



Comportamiento fluidodinámico de cuatro granos en dos modelos de secadores de lecho fluidizado

Fluid dynamic behaviour of four grains in two models of fluidised bed dryers

Jorge Corea-Juárez, Leví Vílchez-Herdocia y Rodolfo Espinosa*

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)
Avenida Universitaria, Managua 11127, Nicaragua
E-mail: rodolfo.espinoza@fiq.uni.edu.ni

(recibido/received: 06-Enero-2020; aceptado/accepted: 04-Julio-2020)

RESUMEN

Se estudió el comportamiento fluidodinámico de cuatro granos (sorgo, frijol, arroz y maíz) en dos secadores de escala de laboratorio: uno de lecho fluidizado y otro de lecho de chorro. Los secadores consistían en una columna de plástico transparente a la cual se adaptaron dos bases diferentes, una para cada secador, conectado a un ventilador. Adicionalmente, se determinaron experimentalmente las propiedades físicas (diámetro, esfericidad y densidad aparente) relacionadas con la fluidización como función de la humedad del grano. Además, se calculó la porosidad del lecho para cada uno de los granos a su máxima humedad. Solo fue posible fluidizar los cuatro granos en el lecho de chorro. Este estudio fluidodinámico es el primer avance en cuanto a la determinación de las propiedades físicas y de fluidización de los granos más consumidos en Nicaragua.

Palabra claves: Propiedades físicas; Porosidad de lecho; Lecho fluidizado; Lecho de chorro

ABSTRACT

The fluid dynamic behaviour of four grains (sorghum, bean, rice, and corn) was studied in two laboratory-scale dryers: a fluidised bed and a spouted bed. The dryers consist of a transparent plastic column to which two different bases were adapted, one for each dryer, connected to a blower. Additionally, the physical properties (diameter, sphericity and bulk density) associated with fluidisation were experimentally determined as a function of grain moisture. Furthermore, the bed porosity was calculated for each of the grains at maximum moisture. It was only possible to fluidise the four grains in the spouted bed. This fluid dynamic study is the first advance in determining the physical and fluidisation properties of the most consumed grains in Nicaragua.

Keywords: Physical properties; Bed porosity; Fluidised bed; Spouted bed

* Autor para la correspondencia

1. INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país con gran potencial agrícola. Desde inicios del presente siglo, la producción agrícola ha aumentado hasta alcanzar más del 18% del PIB. Sin embargo, aunque las superficies cosechadas han aumentado notablemente, la productividad ha disminuido debido al mal uso de las tierras y la falta de infraestructuras y créditos (Gómez, 2009).

Entre los principales productos agrícolas del país se encuentran los granos básicos, los cuales en Nicaragua corresponden a sorgo, frijol, arroz y maíz (INATEC, 2017). Todos ellos constituyen una parte muy importante de la dieta del nicaragüense. Luego de su cosecha, para evitar la pudrición y germinación del grano, es necesario secarlos hasta alcanzar una humedad menor al 13%. Al disminuir el contenido de agua, se facilita su transporte y a la vez aumenta su tiempo de conservación (Valdivia, 2012).

Por sus características, los granos básicos se encuentran en el grupo D de la clasificación de partículas de Geldart (Mujumdar, 2011); grupo para el cual se sugiere utilizar secadores de lecho fluidizado o de lecho de chorro (Kunii y Levenspiel, 1991). Estos secadores poseen un bajo costo de construcción, son fáciles de operar y poseen una alta eficiencia térmica. Además, son apropiados para cualquier tipo de sólido húmedo, siempre y cuando éste pueda ser fluidizado por gas caliente (Barreira, 2007). Por tanto, un primer paso para la implementación de estos equipos es establecer en cuál de ellos se puede fluidizar adecuadamente todos los cuatro granos básicos.

Para este trabajo se utilizó la variedad de mayor producción en el país de cada grano básico; a las cuales se les determinó el comportamiento fluidodinámico, en estos dos modelos de secadores, así como sus propiedades físicas relacionadas con la fluidización. Este artículo se basa en el trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero Químico de Vílchez-Herdocia y Corea-Juárez (2020).

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Medición de propiedades físicas de los granos

La literatura sobre los granos básicos cultivados localmente no refleja datos acerca de las propiedades físicas relacionadas a la fluidización, las cuales son diámetro promedio equivalente de la partícula, esfericidad y densidad aparente. Por tanto, se estableció como parte de los objetivos de este trabajo determinarlas experimentalmente.

