

Definición de la altura de operación para el secado de soja en lecho fluidizado cónico tridimensional

Salcedo, Gustavo A.^{1,2}; Tarifa, Enrique E.^{2,3}; Lescano, Lara V.¹; Juárez, Inés A.¹; Coronel, Eve L.¹

(1) *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero*
gusalca2.92@gmail.com; lescanolaravaleria@gmail.com; inesadiazj@gmail.com;
evecoronel@gmail.com

(2) *CONICET.*

(3) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy*
eetarifa@fi.unju.edu.ar

RESUMEN

Diversos procesos se llevan a cabo en un lecho fluidizado cónico, como el secado, que se aplica a la soja previamente para la inactivación enzimática. Por este motivo, el objetivo del presente trabajo es definir la altura estática óptima del lecho para el citado proceso, en función de la fluidodinámica. Se trabajó con 3 alturas de lecho: 0,06, 0,1 y 0,15 m, y con frecuencias en el rango de 5-50 Hz. Se comparó el comportamiento de la pérdida de carga y de la velocidad superficial a diferentes alturas. Con una altura de 0,15 m, las corrientes descendentes de granos por las paredes del equipo fueron escasas, y en el centro del lecho se formó un canal interno con flujo turbulento ascendente, provocando una distribución heterogénea en el lecho. Al trabajar con 0,06 m de altura del lecho, se produjo un alto grado de mezclado, pero el impacto constante con las paredes del cono generó la ruptura de una gran cantidad de granos. Dadas las comparaciones entre los esquemas de trabajo, se determinó que la altura óptima de trabajo es 0,1 m, la cual permitió lograr una alta tasa de transferencia de calor y materia para el secado eficiente del grano.

ABSTRACT

Several processes are carried out in a conical fluidized bed, such as drying, which is applied to soybeans beforehand for enzymatic inactivation. For this reason, the objective of the present work is to define the optimum static bed height for the above-mentioned process, as a function of fluid dynamics. We worked with 3 bed heights: 0.06, 0.1 and 0.15 m, and with frequencies in the range of 5-50 Hz. The behavior of head loss and surface velocity at different heights was compared. At a height of 0.15 m, the downward flow of grains through the walls of the equipment was scarce, and in the center of the bed an internal channel with turbulent upward flow was formed, causing a heterogeneous distribution in the bed. When working with 0.06 m bed height, a high degree of mixing occurred, but the constant impact with the cone walls generated the rupture of a large number of grains. Given the comparisons between the working schemes, it was determined that the optimum working height is 0.1 m, which allowed achieving a high rate of heat and material transfer for efficient grain drying.

Palabras claves: altura de lecho – soja – turbulencia

Keywords: Bed height – soybean – turbulence

1. INTRODUCCIÓN

El lecho fluidizado cónico constituye un proceso con varias aplicaciones, como granulación,

combustión, recubrimiento, gasificación, secado, entre otros (Moraes, 2021). Esta última operación se aplica a la soja, como un proceso previo de inactivación enzimática. (Torrez Irigoyen, 2013).

Un parámetro relevante en el diseño de este proceso —además de la velocidad, la pérdida de carga y la temperatura— es la altura estática h_0 del lecho. Para cada tipo de material, tamaño, temperatura y fracción de espacios huecos, se trabaja con una h_0 definida.

Moharana y Malik (2012) plantea que a medida que aumenta h_0 , también lo hace la pérdida de carga a través del lecho. Mientras aumenta la altura del lecho estático, se filtra más aire hacia la región del espacio anular o se esparce lateralmente, por lo que se requiere más fluido para fluidizar la región central superior del lecho, lo que conduce a un aumento en la velocidad mínima de fluidización.

Toschi et al. (s.f.) trabaja con urea para la determinación de la fluidodinámica del lecho fluidizado, con una altura inicial de lecho de 0,12 m. Varios factores inciden en la altura óptima del lecho, como el tamaño y densidad de las partículas, la velocidad del aire y la geometría del equipo. Hamzehei (2011) utiliza una altura inicial de 0,44 m, pero trabaja con partículas esféricas de vidrio de 175, 275 y 375 μm de diámetro, con una densidad de 1883 kg/m^3 .

Torrez Irigoyen (2013), por su parte, trabaja con soja en un equipo de lecho fluidizado convencional, y utiliza una altura de lecho estático de 0,1 m., para la deshidratación e inactivación enzimática del grano.

