursos naturales, lo que a su vez puede tener impactos negativos en la sostenibilidad de la agricultura. Además, el crecimiento de la población también puede llevar a la expansión de áreas urbanas y a la conversión de tierras agrícolas en áreas urbanizadas, lo que reduce la disponibilidad de tierras para la agricultura y aumenta la presión sobre las áreas agrícolas restantes.

Aunado a estos factores, las pérdidas poscosecha en México se estiman en alrededor del 25% en promedio, pero suelen ser mayores en regiones tropicales donde la temperatura y humedad favorecen la proliferación de insectos y hongos, dejando más propensos a los granos almacenados de manera incorrecta^[2]. Las grandes pérdidas poscosecha asociadas con el almacenamiento de granos y debidas a las condiciones climáticas y de manejo adversas, conducen a la necesidad imperiosa de realizar estudios y análisis sobre el almacenamiento de granos.

Para abordar este desafío, es necesario considerar diversos factores que influyen en la seguridad de los ecosistemas de almacenamiento de granos, que incluyen tanto factores naturales como biológicos. Los elementos naturales, como la temperatura, la humedad, y la convección natural del aire, pueden tener un impacto considerable en la conservación de la calidad de los granos almacenados. El almacenamiento de granos es una práctica fundamental en la agricultura que implica preservar y proteger los granos cosechados durante períodos prolongados para su uso posterior, venta o distribución. Los granos se almacenan en una variedad de estructuras diseñadas para este propósito, como son silos, bodegas, graneros y contenedores herméticos. Sin embargo, los silos son una de las estructuras más utilizadas debido a su eficiencia de espacio, capacidad de almacenamiento, facilidad de carga y descarga, y proporcionan una solución confiable y conveniente para el almacenamiento a largo plazo de granos, tanto en pequeñas explotaciones agrícolas como en grandes operaciones comerciales.

La temperatura y la humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el periodo de almacenamiento en este tipo de estructuras. La temperatura del grano almacenado puede ser alterada por fuentes tanto internas como externas de calor, lo que puede cambiar las condiciones de equilibrio entre el grano y su entorno. Las fuentes internas incluyen la respiración natural del grano, así como la proliferación de insectos y hongos, cuya actividad está relacionada con la temperatura y el contenido de humedad del grano, así como con la humedad relativa del aire circundante^[3,4]. Por otro lado, las fuentes externas de calor están principalmente determinadas por las variaciones en las condiciones climáticas estacionales durante el período de almacenamiento^[5,6].

Los gradientes de temperatura dentro de la masa de granos pueden provocar la migración de humedad desde áreas más cálidas hacia áreas más frías, lo que puede generar puntos de concentración propicios para el deterioro de los granos almacenados. Conocer las temperaturas puntuales dentro del silo permite preservar la calidad de los granos durante períodos más largos. Por esta razón, la modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir las temperaturas en el interior de un silo, ya que una vez que se ha desarrollado el modelo numérico, se pueden realizar múltiples simulaciones para una amplia gama de condiciones de almacenamiento. Esto incluye variaciones en las condiciones ambientales, el tamaño del silo, el tipo del grano almacenado y el tiempo de almacenamiento. La capacidad de ajustar fácilmente los parámetros del modelo permite explorar diferentes situaciones y optimizar el diseño y la operación del silo. Por esta razón, distintos grupos de investigadores han desarrollado modelos matemáticos que involucran los balances microscópicos de momentum, masa y energía, con diversos grados de complejidad según las hipótesis consideradas. Algunos autores presentan modelos en 2D para predecir la distribución de temperatura y humedad durante el almacenamiento de diversos granos: Khankari et al.,^[7] desarrollan un modelo matemático que considera la transferencia de calor y masa entre el grano y el aire intersticial, encontrando que la permeabilidad del medio facilita la convección natural y la migración dentro de la masa de los granos. Barreto *et al.*,^[8] presenta un modelo similar al de Khankari et al.,^[9] pero considerando la variación de temperatura ambiental e incluyó la radiación solar, para analizar el almacenamiento de soya en

