

### Caracterización física y obtención de parámetros de fluidización de germen de trigo

Gili R.D.<sup>1</sup>, Torrez Irigoyen R.M.<sup>2</sup>, Meriles S.P.<sup>1</sup>, Penci M.C.<sup>1</sup>, Giner S.A.<sup>2</sup>, Ribotta P.D.<sup>1</sup>

- (1) Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba (ICYTAC), CONICET-UNC. Juan Filloy s/n, Córdoba, Argentina.
- (2) Centro de Investigación y Desarrollo en Criogenia de Alimentos (CIDCA), CONICET-UNLP, Calle 47 y 116, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

[renatogili@agro.unc.edu.ar](mailto:renatogili@agro.unc.edu.ar)

#### RESUMEN

El germen de trigo es el embrión del grano de trigo, presenta un elevado contenido de tocoferoles y proteínas y ácidos grasos y proteínas de alta calidad. A su vez, contiene enzimas con elevada actividad que limitan su periodo de aptitud a unos pocos días. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar físicamente las partículas de germen de trigo para determinar los parámetros de diseño para un proceso de fluidificación térmica con aire. Los ejes principales de las partículas fueron determinados mediante análisis de imágenes y sus dimensiones y parámetros geométricos fueron calculados. La densidad de lecho fijo y la porosidad del lecho fueron determinadas. Los estudios fluido-dinámicos nos permitieron determinar los coeficientes, laminar ( $277,46 \pm 17,48$ ) y turbulento ( $7,79 \pm 0,69$ ) de la ecuación de Ergun y la velocidad de mínima fluidificación ( $0,35 \pm 0,02$  m/s).

**Palabras Clave:** Germen de trigo, Lecho fluidizado, Caracterización física de partículas, Velocidad de mínima fluidización.

#### ABSTRACT

Wheat germ is the embryo of the wheat seed, it contains a high tocopherol and protein content, and high quality proteins and fatty acids. Also, wheat germ has a considerable enzymatic activity that limits its shelf life. The aims of the study were to physically characterize wheat germ particles to determine their design parameters of thermal fluidization process with air. The principal axes of the particle were measured by image analysis, and their dimensions and geometric parameters were calculated. The fixed bed density and the void fraction were measured. The fluid-dynamic studies allowed us to determine laminar ( $277.46 \pm 17.48$ ) and turbulent ( $7.79 \pm 0.69$ ) coefficients of the Ergun equation and the minimum fluidization velocity ( $0.35 \pm 0.02$  m/s).

**Key words:** Wheat germ; Fluidisation; Physical particle characterization, minimum fluidization velocity.

#### ABREVIATURAS

$A_p$	Área superficial de partícula, m <sup>2</sup>
$D$	Diámetro de cámara de fluidificación, m
$D_p$	Diámetro efectivo de partícula, m
$D_e$	Diámetro equivalente de partícula, m
$f_c$	Factor de Coulson para efectos de pared, adimensional
$g$	Aceleración de la gravedad promedio, m s <sup>-2</sup>
$K_1$	Coefficiente laminar, ecuación de Ergun
$K_2$	Coefficiente turbulento, ecuación de Ergun
$L_{mf}$	Altura de lecho fluidizado a la mínima velocidad de fluidificación, m
$L_0$	Altura de lecho fijo, m
$l_1$	Eje mayor de la partícula de germen de trigo, mm



$l_2$	Eje intermedio de la partícula de germen de trigo, mm
$l_3$	Eje menor de la partícula de germen de trigo, mm
$l_m$	Promedio de $l_2$ y $l_3$ , mm
$M_a$	Masa molar del aire, kg kmol <sup>-1</sup>
$p$	Presión absoluta al nivel del mar, 1.01325 x 10 <sup>5</sup> Pa
$R$	Constante universal de gases, 8314 J kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$s$	Error standard de la estimación
$T_c$	Temperatura, °C
$T_k$	Temperatura, K
$V_0$	Velocidad superficial de aire, m s <sup>-1</sup>
$V_{mf}$	Velocidad de mínima fluidificación, m s <sup>-1</sup>
$V_f$	Velocidad de fluidificación operativa, m s <sup>-1</sup>
$V_p$	Volumen de partícula, m <sup>3</sup>
$W$	Contenido de humedad del germen de trigo, kg agua/ kg materia seca