Para este estudio se seleccionaron las variedades más cultivadas a nivel nacional de cada uno de los cuatro granos básicos, las cuales corresponden a sorgo millón, frijol rojo, arroz de grano largo con cascarilla y maíz blanco. De las muestras totales de los cuatro granos básicos adquiridos se obtuvieron muestras representativas; siguiendo el método del cuarteo manual (Ramírez, 2003), a las cuales se le determinó la humedad. La humedad del grano fue establecida utilizando el método gravimétrico, consistente en colocar muestras dentro de un horno a 110 °C durante 24 horas.

Como es de interés conocer las propiedades físicas como función del contenido de humedad de los granos; las muestras representativas fueron sometidas a un proceso de humidificación sumergiendo los granos en agua durante tiempos predefinidos para que alcanzaran diferentes niveles de humedad.

2.1.1 Medición de las dimensiones del grano

El largo y ancho de los granos fueron determinados utilizando el programa GrainScan (Whan *et al.*, 2014). El procedimiento consistió en escanear una muestra de cien granos por medio de un scanner HP Scanjet G2710, 2400x4800 dpi y color de 48 bits. Luego, se utilizó GrainScan para obtener los valores promedio

del largo y ancho de cada grano. Por su parte, el espesor, e , de cada grano se midió con un calibrador Vernier y posteriormente se calculó su valor promedio. Con el valor promedio de cada una de las tres dimensiones, se calculó el diámetro equivalente promedio de las partículas mediante la ecuación propuesta por Rojas (2010):

$$\bar{d}_p = (l \times w \times e)^{1/3} \quad (1)$$

2.1.2 Cálculo de la esfericidad del grano

Con la información previamente determinada se calculó la esfericidad de cada grano a través de la ecuación que relaciona el diámetro equivalente con la dimensión de mayor magnitud (Rojas, 2010):

$$\Phi = \frac{\bar{d}_p}{l} \quad (2)$$

2.1.3 Medición de la densidad aparente del grano

La densidad aparente de los granos fue determinada aplicando el método de desplazamiento de líquido descrito por Zogzas *et al.* (1994). En la Fig. 1 se muestra el instrumento utilizado para esta medición; el cual es una réplica de elaboración propia, del instrumento descrito por dichos autores.

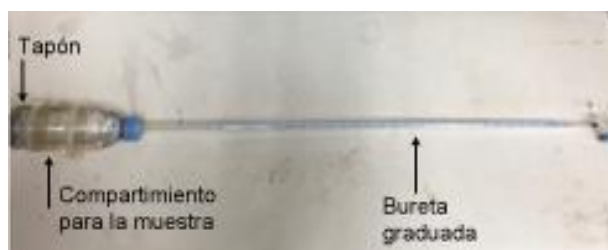


Fig. 1 Instrumento utilizado para la medición de la densidad aparente de sólidos.

El procedimiento de medición (Zogzas *et al.*, 1994) consistió en agregar un volumen previamente establecido de agua en el compartimiento para la muestra (Fig. 1). Luego se introdujo una muestra de granos previamente pesada (masa cercana a los 10 g), m_{grano} . El instrumento se tapó y se giró para leer en la bureta graduada, el volumen de agua desplazado por el sólido, V_{desp} . La densidad aparente se calculó mediante la ecuación:

$$\rho_a = \frac{m_{grano}}{V_{desp}} \quad (3)$$

2.2 Medición de propiedades de fluidización del lecho

Para estudiar la dinámica de fluidización de cada grano se construyeron dos equipos, un lecho fluidizado y un lecho de chorro; esquematizados en la Fig. 2. Para construir ambos equipos se utilizó una columna de plástico transparente de diámetro interno 0.15 m y altura 0.80 m. La base de la columna de fluidización, también utilizada en ambos equipos, se construyó utilizando un embudo plano de plástico translúcido (de ángulo 45° y vástago de diámetro interno 0.015 m). En el vástago del embudo se colocó una manguera de goma, cuyo extremo opuesto se conectó a un ventilador.

En el lecho fluidizado se utilizó como distribuidor del aire un plato de PVC de 6 mm de espesor, con 650 orificios de 2 mm de diámetro, perforados en arreglo cuadrado a 5 mm; cuyo diseño se basó en los distribuidores sugeridos en Wormsbecker *et al.* (2007). Además, debajo de este plato se colocó un lecho fijo de partículas inertes, consistente en bolas de plástico lisas de 6 mm de diámetro.