En un equipo de lecho fluidizado cónico, para caracterizar la fluidodinámica del proceso, se utiliza la pérdida de carga del aire Δp entre la superficie y el fondo del material, y la velocidad superficial v_s en el fondo del cono. A medida que crece el flujo de aire a través del equipo, el parámetro h_0 sufre constantes cambios. Cuando la velocidad superficial del aire v_s es baja, el lecho se encuentra en un estado estático, y Δp aumenta con v_s , hasta que esta última llega a un valor $v_s = v_{\text{smf}}$, conocida como velocidad mínima de fluidización, para la cual corresponde un valor estable $\Delta p = \Delta p_{\text{mf}}$, llamada pérdida de carga de fluidización incipiente. Los valores de las variables Δp_{mf} y v_{smf} son muy importantes en el estudio fluidodinámico del lecho fluidizado (Fang et al., 2020).

Desde luego, todo análisis fluidodinámico de este proceso, debe realizarse tanto en estado fijo como fluidizado (Torrez Irigoyen, 2013).

Otros parámetros importantes en el análisis fluidodinámico son el caudal mínimo de fluidización para diferentes diámetros de partículas de material y diferentes alturas de lecho estático (Lescano, 2021); el ángulo del cono del

lecho y la altura del lecho de partículas (que influyen en la transición de régimen de flujo) (Jing et al., 2000); y la cantidad de material en el lecho (Fang et al., 2020).

Sau et al. (2007) propone modelos basados en análisis adimensionales para predecir la velocidad de fluidización mínima y la caída de presión máxima para lechos fluidizados cónicos gas-sólido.

Torres Sciancalepore (2019), Rodríguez Pérez (2021) y Hamzehei (2011) utilizaron fluidodinámica computacional, para lograr una simulación más minuciosa y precisa del proceso.

Preponderantemente, se busca la optimización del secado y la inactivación de las condiciones de inhibidores lábiles al calor de la soja (Torrez Irigoyen, 2013) a través del equipo de lecho fluidizado, para acortar el tiempo de tratamiento y reducir las pérdidas en la calidad del producto final (Martínez et al., 2013).

De acuerdo a lo analizado, el objetivo del presente trabajo es definir la altura estática del lecho para el proceso de secado de soja, en función de la fluidodinámica resultante, para asegurar la optimización del proceso, y la obtención de un producto de calidad aceptable.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Equipo experimental

El equipo utilizado es un secadero de lecho fluidizado cónico tridimensional (Fig. 1). Este dispositivo posee una cámara cilíndrica de acrílico, con un diámetro de 0,185 m. El equipo posee un fondo cónico, con un diámetro superior de 0,185 m y un diámetro inferior de 0,047 m. La parte inferior de la cámara está conectada al tubo de entrada de aire, construido en acero inoxidable, y la parte superior, está provista de una campana cónica conectada al tubo de escape de aire, también de acero inoxidable.

El aire ingresó a la cámara a través de un tubo circular de acero inoxidable, con un diámetro interno $D = 0,047$ m, unido a la parte inferior del equipo mediante una abrazadera clamp, y salió por la parte superior, a través de un tubo con las mismas características que el de la entrada.

La altura de la parte estructural cónica inferior y la superior es 0,11 m, mientras que la altura de la parte recta de la cámara es $Y = 0,4$ m.

El aire fue impulsado por un soplante centrífugo externo, cuyo caudal se controló a través de un

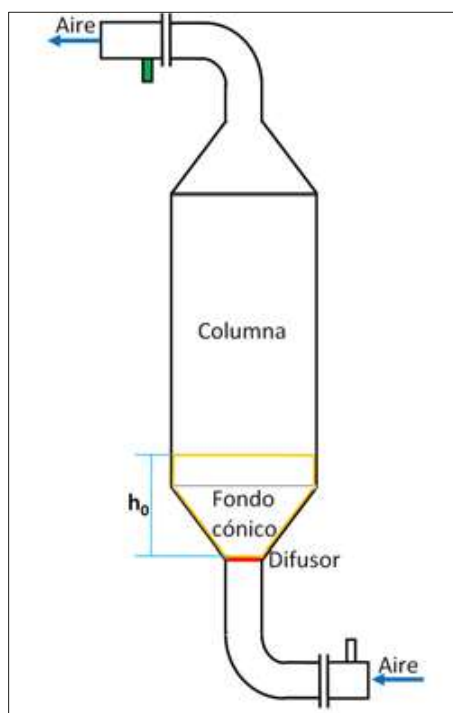


Figura 1. Esquema representativo del equipo experimental. Elaboración propia.

variador de frecuencia asociado al motor del mismo.

