

ALMACENAMIENTO DE GRANOS EN SILOS-BOLSA. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE LA ATMÓSFERA AUTOMODIFICADA

Rita Abalone^{1,2} y Analía Gastón^{1,3}

¹Fac. de Cs. Exs., Ing. y Agrimensura. U. N. Rosario

²Instituto de Física Rosario (UNR - CONICET)

³Carrera de Investigador Científico. Universidad Nacional de Rosario
Tel: 0341-4495467 int. 33, e-mail: rabalone@fceia.unr.edu.ar

Recibido: 20-07-09; Aceptado: 04-10-09.

RESUMEN.- En este trabajo, partiendo de un modelo validado de transferencia de calor y masa, se incorporan los balances de O_2 y CO_2 para determinar en forma acoplada la temperatura, humedad y pérdida de materia seca de trigo almacenado en un silo-bolsa y la concentración de los gases de la atmósfera intergranaria. El sistema de ecuaciones resultantes fue implementado en COMSOL Multiphysics 3.5a y resuelto por el método de elementos finitos. Se estudió la influencia de la temperatura y del contenido de humedad inicial del grano así como el grado de hermeticidad de la bolsa en la evolución de la atmósfera modificada. Del análisis de los resultados puede estimarse el nivel de concentración de gases que definen condiciones de almacenamiento seguro en relación a las condiciones iniciales de embolsado del grano en el silo-bolsa

Palabras claves: almacenamiento hermético, atmósfera modificada, simulación numérica.

GRAIN BAGGED IN THE SILOBAG. MATHEMATICAL MODELING OF THE MODIFIED ATMOSPHERE

ABSTRACT.- In this work, a validated heat and mass transfer model was coupled to the mass balances of O_2 and CO_2 in order to predict the temperature, moisture content and dry matter loss of wheat stored in a silo-bag and the gas concentration of the interstitial atmosphere. The model was implemented in COMSOL Multiphysics 3.5a and solved by the finite element method. The effect of initial grain storage temperature and moisture content as well as the degree of hermeticity of the silobag on the evolution of gas concentration was analyzed. From these results, it is possible to estimate gas concentration levels that represent safety storage conditions according to the initial conditions of the grain bagged in the silobag.

Keywords: hermetic storage, modified atmosphere, numerical simulation

1.- INTRODUCCION

Ante el crecimiento de la producción granaria de los últimos 10 años en Argentina y la falta de capacidad de almacenamiento fijo, el silo-bolsa ha adquirido gran difusión. Esta técnica consiste en el almacenamiento de granos en bolsas plásticas herméticas, donde el proceso respiratorio de los seres vivos del granel (ecosistema formado por granos, hongos, insectos, etc.) consume el oxígeno (O_2) y genera dióxido de carbono (CO_2) y 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.

Los silos-bolsa tienen 2.70 m de diámetro y 60-75 m de largo, pudiéndose almacenar aproximadamente unas 200 toneladas de grano. La estructura de la bolsa está compuesta por tres capas, con el interior color negro y la exterior color blanco con estabilizadores para los rayos ultravioletas. Su espesor puede ser de 230 a 250 micrones y fue diseñada para una producción de dos años aunque lo normal es que los productores guarden su grano durante seis u ocho meses. La

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra una foto del almacenamiento de granos a campo en silos-bolsa.

En un silo convencional, el incremento de la temperatura interior detectado por termometría (calentamiento localizado) es un indicador de la actividad biológica (respiración) del ecosistema y del consecuente deterioro del granel. El cambio de temperatura en el seno del granel, resulta del balance entre la energía liberada por respiración y la intercambiada con el medio ambiente. En los silos-bolsa, la razón área de transferencia/volumen de grano se duplica con respecto a un silo metálico de la misma capacidad ($1.42 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $0.79 \text{ m}^2/\text{m}^3$, respectivamente) por lo que la temperatura del centro de la bolsa está muy influenciada por las condiciones climáticas externas (Bartosik et al., 2008). En consecuencia, el incremento de temperatura deja de ser un indicador confiable de actividad biológica. Bajo ciertas condiciones de almacenamiento, la temperatura promedio puede descender aún existiendo una actividad biológica del granel (Gastón et al., 2009).

Estudios de campo han demostrado que la medición de la concentración de CO_2 es una alternativa válida para el

control de las condiciones de almacenamiento (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008, Rodríguez et al. 2008). Por otro lado, la pérdida de materia seca puede estimarse a partir del CO₂ producido en el proceso de respiración. Por ello resulta necesario analizar la evolución de la concentración de gases y el proceso de difusión dentro de la bolsa para distintas condiciones de almacenamiento. Este conocimiento básico puede contribuir a definir un protocolo de monitoreo de los silos-bolsas y a estimar uno de los parámetros de calidad más importantes relacionados con la comercialización.

La concentración de los gases en los sistemas de almacenamiento en atmósferas automodificadas depende del balance entre la respiración del ecosistema, el ingreso de O₂ y la pérdida de CO₂ al medio ambiente debido a la permeabilidad de la cubierta plástica. A su vez, el ritmo de

respiración es fuertemente dependiente de la temperatura y del contenido de humedad del grano embolsado.

En este trabajo, partiendo de un modelo validado de transferencia de calor y masa (Gastón et al., 2009), se incorporaron los balances O₂ y CO₂ para determinar la concentración de los gases de la atmósfera intergranaria y la pérdida de materia seca del grano embolsado. El sistema de ecuaciones resultantes fue implementado en COMSOL Multiphysics 3.5. Se estudió la influencia de la temperatura y del contenido de humedad inicial del grano (trigo) así como el grado de hermeticidad de la bolsa en el desarrollo de la atmósfera modificada.

Del análisis de los resultados se estimó el nivel de concentración de gases que define condiciones de almacenamiento seguro en relación a la temperatura y contenido de humedad inicial del grano almacenado.