Para evitar el arrastre de las partículas, en la parte superior de la columna de fluidización se colocó un cono invertido, en cuya salida se conectó una manguera de goma. En esta manguera se colocó un medidor de velocidad del aire Testo 435 de sonda de hilo caliente de 0.75 mm, velocidad máxima de lectura 20 m/s, precisión de 0.03 m/s.

Para medir la caída de presión en el lecho se utilizó un manómetro diferencial Testo 512, con un rango de diferencial de presión desde 0 hasta 199.9 hPa. El punto de alta presión (toma 1) se encontraba ubicado en la manguera de goma de la base de la columna de fluidización. Por su parte, el punto de baja presión (toma 2) se ubicaba a 0.76 m de la parte inferior de la columna.

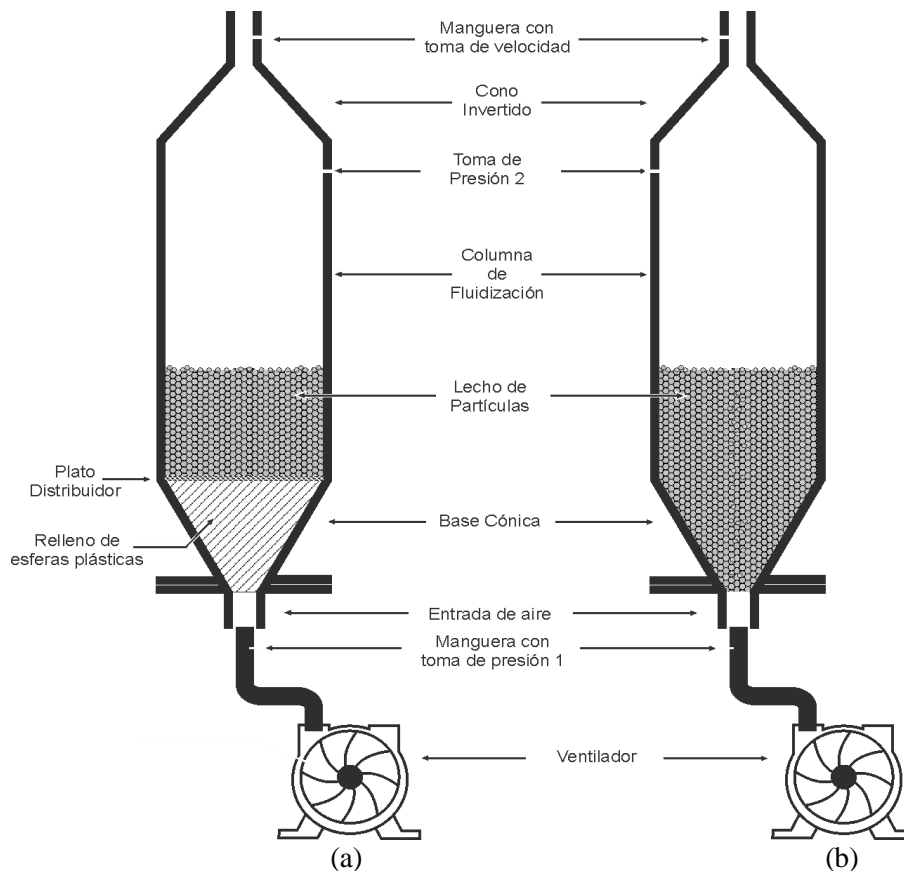


Fig. 2 Esquemas de la columna de lecho fluidizado (a) y de la columna de lecho de chorro (b).

2.2.1 Medición de la porosidad del lecho empacado

Se determinó la porosidad de lecho empacado con granos previamente humidificados. Se empleó el procedimiento descrito por Atarés (2015) para la medición de la porosidad de un lecho empacado suelto y al azar, *lecho*. Se utilizó un beaker de vidrio de 2 litros, cuyo diámetro permitía apilar sueltos y al azar los diferentes granos básicos. Primero se estableció la altura a la cual el beaker contenía un litro de agua, dicho volumen se definió como volumen de lecho, V_{lecho} . Posteriormente, se relleno el beaker con cada

