

Modelado del Ecosistema de Granos Almacenados en Silos bolsa

Arias Barreto, A.^{1,2}, Abalone R.^{1,2}, Gastón, A.^{1,2,3}

¹Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura. UNR.

²Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario).

³Carrera de Investigador Científico. UNR

e-mail: analiag@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se describen las principales características de un modelo de simulación computacional del ecosistema de granos almacenados en silos bolsa. A partir de balances acoplado de energía y materia (humedad, O₂ y CO₂) en el granel, se determinó la evolución de la distribución de la temperatura, el contenido de humedad y la pérdida de materia seca de los granos almacenados como así también de la concentración de gases de la atmósfera intersticial.

La validación de modelo se realizó comparando los valores predichos con valores medidos de la temperatura, contenido de humedad, concentración de O₂ y CO₂. Los errores estándar para la temperatura resultaron del orden de 2°C o menores. Las tendencias generales de las evoluciones de la concentración de O₂ y CO₂ medidas resultaron compatibles con las predichas.

Se predijeron los niveles medios de referencia de O₂ y CO₂ para una región productiva por excelencia con condiciones climáticas sub-tropicales (Saenz Peña, provincia de Chaco), intermedia (Pergamino, provincia de Buenos Aires) y templada (Balcarce, provincia de Buenos Aires) de Argentina. También se comparó la evolución de la temperatura del grano, contenido de humedad, humedad relativa de equilibrio y pérdida de materia seca.

Los resultados mostraron que los niveles referenciales de O₂ y CO₂ dependen en gran medida del contenido de humedad inicial y temperatura del grano embolsado. También las condiciones meteorológicas producen cambios significativos, especialmente en el caso de granos secos o ligeramente húmedos.

La evolución de la temperatura media del grano en combinación con los niveles de CO₂ y O₂ alcanzados en los silos bolsa demuestra que para las condiciones climáticas de las zonas meridionales y centrales de Argentina el desarrollo de insectos sería limitado pero no para el almacenamiento de granos secos en la región septentrional (clima sub-tropical).

El análisis de la evolución de O₂ y CO₂ en bolsas con perforaciones muestra que éstas alteran significativamente los niveles de O₂ y CO₂.

El análisis de la difusión de O₂ y CO₂ en bolsas con distribuciones iniciales no uniforme del contenido de humedad de los granos muestra que se producen zonas de transición en donde el nivel de concentración aumenta significativamente respecto al de bolsas con contenido de humedad uniforme. Sin embargo, este aumento no es el resultado de un proceso de deterioro de la zona en cuestión.

Palabras claves: Silo-bolsa; almacenamiento hermético; atmósfera modificada; trigo; modelado matemático, Argentina

1. INTRODUCCIÓN

Ante el crecimiento de la producción granaria de los últimos 15 años en Argentina y la falta de capacidad de almacenamiento fijo, el silo bolsa ha adquirido gran difusión. En las últimas campañas más del 40% de la producción total de granos (40 millones de toneladas) se almacenaron empleando este sistema.

Esta técnica, consiste en almacenar grano seco en bolsas de plástico herméticamente cerradas. El proceso respiratorio de los seres vivos del granel (ecosistema formado por granos, microflora e insectos) consume el oxígeno (O_2), genera dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y libera energía. La constitución de esta nueva atmósfera, rica en CO_2 y pobre en O_2 , suprime, inactiva o reduce la capacidad de reproducción y/o desarrollo de insectos y hongos, como así también la propia actividad del grano, facilitando su conservación.

La concentración de los gases en los sistemas de almacenamiento en atmósferas automodificadas depende del balance entre la respiración del ecosistema, el ingreso de O_2 y la pérdida de CO_2 al medio ambiente debido a la permeabilidad de la cubierta plástica. A su vez, el ritmo de respiración es fuertemente dependiente del tipo, condición, temperatura y contenido de humedad del grano embolsado, de la concentración de O_2 y CO_2 de la atmósfera intergranaria y del tiempo de almacenamiento.

La temperatura y la humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el almacenamiento. La temperatura del grano ensilado puede ser modificada tanto por fuentes internas como externas de energía alterando localmente las condiciones de equilibrio del grano con su medio ambiente. Las fuentes internas están asociadas a la respiración del ecosistema. Las fuentes externas dependen principalmente de la variación de las condiciones climáticas estacionales durante el tiempo de almacenamiento. El intercambio de energía con el medio ambiente genera gradientes de temperatura dentro de la masa de granos que a su vez inducen 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.

El análisis de las condiciones de almacenamiento resulta complejo debido a la fuerte interrelación que existe entre los componentes bióticos (granos + insectos + microorganismos) y abióticos (temperatura + humedad + composición de la atmósfera intergranaria) del ecosistema asociado a los granos almacenados herméticamente.

En los últimos 15 años el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), Estación Experimental de Balcarce (EEA) desarrolló numerosos estudios experimentales para analizar la influencia de distintos factores que afectan la calidad de los granos almacenados herméticamente (Rodríguez et al., 2001, 2002, 2004, Ochandio et al., 2009, 2010; Bartosik et al., 2012). Además, dado que la termometría o la aireación no son técnicas aplicables en este sistema, el INTA implementó un procedimiento de control de la actividad biológica y del almacenamiento basado en la medición del dióxido de carbono en el aire intersticial de los granos almacenados en silos bolsa (Bartosik et al., 2008b; Cardoso et al., 2008, Rodríguez et al. 2008). El procedimiento consiste en medir la concentración de CO_2 en algunos puntos de la bolsa y compararlos con un valor de

referencia que indica condiciones adecuadas para el almacenamiento. Esto implica conocer los valores típicos de concentración de CO₂ alcanzados para un amplio rango de condiciones de almacenamiento en silo-bolsas (temperatura del grano, contenido de humedad (CH), el tiempo de almacenamiento, zona agrícola, etc.) difíciles de abarcar mediante ensayos experimentales a campo.

Actualmente, la utilización de modelos de simulación computacional basados en principios físicos y validados con datos experimentales se encuentra ampliamente difundida en todas las ramas de las ciencias e ingeniería. Dada la relevancia económica que tiene la producción de granos en Argentina es importante contar con este tipo de herramientas ya que permiten analizar rápidamente numerosas situaciones, describir el efecto de diferentes factores que afectan al grano, predecir las condiciones de almacenabilidad y el deterioro potencial de los mismos. Su empleo sistemático puede contribuir a definir estrategias de almacenaje seguro en función de las características climáticas de las diferentes áreas agrícolas de Argentina.

Por lo expuesto anteriormente, se han desarrollado distintos modelos de simulación computacional para predecir la evolución de las variables relevantes relacionadas con la conservación de los granos almacenados en silos bolsa (Gastón et al., 2009; Abalone et al., 2006, 2011a; b; c; Arias Barreto et al., 2011). Arias Barreto et al. (2013) realizó un estudio comparativo de las condiciones de almacenamiento de trigo para tres áreas agrícolas de Argentina, Saenz Peña (Provincia de Chaco) con clima sub-tropical, Pergamino (centro de la Provincia de Buenos Aires) con clima intermedio y Balcarce (sur de la Provincia de Buenos Aires) con clima templado.

Las variables primarias que calcula el modelo de simulación son temperatura, contenido de humedad del grano, humedad relativa del aire intergranario y concentración de O₂ y CO₂. Con esta información es posible predecir el comportamiento de otras variables de interés como son los parámetros de calidad de los granos y el desarrollo de insectos.

Existen en la literatura correlaciones dependientes de las variables primarias para determinar parámetros de calidad del grano tales como pérdida de materia seca, tiempo de almacenamiento seguro, poder germinativo, viabilidad de la semilla que pueden acoplarse al modelo. En el estado actual se calcula la pérdida de materia seca del grano para las distintas condiciones de almacenamiento.

El desarrollo de insectos depende de la evolución de la temperatura, humedad relativa y composición de la atmósfera intergranaria. Se implementó la correlación que incorpora el efecto de la temperatura y humedad relativa en el ritmo de desarrollo de los insectos. Con este modelo simplificado se analiza la factibilidad del control de los insectos por efecto de las variables mencionadas para diferentes condiciones de almacenamiento en el silo bolsa.