Fig. 1: Almacenamiento de granos en silos-bolsa.

2. MODELO MATEMATICO

2.1. Balance de energía y contenido de agua.

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

1. se considera el lecho de granos ensilados como un continuo, con la fases aire y grano distribuidas uniformemente
2. en cada punto del lecho el aire intergranario se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos
3. se considera despreciable la transferencia de energía en la dirección longitudinal de la bolsa adoptándose un modelo 2D con simetría plana
4. los gases se comportan como gases ideales
5. no se incluye la transferencia de energía y masa por convección
6. se considera que la porosidad se mantiene constante

Planteando el balance de energía y contenido de agua para los granos y el aire intergranario en un volumen de control se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

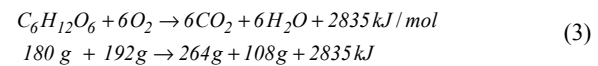
$$c_b \rho_b \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right] + \rho_b L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H Y_{CO_2} \quad \text{en } \Omega_l \quad (1)$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} q_w Y_{CO_2} \quad \text{en } \Omega_l \quad (2)$$

Los últimos términos de las ecuaciones (1) y (2) contabilizan la energía liberada y el vapor de agua producido en el proceso de respiración de los granos, respectivamente. Una deducción de este sistema de ecuaciones puede consultarse en Abalone et al. (2006) así

como la definición de los parámetros que aparecen en ella. En este trabajo sólo se detallan las expresiones para las fuentes ligadas al proceso respiratorio.

Los procesos metabólicos de respiración aeróbica del ecosistema se representan por medio de la siguiente ecuación estequiométrica (combustión completa de glucosa):



Si se conoce la velocidad de producción de dióxido de carbono durante la respiración, Y_{CO_2} [mg [CO₂] kg⁻¹ [materia seca] en 24 h], por medio de la ecuación (3) puede calcularse la energía liberada Y_{Resp} en J kg⁻¹ [materia seca], el vapor de agua producido Y_{H_2O} en mg [H₂O] kg⁻¹ [materia seca] y el oxígeno Y_{O_2} consumido en mg [O₂] kg⁻¹ [materia seca] durante 24 h:

$$Y_{Resp} = \frac{2835 \text{ kJ}}{264 \text{ g}} Y_{CO_2} = q_H Y_{CO_2} \quad (4)$$

$$Y_{H_2O} = \frac{108 \text{ g}}{264 \text{ g}} Y_{CO_2} = q_w Y_{CO_2} \quad (5)$$

$$Y_{O_2} = \frac{192 \text{ g}}{264 \text{ g}} Y_{CO_2} \quad (6)$$

donde q_w es igual a $4.09 \cdot 10^{-5}$ kg [H₂O] mg⁻¹ [CO₂] y q_H igual a 10.738 J mg⁻¹ [CO₂]. La materia seca consumida localmente durante la respiración d_m en mg [materia seca] kg⁻¹ [materia seca] en 24 h se estima mediante:

$$d_m = \frac{180 \text{ g}}{264 \text{ g}} Y_{CO_2} \quad (7)$$

White et al. (1982) desarrolló numerosas experiencias para medir la cantidad de dióxido de carbono liberado por distintos cereales en la respiración, estableciendo modelos que pueden representarse mediante la siguiente expresión:

$$\log Y_{CO_2} = a_1 + a_2 T_c + a_3 \theta + a_4 \theta^2 + a_5 M \quad (8)$$

en donde θ en días, es el tiempo de almacenamiento, T_c en °C es la temperatura del grano y M el contenido de humedad en base húmeda % b.h.

El valor local de la energía liberada y del vapor de agua producido por respiración, ecuaciones (4) y (5), puede calcularse para cada punto del silo-bolsa si se conoce la temperatura y el contenido de humedad. Sin embargo, como la ecuación (8) no depende en forma explícita del nivel de concentración de CO_2 y O_2 de la atmósfera dentro de la bolsa, el proceso de transporte de estos gases en el espacio intergranario no influye en los valores locales de la temperatura y el contenido de humedad.

Existen en la literatura, otras correlaciones de respiración para productos biológicos como frutas y hortalizas (Fonseca et al., 2001; Song et al., 2002) que si dependen explícitamente de la concentración de O_2 y CO_2 . Este tipo de correlaciones aún no han sido obtenidas para los granos.

Finalmente cabe mencionar que la ecuación (8) contabiliza la producción de CO_2 debido a la actividad biológica de los granos y la microflora. Otra posible fuente de CO_2 proviene de la respiración de los insectos del granel.

En el caso de los silos-bolsa, el grano se cosecha y se embolsa directamente en el campo, por lo que está libre de infestación. Esta es más común, cuando el grano se almacena en los sistemas convencionales (silos metálicos, celdas, etc.).

La Fig. 1 muestra la aproximación de la geometría del silo-bolsa, el dominio de cálculo y su frontera. La condición inicial y las condiciones de contorno asociadas a la ecuación (1) son:

$$T(x, y, t=0) = T_0(x, y) \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_{amb}) + \alpha G - \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \text{ en } \Gamma_1 \quad (10)$$

$$T = T_{suelo}(y, t) \text{ en } \Gamma_3 \quad (11)$$

Las condiciones asociadas a la ecuación (2) son:

$$W_g(x, y, t=0) = W_0(x, y) \quad (12)$$

$$\eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \text{ en } \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (13)$$