grano básico, hasta la altura predefinida. Seguidamente se agregó gradualmente agua hasta rellenar todos los espacios vacíos entre los granos, V_{ev} . La porosidad del lecho se calculó mediante la ecuación:

$$\mathcal{E}_{lecho} = \frac{V_{ev}}{V_{lecho}} \quad (4)$$

2.2.2 Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización se determinó experimentalmente en el lecho fluidizado, aplicando el procedimiento indicado en McCabe *et al.* (2007). Estos autores indican que primero debe fluidizarse vigorosamente los sólidos y luego interrumpir bruscamente el flujo de aire para obtener un lecho empacado aleatoriamente. Seguidamente, el experimento se desarrolla aumentando gradualmente la velocidad del aire, considerando como límite la velocidad a la cual se observe arrastre de los sólidos.

Durante el experimento debe registrarse la altura del lecho, velocidad del aire, caída de presión, así como observaciones del comportamiento del lecho, tales como expansión, formación de burbujas o tapones, tanto esporádicos como continuos. Posteriormente, debe construirse una gráfica logarítmica de la caída de presión como función de la velocidad del aire; con la cual se determina la velocidad mínima de fluidizado.

2.2.3 Velocidad mínima de chorro

La velocidad mínima de chorro se determinó experimentalmente en el lecho de chorro, utilizando el procedimiento descrito en Mathur y Epstein (1974). El experimento se desarrolla en dos etapas: primero se debe aumentar gradualmente la velocidad del aire hasta observar el arrastre de partículas. En la siguiente etapa se realiza el procedimiento inverso, es decir, se disminuye gradualmente la velocidad del aire hasta observar el colapso de la fuente, lo cual sucede a la velocidad mínima de chorro. También en estos experimentos debe registrarse la altura del lecho, velocidad del aire, caída de presión, así como observaciones del comportamiento del lecho, entre ellos formación y colapso de la fuente; así como construir gráficas de la caída de presión como función de la velocidad del aire. Para determinar la altura máxima de lecho para la cual aún se puede fluidizar el sólido, se repite los experimentos incrementando en cada uno la altura del lecho.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de la humedad inicial de los granos básicos

Los granos básicos adquiridos presentaron humedades menores a las humedades máximas sugeridas para almacenamiento en silos (Tabla 1). Por lo tanto, los cuatro granos básicos debieron ser sometidos a un proceso de humidificación.

Tabla 1 Humedad promedio del grano adquirido (porcentaje en base húmeda).

Grano	X (kg/kg)	Humedad Máxima para Almacenamiento en Silo
Sorgo	9.98	13
Frijol	11.53	13
Arroz	8.85	13
Maíz	11.81	12

La humidificación se realizó sumergiendo en agua entre uno y dos kilogramos de cada grano. A intervalos definidos de 30 minutos se retiró del agua muestras de aproximadamente 200 gramos de cada grano. Los tiempos máximos de inmersión fueron 120 minutos para el frijol y el sorgo; 150 minutos para el maíz; y 210 minutos para el arroz; tiempos a los cuales no se observó variación apreciable del tamaño del grano. En el caso del sorgo se observó una rápida humidificación, por lo cual fue necesario repetir la humidificación, pero esta vez retirando las muestras del agua cada 7 minutos durante los primeros 30 minutos. Los resultados se muestran en la Fig. 3.

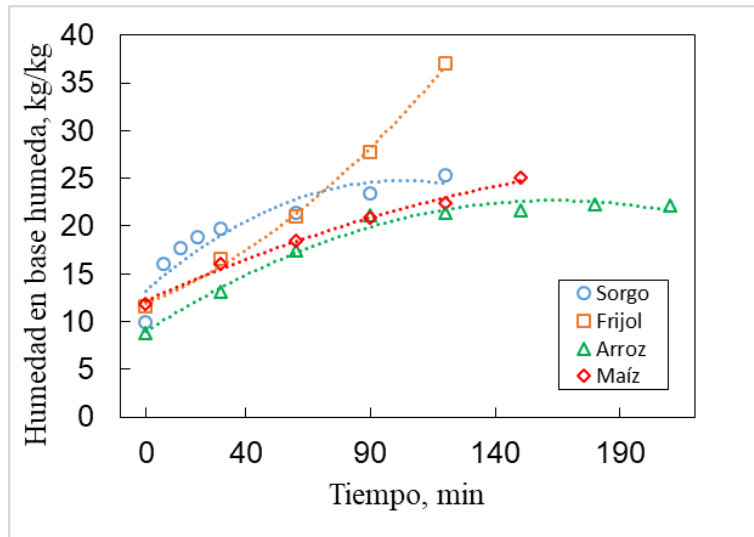


Fig. 3 Variación del porcentaje de humedad de los granos con respecto al tiempo de humidificación.