Por otro lado, el análisis de la evolución de la concentración de gases y el proceso de difusión aporta un conocimiento básico para contribuir a definir un protocolo de monitoreo de los silo-bolsas, localización de puntos de medición y frecuencia de muestreo. Mediante simulación se estudió el efecto de la pérdida de hermeticidad debido a perforaciones de los silos bolsa y el proceso de difusión de los gases en bolsas con una distribución inicial de humedad no uniforme

En este trabajo se resumen las características de los modelos desarrollados y su validación. Se presentan los principales resultados derivados del empleo sistemático del modelo para evaluar las

condiciones de almacenamiento, su efecto en la calidad del grano y en la evolución de la concentración de gases de la atmósfera intergranaria.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Modelo Físico. Silos bolsa

Los silos bolsa tienen 60 m de largo, 2.70 m de diámetro y 230-250 micrones de espesor. Las bolsas están hechas de tres capas de plástico, el interior es negro y el exterior blanco con estabilizadores de UV. Las capas de plástico son una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y baja densidad (LDPE).

Pueden almacenar aproximadamente 200 toneladas de granos (trigo, maíz y soja) y usualmente los productores almacenan su producción durante seis a ocho meses.

2.2 Características de los modelos de simulación

Se han implementado modelos en 2D y 3D que predicen la evolución de la distribución de temperatura y contenido de humedad del grano almacenado, así como de las concentraciones de O_2 y CO_2 del aire intergranario.

Planteando los balances de energía y masa para las fases grano y aire en un volumen de control, se derivada un sistema de ecuaciones acoplado en términos de temperatura T , contenido de humedad del grano W , concentraciones de oxígeno O_2 y dióxido de carbono CO_2 . Los balances consideran el transporte por difusión y tienen en cuenta el consumo de oxígeno y la liberación de calor, vapor de agua y dióxido de carbono debido a la respiración del ecosistema del grano. Esta última se representa mediante la combustión completa de un carbohidrato típico. Para modelar el intercambio de energía, se consideran la interacción de la parte inferior del silo bolsa con el suelo, la radiación solar incidente sobre la bolsa y la transferencia de calor por convección y radiación entre la superficie de la bolsa y el medio ambiente. Subrutinas específicas permiten determinar las variaciones climáticas estacionales de la radiación solar en función de la orientación del plano de incidencia sobre la superficie de la bolsa. También se incorporan las variaciones climáticas de la temperatura ambiente, la humedad relativa y el viento.

Se asumió que el silo-bolsa es impermeable a la transferencia de humedad. La transferencia de O_2 y CO_2 a través del plástico fue modelada definiendo una permeabilidad equivalente del plástico a estos gases. Este valor se calcula usando un modelo de resistencias en series dado que el silo bolsa es una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y baja densidad (LDPE). También es posible incorporar en el modelo el efecto de perforaciones mediante la definición de una permeabilidad efectiva (cobertura plástica + perforaciones) (Abalone et al. 2011b) para analizar este efecto en la concentración de los gases.

Para el lecho de granos se consideran propiedades termofísicas dependientes de la temperatura y la humedad. Se han implementado el Modelo de Henderson Thomposon Modificado y el Modelo de Chung Pfof para describir las características higroscópicas de los granos. Una descripción detallada del modelo matemático se presenta en Gastón et al. (2009) y Abalone et al. (2011c), Arias Barreto et al. (2011). El mismo fue implementado en COMSOL Multiphysics 4.2a, un software comercial que permite resolver numéricamente el sistema de ecuaciones resultante mediante el método de elementos finitos. La Figura 1 muestra el dominio de cálculo y la

discretización de una sección transversal del silo bolsa. Con esta metodología se calculan las incógnitas en cada punto (nodo) de la malla o red y por interpolación el valor de las variables en cualquier punto del dominio.

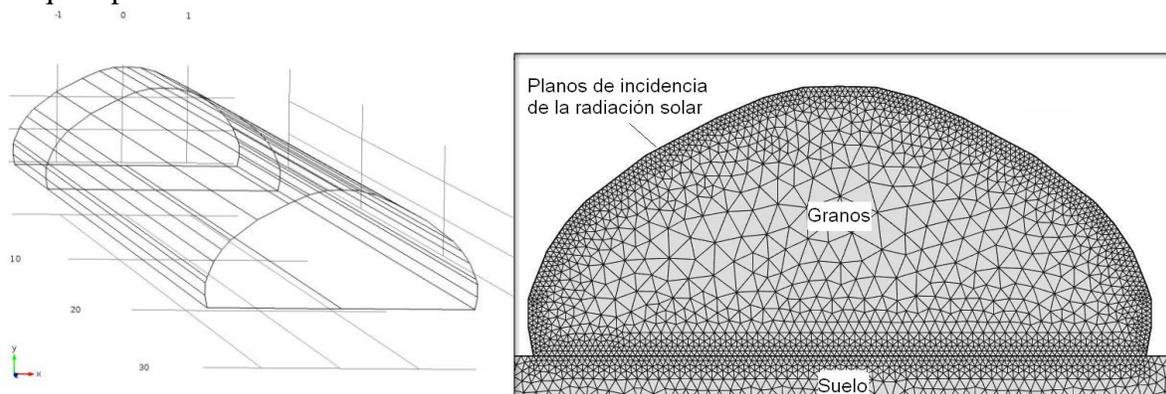


Figura 1: Dominio de cálculo y discretización de una sección transversal del silo-bolsa.

Inicialmente se desarrolló un modelo más sencillo (Modelo Global) para calcular la concentración promedio de gases en la bolsa, suponiendo que la misma es uniforme en una sección transversal (Abalone et al. 2011a; b). Este modelo, que desprecia la resistencia interna a la difusión de gases, presenta limitaciones para analizar efectos localizados en el silo bolsa.

La pérdida de materia seca (DML) se estima a partir de la producción de CO_2 haciendo uso de la relación estequiométrica que representa la combustión completa de un carbohidrato típico.

El desarrollo de los insectos depende de la evolución de la temperatura, humedad relativa y composición de la atmósfera intergranaria. Se implementó una correlación dependiente de la temperatura y humedad relativa desarrollada por Driscoll et. al (2001). El autor considera que este modelo debe interpretarse como un indicador de la probabilidad de infestación, no como una predicción del número real de insectos.

2.3 Validación de los modelos de simulación

Los modelos fueron validados comparando los valores predichos de temperatura, contenido de humedad del grano y concentraciones promedio de O_2 y CO_2 con valores medidos en ensayos de almacenamiento de trigo llevadas a cabo por el INTA EEA Balcarce. Se consideraron las condiciones climáticas del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, durante un período de almacenamiento de 6 meses, a partir del verano (enero) a invierno (julio).

Para modelizar la respiración del trigo se empleó la correlación desarrollada por White et al. (1982) que determina la cantidad de dióxido de carbono liberada ($\text{mg CO}_2/\text{kg}$ materia seca en 24 hs) en función del tiempo de almacenamiento, la temperatura y el contenido de humedad del grano.

Empleando valores de las permeabilidades del HDPE y LDPE al O_2 y CO_2 , (Osborn et al., 1992), se calcularon las permeabilidades equivalentes de la bolsa resultando $9.75 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ md}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$ y $3.22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ md}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$, respectivamente. Para un espesor promedio de $240 \mu\text{m}$ la permeancia al O_2 es $4.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$ y al CO_2 $1.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$.

2.4 Análisis del almacenamiento en silos bolsa para diferentes condiciones climáticas. Definición de las condiciones iniciales de embolsado y de los datos climáticos para la simulación

El modelo fue aplicado para analizar el almacenamiento de trigo en un silo bolsa desde Enero a Junio (seis meses). Se fijó el CH inicial del grano en 12, 14 y 16% b.h y las temperaturas iniciales de embolsado en 25°C y 40°C. Los datos climáticos correspondientes a los años 1997 a 2004 fueron considerados para Balcarce (37.84S; 58.26O), en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires; a los años 2001 a 2006 para Pergamino (33.85S; 60.93O), en el Norte de la Provincia de Buenos Aires y a los años 1999 a 2006 para Sáenz Peña (26.78S; 60.45 W), en la Provincia de Chaco.

La Figura 2 compara la temperatura promedio anual y la radiación solar en las tres localidades. En el verano, la temperatura ambiente promedio en Sáenz Peña es alrededor de 3°C más alta que en Pergamino y 7°C más alta que en Balcarce, mientras que en invierno es aproximadamente 6°C y 8°C más alta, respectivamente. Durante el verano, la radiación solar es comparable en Sáenz Peña y Pergamino y aproximadamente 9% más alta que en Balcarce. En otoño la irradiación en Sáenz Peña es aproximadamente 13% y 30% más alta que en Pergamino y Balcarce.