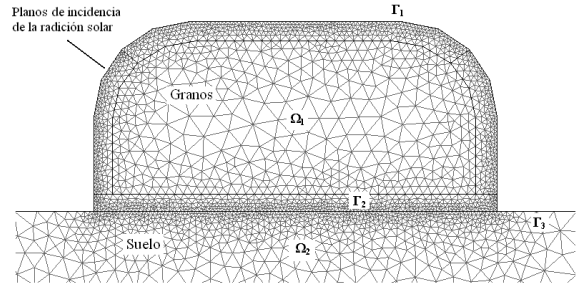


Fig. 1: Dominio de cálculo

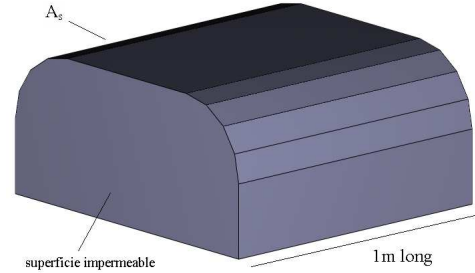


Fig. 2: Volumen de intercambio gaseoso

2.2. Balance de O_2 y CO_2 en el silo-bolsa.

Como se discutió en la sección previa, los balances de energía y contenido de humedad pueden independizarse del proceso de transporte de los gases en el espacio intergranario, definiendo un sentido de acoplamiento.

Conocida la evolución de la temperatura y la humedad puede analizarse la evolución de la atmósfera dentro del silo bolsa.

En una primera aproximación, se adoptó un modelo simplificado para calcular la concentración promedio de CO_2 y O_2 (Navarro et al., 1994) en base a las siguientes hipótesis:

1. los gases se encuentran uniformemente distribuidos en la bolsa. Experimentalmente, no se ha observado estratificación dentro de las bolsas (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008, Rodríguez et al. 2008).
2. no existe producción de CO_2 debido a la respiración de insectos
3. la sorpción de CO_2 es despreciable
3. se conoce la temperatura promedio de la bolsa. Esta varía en el tiempo de acuerdo a las condiciones climáticas estacionales durante el período de almacenamiento
4. el contenido de humedad promedio se mantiene constante, igual al valor inicial
5. la masa de granos ocupa toda el volumen de la bolsa. No existen un volumen libre de aire entre la superficie interior de los granos y la cobertura plástica, que pueda ser el resultado de un llenado defectuoso.

Para un volumen correspondiente a un metro de silo bolsa como el indicado en la Fig. 2, se plantea el balance de conservación de CO_2 y O_2 , obteniéndose el siguiente ODE (Song et al., 2002):

$$\frac{dO_{2i}}{dt} = \frac{A_s P_{O_2} P_{atm}}{\epsilon V L} \{O_{2ext} - O_{2i}\} - \frac{\rho_{bs}}{\epsilon} r_{O_2} \text{ en } \Omega_1 \quad (14)$$

$$\frac{dCO_{2i}}{dt} = \frac{A_s P_{CO_2} P_{atm}}{\varepsilon V L} \{CO_{2ext} - CO_{2i}\} + \frac{\rho_{bs}}{\varepsilon} r_{CO_2} \quad \text{en } \Omega_1 \quad (15)$$

donde O_2 y CO_2 ($V/V \text{ m}^3/\text{m}^3$) representan la concentración media de oxígeno y dióxido de carbono; P_{O_2} y P_{CO_2} en $\text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$, la permeabilidad de la bolsa plástica al O_2 y CO_2 , respectivamente; P_{atm} en Pa, es la presión atmosférica; L en m, es el espesor de la bolsa, A_s en m^2 , es el área de intercambio de gases del silo bolsa, ρ_{bs} en $\text{kg grano seco}/\text{m}^3$, es la materia seca en el volumen del lecho, εV en m^3 , es el volumen libre intergranario; ε es la porosidad del lecho; V en m^3 , es el volumen total por metro de silo bolsa; r_{O_2} y r_{CO_2} en $\text{m}^3/\text{s kg materia seca}$, representan la velocidad de consumo de O_2 y producción de CO_2 , respectivamente. El primer término a la derecha representa el intercambio de gases a través de la cubierta plástica.

El segundo, el sumidero de O_2 y la fuente de CO_2 resultante del proceso respiratorio. Reemplazando en la ecuación (8), la temperatura promedio de la bolsa y el contenido inicial de humedad, se calcula la producción promedio de CO_2 y se obtienen las siguientes expresiones para r_{O_2} y r_{CO_2} :

$$r_{CO_2}(t) = \frac{\bar{Y}_{CO_2}(t)}{1000M_{CO_2}} \frac{R\bar{T}_k}{P_{at}} \quad ; \quad r_{O_2} = r_{CO_2} \quad (16)$$

siendo R la constante universal de los gases, \bar{T}_k en K, la temperatura promedio absoluta y M_{CO_2} la masa molecular del dióxido de carbono. Como el silo bolsa se encuentra al aire libre y contiene aire en su interior, inicialmente ($t=0$) se tiene:

$$O_{2i}^0 = 0.21 \quad ; \quad CO_{2i}^0 = 0.0003 \quad (17)$$

$$O_{2out} = 0.21 \quad ; \quad CO_{2out} = 0.0003 \quad (18)$$

2.3. Permeabilidad efectiva del silo-bolsa.

El silo-bolsa está conformado por una mezcla de polietileno de alta (HDPE) y baja (LDPE) densidad. Se estimó una permeabilidad efectiva empleado un modelo de resistencias en serie, considerando espesores iguales para HDPE y LDPE:

$$\bar{P}_i = \frac{2P_{iHD} P_{iLD}}{P_{iHD} + P_{iLD}} \quad ; \quad i = O_2, CO_2 \quad (19)$$

2.4. Solución Numérica.

El modelo presentado fue implementado en COMSOL Multiphysics 3.5a y resuelto en forma secuencial. En la primera etapa, el PDE formado por las ecuaciones (1) y (2) con sus correspondientes condiciones iniciales y de contorno fue resuelto mediante el método de los elementos finitos. La discretización se realizó con una densificación de la malla sobre la frontera del dominio, donde se concentran los mayores gradientes de temperatura y humedad, como se muestra en la Fig. 1.