#### Simbolos Griegos

$\pi$	Constante
$\Delta p$	Caída de presión estática a través del lecho, Pa
$\varepsilon_0$	Fracción de huecos del lecho fijo, adimensional
$\varepsilon_{mf}$	Fracción de huecos del lecho a la mínima velocidad de fluidificación, adimensional
$\rho_p$	Densidad de partícula, kg m <sup>-3</sup>
$\rho_{B0}$	Densidad de lecho fijo, kg m <sup>-3</sup>
$\rho_a$	Densidad de aire, kg m <sup>-3</sup>
$\mu_a$	Viscosidad de aire, kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$\psi$	Factor de esfericidad, adimensional

## INTRODUCCIÓN

La producción de trigo en Argentina es una actividad económica muy importante, actualmente Argentina produce alrededor de 14 millones de toneladas al año de las cuales 5.8 millones de toneladas son molidas para obtener harina de trigo (F.A.I.M. 2016). Esta actividad industrial produce grandes cantidades de germen de trigo (producto secundario en el proceso de elaboración de harina de trigo) lo que lo convierten en un subproducto abundante y de bajo costo. El germen de trigo es el embrión del grano y representa entre el 2 y 3% del peso del grano. El germen contiene entre 8-14 g/100 g de aceite (Capitani et al. 2011), a su vez presenta proteínas y ácidos grasos de alta calidad, un gran contenido de tocoferoles, vitaminas B, fibra dietaria, aminoácidos esenciales y fotoquímicos funcionales tales como los flavonoides y los esteroides (Marti et al., 2014). A pesar de esas destacadas características nutricionales que presenta el germen de trigo, el germen presenta una considerable actividad enzimática debido a que contiene las enzimas lipasa y lipoxigenasa (Shurpalekar and Rao 1977). Estas enzimas son las responsables del deterioro de la calidad del aceite de germen de trigo generando acidez y compuestos volátiles limitando su vida útil a solo unos pocos días (Sjövall et al. 2000). A causa de la actividad de estas enzimas, diversos procesos de estabilización de germen de trigo fueron desarrollados, entre ellos: aplicación de calor (procesos térmicos) (Ferrara P.J & Benson J.T. 1991), irradiación (Jha et al. 2013), procesos de deshidratación (Rothe 1963) o conservación química, como por ejemplo mediante la adición de antioxidantes (Barnes 1948) o álcalis (Grandel 1959). Los procesos térmicos demostraron ser efectivos en la estabilización del germen de trigo, uno de esos, la fluidización, promueve un intenso intercambio entre el material y el aire caliente, lo cual genera un tratamiento uniforme al material que se está fluidizando (Giner and Calvelo 1987). Las características físicas de las hojuelas de germen de trigo (baja densidad y superficie no pegajosa) lo convierten en un material apto para ser estabilizado mediante un tratamiento térmico por fluidificación. Yöndem-Makascioğlu et al. (2005) utilizaron un *spouted bed* (un tipo especial de lecho fluidizado) para estabilizar el germen de trigo. Estos autores determinaron que el tratamiento térmico puede extender la vida útil del germen de trigo sin



estabilizar unas 20 veces y, además el tostado por irradiación le otorga un color dorado y un placentero olor a nuez. A pesar de haber utilizado la fluidificación para estudiar el proceso de estabilización de germen de trigo, no fue propuesto un modelo matemático para analizar el secado mediante lecho fluidizado de germen de trigo. El adecuado modelado y optimización del proceso de secado mediante fluidificación requiere conocer las características físicas de las partículas y los parámetros de diseño de la fluidificación. Es por ello que los objetivos del presente trabajo fueron caracterizar físicamente las partículas de germen de trigo y determinar sus parámetros de diseño para el proceso térmico de fluidificación con aire.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

El germen de trigo fue suministrado por una empresa molinera local (JOSE MINETTI Y CIA. LTDA. S.A.C.I, Córdoba, Argentina) luego de la molienda (cosecha 2014).

### Operaciones preliminares

El germen de trigo fue tamizado (EJR 2000, Zonytest®) para separarlo de las partículas de harina y salvado, el porcentaje de retención fue de  $93.3 \pm 0.3$  (g/100 g de germen de trigo). Las partículas de germen de trigo fueron retenidas en una malla mesh 20 (0,841 mm) y luego fueron almacenadas a  $-18$  °C en un envase tri-capa (poliéster, aluminio, polietileno) con barreras al oxígeno y luz hasta el posterior uso.

### Contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado de acuerdo al método standard AOCS (2009).

### Caracterización geométrica mediante análisis de imágenes

Los ejes principales de las partículas de germen de trigo fueron medidos mediante análisis de imágenes. Las imágenes fueron tomadas con una cámara digital Canon Power Shot S70 montada en una lupa Leica S8 APO utilizando una resolución de 7,1 mega pixeles. Dos fotografías de cada partícula de germen de trigo fueron tomadas (50 partículas), una con las partículas siendo observadas desde una vista en plano y la otra desde una vista lateral. Cada fotografía incluyó una circunferencia de diámetro conocido como referencia (0.0006 m). Las imágenes obtenidas fueron procesadas mediante el software ImageJ 1.48v (disponible como software libre en <http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Una geometría elipsoidal fue seleccionada para describir la forma de las partículas de germen de trigo. Para calcular el área superficial ( $A_p$ ) y el volumen de partícula ( $V_p$ ), los tres ejes principales fueron utilizados como datos en la siguiente fórmula (Gastón et al. 2002):

$$A_p = \frac{\pi}{2} l_1 l_m \left[ \frac{l_m}{l_1} + \frac{1}{U} \sin^{-1} U \right] \quad (1)$$

donde

$$U = \frac{(l_1^2 - l_m^2)^{1/2}}{l_1} \quad (2)$$

$$l_m = \frac{(l_2 + l_3)}{2} \quad (3)$$

$$V_p = \frac{\pi}{6} l_1 l_2 l_3 \quad (4)$$

El factor de esfericidad ( $\psi$ ) fue calculado con la siguiente fórmula (Torrez Irigoyen and Giner 2011):

$$\psi = \frac{\pi D_e^2}{A_p} \quad (5)$$

donde  $D_e$  es el diámetro equivalente de la partícula de germen de trigo, el cual representa el diámetro de una



esfera con el mismo volumen que el de la partícula de germen de trigo.

$$D_p = \psi D_e \quad (6)$$

El diámetro efectivo ( $D_p$ ) representa una esfera con la misma relación superficie-volumen que la de la partícula de germen de trigo (Torrez Irigoyen and Giner 2011). El valor  $D_p$  es relevante como dimensión característica de la partícula para los estudios fluido-dinámicos de lechos fijos.

#### **Secador de lecho fluidizado**

El equipo utilizado fue construido con fines de investigación en el taller de la Facultad de Ingeniería de la Universidad nacional de La Plata, Argentina. El equipo consta de (i) cámara de secado aislada, 0,10 m de diámetro interno y 0,30 m de alto con una ventana de inspección de doble vidrio; (ii) anemómetro de hilo caliente para medir las velocidades superficiales de aire a través del lecho (0- 20 m/s, con un error de 0,03 m/s), (iii) un micromanómetro Testo 525 (0–25 hPa, con un error de 0.2% a fondo de escala) para medir diferencias en la presión del aire a través del lecho; (iv) un controlador de temperatura Novus Model N321; y(v) un ventilador centrífugo, alimentado con un motor eléctrico Siemens (velocidad angular máxima, 2800 rev/min). Dos resistencias en “U” de níquel-plata-cobre de 8 mm de diámetro capaces de calentar el aire hasta 325°C. La velocidad del aire es controlada a través del ventilador que es regulado con un variador de frecuencias WEG Modelo CFW-08, Brasil.

#### **Determinación de la densidad de lecho fijo y la fracción de huecos**

La densidad de lecho fijo se midió en la cámara de secado con las partículas de germen de trigo. Cien gramos de germen de trigo fueron pesados (1500 g-OHAUS balanza de precisión, precisión 0.01 g) y cargados a la cámara de secado. Las partículas fueron llevadas hasta la condición de fluidificación y luego se las volvió a la condición de lecho fijo nuevamente, este paso se realizó para estandarizar el empaquetamiento de las partículas en el lecho.

La altura de lecho fijo ( $L_0$ ) fue medida ( $n=3$ ) y la densidad de lecho fijo ( $\rho_{B0}$ ) fue calculada dividiendo la masa de germen de trigo por el volumen del lecho, formado por el volumen de las partículas más los huecos. La masa de aire en los huecos fue despreciada.