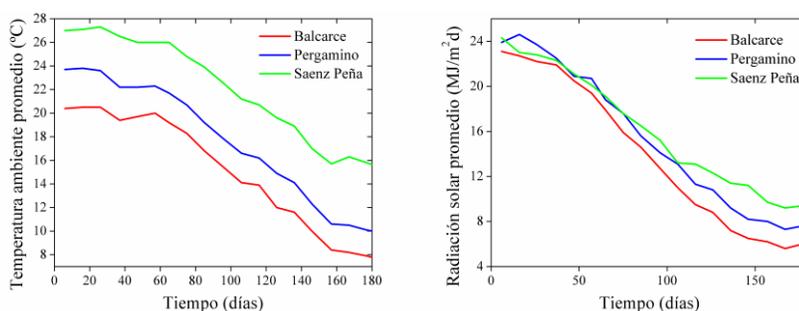


Figura 2: Comparación de la temperatura ambiente promedio y la radiación solar promedio en las áreas agrícolas.

2.5 Predicción de la concentración de gases en bolsas dañadas.

El intercambio de gases intergranarios con el medio ambiente depende de la permeabilidad del silo-bolsa. La misma es función del espesor y de la combinación de tipo de polietileno fijada en el proceso de fabricación. La presencia de pequeñas perforaciones producidas por animales o rastrojo puede cambiar significativamente la permeabilidad efectiva (cobertura plástica + perforaciones), modificando la evolución de la concentración de los gases así como generando zonas localizadas donde la combinación del oxígeno disponible para la respiración, temperatura y humedad relativa intergranaria generen condiciones propicias para el deterioro del grano.

Existen diversos modelos en la literatura para modelar macro y micro perforaciones en películas plásticas delgadas y gruesas (Abalone et al. 2011b). Empleando el modelo de Paul & Clarke (2002) se analizó el efecto de diferentes configuraciones (número y tamaño de las perforaciones por metro de bolsa) en la permeabilidad efectiva de la bolsa y en la evolución de la concentración de los gases.

2.6 Análisis de la difusión de gases para condiciones de embolsado uniforme y no uniforme del contenido de humedad

La condición más simple de analizar es considerar que la temperatura y contenido de humedad inicial del grano son uniformes. No obstante, en el almacenamiento a campo, tiene alta probabilidad de ocurrencia el llenado de un silo bolsa con grano con distinto contenido de humedad inicial (condiciones de embolsado no uniformes).

El llenado de un silo bolsa (200 toneladas) se realiza cargando grano proveniente de tolvas de aproximadamente 20 toneladas de capacidad. Por diversos factores, el contenido de humedad de los grano de una tolva a otra puede variar de 2 a 4%bh. Para simular una distribución inicial con estas características y analizar la evolución de la concentración en la dirección longitudinal del silo, se modeló el silo bolsa combinando grano húmedo y seco: 12 m de la bolsa a 16%bh y el resto a 12%bh; 12 m a 14%bh y el resto a 12%bh.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Validación de los modelos de simulación

La Figura 3 compara la temperatura predicha y medida en tres niveles dentro del silo bolsa durante 180 días, desde enero a fines junio. El desvío estándar del ajuste (SE) fue de 1.94C en la parte inferior, 1.35C en el medio y 1.20 en la parte superior del silo-bolsa.

El modelo predijo un aumento del contenido de humedad en la capa superior del orden de 1.0 a 1.5%w.b, mientras que el aumento medido resultó entre 0.4 to 0.8% w.b. (Gastón et al., 2009).

Para comparar los valores predichos de O₂ y CO₂, las concentraciones medidas de gases fueron agrupadas en cuatro rangos de contenido inicial de humedad (CH) del trigo: 12 -16%, 12 -13%, 13 -13.5% y 14 -15% bh y la exactitud del modelo fue determinada para cada rango de CH. Para el rango completo 12 -16%, SE para CO₂ fue de 1.60% mientras que para O₂ resultó de 2.45%, incrementándose con el rango de CH (Abalone et al., 2011a). La Figura 4 muestra la comparación para el rango 12 -13%, rango que posee la mayor cantidad de datos experimentales, siendo SE de 1.10% para el CO₂ y de 2.35% para O₂.

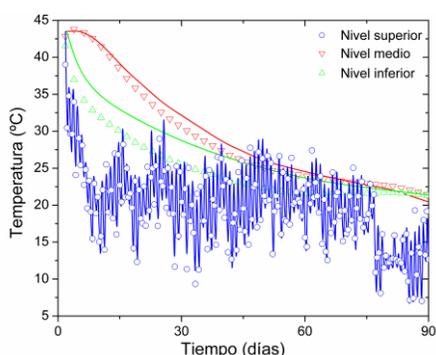


Figura 3: Comparación entre valores medidos (símbolos) y predichos (líneas) de la temperatura en tres niveles dentro del silo-bolsa (Enero-Mayo 2001). Condiciones iniciales de embolsado 43.5°C y 12.5%bh

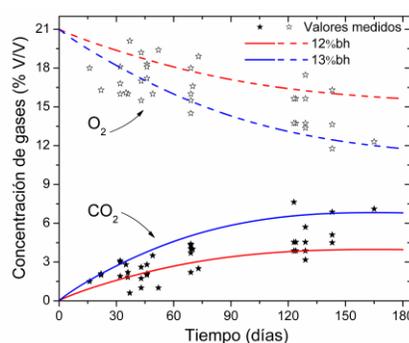


Figura 4: Comparación entre valores medidos (símbolos) y predichos (líneas) de la concentración de CO₂ y O₂ (Enero-Junio 2001). Temperatura inicial 25°C. Rango de contenido de humedad 12-13%bh.

3.2 Análisis del almacenamiento en silos bolsa para diferentes condiciones climáticas.

3.2.1 Comparación de los cambios de temperatura y humedad relativa del silo bolsa.

Los resultados de la simulación numérica presentada por Gastón et al. (2009) revelaron que los gradientes de temperatura y de contenido de humedad se concentran en una capa del orden de 0.20m de espesor por debajo de la superficie del silo bolsa. Esto significa que aproximadamente el 25% del grano almacenado está afectado por las fluctuaciones horarias de las condiciones climáticas estacionales y en consecuencia estará expuesto a mayores pérdidas de calidad y deterioro. Por lo tanto se ilustrarán el cambio de la temperatura en dos posiciones, debajo de la superficie plástica ($y = 1.4\text{m}$) y en el centro ($y = 0.8\text{m}$) junto con la evolución de la temperatura promedio del silo bolsa. Para una dada temperatura inicial del grano embolsado, los resultados para 12, 14 y 16% b.h de CH inicial fueron casi idénticos. Por esta razón, sólo los resultados correspondientes a 16% b.h de CH inicial (peor condición de embolsado) se muestran en la Figura 5 para 25°C y la Figura 6 para 40°C . Debajo de la superficie, la temperatura oscila con una amplitud promedio de 5°C en verano y 2.5°C en invierno. En Balcarce y Pergamino, la temperatura en la parte superior comenzó a decrecer desde el comienzo para ambas temperaturas iniciales de embolsado, mientras que en Saenz Peña, el clima más cálido provoca un aumento de 2.5°C durante el verano para una temperatura inicial de embolsado moderada (25°C). Las oscilaciones se atenuaron casi completamente en la zona central de la bolsa ($y = 0.8\text{m}$) y la temperatura decreció debido al intercambio de energía con el medioambiente, incluso en el caso de grano húmedo (16% b.h).

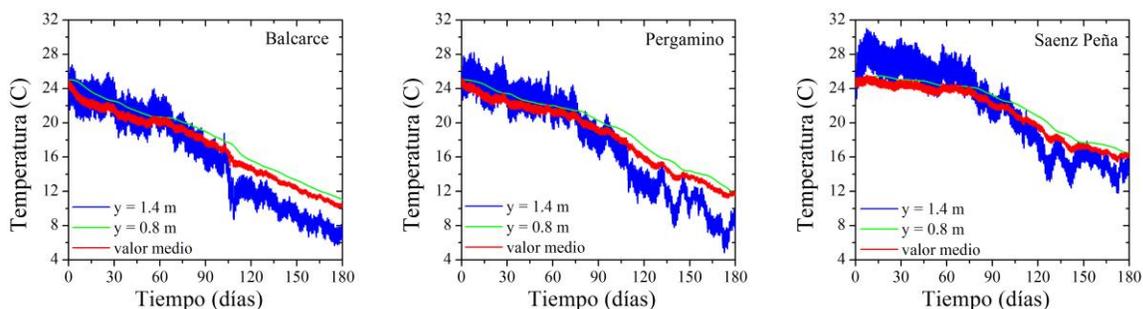


Figura 5: Evolución de la temperatura del grano en diferentes alturas dentro del silo bolsa. Condiciones de almacenamiento: 16% b.h, 25°C .