Se emplearon elementos Lagrangianos triangulares cuadráticos y un esquema de integración de cuatro puntos de Gauss.

La temperatura promedio de la bolsa en función del tiempo se calculó mediante:

$$\bar{T}_c(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} T(x, y, t) d\Omega \quad (20)$$

La distribución de la materia seca perdida en la bolsa al tiempo t , DML en $\text{mg [materia seca]}/\text{kg [materia seca]}$, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$DML(x, y, t) = \int_0^t d_m(x, y, t') dt' \quad (21)$$

La pérdida de materia seca promedio de la bolsa en función del tiempo se calcula mediante:

$$\overline{DML}(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} DML(x, y, t) d\Omega \quad (22)$$

En la segunda etapa, se resolvió el ODE, formado por las ecuaciones (14) y (15), calculando la producción promedio de CO_2 mediante la ecuación (8) para la temperatura promedio de la bolsa y el contenido de humedad inicial.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo fue aplicado para simular el almacenamiento de granos de trigo desde Enero a Julio para las condiciones climáticas de la zona de Balcarce, provincia de Buenos Aires. Para cubrir el rango de posibles condiciones de embolsado durante la etapa de cosecha, la temperatura inicial se fijó en 25, 30 y 45°C y el contenido de humedad inicial entre 12-16% bh (base húmeda).

A 25°C, la permeabilidad al O_2 del HDPE es $6.5 \cdot 10^{-8} \text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$ y la del LDPE es $1.95 \cdot 10^{-7} \text{m}^3\text{m d}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$; la permeabilidad al CO_2 del HDPE es $1.9 \cdot 10^{-7} \text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$ y la del LDPE es $1.05 \cdot 10^{-6} \text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$ (Osborn et al., 1992).

Aplicando la ecuación (19) resulta \bar{P}_{O_2} $9.75 \cdot 10^{-8} \text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$ y \bar{P}_{CO_2} $3.2210^{-7} \text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$. Para un espesor promedio de 240 μm 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 $1.34 \cdot 10^{-3} \text{m}^3\text{d}^{-1}\text{m}^2\text{at}^{-1}$.

Los parámetros del modelo de transferencia de calor y masa se detallan en Abalone et al. (2006). En la Tabla 1 se listan los parámetros del lecho de trigo. Para un metro de silo-bolsa $A_s = 5.54 \text{m}^2$ y $V = 4.54 \text{m}^3$ (Fig. 2).

La Fig. 3 muestra la dependencia del ritmo de producción de CO_2 con el contenido de humedad y la temperatura. El ritmo se duplica cada 5°C de incremento de la temperatura o cada 1% bh en el contenido de humedad.

La Fig. 4 muestra la evolución de la temperatura promedio del silo-bolsa, obtenida con el modelo de transferencia de calor y materia. Debido a la capacidad de disipar de energía al medio ambiente, el efecto del calor liberado debido a la respiración se atenúa (Gastón et al., 2009) y la diferencia entre la evolución de la temperatura promedio del grano seco (12%) y húmedo (16%) es del orden de 2°C.

Tabla 1: Propiedades del grano y lecho de trigo

Densidad del lecho de trigo [kg/m ³]	$\rho_b = 824$
Porosidad del lecho	$\varepsilon = 0.38$
Cond. térmica del trigo [W/mK]	$k_g = 0.14 + 0.68W$
Calor esp. de grano de trigo [J/kg K]	$c_g = 1300 + 4187W$
Ecuación de Henderson [Pa]	$K_H = 2.31 \cdot 10^{-5}$; $C_H = 55.813$; $N = 2.2857$
CO ₂ producido por respiración, mg [CO ₂] /kg [materia seca] en 24 hs	$a_1 = -4.054$; $a_2 = 0.0406$; $a_3 = -0.0165$; $a_4 = 0.0001$; $a_5 = 0.2389$
Tortuosidad	$\tau = 1.53$

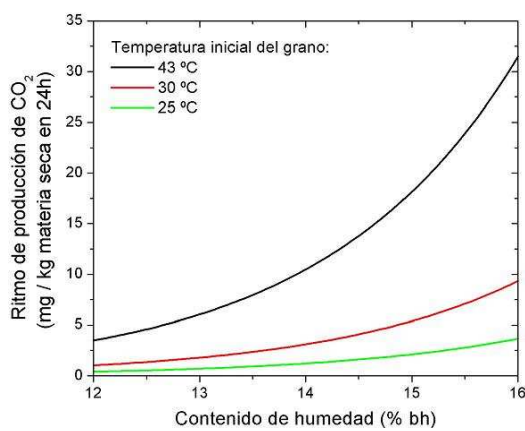


Fig. 3: Ritmo de producción de CO₂ en 24 hs en función de la temperatura y del contenido de humedad del grano

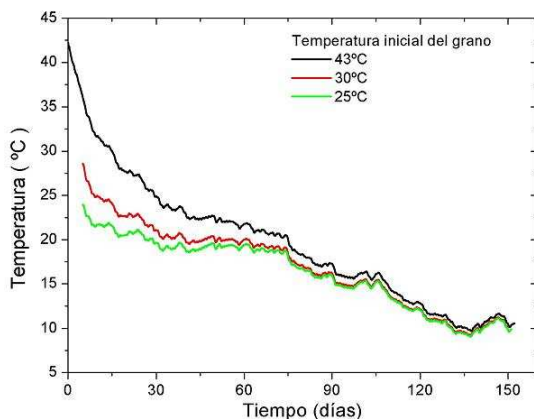


Fig. 4: Evolución de la temperatura promedio del silo-bolsa para la zona agrícola de Balcarce.

3.1. Validación del modelo de concentración de O₂ y CO₂

Las concentraciones de CO₂ simuladas fueron comparadas con datos experimentales obtenidos del monitoreo de bolsas en acopios y campos de productores realizadas por el INTA EEA Balcarce.