3.2 Diámetro equivalente promedio de los granos

Los resultados de diámetro equivalente promedio con respecto al porcentaje de humedad para cada grano se muestran en la Fig. 4. Para el sorgo y el arroz no hay variación apreciable del diámetro promedio para el rango de humedad a la cual se trabajó con ambos granos. En cambio, para el frijol y el maíz se observa un aumento del diámetro promedio al aumentar su humedad.

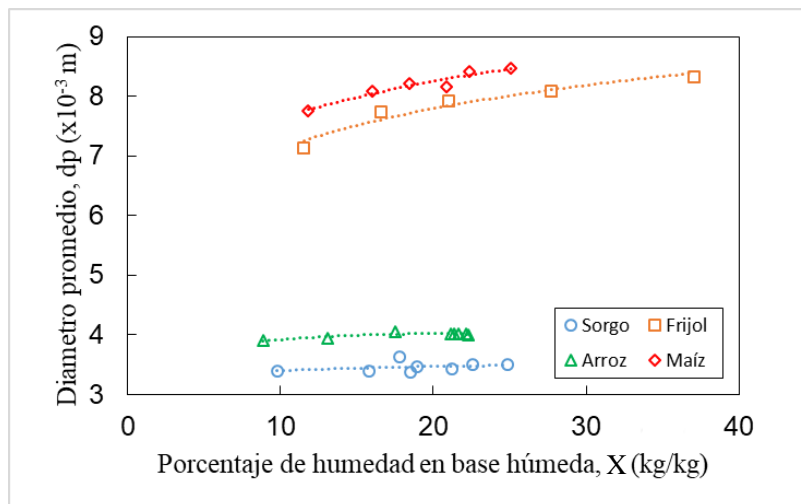


Fig. 4 Variación del diámetro promedio de los granos con respecto a su porcentaje de humedad.

3.3 Esfericidad de los granos

La esfericidad de los cuatro granos básicos no varía apreciablemente con la humedad del grano, tal como se observa en la Fig. 5.

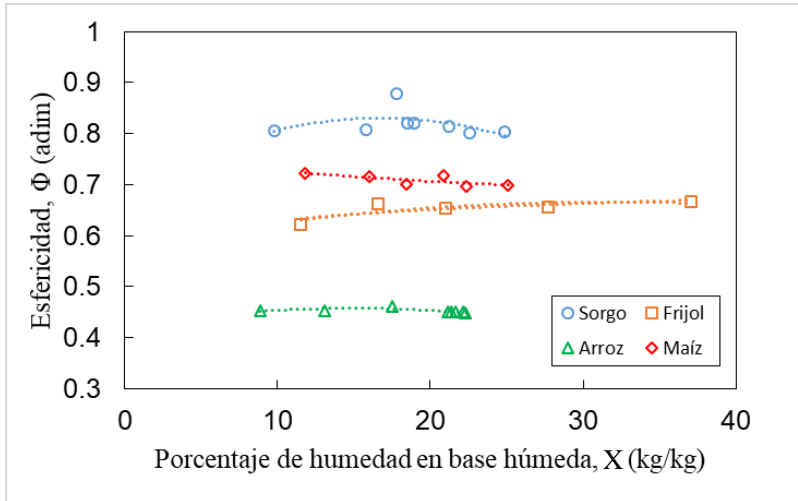


Fig. 5 Variación de la esfericidad de los granos con respecto a su porcentaje de humedad.

3.4 Densidad aparente de los granos

La densidad aparente presentó comportamientos diferentes para cada grano. Tal como se observa en la Fig. 6, en los casos del arroz, frijol y maíz esta disminuye al aumentar su humedad; en cambio, para el sorgo se observa un aumento de la densidad aparente al aumentar su humedad.