la zona de Rosario, Argentina. Estos resultados muestran la importancia de considerar la variación ambiental en el modelado. Tomando como base estas ideas, otros autores han presentado y resuelto modelos matemáticos para diferentes tipos de granos. Alagusundaram *et al.*,^[10] Chang *et al.*,^[11] Jiang *et al.*,^[12] estudiaron el almacenamiento del trigo. Abbouda *et al.*,^[13] y Jiménez-Islas *et al.*,^[3] estudian el almacenamiento del sorgo con un modelo 2D de transferencia de calor y masa que incluye la generación de calor debido a la respiración de los granos, pero sin considerar las variaciones ambientales. El efecto de la convección natural generada por gradientes de temperatura durante el almacenamiento sin ventilación de los granos ha sido abordado en múltiples trabajos, pero muy pocos autores consideran las variaciones ambientales^[4, 5, 6, 9, 14]. También se han desarrollado modelos que tratan de integrar el efecto de las variaciones ambientales durante los periodos de almacenamiento; algunos se basan en datos que deben monitorearse continuamente^[7, 15, 16] mientras que otros, de manera más práctica, pero un poco menos preciso, utilizan por lo general modelos donde solo se determina el efecto de las variaciones ambientales de forma global utilizando pocos datos^[5, 17].

Considerando que el maíz es uno de los cultivos representativos de México por su importancia económica, social y cultural, lo que lo convierte en un cultivo de gran importancia para el país y su población. En particular para el estado de Guanajuato, el cual es conocido por su diversidad agrícola y por ser uno de los principales productores de maíz blanco en el país, su cultivo representa el 6% de la producción nacional (SAGARPA, 2024) y su producción, en particular en la zona del Bajío, contribuye directamente a la seguridad alimentaria tanto a nivel local como nacional.

Por esta razón, en este trabajo se describe un modelo tridimensional para predecir la evolución de la distribución de temperatura de una masa de granos almacenados en un silo cilíndrico, teniendo en cuenta las variaciones climáticas en las condiciones de contorno asociadas, empleando valores promedio de la temperatura ambiente y de la radiación solar incidente sobre el silo. El modelo propuesto fue resuelto por el método de elementos finitos (FEM) y aplicado para evaluar la evolución de la temperatura que tiene lugar durante el período poscosecha diciembre-julio para las condiciones climáticas del estado de Guanajuato, en particular la región del Bajío que es la que presenta mayor producción de granos.

Metodología

El problema de estudio consiste en un silo cilíndrico a escala industrial con un radio de 5.3 m y una altura de 13 m (ver **Figura 1**), lleno de maíz. Para las simulaciones se considera el grano como un medio poroso isotrópico, saturado de aire que exhibe un comportamiento de fluido newtoniano y que el grano presenta una generación constante y uniforme de calor debido al proceso de respiración. Finalmente, se considera que las propiedades físicas son independientes de la presión y la temperatura. Con estas consideraciones, se obtiene el siguiente modelo matemático:

Modelo matemático

Ecuación de continuidad:

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Momentum (Ley de Darcy con la extensión de Brinkman):

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot [-\mathbf{PI} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] - \mu \kappa^{-1} \mathbf{u} + \beta \rho \mathbf{g}(T - T_0) \quad (2)$$

Ecuación de Energía:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + Q_0 \quad (3)$$

Para considerar las condiciones físicas en las superficies lateral y superior, que representa la interacción entre la convección natural a través del dominio poroso y el fluido ambiental externo se considera la variación ambiental del estado de Guanajuato durante el año 2022, las simulaciones inician el 1 de enero de enero a las 00:00 y continúan durante 100 días de almacenamiento, además se considera la convección de calor y la radiación solar. En la tabla 1 se listan las expresiones y los valores de los parámetros térmicos de transferencia de calor [4, 12,18].

La ecuación 3 tiene asociada las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

$$T(r, z, \theta, t = 0) = T_0(r, z, \theta) \quad (4)$$

$$\Gamma_1 \quad -k_w \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c1}(T - T_{amb}) - \varepsilon\sigma(T - T_{cielo}^4) \quad (5)$$

$$\Gamma_2 \quad -k_w \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c2}(T - T_{cielo}) \quad (6)$$