2.2. Materia prima

Se trabajó con soja, cuyo contenido de humedad fue $W = 13\%$ b.h. La caracterización geométrica de la soja utilizada estuvo en función de 3 ejes, representados en la Fig. 2.

La altura es $E_3 = 5,22$ mm, la profundidad es $E_1 = 6,53$ mm, y el ancho es $E_2 = 6,12$ mm. E_1 , E_2 y E_3 representan valores promedio, para una muestra de 100 granos de soja.

2.3. Rango de trabajo

La frecuencia F aumentó en el rango de 5-50 Hz, con incrementos variables. A continuación, se trabajó disminuyendo F progresivamente en intervalos variables, hasta $F = 5$ Hz. En cada valor fijado de F , se esperó un minuto para que el equipo alcanzara el estado estacionario, y luego se realizó la medición correspondiente de pérdida de carga en la placa orificio y pérdida de carga en el equipo. Las experiencias se desarrollaron por triplicado, con aire a $T = 30^\circ\text{C}$.

2.4. Instrumentación

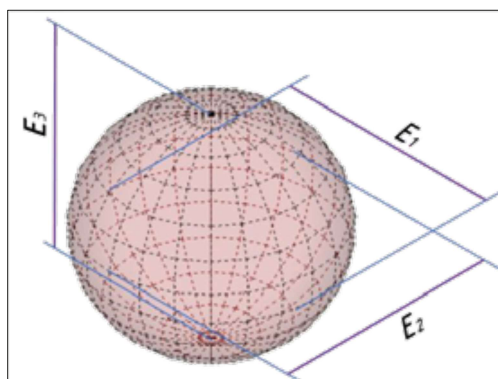


Figura 2. Ejes representativos de las dimensiones del grano de soja.

En los experimentos realizados, se utilizó el anemómetro digital de Pitot TROTEC TA400. Se empleó este instrumento de medición en modo manómetro diferencial. Este equipo mide la diferencia entre las presiones, Δp_{placa} , en Pa, aguas arriba y abajo de la placa orificio instalada en el tubo. En este caso, la velocidad promedio v_{prom} se obtuvo con la Ecuación (1) en m/s.

$$v_{\text{prom}} = \left(\frac{D_1}{D}\right)^2 C_0 Y \frac{\sqrt{\Delta p_{\text{placa}}}}{\sqrt{\rho \left[1 - \left(\frac{D_1}{D}\right)^4\right]}} \quad (1)$$

Donde D_1 es el diámetro interno de la placa orificio, D es el diámetro interno del tubo ($D = 0,047$ m), C_0 es el coeficiente de descarga de la placa orificio (adimensional), Y es el factor de expansión (adimensional) y ρ es la densidad del aire en kg/m^3 . El valor de C_0 , dependiente del régimen de flujo, se obtuvo de Salcedo et al. (2022). El valor del factor Y se obtuvo de Geankoplis (1998). El diámetro interno del tubo posee la misma dimensión que la base cónica del equipo. Por lo tanto, el valor calculado de v_{prom} corresponde a la velocidad superficial del aire v_s en la base del cono, definida como la velocidad que existiría a través del lecho, si éste estuviera vacío (Foust, 2006).

Según Çengel y Cimbala (2006), a 30°C , la viscosidad y densidad del aire son $1,872 \times 10^{-5}$ Pa s y $1,164$ kg/m^3 , respectivamente.

El mismo instrumento, en el mismo modo de medición, se utilizó para medir las pérdidas de carga Δp a través del lecho. Los resultados se expresaron en Pa. En este modo de medición, el instrumento posee una precisión de $\pm 0,3\%$, una resolución de 1 Pa y un rango de medición de

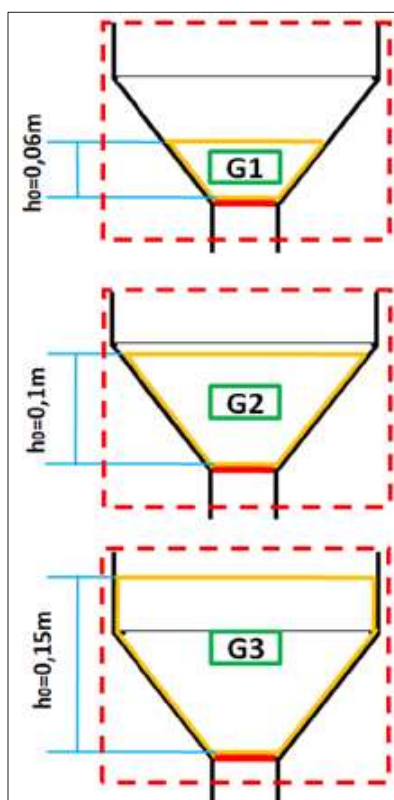


Figura 3. Representación de los esquemas de trabajo.