El trigo fue embolsado entre Diciembre y Enero y almacenado hasta Junio y Julio. Los resultados de estos ensayos se describen en Rodríguez et al. (2008). En ese trabajo, los autores derivaron una correlación entre la concentración de CO₂ y el contenido de humedad inicial del grano, para los datos recolectados durante la estación cálida (Enero-Marzo) y otra para los datos recolectados durante la estación fría (Mayo-Julio). Los datos recopilados corresponden a bolsas sin daño estructural o roturas visibles.

La Fig. 5 muestra la evolución de la concentración de O₂ y CO₂ de Enero a Julio para la temperatura promedio de embolsado de 30°C.

En la Fig. 6 se comparan los resultados numéricos obtenidos al cabo de 60, 90, 150 y 180 días de almacenamiento con las correlaciones experimentales. A pesar de la variabilidad que presentan las propiedades de los productos biológicos y la dificultad que implica el desarrollo de experiencia a campo se obtuvo buena concordancia entre valores medidos y calculados. De estas gráficas se observa que para trigo seco (12-13% bh) la concentración promedio de CO₂ es menor al 7%, registrándose poca variación entre la estación cálida y fría.

Para el caso de grano húmedo (14-16% bh) el modelo predice en exceso las concentraciones, especialmente en la estación fría. No obstante es importante mencionar que la cantidad de datos experimentales que se disponen para humedades entre (15-16% bh) es escasa ya que no es una práctica habitual embolsar con humedades tan elevadas.

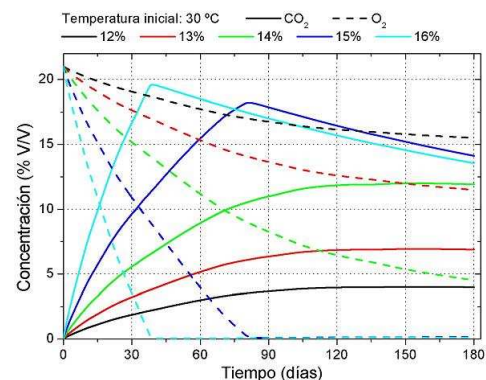


Fig. 5: Evolución de la concentración del O₂ y CO₂ de Enero a Julio. Temperatura inicial 30°C.

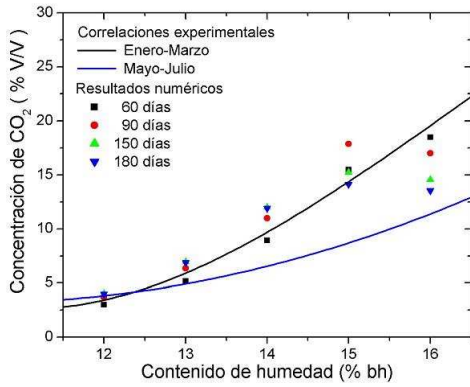


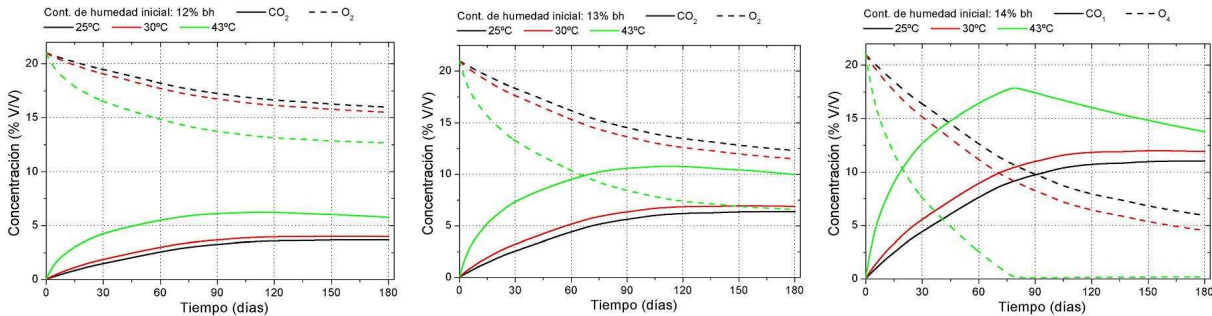
Fig. 6: Comparación entre correlaciones experimentales y valores predichos de CO₂.

3.2. Efecto de las condiciones de almacenamiento en la concentración de O₂ y CO₂.

La Fig. 7 muestra la evolución de la concentración de O₂ y CO₂ para granos secos. Para las temperaturas típicas de embolsado (25°C -30°C) de la zona de Balcarce y grano con 12- 13% bh, la concentración de CO₂ aumentó entre 4 y 6%

y el O₂ disminuyó a 16 y 12%. A 14%, la actividad de la microflora se intensifica produciéndose cambios significativos en las concentraciones de CO₂ a (12%) y O₂ (5%). La condición excepcional de 43°C muestra que a 14% se alcanzan condiciones anaeróbicas en la bolsa al cabo de 80 días. El nivel de CO₂ crece hasta 18% y luego se produce una disminución como consecuencia de las pérdidas a través de la bolsa. Esta condición extrema pone de manifiesto la importancia de registrar la temperatura de embolsado. Un valor elevado de CO₂ fuera del rango típico (10% de CO₂ para 13% bh), no siempre implicaría problemas de deterioro del grano, sino el resultado de una actividad normal resultado de una temperatura inicial elevada. Por el otro lado si la temperatura inicial fue de 25-30°C, tal nivel de concentración es un indicador de actividad biológica anormal dentro de la bolsa.