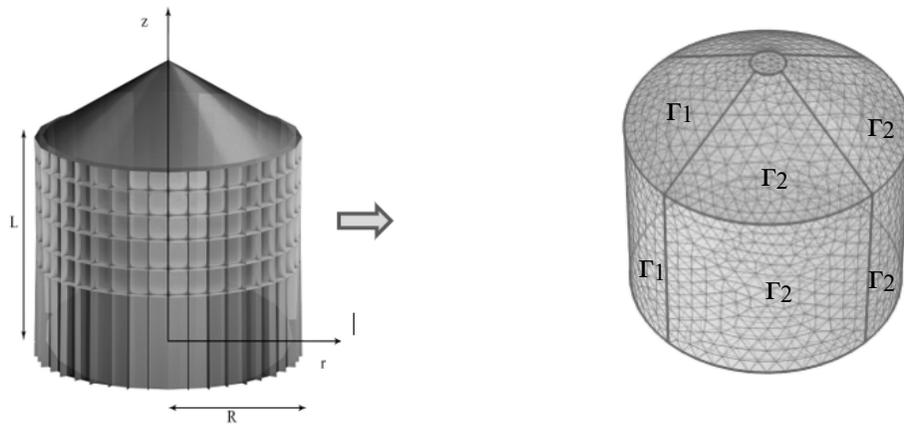


Figura 1. Sistema geométrico y dominio computacional.

Tabla 1. Parámetros del modelo térmico

Coefficiente de transferencia de calor [19]	$h_{c1} = 8.6 \frac{V^{0.6}}{L^{0.4}}$
Coefficiente de transferencia de calor [11]	$h_{c1} = 0.5h_{c1}$
Temperatura de cielo	$\sigma T_c^4 = \xi_c \sigma T_{amb}^4$
Emisividad del cielo	$\xi_c = 0.82$
Emisividad del acero	$\xi_c = 0.82$
Absortividad del acero	$a = 0.89$

Abalone *et al.*, [4]

La variación de la temperatura ambiental durante el almacenamiento de granos en silos resulta un factor crítico que influye en la calidad, la seguridad y la preservación del grano. Durante el almacenamiento, los granos generan calor debido a la respiración biológica y a la actividad microbiana. Si la temperatura ambiental es alta, este calor puede acumularse más fácilmente, lo que aumenta el riesgo de calentamiento del grano. El calentamiento excesivo puede provocar la proliferación de hongos e insectos la degradación de los nutrientes del maíz y la pérdida de calidad [20]. Por esta razón para llevar a cabo las simulaciones, se emplearon los registros de los promedios de temperatura y radiación para el estado de Guanajuato en particular para la zona del Bajío, precargadas en las librerías de software especializado COMSOL Multiphysics®, el cual recopila datos meteorológicos de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). Estos datos incluyen información sobre la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, y otros parámetros climáticos relevantes. En la **Figura 2** se muestra la variación de la temperatura para la zona del Bajío del estado Guanajuato, durante el periodo de almacenamiento de maíz, la gráfica muestra la variación de la temperatura ambiental promedio y la temperatura de la radiación solar incidente sobre las paredes durante los 100 días de almacenamiento [17].

Las ecuaciones de conservación de continuidad, momentum y energía junto con sus condiciones de frontera e iniciales, se resolvieron utilizando COMSOL Multiphysics®, empleando volúmenes finitos con una malla normal [15,21]. Las simulaciones se realizaron en una computadora personal con procesador 13th Gen Intel(R) Core (TM) i5-13450HX 2.40 GHz, 8 Gb memoria RAM, requiriéndose un tiempo de cómputo de 29 horas 48 minutos 51, segundos para un periodo de almacenamiento de tiempo real de 100 días.