1 – 5000 Pa. Se utilizó la pérdida de carga neta, para eliminar los efectos del equipo (Salcedo, 2023).

2.5. Esquemas de trabajo

En todo el desarrollo experimental, se utilizó la pérdida de carga neta en el lecho, para eliminar la influencia del equipo (Salcedo et al., 2023). Se trabajó con 3 alturas estáticas del lecho, las cuales dieron clasificación a los esquemas de trabajo: $h_0 = 0,06$ m (Esquema G1); $h_0 = 0,1$ m (Esquema G2); y $h_0 = 0,15$ m (Esquema G3). En la Fig. 3 se exhiben los 3 esquemas de trabajo, tomando como volumen de control (en el recuadro de línea punteada) el fondo cónico, en el cual se deposita la soja. Como puede observarse, para el esquema G1, la altura estática se encuentra por debajo de la altura del cono inferior del equipo. En cambio, en el esquema G3, la altura estática se encuentra por encima del cono del equipo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Esquema G1

La curva obtenida trabajando con $h_0 = 0,06$ m se ilustra en la Fig. 4. Mientras aumenta la frecuencia de trabajo F (Ida), incrementa v_s , y también lo hace Δp , pero la altura del lecho permanece invariable, hasta $v_s = 5,95$ m/s. Cuando v_s se encuentra en el rango $5,95 - 6,15$ m/s, el lecho presenta cierta inestabilidad, los granos de soja comienzan a imponer cierto movimiento vibratorio, rotando sobre sus ejes, y presentando cada vez menor resistencia al flujo de aire. Cuando $v_s = 6,15$ m/s, los granos presentan mayor movimiento, colisionando entre ellos. Este es el estado que presentó mayor pérdida de carga. Cuando $v_s > 6,15$ m/s, la fluidización inicia. Como puede observarse, la pérdida de carga Δp disminuye a un mínimo y luego se estabiliza, dando lugar a la expansión del lecho y aumentando la porosidad (Lescano, 2021, Foust, 2006, Peng y Fan, 1997).

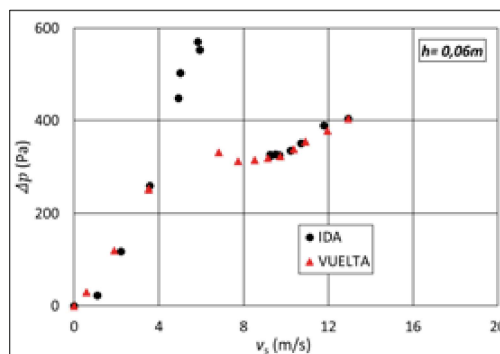


Figura 4. Pérdida de carga en función de la velocidad superficial para el esquema G1.

A medida que la frecuencia F decrece (Vuelta), los granos de soja van atenuando su movimiento y se acomodan nuevamente en el fondo del equipo, dando al lecho una porosidad diferente a la inicial (Salcedo, 2023), por lo que la altura estática final es $h = 0,063$ m. Se observó que, al trabajar en estas condiciones, se produjo efectivamente un alto grado de mezclado, lo cual es sumamente importante para la transferencia de calor y materia para el secado de la soja.

3.2. Esquema G2

La Fig. 5 expone la curva obtenida al trabajar con $h_0 = 0,1$ m. Cuando se trabaja a frecuencia F creciente (Ida), en la condición de lecho fijo, se observa un incremento de Δp con v_s , hasta que se produce un equilibrio entre Δp y el peso de los granos, que constituye la mayor pérdida de carga.

Luego, la curva exhibió una disminución notable de Δp , hasta llegar a un mínimo, cuyo valor fue $\Delta p = 458$ Pa. Por último, se observó un leve incremento de Δp con v_s , concordando el comportamiento de la curva con lo reportado por Lescano (2021), Geankoplis (1998), Foust et al. (2006), Moharana y Malik (2012), Sau (2007) y Salcedo (2023).