La relación entre la densidad de lecho y la densidad de partícula ( $\rho_p$ ) brinda la fracción de lecho ocupada por las partículas de germen de trigo. En consecuencia, la fracción de huecos del lecho fijo ( $\varepsilon_0$ ) se calculó con la siguiente formula:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{B0}}{\rho_p} \quad (7)$$

#### **Estudio de la fluidodinámica en condiciones de lecho fijo y fluidizado**

La velocidad de mínima fluidificación ( $V_{mf}$ ) de las partículas de germen de trigo fue determinada como parámetro basado en datos experimentales. Para obtenerla, la caída de presión a través del lecho fue medida a 25°C con el instrumento mencionado en la sección 2.5 como una función de la velocidad superficial de aire en el rango que comprende la zona de lecho fijo, la zona de transición entre lecho fijo y fluidizado y la zona de lecho fluidizado.

Los datos correspondientes a la zona de lecho fijo fueron utilizados para determinar los dos parámetros ( $K_1$  y  $K_2$ ) de la expresión de Ergun (1952). (Ec. (9)). Luego, el valor de  $V_{mf}$  fue determinado mediante un procedimiento (Torrez Irigoyen and Giner 2011) para estados fijo y fluidizado como se describe en la siguiente sección.

#### **Determinación de los parámetros de la ecuación de Ergun**

El comportamiento de las partículas de germen de trigo dentro de la cámara de fluidificación fue analizado mediante la medición de la caída de presión de aire y de la velocidad superficial de aire. La caída de presión de aire por unidad de altura de lecho ( $\Delta p/L_0(1-\varepsilon_0)$ ) fue graficada en función de la velocidad superficial de aire ( $V_0$ ).

El factor de Coulson ( $f_c$ ) fue utilizado para corregir la  $V_0$  (multiplicándola por  $f_c$ ) en la región de lecho fijo.



Este factor considera los efectos causados por la pérdida del empaquetamiento del lecho en las cercanías de las paredes de la cámara de secado. (Coulson et al. 1991)

$$f_c = \frac{1}{\left[1 + \frac{\left(\frac{A}{D}\right)^2}{2\left(\frac{6}{D_e}\right)}\right]^2} \quad (8)$$

Para las partículas de germen de trigo el  $f_c$  fue de 0.993 por lo que los efectos de pared para este sistema fueron considerados como leves.

Para la zona de lecho fijo, la ecuación tipo Ergun (Ergun 1952) fue ajustada a los datos experimentales:

$$\frac{\Delta p}{L_0(1-\varepsilon_0)} = K_1 \frac{(1-\varepsilon_0)\mu_0}{D_p^2 \varepsilon_0^3} V_0 + K_2 \frac{\rho_a}{D_p \varepsilon_0^3} V_0^2 \quad (9)$$

Los coeficientes laminar y turbulento,  $K_1$  y  $K_2$ , fueron determinados por Ergun, 1952, para pequeñas partículas inorgánicas, como 150 y 1,75 respectivamente. Delele et al. (2008) informaron que esos valores dependen de las características del producto, particularmente para grandes partículas, y que los mismos deben ser determinados experimentalmente ajustando los datos a una ecuación tipo Ergun. La adecuada selección de los datos correspondiente a la región de lecho fijo se llevó a cabo según lo realizado por Torrez Irigoyen and Giner (2011).

La Ec. (9) fue dividida en ambos miembros por  $V_0$  con el fin de representarla como una recta:

$$\frac{\Delta p}{L_0(1-\varepsilon_0)V_0} = K_1 \frac{(1-\varepsilon_0)\mu_0}{D_p^2 \varepsilon_0^3} + K_2 \frac{\rho_a}{D_p \varepsilon_0^3} V_0 \quad (10)$$

Entonces, luego de reorganizar los datos experimentales de acuerdo con la Ec. (10) y de graficarlos en función de  $V_0$ , el comportamiento de la zona de lecho fijo debería ser representado por una tendencia lineal. Luego de haber seleccionado los datos de la zona de lecho fijo de acuerdo a lo realizado por Torrez Irigoyen and Giner (2011), la forma cuadrática de la ecuación tipo Ergun Ec.(9) fue utilizada, ya que la misma usualmente otorga mejores ajustes que la versión lineal. Ec. (10). El ajuste de los datos experimentales fue realizado mediante el software estadístico Statgraphic Centurion XV v 15.1.02, USA. Los resultados de los ajustes fueron obtenidos mediante el método no lineal de mínimos cuadrados.