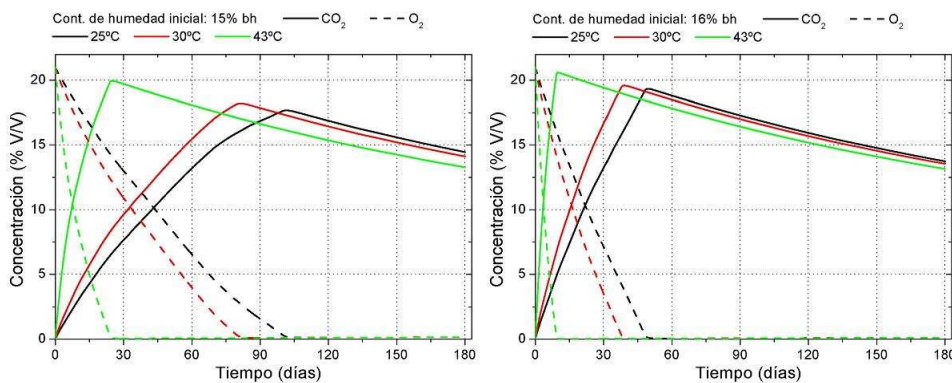
Para condiciones climáticas más cálidas, las temperaturas de embolsado típicas son más elevadas y el nivel de referencia de CO₂ es más elevado, siendo necesario determinarlo para cada zona agrícola



(a) Humedad inicial 12% bh (b) Humedad inicial 13% bh (c) Humedad inicial 14% bh
Fig. 7: Evolución de la concentración del O₂ y CO₂ de Enero a Julio para trigo seco

La Fig. 8 muestra la evolución de la concentración de O₂ y CO₂ para granos húmedos. A 15% bh, las condiciones anaeróbicas (0% de O₂) se alcanzan luego 80-100 días y el contenido de O₂ decrece hasta 14%. A 16% bh, si bien la condición final es similar, el O₂ se consume en aproximadamente 45 días. La combinación de alta humedad

inicial y temperatura hace que el O₂ se consume en sólo 5 días. En general dado que la permeabilidad al O₂ es menor que al CO₂, todo ingreso de O₂ se consume en la respiración y la concentración permanece aproximadamente en 0%.



(a) Humedad inicial 15% bh (b) Humedad inicial 16% bh
Fig. 8: Evolución de la concentración del O₂ y CO₂ de Enero a Julio para trigo húmedo

3.3. Efecto de la permeabilidad de la bolsa en la concentración de O₂ y CO₂.

A fin de analizar el efecto de la permeabilidad en la predicción del modelo, se realizaron dos nuevas

simulaciones. Para los valores iniciales de permeancia y la máxima diferencia de presión parcial de 21% (ver primer término en las ecuaciones (14) y (15)), el ingreso de O₂ es de aproximadamente 0.027%/día y la pérdida de CO₂ de

0.09%/día. En el primer caso se aumentó un 50% el valor inicial de permeancia efectiva. En el segundo, se empleó el valor de la permeabilidad al O₂ y CO₂ del LDPE. Esto equivale a un aumento del 300% de valor inicial a puede representar una condición desfavorable en la que el silo-bolsa presenta daño estructural.

En la Fig. 9 se presentan los resultados para un incremento del 50% y en la Fig. 10 se comparan los nuevos valores predichos con las correlaciones experimentales.

A los efectos de una comparación, se incluyen en esta gráfica los resultados obtenidos con los valores iniciales de la permeancia (líneas de trazo fino en Fig. 9 y símbolos vacíos en la Fig. 10).

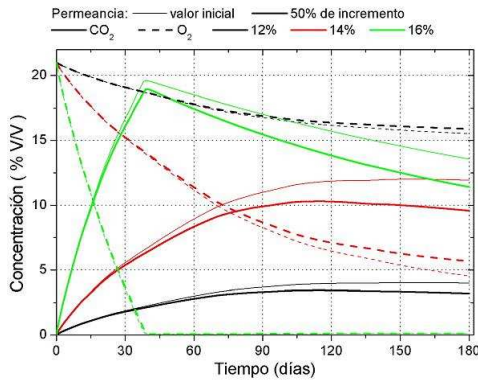


Fig. 9: Evolución de la concentración del O₂ y CO₂ para un incremento de la permeabilidad de 50%. Temperatura inicial 30°C.

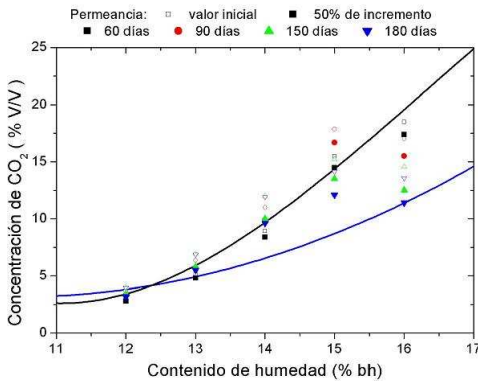


Fig. 10: Comparación entre correlaciones experimentales y valores predichos de CO₂ para un incremento de la permeabilidad de 50%. Temperatura inicial 30°C

La Fig. 11 y la Fig. 12 presentan los resultados para un incremento del 300%. De estas gráficas concluye que un aumento del 50% mejora, globalmente, el ajuste del modelo. Para un incremento del 300%, mejora el ajuste con la correlación de la estación fría para grano húmedo, pero empeoran los resultados para grano seco con ambas correlaciones.

3.4. Predicción de la pérdida de materia seca.

La pérdida de material seca promedio \overline{DML} se calculó por medio de la ecuación (22) White et al., (1982) consideran que una pérdida de 0.1% resulta inaceptable para trigo ya

que pierde calidad comercial, y si el grano almacenado es destinado a semilla, no puede superar el 0.04%.

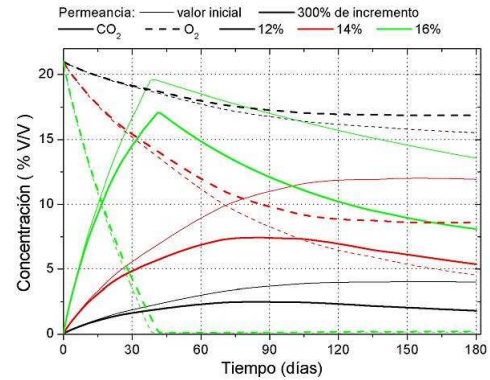


Fig. 11: Evolución de la concentración del O₂ y CO₂ para un incremento de la permeabilidad de 300%. Temperatura inicial 30°C.