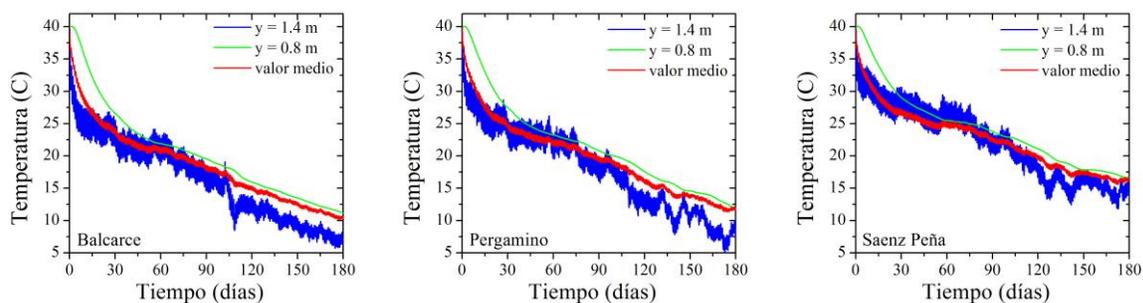


Figura 6: Evolución de la temperatura del grano en diferentes alturas dentro del silo bolsa. Condiciones de almacenamiento: 16% b.h, 40°C .

También se determinó la redistribución del contenido de humedad la cual se produce en dirección opuesta a los gradientes de temperatura. Por lo tanto, la humedad migró principalmente hacia la superficie y en menor medida hacia la base del silo bolsa como se demostró en trabajos previos (Gastón, Abalone, Bartosik & Rodríguez, 2008, 2009). En promedio, la acumulación de humedad en la capa superior ($y = 1.4\text{m}$) fue a lo sumo de 0.2% b.h puntos de humedad para 25°C

y de 0.3% b.h para 40°C en las tres localidades.

Empleando la isoterma de sorpción, se predijo la humedad relativa de equilibrio (HRE). Condiciones de almacenamiento seguro (HRE<70%) se mantuvieron del verano al invierno para 12% b.h y 14% b.h de CH inicial. Para 16% b.h, HRE intersticial fue siempre superior a 70% durante el verano y durante el invierno, la HRE de la capa superior ($y= 1.4$ m) disminuyó al enfriarse el grano como consecuencia de las condiciones climáticas, pero no lo suficiente como para alcanzar condiciones de almacenamiento seguro. La Figura 7 muestra la HRE para las condiciones iniciales de 16% b.h y 25°C. Estos resultados demuestran la importancia de mantener la hermeticidad del silo bolsa, especialmente en el caso de almacenamiento de grano húmedo. A pesar de que el grano húmedo genera condiciones anaeróbicas que previenen la actividad de la microflora (Weinberg et al., 2008), cualquier filtración sería favorable para la actividad fúngica aeróbica causando deterioro y reduciendo el tiempo de almacenamiento seguro.

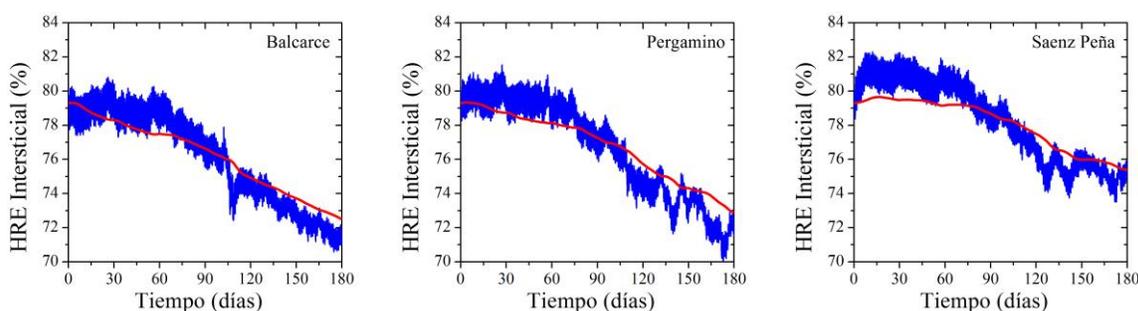


Figura 7: Evolución de la humedad relativa de equilibrio (HRE) en Balcarce, Pergamino y Sáenz Peña. Condiciones de almacenamiento: 16% b.h, 25°C

3.2.2 Comparación de la concentración de CO₂ y O₂.

La comparación de los niveles de referencia de CO₂ y O₂ entre las tres localidades se realiza en términos de la evolución de la concentración promedio de ambos gases.

La Figura 8 ilustra la concentración promedio de los gases en las tres localidades para una temperatura inicial de embolsado de 25°C. Se puede apreciar que las condiciones climáticas producen cambios significativos en los niveles de referencia luego de 180 días de almacenamiento para 12% y 14% b.h. En Balcarce para 12% b.h, el nivel de CO₂ aumentó a (4.03±0.07)% V/V y el nivel de O₂ disminuyó a (15.5±0.1)% V/V. Un incremento de 3°C en la temperatura ambiente cambió los niveles de CO₂ y O₂ a (4.6±0.1)% V/V y (14.8±0.1)% V/V en Pergamino, y uno de 8°C a (6.0±0.1)% V/V y (13.9±0.2)% V/V en Sáenz Peña. La diferencia en los niveles de concentración entre verano (40 días) e invierno (180 días) permanecieron dentro de los 3% puntos aproximadamente en las tres localidades.

A 14% b.h la actividad fúngica se vuelve importante aumentando la concentración de CO₂ a (11.7±0.2)% V/V y reduciendo la concentración de O₂ a (5.0±0.3)% V/V en Balcarce y a (13.2±0.3)% V/V y a (2.9±0.4)% V/V en Pergamino. Se encontraron diferencias de hasta 7% puntos entre verano (40 días) e invierno (180 días). En Sáenz Peña, el O₂ es prácticamente consumido luego de 140 días y permaneció en un nivel cero a partir de allí porque todo el O₂ ingresante a través del plástico es consumido por la respiración. El CO₂ alcanza (14.9±0.1)% V/V y luego decae como resultado de la permeancia de CO₂ través del plástico que es aproximadamente 3 veces mayor que la del O₂ ($\beta = 3$). Para 16% b.h, el O₂ disminuye a menos

del 1% dentro de los 40 a 50 días (Sáenz Peña y Balcarce) y el CO₂ evoluciona como se explicó anteriormente.

La Figura 9 muestra los resultados para 40°C de temperatura inicial. Para 12% b.h, CO₂ aumentó de 1 a 1.5% V/V puntos respecto a 25°C mientras que el O₂ disminuyó en la misma magnitud. Para 14% b.h, el O₂ disminuye a menos del 1% V/V luego de 90 días en Sáenz Peña, 140 días en Pergamino y 180 días en Balcarce mientras que a 16% b.h se alcanzan estas condiciones en aproximadamente 20 días en las tres localidades.

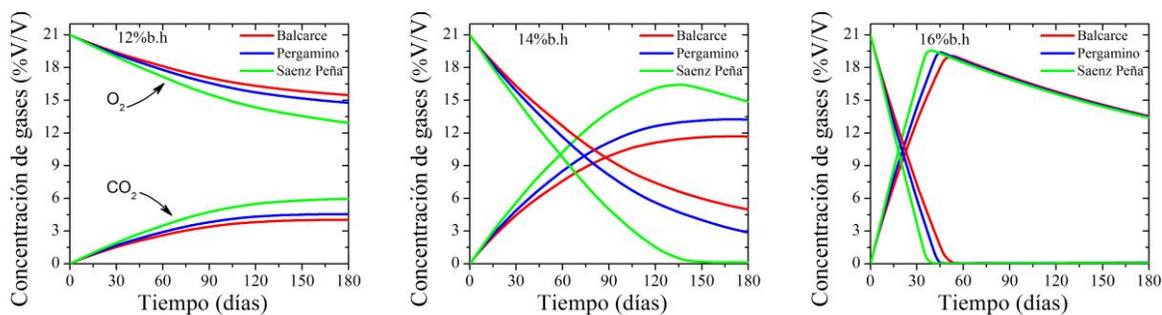


Figura 8: Evolución de la concentración de gas en Sáenz Peña, Pergamino y Balcarce. Temperatura inicial 25°C

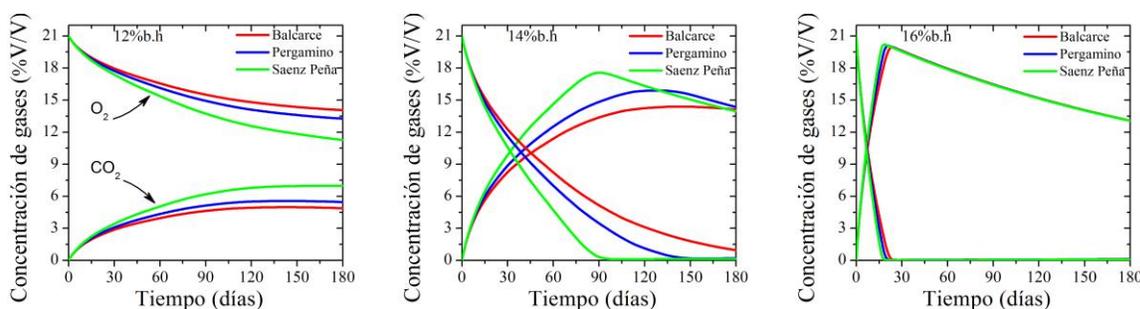


Figura 9: Evolución de la concentración de gas en Sáenz Peña, Pergamino y Balcarce. Temperatura inicial 40°C

3.2.3 Comparación de la pérdida de materia seca (DML)

Para estimar el efecto de las condiciones de almacenamiento en la calidad del grano se calculó la DML. White et al. (1982) considera que una DML de 0.1% es inaceptable para trigo y si el grano se empleará como semilla, el límite de almacenamiento seguro es 0.04% de DML.