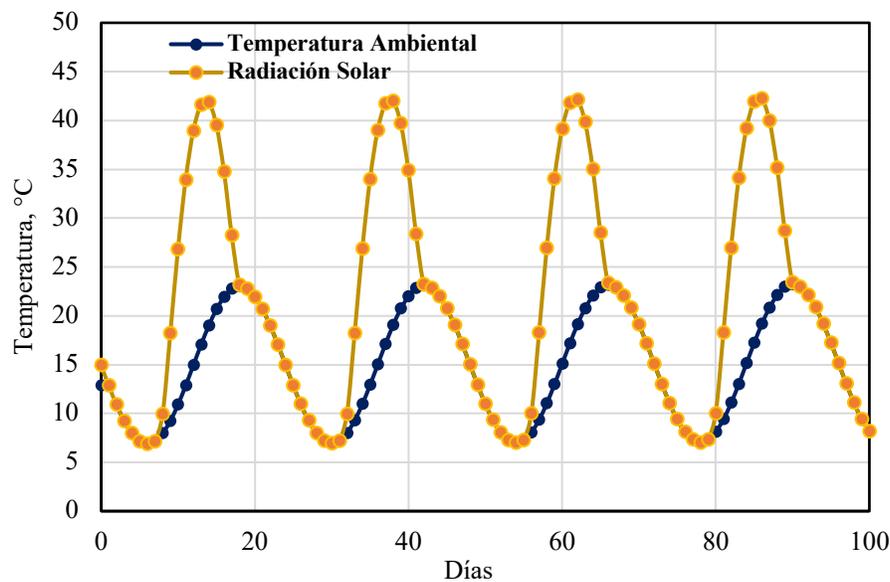


Figura 2. Variación de la temperatura ambiental y radiación solar para el estado de Guanajuato durante el periodo de almacenamiento.

Resultados y discusión

El modelo desarrollado fue aplicado para estudiar el almacenamiento de maíz durante tres meses (≈ 100 días), del 1 de enero al 10 de abril para las condiciones climáticas del estado de Guanajuato en particular en la zona del Bajío. Las propiedades físicas y condiciones iniciales para el maíz y el aire que se utilizaron en las simulaciones se describen en la **Tabla 2**.

Se considera el calor de respiración del maíz como función la temperatura y humedad, teniendo en cuenta que durante el proceso de postcosecha se recibe maíz con diferentes contenidos de humedad, se considera el calor de respiración como una media aritmética de 2.0 W/m^3 , aun cuando no se considera el equilibrio termodinámico entre la humedad del grano y la humedad relativa del aire, este trabajo representa de forma más realista la dinámica de almacenamiento permitiendo predecir la formación de zonas calientes e identificar zonas propicias para la proliferación plagas [22]. En la **Figura 3** se presenta la distribución de la temperatura del grano de maíz durante el periodo de almacenamiento. Durante el primer día de almacenamiento, la temperatura del grano y la temperatura en la parte superior del silo son prácticamente homogéneas y corresponden a las condiciones iniciales de almacenamiento (20°C). Continuando con la dinámica al día 10 de almacenamiento, la radiación solar provoca que las temperaturas en las paredes izquierdas aumenten, incrementando en 2°C la temperatura promedio de la masa almacenada a los 40 días de almacenamiento. A los 60 días de almacenamiento (inicios de marzo), podemos observar que las temperaturas en las paredes son similares a las temperaturas del ambiente (Ver **Figura 2**), siendo más altas en las paredes izquierdas. Esto se debe básicamente a las condiciones de contorno impuestas en estas paredes; las variaciones ambientales generan que el calor de respiración del maíz aumente, generando un incremento de 6°C de la temperatura inicial de almacenamiento [6,23]. Al iniciar la estación cálida a los 80 días de almacenamiento (20 de marzo), se observa que el incremento de la temperatura ambiental calienta la pared derecha del silo, lo que acelera el calor de respiración del grano y genera que la convección natural del aire emigre a las zonas menos cálidas, que resulta ser la parte izquierda del silo [6]. Esto se debe a que la radiación solar impuesta por las condiciones de contorno sigue las fluctuaciones diurnas-nocturnas, logrando mantener esta zona con menor temperatura que la zona derecha, donde se omitió la radiación solar y la transferencia de calor solo ocurre por convección. Al finalizar la dinámica a los 100 días de almacenamiento (primavera), se observa la formación de un núcleo caliente a lo largo del eje axial y aproximadamente a $\frac{3}{4}$ del diámetro total del silo, donde se alcanza una temperatura máxima de 28°C , mientras que en las paredes izquierdas del silo y en $\frac{1}{4}$ del diámetro total, las variaciones diurnas-nocturnas de la radiación solar incidente sobre estas paredes mantienen una temperatura máxima de 23°C . Estas temperaturas máximas durante el almacenamiento y el calentamiento excesivo del maíz, propio de su metabolismo, pueden provocar la proliferación de hongos e insectos, la degradación de los nutrientes del maíz y la pérdida de calidad.