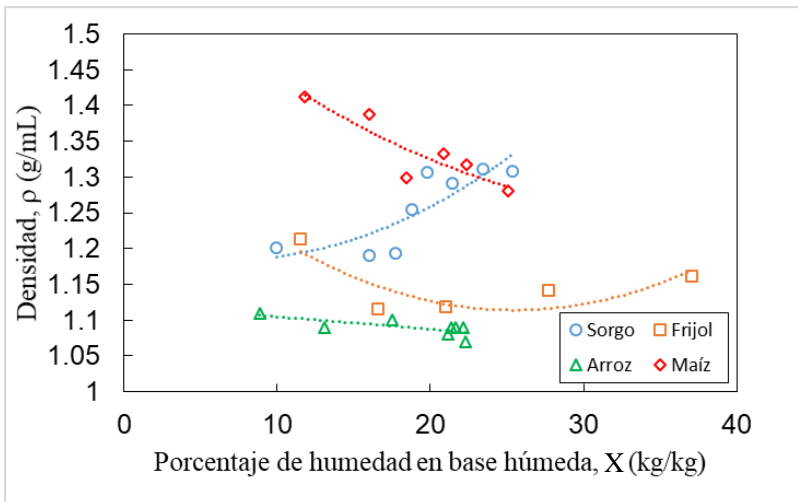


Fig. 6 Variación de la densidad de los granos con respecto al porcentaje de humedad.

3.5 Porosidad del lecho

En la Tabla 2 se muestra los resultados de porosidad promedio del lecho, así como la humedad promedio de los granos básicos empleados para determinar dicha porosidad.

El lecho de arroz presentó la mayor porosidad. Por su parte, los lechos de sorgo, frijol y maíz presentaron porosidades similares.

Tabla 2 Valores promedios de porosidad de lecho empacado, suelto y al azar, y humedad de los granos básicos.

Grano	ε_{lecho} (adim)	X (kg/kg)
Sorgo	0.43	24.9
Frijol	0.40	25.2
Arroz	0.55	20.0
Maíz	0.44	22.7

3.6 Velocidad mínima de fluidización para el lecho fluidizado

Para todos los experimentos de fluidización realizados en el lecho fluidizado, se utilizó granos básicos previamente humidificados (humedad indicada en Tabla 3) y se trabajó con lechos de 3 cm de altura.

Tabla 3 Humedad de los granos básicos utilizados en los experimentos de fluidización.

Grano	X (kg/kg)
Sorgo	23.3
Frijol	27.7
Arroz	22.2
Maíz	25.1

En general, para las condiciones de trabajo no se logró fluidizar los granos. En la Fig. 7 se muestra los resultados de caída de presión en el lecho contra velocidad superficial del aire. Para el frijol y maíz, la distribución lineal de los datos indica comportamiento de lecho fijo. Solamente con el sorgo y el arroz se observó los primeros indicios de transición de comportamiento de lecho fijo a lecho fluidizado.

Por ejemplo, en el experimento realizado con sorgo, a la velocidad del aire correspondiente a la capacidad máxima del ventilador, se presentó un burbujeo constante en la zona central y alrededores de la superficie del lecho.

En el caso del arroz, al alcanzar el 80% de capacidad del ventilador se observó canalizaciones cerca de la pared de la columna. Al aumentar la velocidad del aire hasta la máxima posible se apreció una expansión del lecho de aproximadamente 0.5 cm; y las canalizaciones cercanas a la pared continuaron. Este fue el grano que presentó la caída de presión más alta. Además, en la gráfica correspondiente se observa una tendencia de los datos de las más altas velocidades del aire a distribuirse sobre una curva, lo cual indica el inicio de la transición hacia lecho fluidizado.

3.7 Velocidad mínima de chorro para el lecho de chorro

La humedad de cada grano básico utilizado en los experimentos corresponde con las indicadas en la Tabla 3. Como resultado general, en el lecho de chorro se logró la fluidización de los cuatro granos básicos. Para todos los granos se realizaron experimentos con tres alturas de grano, y cada experimento se realizó por

triplicado. En las Tablas 4 a 7 se presentan los resultados del promedio de la velocidad mínima de chorro para cada altura de lecho utilizada.