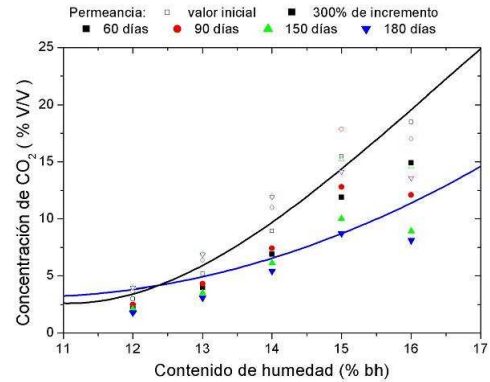


Fig. 12: Comparación entre correlaciones experimentales y valores predichos de CO₂ para un incremento de la permeabilidad de 300%. Temperatura inicial 30°C

La Fig. 13 muestra la evolución de la pérdida de materia seca promedio \overline{DML} (%) para la condición de almacenamiento más desfavorable de 43°C. Para trigo seco (12 y 13% bh), la pérdida de materia seca resultó inferior 0.01% luego de 150 días.

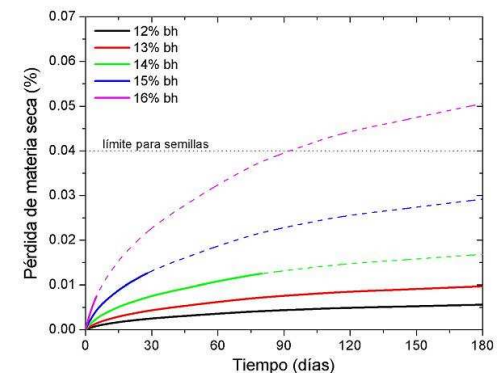


Fig. 13: Pérdida de materia seca promedio. Temperatura inicial 43°C.

En el caso del trigo más húmedo, el modelo predice que el O₂ se consume totalmente luego de 80, 25 y 5 días para 14, 15 y 16% bh, respectivamente. A fin de establecer un límite superior para \overline{DML} , se calculó cuál hubiera sido la pérdida de materia, si por falta de hermeticidad del silo-bolsa, el grano hubiera tenido la posibilidad de respirar durante los 150 días. En la Fig. 13, las líneas continuas representan la pérdida de materia hasta que se consume el O₂, mientras que las líneas punteadas la \overline{DML} que se registra cuando la respiración se produce durante todo el almacenamiento. Solamente para 16% bh, la \overline{DML} alcanza 0.075%, superando el límite admitido para trigo semilla, sin llegar a reducir la calidad comercial del trigo.

Finalmente, la Fig. 14 muestra la distribución local de DML (ecuación (21)) al cabo de 150 días. En la periferia, debido a que la temperatura disminuye por acción de las condiciones climáticas, disminuye el ritmo de respiración, por lo que la zona central del silo-bolsa es la que registra la mayor pérdida de materia seca.

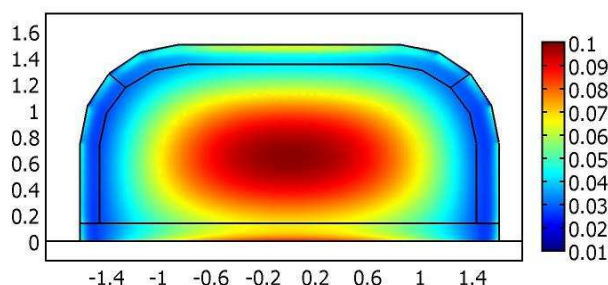


Fig. 14: Distribución de la pérdida de materia seca al final del almacenamiento. Trigo húmedo (16%bh).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un modelo simplificado para analizar la evolución de las concentraciones de O₂ y CO₂ en un silo-bolsa, considerando la respiración aeróbica de los granos y la microflora. El modelo se empleó para simular el embolsado de trigo para las condiciones climáticas de la zona de Balcarce. Las concentraciones de CO₂ predichas fueron comparadas con correlaciones experimentales desarrolladas por el INTA EEA Balcarce para diferentes condiciones de almacenamiento. A pesar de la variabilidad que presentan las propiedades de los productos biológicos y la dificultad que implica el desarrollo de experiencia a campo se obtuvo buena concordancia entre valores medidos y calculados.

Las simulaciones muestran que para grano húmedo y temperaturas de almacenamiento elevadas el oxígeno se consume en unos pocos días. A medida que disminuye la temperatura inicial de embolsado, puede llevar de uno a tres meses en alcanzar condiciones anaeróbicas. Cuando se almacena trigo seco el nivel de O₂ es superior al 10% y el de CO₂ cercano al 5%, mientras que con grano húmedo el nivel de CO₂ crece hasta 15-16% luego de 150 días de almacenamiento.

El desarrollo de correlaciones para la respiración de los granos que dependan explícitamente de la concentración de O₂ y CO₂ de la atmósfera integraría así como la

determinación experimental de la permeabilidad de la bolsa permitirá mejorar la predicción del modelo propuesto. Por otro lado la incorporación al análisis de los procesos de transporte del O₂ y CO₂ dentro de la bolsa aportará información básica para el desarrollo un protocolo de monitoreo de los silos-bolsas.

El monitoreo sistemático del silo-bolsa permite prevenir, diagnosticar y solucionar los problemas antes de que se afecte la calidad del grano. Contar con un modelo de simulación validado, equivalente a un embolsado virtual, representa una herramienta complementaria que aportará información relevante para la toma de decisiones basadas en principios de ingeniería.