Tabla 2. Propiedades termodinámicas del maíz y del aire utilizadas para las simulaciones

	Parámetro	Valor
Parámetros del maíz	Humedad inicial del maíz	14.5%
	Temperatura inicial	25°C
	Densidad	760 kg/m^3
	Calor específico	1780 kJ/kg K
	Conductividad térmica	0.13 W/m K
	Permeabilidad	$3.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
	Porosidad	0.38
Parámetros del aire	Temperatura de referencia	25°C
	Densidad calor específico	972.92 kJ/kg K
	Conductividad térmica	0.023697 W/m K
	Viscosidad	$1.78 \times 10^{-5} \text{ Pa-s}$
	Coefficiente de transferencia de calor	$15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Khankari *et al.*, [7].

En la **Figura 4** se presentan los patrones de flujo correspondientes a los 100 días de almacenamiento. El movimiento de las flechas en sentido positivo, es decir, a favor de las manecillas del reloj, indica que la transferencia de calor por convección sucede de la parte superior a la parte inferior. La dinámica para el primer día de almacenamiento (1 de enero de 2023) forma dos vórtices simétricos que se desplazan hacia la parte superior, induciendo un movimiento continuo y homogéneo en todo el silo. A los 20 días de almacenamiento se observa que las corrientes de flujo se generan en la parte central del silo. Esto se debe básicamente al calor generado por la respiración del grano, el cual produce corrientes de convección natural (Jiménez-Islas *et al.*, 2004). Este fenómeno continúa hasta los 40 días de almacenamiento. Este fenómeno se atribuye a que el enfriamiento natural es suficiente para enfriar lo que se encuentra cerca de las paredes, sin embargo, no es suficiente para enfriar el centro del silo, ya que el grano actúa como un aislante. Continuando con la dinámica a los 60 días de almacenamiento (primeros días de marzo) se observa que el aumento de las temperaturas ambientales y la radiación solar cambian los patrones de flujos y las corrientes de aire se alejan de la parte central del silo, generando poco o nulo movimiento en esta zona (Abalone *et al.*,

2006). Durante el cambio de estación a primavera (80 días de almacenamiento), los patrones de flujo han cambiado drásticamente debido a la modificación en las condiciones ambientales en el periodo de transición entre invierno y primavera (100 días de almacenamiento). Durante estos días se forman diferentes flujos de recirculación en la parte derecha e izquierda del silo, esto se debe a la variación de las condiciones ambientales ^[6]. Mientras que a lo largo del eje axial en la parte central del silo las corrientes de flujo son casi nulas, lo que genera la formación de zonas calientes debido a la falta de movimiento del aire.