#### **Determinación de la velocidad de mínima fluidificación**

Cuando la velocidad del fluido genera una caída de presión a través del lecho que, multiplicada por el área de la sección transversal iguala al peso del producto en el fluido, la velocidad de mínima fluidificación ( $V_{mf}$ ) es alcanzada. El peso del producto en el fluido se obtuvo mediante la diferencia entre el peso del producto y la fuerza de flotabilidad en el fluido (Werther 1999). Luego de realizar operaciones matemáticas, el área de la sección transversal fue cancelada y la expresión matemática se transformó en:

$$\Delta p = (\rho_p - \rho_a)g(1 - \varepsilon_{mf})L_{mf} \quad (11)$$

Asumiendo que la masa permanece constante desde la zona de lecho fijo a la zona de lecho fluidizado, a ambos lados del punto de velocidad de mínima fluidificación, la siguiente expresión matemática es válida:

$$(1 - \varepsilon_{mf})L_{mf} = (1 - \varepsilon_0)L_0 \quad (12)$$

Al reemplazar la Ec. (12) en la Ec. (11) obtenemos:

$$\frac{\Delta p}{L_0(1-\varepsilon_0)} = (\rho_p - \rho_a)g \quad (13)$$



Luego, el miembro izquierdo de la Ec. (13) fue reemplazado por el miembro derecho de la Ec. (9) evaluada a  $V_{mf}$ , en consideración al hecho de que la  $V_{mf}$  nominalmente pertenece a ambos estados, fijo y fluidizado.

$$K_2 \frac{\rho_a}{D_p \varepsilon_0^3} V_{mf}^2 + K_1 \frac{(1-\varepsilon_0)\mu_0}{D_p^2 \varepsilon_0^3} V_{mf} - (\rho_p - \rho_a)g = 0 \quad (14)$$

$V_{mf}$  es la solución de esta expresión matemática y tiene un significado físico. Para obtener este resultado, la aproximación  $\varepsilon_{mf} \approx \varepsilon_0$  fue utilizada porque la determinación de  $\varepsilon_{mf}$  es dificultosa de llevar a cabo durante la fluidificación y el procedimiento usualmente no otorga valores fiablemente diferentes de  $\varepsilon_0$ . El valor de la densidad de partícula ( $\rho_p$ ) se obtuvo del trabajo publicado por KIM et al. (2003).

La viscosidad del aire ( $\mu_0$ ) y su densidad ( $\rho_a$ ) fueron calculadas en función de la temperatura con las siguientes ecuaciones: (Formisani et al. 1998).

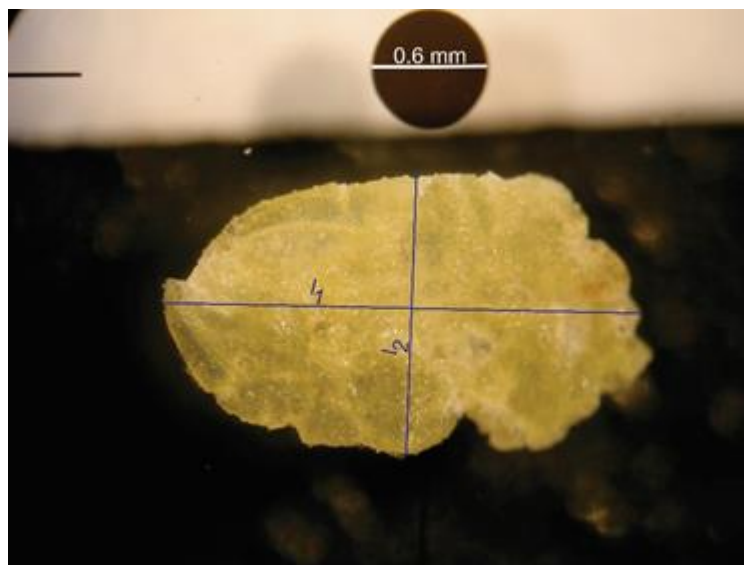
$$\mu_0 = 1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_C \quad (15)$$

$$\rho_a = \frac{PM_a}{RT_K} \quad (16)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización geométrica mediante análisis de imágenes

Un total de 50 partículas de germen de trigo fueron medidas mediante análisis de imágenes. Los tres ejes principales fueron medidos utilizando una referencia circular en las imágenes. (**Fig. 1**).