AGRADECIMIENTO

Las autoras expresan su agradecimiento al Dr. J.C. Rodríguez y al Dr. R. Bartosik del EEA INTA (Balcarce) quienes han suministrado los datos experimentales empleados en este trabajo.

NOMENCLATURA

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5	parámetros de la ecuación de respiración, velocidad de producción de CO ₂ , adimensional, °C ⁻¹ , s ⁻¹ , s ⁻² , adimensional, respectivamente
A_s	área de intercambio de gases del silo bolsa por metro de silo-bolsa, m ²
x, y	coordenadas cartesianas
c_b	calor específico del lecho de granos (J/kg K)
d_m	velocidad del material seco consumida en la respiración aeróbica, en mg [materia seca] kg ⁻¹ [materia seca] en 24 h
D_{ef}	difusividad efectiva del vapor de agua (m ² /s)
DML	distribución de materia seca perdida al tiempo t, mg [materia seca]/kg [materia seca]
\overline{DML}	valor medio de materia seca perdida al tiempo t, mg [materia seca]/kg [materia seca]
G	radiación solar incidente el silo-bolsa (W/m ²)
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² C)
k_b	conductividad térmica del lecho de granos (W/mK)
L	espesor del plástico del silo-bolsa (m)
L_g	calor de desorción del agua en el grano (J/kg)
M	contenido de humedad del grano (base húmeda, kg / kg grano húmedo)
M_{CO_2}	masa molecular del CO ₂ , 44 gramos mol ⁻¹
n	dirección normal
P_{atm}	presión atmosférica, 101325 Pa
P_{O_2}	permeabilidad del plástico al O ₂ , m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
P_{CO_2}	permeabilidad del plástico al CO ₂ , m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
\overline{P}_i	permeabilidad efectiva del plástico, i= O ₂ , CO ₂
q_H	calor de respiración, 10.738 J mg ⁻¹ [CO ₂]
q_w	vapor de agua producido en la respiración, 4.09 10 ⁻⁵ kg [H ₂ O] mg ⁻¹ [CO ₂]
r_{O_2}	producción de O ₂ , en m ³ /s kg materia seca
r_{CO_2}	producción de CO ₂ , en m ³ /s kg materia seca
R	constante universal de los gases, 8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹
t	tiempo (s)
T	temperatura (C)
T_k	temperatura absoluta(K)
T_0	temperatura inicial de los granos (C)

V	volumen del lecho de granos, m^3
W_g	contenido de humedad del grano (base seca, kg / kg grano seco)
W_0	contenido de humedad inicial de los grano (base seca, kg / kg grano seco)
Y_{CO_2}	producción de CO_2 , $mg [CO_2] kg^{-1}$ [materia seca] en 24 h
Y_{O_2}	producción de O_2 , $mg [O_2] kg^{-1}$ [materia seca] en 24 h
Y_{H_2O}	velocidad de producción de H_2O , $mg [H_2O] kg^{-1}$ [materia seca] in 24 h
CO_2	concentración de CO_2 , % V/V
O_2	concentración de O_2 , % V/V

Letras Griegas

α	absortividad del silo-bolsa
ε	porosidad (m^3 de aire/ m^3 de lecho)
Γ	frontera del dominio
η	cambio de presión parcial p_v respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, (Pa)
ρ_b	densidad del lecho de granos (kg grano húmedo/ m^3 (volumen del lecho))
ρ_{bs}	materia seca por volumen de lecho (kg grano seco / m^3 (volumen del lecho))
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$
ω	cambio de presión parcial p_v respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, (Pa/K)
ξ	emisividad del silo-bolsa
<i>Subíndices</i>	
a	aire intersticial
amb	ambiente
$cielo$	cielo
b	grano bulk
g	grano
0	inicial
$Suelo$	suelo

REFERENCIAS

Abalone, R.M., A. Gastón, A. Cassinera y M.A. Lara (2008). Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional Vol. XXV*, 233-247, 2006.

Bartosik, R. E., M. L. Cardoso y J.C. Rodríguez (2008). Early Detection of Spoiled Grain Stored in Hermetic Plastic Bags (Silo-bags) Using CO_2 Monitoring. Proc. of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 21-26 September, Chengdu, China, 550-554, 2008.

Cardoso, M.L., R.E. Bartosik, J.C. Rodríguez y D. Ochandio (2008). Factors Affecting Carbon Dioxide Concentration in Interstitial Air of Soybean Stored in Hermetic Plastic Bags (Silo-bag). Proc. of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 21-26 September, Chengdu, China, 565-568.

Fonseca, S.C., F.A.R. Oliveira y J.K. Brecha (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J. Food Engineering*, 52: 99-119.

Gastón, A., R. Abalone, R.E. Bartosik, y J.C. Rodríguez (2009). Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo-bags). *Biosystems Engineering Vol 104(1)*: 72-85. ISSN 1537-5110. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.012.

Navarro, S., E. Donahay y S. Fishman (1994). The future of hermetic storage of dry grains in tropical and subtropical climates. Proc. of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection, 17-23 April, Canberra, Australia, 130-138.

Osborn, K.R., and W.A Jenkins.(1992) *Plastic Films. Technology and Packaging Applications*. Thecnomic Publising Co, Lancaster, Penn.

Rodríguez, J. C., R.E. Bartosik, M.L. Cardoso y D. Crocche. (2008). Factors Affecting Carbon Dioxide Concentration in Interstitial Air of Wheat Stored in Hermetic Plastic Bags (Silo-bag). Proc. of the 8th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 21-26 September, Chengdu, China, 589-592.

Song, Y., N. Vorsa, y K.L. Yam. (2002). Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry, *Journal of Food Engineering*, 53: 103-109.

White N. D. G., Sinha R. N. y W. E. Muir (1982). Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Eng.*, 24(1): 35-42.