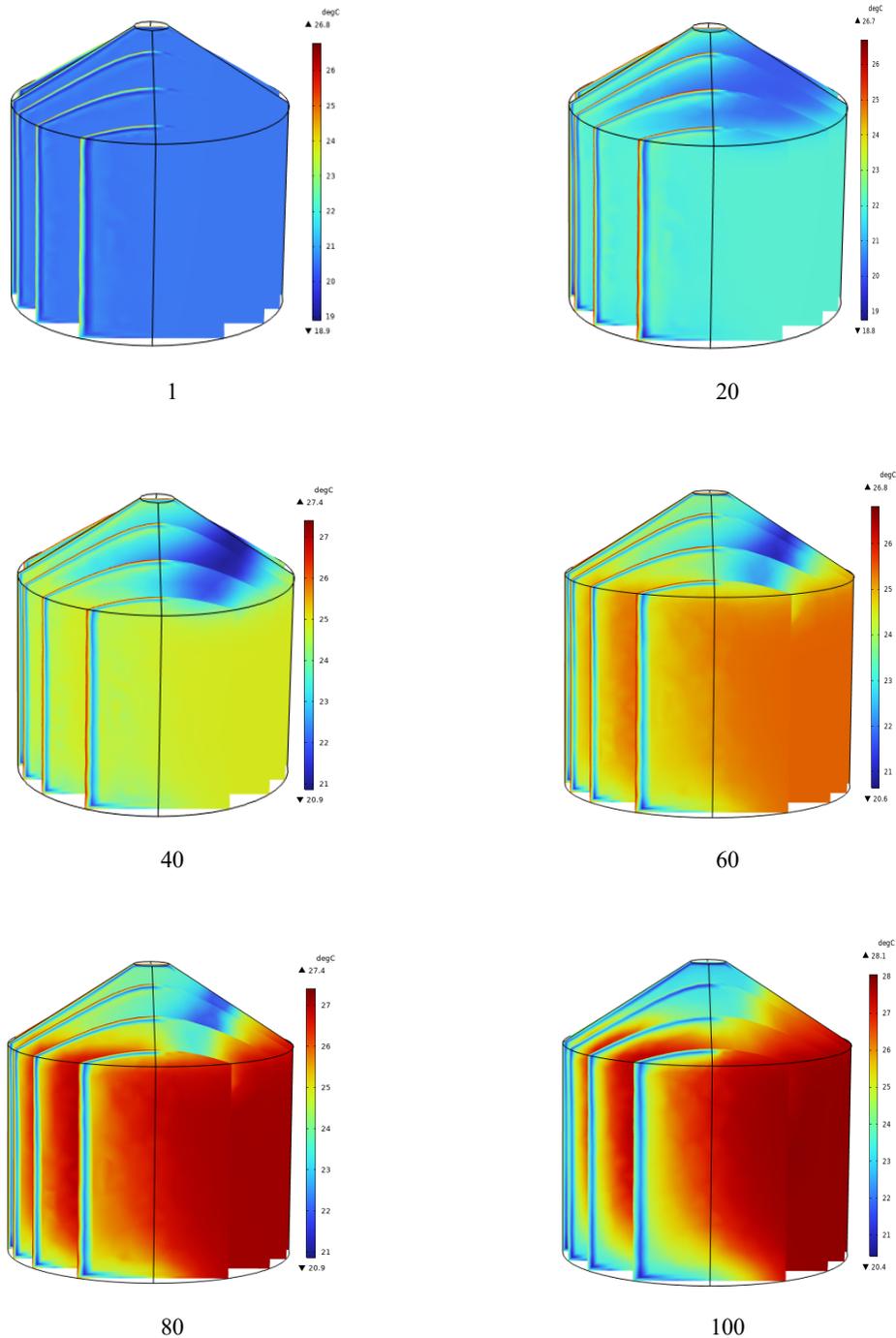


Figura 3. Perfiles de temperatura durante la dinámica completa de almacenamiento en días