**Figura 1.** Vista en plano de la partícula de germen de trigo con los ejes principales  $l_1$  y  $l_2$  y la circunferencia utilizada como referencia.

En la **Tabla 1** se muestran los valores medidos de los ejes principales y los valores calculados de área superficial, volumen de partícula, diámetro equivalente y diámetro efectivo. (Ec. 1 a 6).





**Tabla 1.** Propiedades de las partículas de germen de trigo determinadas mediante análisis de imágenes.

	Media	Min	Max	Unidad
$l_1$	2,28	1,65	3,39	mm
$l_2$	1,59	1,19	2,13	mm
$l_3$	0,29	0,17	0,41	mm
$A_p$	5,26	3,65	9,21	mm <sup>2</sup>
$V_p$	0,49	0,24	0,97	mm <sup>3</sup>
$\square_{\square}$	0,969	0,766	1,223	mm
$\square_{\square}$	0,623	0,366	0,849	mm
$\square$	0,62	0,477	0,79	Adimensional

n=50

**Determinación de los parámetros de Ergun**

La caída de presión a través del lecho por unidad de altura de lecho fue graficada en función de la velocidad superficial de aire para el germen de trigo. A bajas velocidades, se observó una pendiente creciente y una forma cóncava de la curva, este comportamiento es comparable con lo publicado por otros autores (Torrez Irigoyen and Giner 2011, Sau et al. 2007) y es considerado como comportamiento típico para la región de lecho fijo. A velocidades de aire mayores la curva presenta un comportamiento horizontal.

La región de lecho fijo se determinó mediante el arreglo de los datos experimentales de acuerdo a lo indicado por el miembro izquierdo de la Ec. (10) graficados en función de  $\square_{\theta}$ . La zona de lecho fijo se caracteriza por un comportamiento regular, para esta partícula en particular, el comportamiento regular se produjo hasta los 0,26 m/s, luego de esa velocidad el comportamiento observado se volvió irregular. A partir de esas observaciones, la región de lecho fijo fue determinada en la región de velocidad de aire de 0,05-0,26 m/s.

Una vez delimitada la zona pura de lecho fijo, los datos experimentales fueron reacomodados de acuerdo a como indica el miembro izquierdo de la Ec. (9) en función de  $\square_{\theta}$  y luego la forma parabólica de la ecuación de tipo Ergun (Ec.9) fue ajustada a los datos experimentales utilizando la porosidad de lecho y el diámetro efectivo informados en la **Tabla 2**. Los parámetros obtenidos ( $K_1$  y  $K_2$ ) fueron 277.46 (17.48) y 7.79 (0.69) respectivamente, el correspondiente error asintótico standard (ASE) se encuentra entre paréntesis. El coeficiente de determinación corregido ( $r^2$ ) fue de 0,994.

**Tabla 2.** Propiedades de lecho fijo determinadas.

$\rho_p$	1234,23	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{B0}$	413,83	kg/m <sup>3</sup>
$L_0$	0,03	m
$\varepsilon_0$	0,664	Adimensional

Como se mencionó previamente en la sección 2.8,  $K_1$  y  $K_2$  dependen de las características de la partícula, principalmente en la rugosidad de la superficie, tamaño y forma (Escardino et al. 1974). Los valores obtenidos fueron mayores a los informados por Torrez Irigoyen and Giner, 2011 para granos de soja.

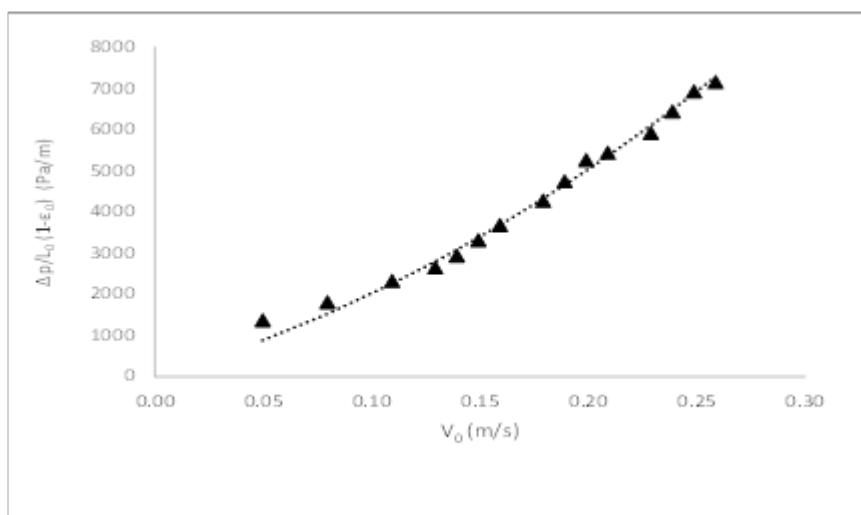
El valor determinado de  $K_1$  en este trabajo, fue menor que el informado por Escardino et al., 1974 para granos de trigo, mientras que  $K_2$  fue mayor que el correspondiente valor informado en el trabajo mencionado. Esto puede estar relacionado con la forma de las partículas, las partículas de germen de trigo son pequeñas y planas. Estas características pueden influir en el empaquetamiento de las mismas dentro de la