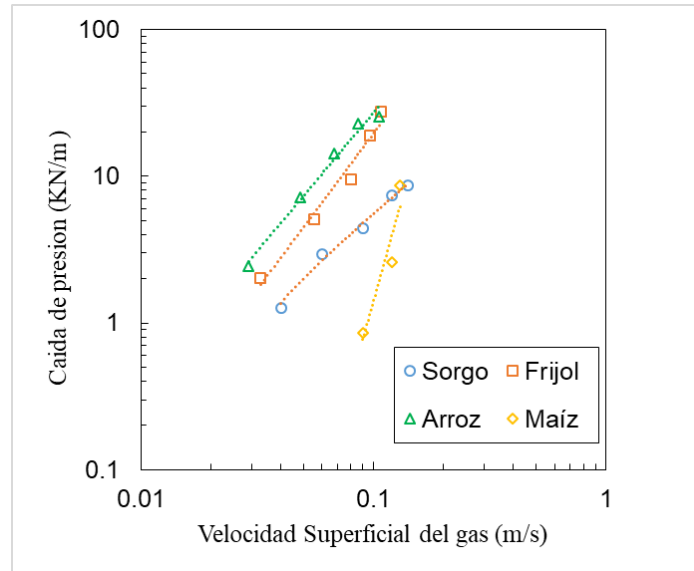


Fig. 7 Curva de caída de presión de los granos en el lecho fluidizado.

Tabla 4 Velocidad mínima de chorro para lechos de sorgo.

Altura de lecho (m)	Velocidad mínima de chorro (U_{ms} , m/s)	Caída de presión en el lecho (ΔP , kN/m)
0.35	2.22	21.8
0.25	1.87	14.6
0.15	1.44	9.4

Tabla 5 Velocidad mínima de chorro para lechos de frijol.

Altura de lecho (m)	Velocidad mínima de chorro (U_{ms} , m/s)	Caída de presión en el lecho (ΔP , kN/m)
0.15	1.29	13.1
0.12	1.26	11.3
0.06	0.87	6.5

Tabla 6 Velocidad mínima de chorro para lechos de arroz.

Altura de lecho (m)	Velocidad mínima de chorro (U_{ms} , m/s)	Caída de presión en el lecho (ΔP , kN/m)
0.25	1.47	63
0.18	1.27	21
0.11	0.95	7.1

Tabla 7 Velocidad mínima de chorro para lechos de maíz.

Altura de lecho (m)	Velocidad mínima de chorro (U_{ms} , m/s)	Caída de presión en el lecho (ΔP , kN/m)
0.14	1.13	10.1
0.10	0.98	6.9
0.06	0.83	3.8

A modo de ejemplo en la Fig. 8 se muestra los resultados de caída de presión como función de la velocidad del gas, para un lecho de sorgo de 0.25 m de altura. En todos los experimentos se observó este mismo comportamiento para los cuatro granos básicos.

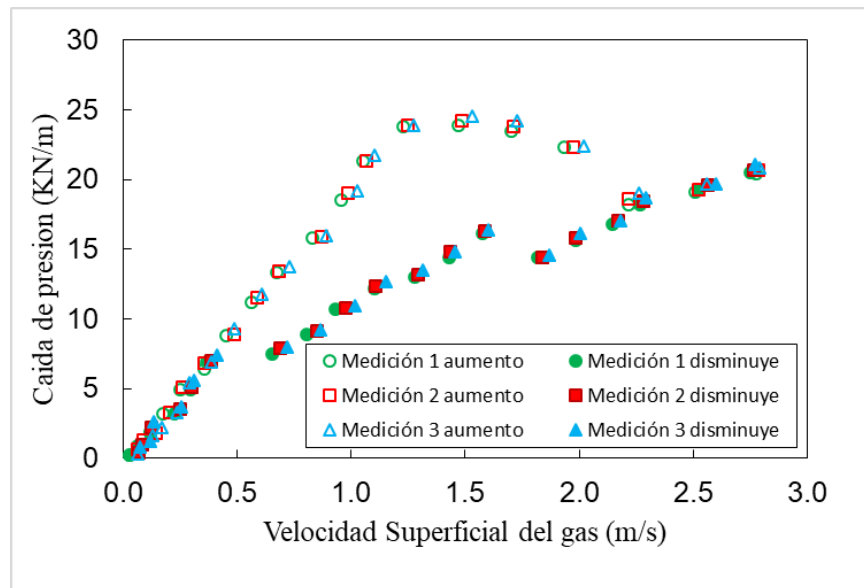


Fig. 8 Velocidad de chorro para un lecho de sorgo de 0.25 m de altura.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas diámetro equivalente, esfericidad y densidad de la partícula no presentaron una dependencia fuerte de la humedad del grano, en el rango en que se espera trabajar en un proceso de secado; en el cual se tendría entre 25 a 10 por ciento de humedad del sólido.