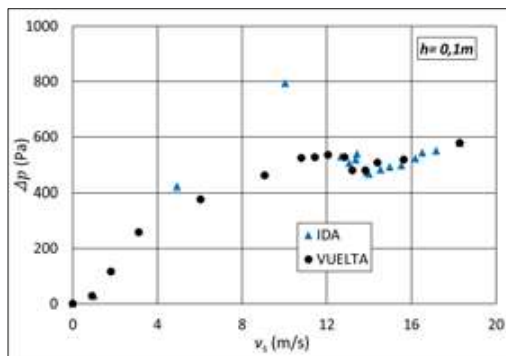


Figura 5. Pérdida de carga en función de la velocidad superficial para el esquema G2.

A medida que la frecuencia F decreció (Vuelta), se observó una disminución de Δp a medida que lo hizo v_s , hasta llegar a $\Delta p = 0$. Este comportamiento de la pérdida de carga y la velocidad superficial coincide con lo reportado por Lescano (2021) y Peng y Fan (1997).

3.3. Esquema G3

Los datos experimentales del esquema G3 se muestran en la Fig. 6. Cuando se trabajó a frecuencia F creciente (Ida), nuevamente se observó un incremento de Δp con v_s , con el consiguiente equilibrio entre Δp y el peso de los granos. Luego, la curva exhibió una disminución notable de Δp , hasta llegar a un mínimo; y finalmente, hubo un leve incremento de Δp con v_s . Un comportamiento similar manifiestan los esquemas G1 y G2 durante la caída de la frecuencia de trabajo. Como se puede apreciar, los estados por los que pasan las variables son similares, sólo que existen diferentes requerimientos de potencia por parte del soplante.

3.4. Comparación general

La Fig. 7 muestra que el esquema G3 requiere mayores valores de Δp , esto está asociado a una mayor frecuencia de trabajo del soplante. Una vez alcanzada la fluidización, las corrientes descendentes de granos por las paredes del equipo

fueron escasas, lo cual impidió la formación del anillo característico en las líneas de corriente de aire y en las líneas de trayectorias de granos del lecho fluidizado. Además, en el centro del lecho, se formó un canal interno con flujo turbulento ascendente, lo que provocó una distribución heterogénea, dando lugar a la formación de zonas de altas y bajas concentraciones, lo cual es indeseable para la transferencia de calor y materia. Es decir, bajo estas condiciones, se necesitaría un tiempo más prolongado para llevar a cabo el proceso de secado.

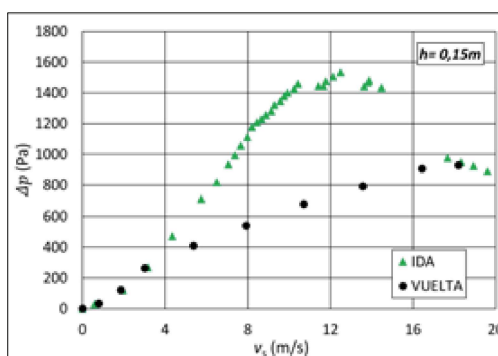


Figura 6. Pérdida de carga en función de la velocidad superficial para el esquema G3.

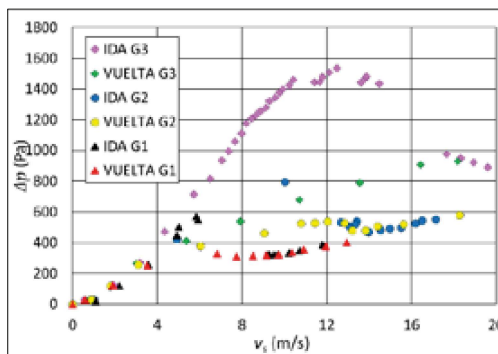


Figura 7. Comparación general de los esquemas de trabajo.

Las curvas para G2 mostraron valores de Δp que requieren niveles aceptables de frecuencias de trabajo, en el rango de 5-40 Hz. Además, se pudo formar el anillo de las líneas de corriente de aire, que es característico de la fuente formada en el centro del equipo de lecho fluidizado. La simetría axial que mostró la fuente formada, conjuntamente con la turbulencia observada, permiten obtener una alta tasa de transferencia energética y másica.