cámara de secado, generando abruptos cambios en la dirección del flujo de aire que percola a través el lecho fijo (Yang 2003). Además, las partículas de germen de trigo presentan una superficie rugosa, característica que contribuye a aumentar los valores de  $K_1$  y  $K_2$ .

Esto está en concordancia con Molenda et al. (2005) quienes informaron que los granos con formas no esféricas y con tamaño aleatorio de partículas resultan en coeficientes  $K_1$  y  $K_2$  considerablemente mayores que los valores teóricos para partículas esféricas, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo.

La caída de presión predicha (línea) y experimental (símbolos) fueron graficadas en función de la velocidad superficial de aire utilizando los parámetros obtenidos en el ajuste de la ecuación de Ergun (Fig. 2). La concordancia de la caída de presión predicha y la experimental fue satisfactoria para las partículas de germen de trigo.



**Figura 2.** Caída de presión a través del lecho fijo por unidad de altura de lecho en función de la velocidad superficial de aire. Datos experimentales (  $\blacktriangle$  ), datos predichos con la ecuación de Ergun.

### Determinación de velocidad de mínima fluidificación $V_{mf}$

La velocidad de mínima fluidificación fue obtenida a partir de la Ec. 14 utilizando los parámetros de partícula medidos ( $D_p$ ,  $\epsilon_0$ ). Luego de resolver la Ec. (14), la  $V_{mf}$  para las partículas de germen de trigo en aire a  $\sim 25^\circ\text{C}$  fue de  $0,35 \pm 0,02$  m/s. Esta velocidad de mínima fluidificación corresponde a un caudal de aproximadamente  $0,003$  m<sup>3</sup>/s en el secador utilizado. Este caudal es bajo en comparación con los  $0,011$  m<sup>3</sup>/s informados por Yöndem-Makascioğlu et al. (2005) para estabilizar germen de trigo en un secador de lecho fluidizado del tipo “spouted”.

### CONCLUSIONES

En la presente investigación algunas propiedades de la partícula de germen de trigo fueron caracterizadas mediante análisis de imágenes ( $V_p$ ,  $A_p$ ,  $\psi$ ,  $D_p$ ,  $D_e$ ).

La densidad de lecho fijo y la porosidad de lecho fueron medidas. Las características fluido-dinámicas de la partícula de germen de trigo en lecho fijo fueron estudiadas. Los coeficientes laminar y turbulento ( $K_1$  y  $K_2$ ) de la ecuación de Ergun fueron ajustados a los datos experimentales obtenidos y la velocidad de mínima fluidificación de la partícula de germen de trigo fue  $0,35 \pm 0,02$  m/s, determinada a  $25^\circ\text{C}$ .

### BIBLIOGRAFÍA

AOCS. (2009). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society (5th





ed.). Champaign, Illinois, USA.

Barnes HM (1948). 5-Pentadecyllresorcinol as an oxidation inhibitor of glycerides. US Patent 2,448, 207.

Capitani, M., Mateo, C. M., & Nolasco, S. M. (2011). Effect of temperature and storage time of wheat germ on the oil tocopherol concentration. *Braz. J. Chem. Eng.*, 28(02), 243–250. doi: 10.1590/S0104-66322011000200008

Coulson, J.M., Richardson, J.F., Harker, J.H., Backhurst, J., 1991. *Chemical Engineering Volume 2: Particle Technology and Separation Processes*, 5th ed, Chemical Engineering Science. Butterworth-Heinemann, Oxford. doi:10.1016/0009-2509(60)80030-9

Delele, M.A., Tijssens, E., Atalay, Y.T., Ho, Q.T., Ramon, H., Nicolaï, B.M., Verboven, P., 2008. Combined discrete element and CFD modelling of airflow through random stacking of horticultural products in vented boxes. *J. Food Eng.* 89, 33–41. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.03.026

Ergun, S., 1952. Fluid Flow Through Packed Columns. *Chem. Eng. Prog.* 48, 89–94.