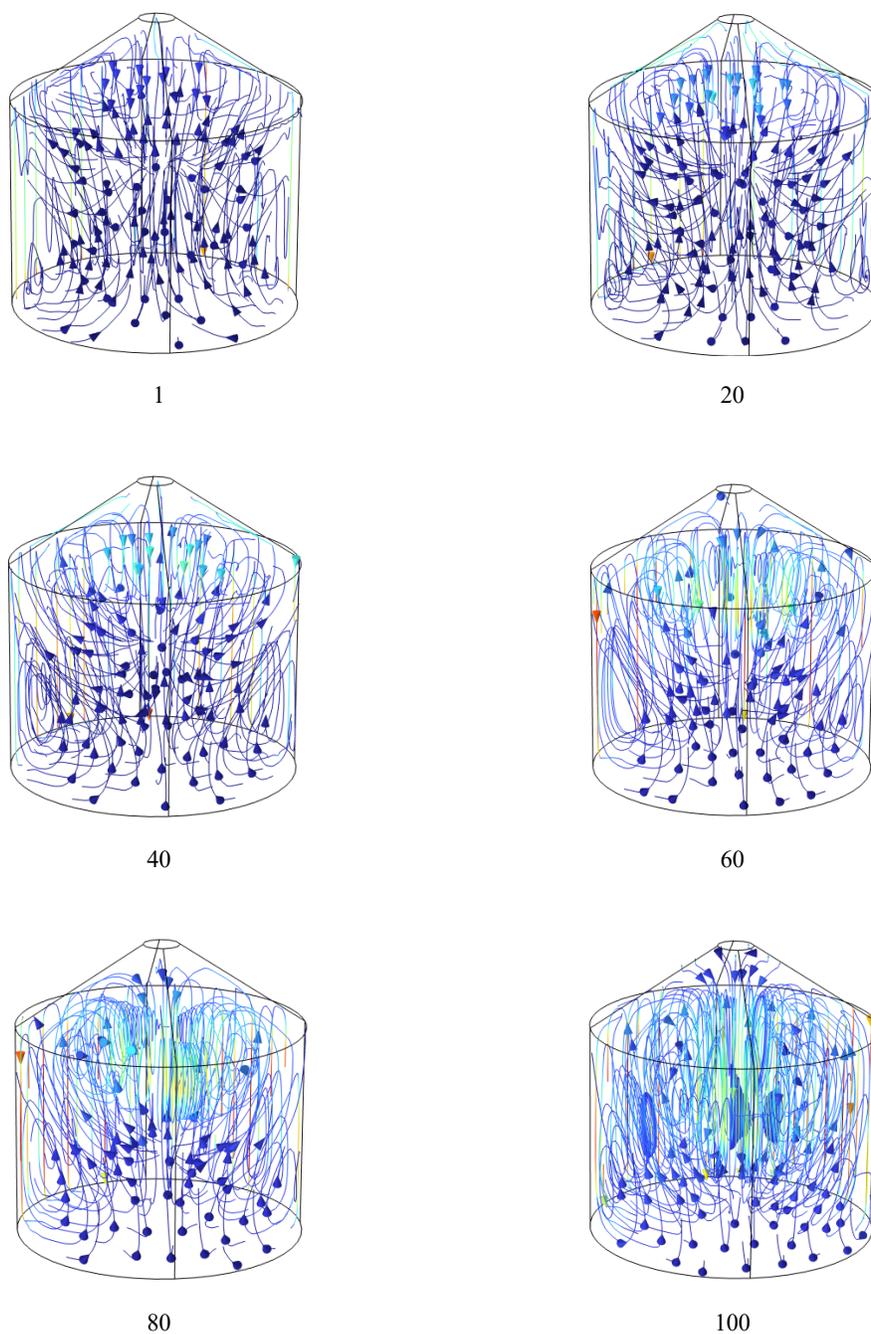


Figura 4. Patrones de flujo durante la dinámica completa de almacenamiento en días.

Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un modelo en 3D con base en el enfoque de medio poroso para predecir los patrones de flujo y la distribución de la temperatura en un silo metálico sin aireación para las condiciones climáticas del estado de Guanajuato, en particular para la zona del Bajío. El modelo fue resuelto mediante el método de volúmenes finitos y utilizado para analizar el almacenamiento de maíz durante 100 días. Los resultados de las simulaciones indican la formación de una región caliente en la zona superior y a lo largo del eje axial del silo, que se forma a partir de los primeros dos meses de almacenamiento, generando un lugar idóneo para la formación de plagas. Además, esta zona resulta ser la menos sensible a los cambios ambientales, por lo cual, si la temperatura del grano es alta, difícilmente podrá disminuir por efecto de los cambios ambientales. Mientras que las temperaturas en las paredes varían siguiendo las fluctuaciones ambientales, sobre todo las paredes izquierdas que, además de la convección entre el aire y el silo, tienen impuesta la radiación solar, la cual juega un papel en el enfriamiento de las paredes. Sin embargo, durante todo el periodo de simulación, las temperaturas siempre estuvieron por encima de los 17 °C, que representa el límite ideal para disminuir la actividad biológica, como la germinación, el desarrollo de hongos y la proliferación de insectos, lo que puede causar el deterioro del grano. Por lo cual, se recomienda un monitoreo regular de las condiciones dentro del silo y ajustar el proceso de aireación según sea necesario para garantizar un almacenamiento óptimo y la conservación del producto almacenado. En este trabajo se utilizó el maíz; sin embargo, las ecuaciones gobernantes se pueden extrapolar fácilmente para otros granos u otros sistemas biológicos con interacción de calor y generación de calor.