La Figura 10 presenta la DML promedio del silo bolsa para trigo a 12, 14 y 16% b.h, 25°C y 40°C en las tres localidades. Para la peor condición de almacenamiento, trigo a 16% b.h y 40°C, la DML media en promedio fue (0.015±0.004)% luego de aproximadamente 20 días. De allí en más, el incremento de la DML presumiblemente resultaría pequeño debido a la inhibición de la respiración, ya que el nivel de O₂ predicho por el modelo se mantuvo muy bajo. Las líneas en trazos en la Figura 10 darían una estimación de la magnitud de la DML media producida en un silo bolsa que ha perdido hermeticidad, de forma tal que se dispone de O₂ en forma irrestricta para la respiración. En tales condiciones, la DML excedería los límites permitidos para el uso de trigo para semilla pero no serían lo suficientemente elevados para disminuir la calidad comercial del grano. Esto resultados concuerdan con datos de ensayos a campo que muestran que cuando se

embolsaron semillas con bajo CH (HRE menor que 67%), no se observó una reducción significativa en los ensayos de poder germinativo en trigo y soja (Bartosik, Rodríguez & Cardoso, 2008) y cebada (Massiggoge et al., 2010; Ochandio et al., 2009, 2010), aun cuando el tiempo de almacenamiento se extendió al verano.

Por otro lado se determinó que el sector dentro de la bolsa con mayor DML depende de la temperatura inicial de embolsado. Para 25°C, la DML es mayor en la capa superior que en el centro de la bolsa, mientras que para 40°C el comportamiento es opuesto. Como resultado del intercambio de energía con el medio ambiente, la velocidad promedio de respiración resultó mayor en la capa superior ($y = 1.4\text{m}$) porque la temperatura (inicialmente 25°C) aumentó y permaneció superior a la del centro ($y = 0.8\text{m}$) durante el verano (primeros 80 días en la Figura 5). Cuando el trigo se embolsó a 40°C, el centro del silo bolsa se mantuvo más caliente que la capa superficial que se enfrió debido a las condiciones climáticas, invirtiéndose así el ritmo de respiración. En base a esta observación, podría desarrollarse durante el almacenamiento variaciones en la calidad de la semilla en el perfil de la bolsa (dirección vertical). Por este motivo, se recomienda muestrear el perfil completo del grano embolsado para obtener información confiable respecto de la calidad de la semilla.

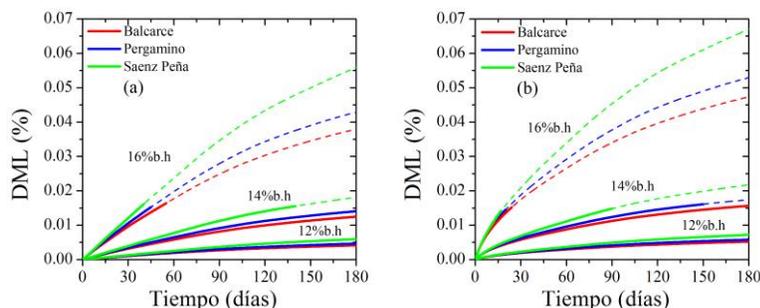


Figura 10: Pérdida de materia seca (DML) en trigo almacenado en silobosa en Balcarce, Pergamino y Sáenz Peña. Temperatura inicial: a) 25°C; b) 40°C

3.3 Factibilidad de control de los insectos en los silos bolsa

La Figura 11 compara la evolución de la temperatura promedio en las tres localidades para 16% b.h, y temperatura inicial de 25°C y 40°C. Estos resultados sugieren que para las regiones del centro y sur de la Argentina, la actividad de los insectos estaría limitada para grano seco y húmedo, ya que la temperatura promedio del grano decrece por debajo de los 17°C durante el otoño y el invierno previniendo la infestación. Más aún, incluso en verano, grano con 14% b.h o mayor CH, limitaría la actividad de los insectos como resultado de la baja concentración de O₂ y alta de CO₂, si el silo bolsa mantiene un alto nivel de hermeticidad.

Por el contrario, cuando se almacena grano seco (12% b.h), la infestación podría desarrollarse durante el verano y al comienzo del otoño (o durante todo el año en las regiones con clima tropical) ya que ni la temperatura ni los niveles de O₂ y CO₂ alcanzan valores para limitarla. Una ventaja adicional del silo bolsa con respecto a la infestación es que los mismos no se reutilizan, cada vez que se embolsa grano se emplea una bolsa nueva libre de insectos (no hay infestación permanente como en las estructuras fijas) y el plástico actúa como una barrera física, por lo que si el grano proviene del campo libre de insectos, no debería producirse una infestación posterior durante el almacenamiento.

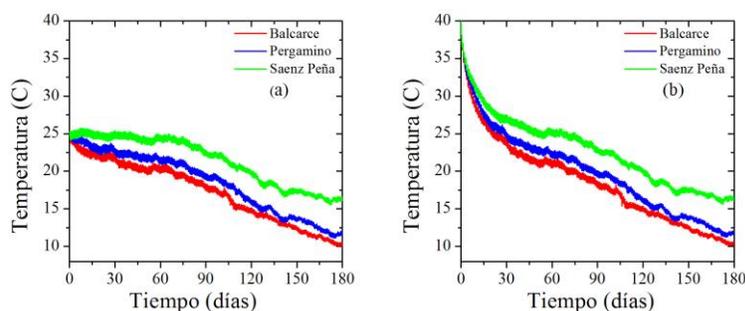


Figura 11: Evolución de la temperatura promedio del grano en Balcarce, Pergamino y Sáenz Peña. Condiciones de almacenamiento: 16% b.h; temp. inicial a) 25°C; b) 40°C

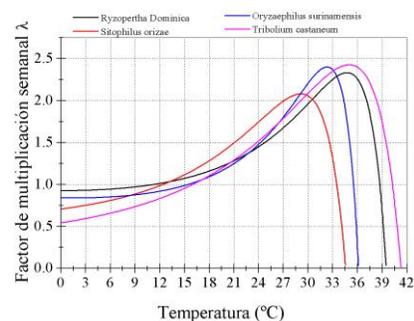


Figura 12: Factor de multiplicación semanal de insectos (Driscoll et al., 2000) para RH 70%

Driscoll et. al (2001) desarrolló correlaciones dependiente de la temperatura y humedad relativa para predecir el desarrollo de distintas especies (*Rhyzoperta Dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum*). La Figura 12 muestra el factor de multiplicación semanal para las cuatro especies. Un factor de multiplicación λ igual a la unidad significa que la población no aumenta mientras que uno menor que la unidad que la misma disminuye. Para profundizar el estudio de la factibilidad de control por efecto de la temperatura, se calculó el factor de multiplicación semanal λ de una población de *Rhyzoperta Dominica* durante el tiempo de almacenamiento (180 días, de enero a julio) empleando la evolución de la temperatura en el centro ($y = 0.8$ m), la temperatura debajo de la superficie ($y = 1.4$ m) y la temperatura promedio de la bolsa que se muestra en la Figura 5.