En el lecho de chorro fue posible fluidizar las variedades más producidas en el país de los cuatro granos básicos, los cuales entre sí tienen morfologías muy diferentes. Mientras el sorgo es casi esférico; el frijol parece un elipsoide; y el arroz tiende a ser cilíndrico. Por su parte, el maíz presenta una geometría intermedia entre el sorgo y el arroz; y se asemeja más a una placa.

Por tanto, un secador de lecho de chorro puede ser la opción más conveniente para situaciones en las cuales un mismo equipo es requerido para el secado de granos con características tan diversas. Además, la flexibilidad de este modelo de secador puede ser más conveniente, al tomar en consideración que los granos básicos se cultivan en casi todo el país y sus períodos de cosecha abarcan casi todo el año; por lo cual el secado debe realizarse a diferentes condiciones climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Investigación en Ingeniería de Procesos y Ambiental (PIIPA), de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), por las facilidades prestadas para la realización del presente trabajo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses con respecto a la publicación de este artículo.

NOTACIÓN

\bar{d}_p	Diámetro equivalente promedio de la partícula	(m)
e	Espesor de la partícula	(m)
l	Longitud de la partícula	(m)
m	Masa	(g)
t	Tiempo	(min)
U_{ms}	Velocidad mínima de chorro	(m/s)
V	Volumen	(mL)
w	Ancho de la partícula	(m)
X	Humedad del grano, porcentaje en base húmeda	(kg/kg)

Letras Griegas

ϵ_{lecho}	Porosidad del lecho	(adim)
Φ	Esfericidad de la partícula	(adim)
ρ_a	Densidad aparente del sólido	(g/mL)

Subíndices

$desp$	Desplazado	$grano$	Grano básico
ev	Espacios vacíos	$lecho$	Lecho

REFERENCIAS

Atarés, L. (2015). *Determinación de la Porosidad*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. Valencia, España. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/52102>

Barreira, V. (2007). *Estudio Hidrodinámico de un Lecho Fluidizado*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid, España. Recuperado de: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/1161>

Gómez, O. (2009). *Producción Agrícola en Nicaragua es 18% de PIB*. El Nuevo Diario. Recuperado de: www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/60456/

INATEC (2017). *Manual del Protagonista. Granos Básicos*. Instituto Nacional Tecnológico. Dirección General de Formación Profesional. Managua, Nicaragua. Recuperado de: https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spz-att/Granos_Basicos.pdf

Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*, 2nd Ed. Butterworth-Heinemann. Boston, USA.

Mathur, K.B. & Epstein, N. (1974). *Spouted Beds*. Academic Press. Vancouver, Canadá.

McCabe, W., Smith, J. & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, 7^{ma} Ed. McGraw Hill. México D.F., México.

Mujumdar, A.S. (2011). *ME5202 Industrial Transfer Processes*. Recuperado de: http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/ME5202_2011_Mujumdar.pdf

Rojas, A.F. (2010). *Caracterización Físico-Mecánica de la Semilla de Vitabosa (Mucuna deeringiana)*. Tesis de Magíster en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Medellín, Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1855/1/87571797.2010.pdf>

Valdivia, R. (2012). *Manual Postcosecha para Granos Básicos*. Catholic Relief Services (CRS Nicaragua).

Vílchez-Herdocia, L.A. & Corea-Juárez, J.I. (2020). *Estudio del Comportamiento Fluidodinámico de Cuatro Granos Básicos en Dos Modelos de Secadores de Lecho Fluidizado*. Tesis de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua.

Wormsbecker, M., Pugsley, T.S., & Tanfara, H. (2007). The Influence of Distributor Design on Fluidized Bed Dryer Hydrodynamics. In *Proceedings of the 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering*. Recuperado de: https://dc.engconfintl.org/fluidization_xii/100

Whan, A.P., Smith, A.B., Cavanagh, C.R., Ral, J.P.F., Shaw, L.M., Howitt, C.A. & Bischof, L. (2014). GrainScan: a low cost, fast method for grain size and colour measurements. *Plant Methods*, 10, 23. doi: [10.1186/1746-4811-10-23](https://doi.org/10.1186/1746-4811-10-23)

Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., & Marinos-Kouris, D. (1994). Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12 (7), 1653-1666. doi: [10.1080/07373939408962191](https://doi.org/10.1080/07373939408962191)