Referencias

1. Wu, Y., Wu, W., Chen, K., Ji, Z., Liu, Z., and Zhang, Y. (2023). Progress and Prospective in the Development of Stored Grain Ecosystems in China: From Composition, Structure, and Smart Construction to Wisdom Methodology. *Agriculture*, 13(9), 1724. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091724>
2. SAGARPA (secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, pesca y Alimentación). Programas de la secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2024).
3. Jiménez-Islas, H., Navarrete-Bolaños, J. L., and E. Botello-Álvarez, (2004). Numerical study of the natural convection of heat and 2-D mass of grain stored in cylindrical silos, *Agrociencia*, vol. 38, no. 3, pp. 325–342.
4. Abalone, R., Gastón, A., Cassinera, R., and Lara, M., A. (2006). Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional Asociación Argentina*, Vol., XXV, pp.233-247.
5. Carrera-Rodríguez, M., Martínez-González, G. M., Navarrete-Bolaños, J. L., Botello-Álvarez, J. E., Rico-Martínez, R., & Jiménez-Islas, H. (2011). Transient numerical study of the effect of ambient temperature on 2-D cereal grain storage in cylindrical silos. *Journal Of Stored Products Research*, 47(2), 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.01.006>
6. Quemada-Villagómez, L. I., Molina-Herrera, F. I., Carrera-Rodríguez, M., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., Navarrete-Bolaños, J., and Jiménez-Islas, H. (2020). Numerical Study to Predict Temperature and Moisture Profiles in Unventilated Grain Silos at Prolonged Time Periods. *International Journal of Thermophysics*, 41(5). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02636-5>
7. Khankari, K. K., Patankar, S. V., and Morey, R. V. (1995a). A Mathematical Model for Natural Convection Moisture Migration in Stored Grain. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 1777-1787. <https://doi.org/10.13031/2013.28005>
8. Barreto, A. A., Abalone, R., and Gastón, A. (2013). Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos: part II: Model application. *Latin American Applied Research*, 43(4), 385-391.
9. Khankari, K. K., Morey, R. V., and Patankar, S. V. (1995b). Application of a Numerical Model for Prediction of Moisture Migration in Stored Grain. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 1789-1804. <https://doi.org/10.13031/2013.28006>
10. Alagusundaram, K., Jayas, D. S., White, N. D. G., and Muir, W. E. (1990). Three-dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. *Transactions Of The ASAE*, 33(2), 0577-0584. <https://doi.org/10.13031/2013.31369>

11. Chang, N. C. S., Converse, N. H. H., and Steele, N. J. L. (1994). Modeling of Moisture Content of Grain During Storage with Aeration. *Transactions Of The ASAE*, 37(6), 1891-1898. <https://doi.org/10.13031/2013.28280>
12. Jiang, N. S., & Jofriet, N. J. C. (1987). Finite Element Prediction of Silage Temperatures in Tower Silos. *Transactions Of The ASAE*, 30(6), 1744-1750. <https://doi.org/10.13031/2013.30631>
13. Abbouda, S. K., Seib, P., Chung, D., and Ai, S. (1992). Heat and Mass Transfer in Stored Milo. Part I. Heat Transfer Model. *Transactions Of The ASAE*, 35(5), 1569-1573. <https://doi.org/10.13031/2013.28769>
14. Singh, A., Leonardi, E., and Thorpe, G. (1993). A Solution Procedure for the Equations that Govern Three-dimensional Free Convection in Bulk Stored Grains. *Transactions of the ASAE*, 36(4), 1159-1173. <https://doi.org/10.13031/2013.28447>
15. Montross, M. D., Maier, D. E., and Haghghi, K. (2002). Validation of a Finite Element Stored Grain Ecosystem Model. *Transactions of the ASAE*, 45(5). <https://doi.org/10.13031/2013.11036>
16. Barreto, A. A., Abalone, R., and Gastón, A. (2013). Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos: part II: Model application. *Latin American Applied Research*, 43(4), 385-391.
17. Quemada-Villagómez, L. I., Miranda-López, R., Calderón-Ramírez, M., Navarrete-Bolaños, J., Martínez-González, G. M., and Jiménez-Islas, H. (2021). A simple and accurate mathematical model for estimating maximum and minimum daily environmental temperatures in a year. *Building and Environment*, 197, 107822. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107822>
18. Jofriet, J. C., Jiang, S., and Tang, S. (1991). Finite element prediction of temperature gradients in walls of cylindrical concrete storage structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(1), 12-19. <https://doi.org/10.1139/l91-002>
19. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
20. Munguía, S. M., Cárdenas, F. C., and Martínez, M. R. (2020). Almacenamiento y conservación de granos. Editorial Universidad de Guadalajara.
21. Portugal, A. D. (2021). Introducción teórica al método de los elementos finitos mediante métodos matriciales en asignaturas de ingeniería. *Dykinson eBooks* (pp. 207-216). <https://doi.org/10.2307/j.ctv2gz3t8w.18>
22. Valle, F. J. M., Gastón, A., Abalone, R., De la Torre, D. A., Castellari, C., and Bartosik, R. (2021). Study and modelling the respiration of corn seeds (*Zea mays* L.) during hermetic storage. *Biosystems Engineering*, 208, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.009>
23. Gastón, A., Abalone, R., Cassinera, A., and Lara, M. A. (2005). Predicción de la distribución de temperatura de granos almacenados en silos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*; vol. 9. pp. 13-18.