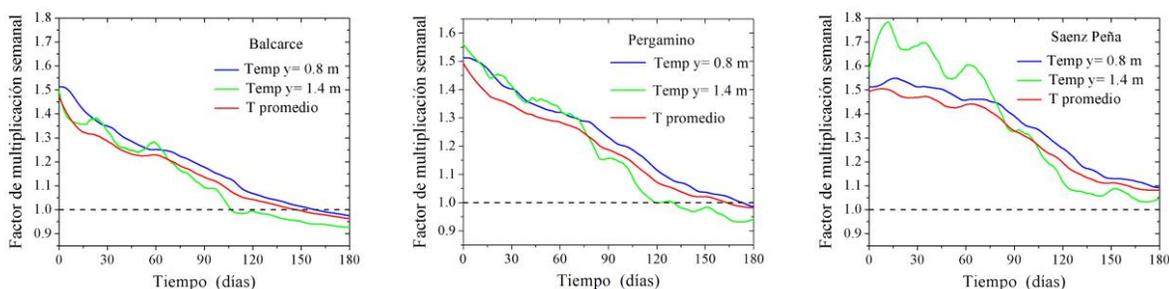


Figura 13: Evolución del factor de multiplicación semanal de insectos en las tres localidades. Condiciones de almacenamiento del grano: 12% b.h, 25°C

De acuerdo a este modelo, la Figura 13 muestra que en Balcarce y Pergamino, con clima templado e intermedio, respectivamente, el control por efecto de la temperatura es relativamente débil, un poco mayor en la zona superficial lo cual resultaría favorable en el caso de ingreso de O_2 por pérdida de hermeticidad de la bolsa. En Sáenz Peña, con clima subtropical, el factor de multiplicación semanal se mantiene constante en la zona central durante los primeros 90 días y nunca disminuye a valores menores que la unidad.

En consecuencia, la posibilidad de controlar la población de insectos radica fundamentalmente en el efecto de la composición de la atmósfera intergranaria.

3.4 Predicción de la concentración de gases en bolsas dañadas

Los valores estimados de la permeabilidad efectiva de la bolsa (cobertura plástica + perforaciones) muestran que la presencia de perforaciones reduce el cociente de permeabilidades β (permeabilidad CO_2 / permeabilidad O_2). Por lo tanto, los cambios en la concentración de O_2 serán más pronunciados que aquellos cambios en CO_2 con respecto al caso sin perforaciones. También se concluye que la permeabilidad efectiva de una bolsa con un número mayor de pequeñas perforaciones es mayor que la de una que tiene una única perforación con igual área de transferencia (Abalone et al. 2011b).

Se simuló la evolución de la concentración en un silo con perforaciones de distinto diámetro y se compararon los resultados con los de un silo bolsa sin perforaciones (caso base). Se consideraron perforaciones de 3, 5 y 10 mm de diámetro por metro de silo-bolsa, semejantes a las producidas por el rastrojo en el campo. Se consideró trigo a 13%bh y a 15%bh, embolsado con una temperatura inicial de 25°C.

La Figura 14 muestra los resultados para 13% bh. A mayor diámetro de la perforación, mayor la diferencia con respecto al caso base. La concentración de CO_2 disminuye 0.75, 1 y 2 % V/V, mientras que la del O_2 aumenta 1.5, 2 y 4.5 % V/V al cabo de 180 días para una perforación por metro de silo de 3, 5, 10 mm de diámetro, respectivamente. La Figura 15 muestra los resultados para 15%bh con cambios muy significativos con respecto al caso base, con diferencias máximas de 2% V/V para el CO_2 y 6 % V/V para el O_2 .

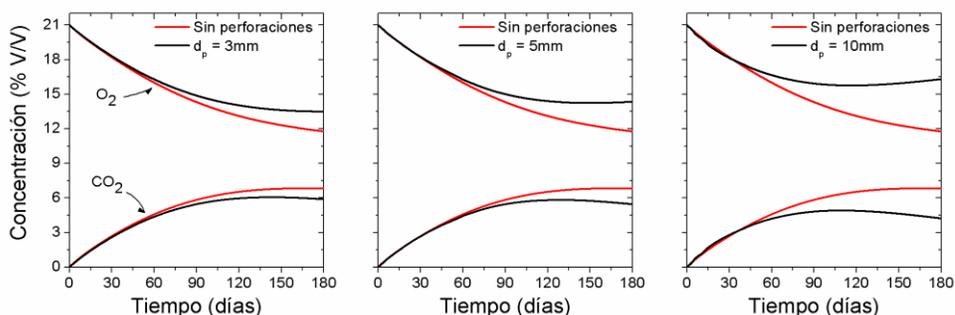


Figura 14: Evolución de la concentración promedio de O_2 y CO_2 para un silo-bolsa sin perforaciones y con una perforación de 3mm, 5mm y 10mm de diámetro, 13%bh y 25°C.

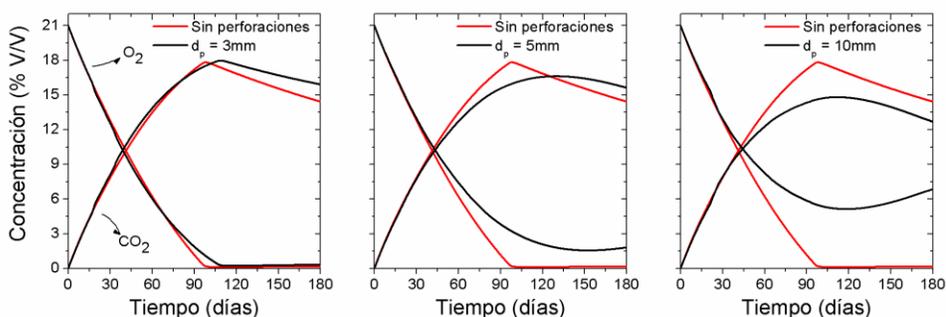


Figura 15: Evolución de la concentración promedio de O_2 y CO_2 para un silo-bolsa sin perforaciones y con una perforación de 3mm, 5mm y 10mm de diámetro, 15%bh y 25°C

Tanto para grano seco como húmedo, con una perforación de 10 mm de diámetro por metro de silo-bolsa, el nivel de O_2 comienza a aumentar durante la última etapa (120-180 días). Esto se

debe a que a medida que avanza el invierno, al disminuir la temperatura del grano decrece la velocidad de respiración y el ingreso de O_2 resulta mayor que el consumo. En el silo húmedo sin perforaciones siempre el consumo resulta mayor que el ingreso de O_2 , alcanzándose la condición de anaerobiosis favorable para la conservación al cabo de los 90 días. La disponibilidad de O_2 en una bolsa húmeda aumenta el riesgo de deterioro del grano porque la actividad biológica de la microflora podría reactivarse. Así mismo, al continuar respirando aumentará la pérdida de materia seca del grano, pudiendo superarse límites admisibles para el empleo del grano para semilla (Abalone et al., 2011b). Para las perforaciones de 3 y 5mm, la Figura 15 muestra que los niveles de O_2 se mantienen menores o iguales a 1.5% V/V.

3.5 Análisis de la difusión de gases para condiciones de embolsado uniforme para una distribución inicial uniforme de temperatura y contenido de humedad de los granos

La Figura 16 muestra, para una sección transversal del silo-bolsa, perfiles típicos de temperatura (a), contenido de humedad (b) y velocidad de producción de CO_2 (c). Los mismos corresponden a las peores condiciones de almacenamiento, es decir, grano húmedo y caliente a 16 %bh y 40°C, al mediodía del primer y décimo día de almacenamiento.

Las fluctuaciones de temperatura en respuesta a las condiciones climáticas se concentran en una capa de unos 25 cm debajo de la superficie (Figura 16a) En el centro, a pesar de la energía liberada durante la respiración no se registra un aumento de la temperatura debido a que la razón (área de intercambio/ volumen del silo-bolsa) resulta elevada (Gastón et al., 2009). La migración de la humedad hacia la base y superficie de la bolsa, opuesta a los gradientes de temperatura, resulta del orden de 1%bh (Figura 16b). La velocidad de producción de CO_2 sigue el comportamiento de la distribución de la temperatura (Figura 16b).

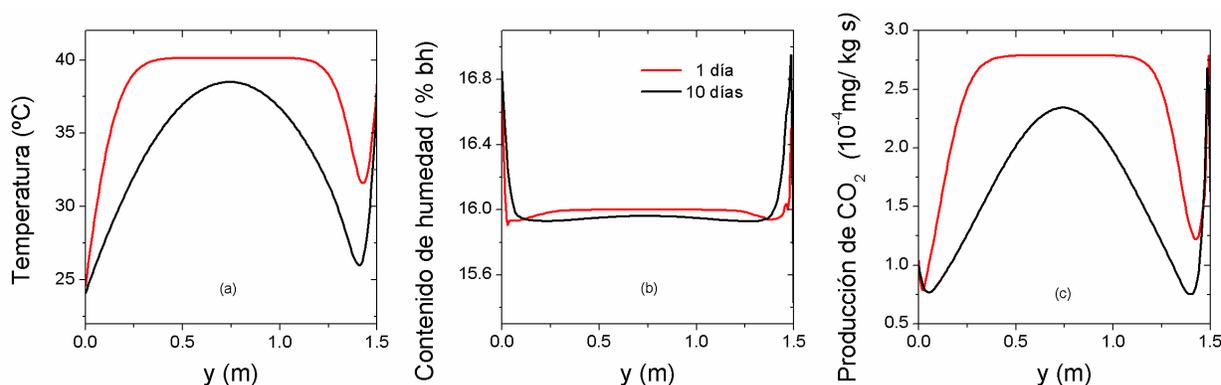


Figura 16: Perfil de temperatura (a), contenido de humedad (b) y velocidad de respiración (c) en dirección vertical para una sección transversal del silo-bolsa. Condiciones iniciales de embolsado 40°C y 16%bh.