Escardino, A., Ruiz, F., Barbero, P., 1974. Circulación de aire a través de lechos formados por granos de cereales. *Rev. Agroquímica y Tecnol. Aliment.* 10, 528–539.

F.A.I.M., 2016. Molienda y producción de Harina [WWW Document]. URL <http://www.faim.org.ar/Nacional.aspx> (accessed 4.1.16).

Ferrara P.J., Benson, J.T., 1991. Method of producing shelf stable wheat germ. US Patent US5063079 A

Formisani, B., Girimonte, R., Mancuso, L., 1998. Analysis of the fluidization process of particle beds at high temperature. *Chem. Eng. Sci.* 53, 951–961. doi:10.1016/S0009-2509(97)00370-9

Gastón, A.L., Abalone, R.M., Giner, S. a., 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *J. Food Eng.* 52, 313–322. doi:10.1016/S0260-8774(01)00121-2

Giner, S. A., Calvelo, a., 1987. Modelling of wheat drying in fluidized beds. *J. Food Sci.* 52, 1358–1363. doi:10.1111/j.1365-2621.1987.tb14082.x

Grandel, F., 1959. Process of making germ flakes. US Patent 2879167 A

Jha, P.K., Kudachikar, V.B., Kumar, S., 2013. Lipase inactivation in wheat germ by gamma irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 86, 136–139. doi:10.1016/j.radphyschem.2013.01.018

Kim, Y.S., Flores, R.A., Chung, O.K., Bechtel, D.B., 2003. Physical, chemical, and thermal characterization of wheat flour milling coproducts 2. *J. Food Process Eng.* 26, 469–488. doi:10.1111/j.1745-4530.2003.tb00613.x

Marti, A., Torri, L., Casiraghi, M.C., Franzetti, L., Limbo, S., Morandin, F., Quaglia, L., Pagani, M.A., 2014. Wheat germ stabilization by heat-treatment or sourdough fermentation: effects on dough rheology and bread properties. *LWT - Food Sci. Technol.* doi:10.1016/j.lwt.2014.06.039. This

Molenda, M., Montross, M.D., McNeill, S.G., Horabik, J., 2005. Airflow resistance of seeds at different bulk densities using Ergun's equation. *Trans. ASAE* 48, 1137–1145.

Rothe, M., 1963. Uber ein neues Stabilisierungsverfahren fur Weizenkeime. *Mol. Nutr. Food Res.* 7(8), 579-587. doi: 10.1002/food.19630070805

Sau, D.C., Mohanty, S., Biswal, K.C., 2007. Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas–solid tapered fluidized beds. *Chem. Eng. J.* 132, 151–157. doi:10.1016/j.cej.2007.01.036

Shurpalekar, S.R., Rao, P.H., 1977. Wheat Germ. *Adv. Food Res.*, 23, 187-304

Sjövall, O., Virtalaine, T., Lapveteläinen, A., Kallio, H., 2000. Development of rancidity in wheat germ analyzed by headspace gas chromatography and sensory analysis. *J. Agric. Food Chem.* 48, 3522–7.

Torrez Irigoyen, R.M., Giner, S. a., 2011. Fluidisation velocities during processing of whole soybean snack. *J. Food Eng.* 107, 90–98. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.05.040

Werther, J., 1999. Measurement techniques in fluidized beds. *Powder Technol.* 102(1), 15-36. doi:10.1016/S0032-5910(98)00202-2

Yang, W.-C., 2003. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. *China Particuology* 1, 137. doi:10.1016/S1672-2515(07)60126-2

Yöndem-Makascioğlu, F., Gürün, B., Dik, T., Kincal, N.S., 2005. Use of a spouted bed to improve the storage stability of wheat germ followed in paper and polyethylene packages. *J. Sci. Food Agric.* 85, 1329–1336. doi:10.1002/jsfa.2102



**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SeCyT-UNC) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por el financiamiento recibido.