Con respecto a G1, los valores de Δp fueron menores que el resto, por lo cual, requieren menor aporte energético por parte del soplante. Sin

embargo, el impacto constante con las paredes del cono inferior generó la ruptura de una gran cantidad de granos, lo cual afectará la calidad del producto final.

En función de lo analizado, dadas las formas de las curvas y las comparaciones entre las mismas, se determinó que la mejor altura de lecho estático de trabajo para la soja es 0,1 m, cuyas condiciones permitirán realizar un secado eficiente del grano.

4. CONCLUSIÓN

Para el esquema G1, los resultados experimentales muestran que los requerimientos de potencia son inferiores, lo cual se traduce en eficiencia energética, pero se encuentra limitado a la alta turbulencia, que genera la ruptura de granos, afectando la calidad final del producto.

La forma de la fuente obtenida en G3 permite inferir en condiciones que no favorecen la transferencia de calor y materia para el secado, además de necesitar un mayor suministro energético.

Las curvas para G2 requirieron niveles aceptables de frecuencias de trabajo, permitiendo, además, la formación del anillo de las líneas de corriente de aire, lo cual favorece la transferencia materia y energía para el secado.

Se determina, por lo tanto, que la altura óptima de lecho estático de trabajo para la soja es 0,1 m, desde el punto de vista de la eficiencia energética y de la calidad del producto final.

5. REFERENCIAS

- Çengel Y., Cimbala J. (2006). *Mecánica de Fluidos*. (1ª. ed.). McGraw-Hill.
- Fang, S., Wei, Y., Fu, L., Tian, G., Qu, H. (2020). Modeling of the Minimum Fluidization Velocity and the Incipient Fluidization Pressure Drop in a Conical Fluidized Bed with Negative Pressure. *Applied Sciences*, 10 (24), 1-19.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., Andersen, L. B. (2006). *Principios de operaciones unitarias* (2ª. ed.). Programas Educativos, S. A. de C. V., México.
- Hamzehei, M. (2011). CFD modeling and simulation of hydrodynamics in a fluidized bed dryer with experimental validation. *International Scholarly Research Notices*, 2011 (1), 131087.
- Jing, S., Hu, Q., Wang, J., Jin, Y. (2000). Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 39 (4), 379-387.
- Lescano, L. V. (2021). Secado en lecho de chorro bidimensional para la deshidratación de proteínas de plasma de sangre bovina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina.
- Martínez, ML, Marín, MA, Ribotta, PD. (2013). Optimization of soybean heat-treating using a fluidized bed dryer. *Journal of Food Science and Technology*. 50 (6), 1144-1150.
- Moharana, Y. C., Malik, M. K. (2012). Fluidization in Conical Bed and Computational Fluid Dynamics Modeling Of The Bed (Doctoral dissertation).
- Moraes, D. M. (2021). Construção de um secador de grãos em leito fluidizado cônico e implementação de seus sistemas de aquisição de dados. Tesis de grado, Universidade Federal do Maranhão, Brasil.
- Peng, Y., Fan, LT (1997). Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid-solid tapered beds. *Chemical Engineering Science*. 52 (14), 2277-2290.
- Rodríguez Pérez, H. (2021). Simulación CFD de la hidrodinámica de un reactor anaerobio de lecho fluidizado inverso. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Salcedo, G. A., Tarifa, E. E., Lescano, L. V., Rosas, D. A., Coronel, E. L. (2022). Estimación de la incertidumbre para la selección de instrumentos de medición de la velocidad del aire en un tubo. *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, 8, 246-252.
- Salcedo, G. A., Tarifa, E. E., Lescano, L. V., Rosas, D. A., Herrera, F. E., Coronel, E. L. (2023). Estudio de la influencia de la parte estructural de un equipo de lecho fluidizado en la pérdida de carga del proceso. *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, 9, 736-743.
- Sau, D. C., Mohanty, S., Biswal, K. C. (2007). Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 132, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.036>
- Torres Sciancalepore, R. A. (2019). Estudio experimental y simulación por CFD de contactores fluidizados gas-sólido en régimen burbujeante. Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue, Argentina.
- Torrez Irigoyen, R. M. (2013). Diseño de un proceso térmico de fluidización para la producción de soja crocante. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Toschi, F., Zambon, M. T., Mazza, G. D. (s.f.)
Análisis de alternativas para la caracterización
del régimen burbujeante en sistema fluidizado
con partículas Geldart D de base cónica.