La Figura 17 muestra las correspondientes distribuciones de O_2 y CO_2 . A pesar que en la zona central la respiración es de dos a tres veces más intensa que en la periferia de la bolsa, los gradientes de concentración son del orden de 0.05%V/V/m, como consecuencia del transporte por difusión por lo que la distribución resulta casi uniforme cuando los resultados se presentan en una misma escala (Figura 17c).

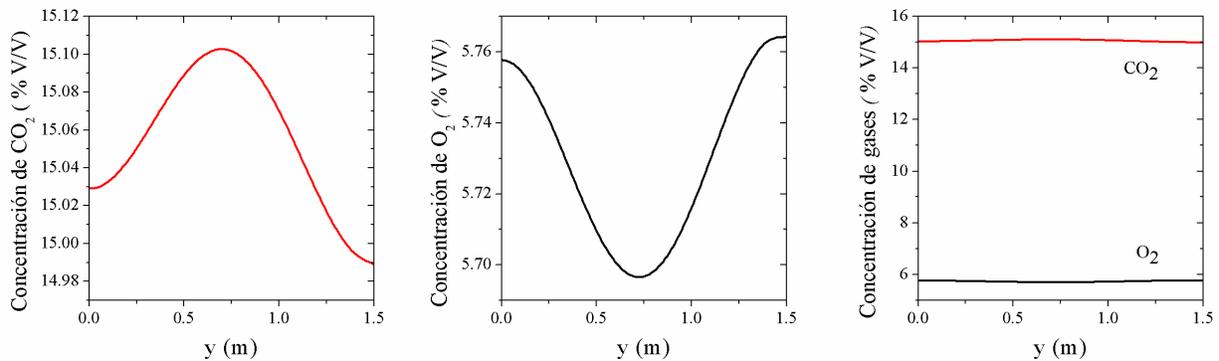


Figura 17: Perfil de concentración de CO₂ y O₂ en dirección vertical para una sección transversal del silo-bolsa al cabo 10 días de almacenamiento. Condiciones iniciales de almacenamiento 40°C y 16%bh.

Gradientes de concentración del orden de 0.05%V/V/m difícilmente sean medibles en las bolsas en el campo, por lo que a los fines prácticos, puede considerarse que la distribución de gases es uniforme. Estas predicciones concuerdan con las experiencias realizadas a campo donde no se detectó una estratificación de las concentraciones en el eje vertical de los silo-bolsa (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008).

Este comportamiento resulta favorable para la implementación de un protocolo de monitoreo de las bolsas, basado en el nivel de CO₂. Para una dada sección transversal de la bolsa, el muestreo en uno o dos lugares debajo de la superficie (valores locales de la concentración) serían suficientes para reunir información sobre el estado de conservación del grano, ya que si bien la zona afectada (por ejemplo un foco con mayor generación de CO₂ en la base del silo) puede no ser la zona testeada, su efecto rápidamente se difunde hacia esta última.

3.4 Efecto de una distribución inicial no uniforme de contenido de humedad de los granos

Para simular una distribución inicial no uniforme se modeló el silo-bolsa combinando grano húmedo y seco: 12m de la bolsa a 16%bh y el resto a 12%bh; 12m a 14%bh y el resto a 12%bh.

La Figura 18 (corresponde a media bolsa por simetría), muestra la distribución del contenido de humedad inicial (a), de la temperatura (b) y de la velocidad de producción de CO₂ (c) en la dirección longitudinal del silo-bolsa al cabo de 30 y 90 días para la combinación 16-12%bh. Al cabo de 30 días la temperatura del silo descendió de 40 a 29°C. A medida que se avanza la estación fría (90 días) el descenso de la temperatura a 21°C reduce a más de la mitad el ritmo de respiración. Para la combinación 14-12%bh la distribución de temperatura es casi idéntica a la de la Figura 15b, pero la producción de CO₂ a 16% b.h es 3 veces mayor que a 14%b.h (Arias Barreto et al., 2011). La Figura 19 muestra la distribución de CO₂ y O₂ a para 16-12%bh, cada treinta días de almacenamiento para 40°C de temperatura inicial.

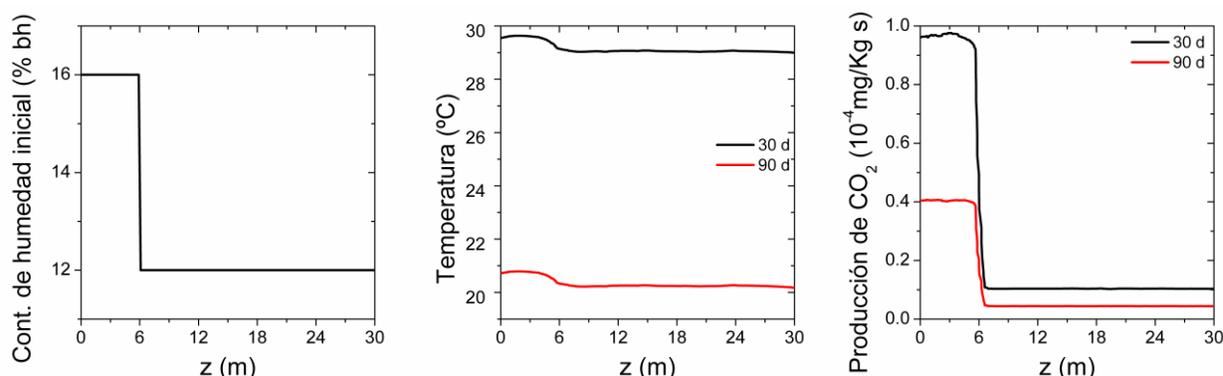


Figura 18: Cont. de humedad para la distribución inicial 16-12%bh, temperatura y producción de CO₂ para 30 y 90 días. Temperatura inicial 40°C

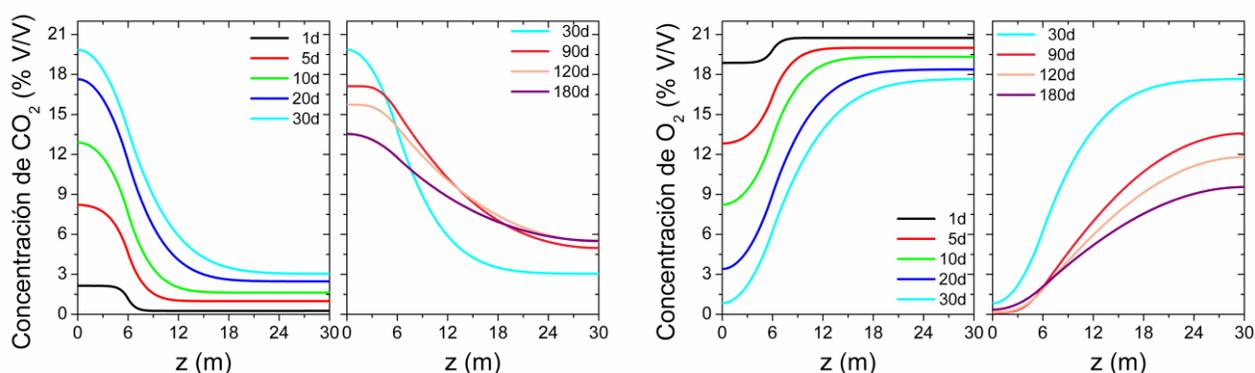


Figura 19: Distribución longitudinal de concentración de CO₂ y O₂ para la distribución inicial 16-12%bh. Temperatura inicial 40°C

En estas gráficas se observa que durante los primeros treinta días se desarrolla una zona de “transición”, donde los valores de la concentración son sustancialmente diferentes a los correspondientes a un embolsado uniforme fijados como referencia. Esto se debe a la difusión de los gases desde la zona de mayor a menor concentración. Para la condición 16-12%bh, la longitud de la zona es del orden de 12m. Para 14-12%bh la zona se reduce a unos 6 m (Arias Barreto et al., 2011). Estos resultados muestran la importancia de llevar un registro de las humedades de embolsado a lo largo de la bolsa, a fin de realizar una correcta interpretación de los valores medidos durante el monitoreo. El caso analizado muestra que los valores más elevados de CO₂ en la zona de transición no son el resultado de un proceso de deterioro, sino del transporte desde la zona húmeda a la seca. Por otro lado, si no existe un registro de humedades iniciales por tolva, realizando un monitoreo temprano (5 días después de embolsado) con un espaciamiento de unos 6 m entre puntos de muestro podría detectarse el llenado no uniforme. A medida que avanza el tiempo de almacenamiento (30-180 días), se observa que la distribución de CO₂ a lo largo de la bolsa tiende a uniformizarse. En la zona húmeda la disminución en el ritmo de producción de CO₂ no compensa la difusión y la pérdida a través del plástico por lo que la concentración disminuye en la zona húmeda mientras que aumenta en la zona seca.

En una bolsa uniforme a 16%bh y 40C de temperatura inicial, el O₂ se consume totalmente al cabo de 15 días. En la distribución de O₂ para el caso para 16-12%bh (Figura 19) se observa que recién al cabo de 90 días se alcanza esta condición debido a la difusión de O₂ desde la zona seca a la húmeda. Desde el punto de vista de la conservación esto implica que podría aumentar la pérdida de materia seca debido a la posibilidad que tiene el grano de continuar respirando.

4. CONCLUSIONES

Mediante un modelo matemático validado se analizó el efecto de las condiciones climáticas en la evolución de la concentración de gases en trigo almacenado en silos bolsa. Valores de referencia de los niveles promedio de O₂ y CO₂ fueron predichos para tres zonas productivas típicas: una en el Norte con clima subtropical (Sáenz Peña, Provincia del Chaco), una en el Centro con clima intermedio (Pergamino, Provincia de Buenos Aires) y otra en el Sur con clima templado (Balcarce, Provincia de Buenos Aires) de Argentina.

Los resultados mostraron que los valores referenciales de O₂ y CO₂ dependen fuertemente del contenido de humedad inicial y de la temperatura de embolsado del grano. Además, la condición climática agrícola produce cambios significativos, especialmente para grano seco y levemente húmedo. Una diferencia de aproximadamente 7 a 8°C en el promedio de la temperatura ambiente entre la región Norte (Sáenz Peña) y la región Sur (Balcarce) cambia los niveles de referencia aproximadamente 2% V/V puntos para 12% b.h y aproximadamente 4% V/V puntos para 14% b.h. En las tres localidades, el O₂ disminuyó a menos de 1% para 16% b.h.

El modelo predice un leve incremento en el CH de la capa superior de granos. Para grano húmedo, la HRE de la capa superior es mayor que la de almacenamiento seguro, incluso durante el invierno, resultando factible la actividad fúngica si hay pérdida de hermeticidad. Sin embargo, la DML predicha para todas las condiciones de almacenamiento no superó los límites para producir una disminución en la calidad comercial del grano; no obstante la calidad para semilla podría ser afectada en caso de almacenar grano húmedo

La evolución de la temperatura promedio del grano en combinación con los niveles de CO₂ y O₂ alcanzados en los silos bolsa demuestra que para las condiciones climáticas de las regiones de centro y sur de Argentina, la actividad de los insectos podría ser limitada. Embolsar grano seco en las zonas del Norte (clima subtropical) permitiría la actividad durante el verano y otoño. No obstante, de acuerdo al modelo de Driscoll et al (2000), el control del desarrollo de los insectos por efecto de la temperatura es débil. En consecuencia este dependería fundamentalmente del efecto de la composición de la atmósfera intergranaria.

La presencia de perforaciones en las bolsas cambia significativamente los niveles de CO₂ y O₂. Con perforación de 10 mm de diámetro por metro de bolsa, los niveles de O₂ son superiores al 6% V/V por lo que la actividad biológica de la microflora podría reactivarse.

Es conveniente tener un registro del contenido de humedad de cada tolva o tanda de granos que se embolsa a los efectos de interpretar correctamente las mediciones de la concentración de CO₂ durante el monitoreo. De no contar con este registro, un testeado espaciado unos 6m a lo largo de la bolsa dentro de los primeros días de embolsado permite obtener información respecto a la distribución iniciales de humedad de los granos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes Instituciones: ANPCYT/FONCYT (PICT 2008 0460), Universidad Nacional del Rosario (PID ING295) y al INTA-PRECOP Proyecto: Eficiencia en la Postcosecha, por el financiamiento del presente trabajo.

6. REFERENCIAS

- Abalone, R.M., A. Gastón, A. Cassinera, and M. A. Lara. 2006. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional* 24: 233-247.
- Abalone, R., A. Gastón, R. Bartosik, L. Cardoso and J. Rodríguez. 2011a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag. Part I: Model development and validation. *Journal of Stored Products Research* 47: 268-275.
- Abalone, R., A. Gastón, R. Bartosik, L. Cardoso and J. Rodríguez. 2011b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag. Part II: Model sensitivity and effect of grain storage conditions. *Journal of Stored Products Research* 47: 268-275.
- Abalone, R. and A. Gastón. 2011c. Mathematical modelling of oxygen and carbon dioxide concentration profiles in the interstitial atmosphere of silo-bags. In: *Proceeding of XXXIV CIOSTA CIGR V Conference 2011: Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry*, 1-9, Vienna, Austria.
- Arias Barreto, A., R. Abalone and A. Gastón. 2011. Simulación computacional de la difusión de gases en sistemas de almacenamiento hermético. *Mecánica Computacional* 30: 1575-1589.
- Arias Barreto, A., R. Abalone, A. Gastón and R. Bartosik. 2012. Computer simulation of gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag for typical agricultural areas of Argentina. In: *Proceeding of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, CAF2012*. 575-582. Antalya, Turkey.
- Arias Barreto A., R. Abalone, A. Gastón, R. Bartosik. 2013. Analysis of storage conditions of a wheat silo-bag for different weather conditions by computer simulation *Biosystems Engineering*. 116 (4), 497-508.
- Bartosik, R. E., M. L. Cardoso and J. C. Rodríguez. 2008b. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring. In: *Proceeding of 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*. 550-554.
- Bartosik, R. 2012. An inside look at the silo-bag system. In: *Proceeding of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, CAF2012*. 117-129.
- Cardoso, M. L., R. E. Bartosik, J. C. Rodríguez and E. Ochandio. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo-bag). In: *Proceeding of the 8th Int. Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*. 565-568.
- Driscoll, R., Longstaff, B.C. and Beckett, S. 2000. Prediction of insect populations in grain storage. *Journal of Stored Products Research* 36: 131-151.
- Gastón, A., R. Abalone, R. E. Bartosik and J. C. Rodríguez. 2009. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo-bags). *Biosystems Engineering* 104: 72-85.
- Ochandio, D., J. Rodríguez, E. Rada, L. Cardoso and R. Bartosik. 2009. Almacenamiento de cebada cervecera en bolsas plásticas herméticas. In: *Proceeding of the X Argentine Congress of Rural Engineering and II of MERCOSUR*, Rosario, Argentina. 238.
- Ochandio, D., L. Cardoso, R. Bartosik, D. de la Torre, J. Rodríguez and J. Massigoge. 2010. Storage of quality malting barley in hermetic plastic bags. In: *Proceeding of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, Portugal*, 331-337.

- Osborn, K.R. and W. A. Jenkins. 1992. *Plastic Films. Technology and Packaging Applications*. Thecnomic Publishing Co, Lancaster, Penn.
- Paul, D.R. and R. Clarke. 2002. Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. *Journal of Membrane Science* 208: 269-283.
- Rodríguez, J.C., R. E. Bartosik, H.D. Malinarich, J.P. Exilart and M.E. Nolasco. 2001. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema silobag. Informe final de girasol. EEA INTA Balcarce. <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm>
- Rodríguez, J. C., R. E. Bartosik, H. D. Malinarich and E. E. Maier. 2002. Silobag: evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field. In: *Proceeding of the 8th International Working Conference on Stored Products Protection, York, England*. 1018-1023.
- Rodríguez, J. C., R. E. Bartosik, H. D. Malinarich, J. P. Exilart and M. E. Nolasco. 2004. IP Short term storage of Argentine cereals in Silobags to prevent spoilage and insects. In: *Proceeding of the International Quality Grain Conference, Purdue University, USA*. 1-15.
- Rodríguez, J. C., R. E. Bartosik, M. L. Cardoso and D. Croce. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo-bag). In: *Proceeding of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, Chengdu, China*, 589-592.
- White, N. D. G, R. N. Sinha and W. E. Muir. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Engineering* 24(1): 35-42.