

Estudio de fluidización en un equipo de lecho de chorro bidimensional

Lescano Farias, Lara V.¹; Coronel, Eve L.¹; Tarifa, Enrique² y Salcedo, Gustavo A.¹

(1) *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*
lescanolaravaleria@gmail.com; ev coronel@gmail.com

(2) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
etarifa@gmail.com

RESUMEN

La tecnología de fluidización se aplica en muchos procesos de la industria alimentaria, para el caso de secado, resulta muy competitiva por las ventajas sobre el secado spray, ameritando la apropiación de su conocimiento. El estudio de la fluidodinámica del lecho de chorro fluidizado bidimensional se realizó en un equipo diseñado y construido al efecto. El estudio de fluidodinámica del lecho consistió en evaluar el comportamiento del lecho con un caudal de aire alimentación creciente y luego decreciente. Se determinaron los parámetros globales predominantes en la fluidización: pérdida de carga máxima del lecho de chorro ΔP_x , velocidad de mínima fluidización V_{mf} y caudal mínimo de fluidización Q_{mn} , los ensayos se realizaron para lechos de inertes conformados con esferas de vidrio de diámetros $D_p=3\text{mm}$, 4mm , 6mm , 7mm y alturas de lecho estático $H_0=6\text{cm}$, 11cm , 15cm . Para el estudio del caudal de alimentación óptimo para el lecho construido, se utilizó agua destilada a una temperatura de 100°C , como solución patrón y los caudales probados fueron $W_{\text{agua}}=3\text{ml/min}$ y 9ml/min . Los resultados revelaron que las mejores condiciones operacionales para el lecho de chorro bidimensional fueron un W_{agua} de 9ml/min , con un caudal $Q_{\text{aire}}=0,006\text{m}^3/\text{s}$ para un lecho de inerte conformado por un $D_p=4\text{mm}$ y una altura estática de lecho inicial $H_0=11\text{cm}$.

Palabras Claves: Lecho fluidizado-Lecho de chorro bidimensional -secado.

ABSTRACT

Fluidization technology is applied in many processes in the food industry, in the case of drying, it is very competitive due to the advantages over spray drying, meriting the appropriation of its knowledge. The study of the fluid dynamics of the two-dimensional fluidized jet bed consisted of evaluating the behavior of the bed with increasing and then decreasing feed air flow. The predominant global parameters in fluidization were determined: maximum head loss of the jet bed ΔP_x , minimum fluidization speed V_{mf} and minimum fluidization flow Q_{mn} , the tests were carried out for inert beds formed with glass spheres of diameter $D_p = 3\text{mm}$, 4mm , 6mm , 7mm and static bed heights $H_0 = 6\text{cm}$, 11cm , 15cm . For the study of the optimal feed flow rate for the constructed bed, distilled water at a temperature of 100°C was used as a standard solution and the flow rates tested were $W_{\text{agua}} = 3\text{ml/min}$ and 9ml/min . The results revealed that the best operational conditions for the two-dimensional jet bed were a W_{agua} of 9ml/min , with a flow rate $Q_{\text{aire}} = 0.006\text{m}^3/\text{s}$ for an inert bed made up of a $D_p = 4\text{mm}$ and an initial static bed height $H_0 = 11\text{cm}$.

Keywords: fluidized bed-two-dimensional jet bed –drying.

1. INTRODUCCIÓN

La fluidización es una tecnología con excelente capacidad para llevar adelante tratamientos térmicos uniformes en alimentos particulados. Este tipo de flujo permite además un contacto eficiente gas-sólido, por lo que es ampliamente

utilizado en procesos de recubrimiento de partículas, secado, granulación, mezcla, combustión, gasificación, entre otros procesos.

1.1 Fluidización y lechos

McCabe (1991) especifica que las expresiones fluidización y lecho fluidizado se utilizan para describir la condición de las partículas completamente suspendidas, toda vez que la suspensión se comporta como un fluido denso.

La fluidización permite el movimiento ascendente y descendente de las partículas sólidas debido al pasaje de fluido a través de dichas partículas. Estas partículas sólidas forman el lecho de inertes y el fluido en movimiento puede ser gas o líquido.

En los casos en que la base de la columna de fluidización tenga una forma cónica, el sistema se denomina lecho de chorro fluidizado. Este es un lecho único de agitación-partículas-fluido en el que se produce un chorro y fluidificación simultáneamente. La técnica de lecho de chorro fluido proporciona una tasa de circulación y mezcla de sólidos y fluidos mucho más alta que cualquier otra técnica para el contacto partícula-fluido. Permite un rango más amplio de caudal de fluido y un buen control del sistema.

El lecho de chorro bidimensional o de dos dimensiones es una modificación del lecho de chorro convencional y fue propuesto para reducir al mínimo los problemas de ampliación de escala del lecho de base cónica.

1.1. Parámetros globales de la fluidodinámica

1.2.1 Caída de presión máxima.

La operación de fluidización recorre dos etapas, una de lecho fijo y otro de lecho fluidizado. Cuando el lecho conformado por partículas inertes confronta una gran resistencia al paso del aire en caudal ascendente, se está en presencia de lecho fijo y la caída de presión ΔP aumenta hasta convertirse en la caída de presión máxima, ΔP_x . Cuando se vence esta resistencia al flujo del aire, inicia la fluidización, en ese punto la caída de presión disminuye para luego recuperarse un poco y mantenerse. Estos cambios bruscos de ΔP hacen que se considere su análisis en el estudio del procesamiento en lechos de chorro fluidizados.

1.2.2. Velocidad mínima de fluidización.

Al ir incrementando el caudal de aire de entrada al lecho, es posible observar la velocidad

mínima de fluidización en el momento en que se inicia el movimiento de las partículas, sin embargo, resulta de mayor practicidad obtenerla a partir de la curva característica de descenso de caudal de aire hasta un punto en que esta disminución hace que el chorro colapse. Se logran valores más reproducibles de V_{mf} , interceptando en un gráfico las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado como lo describe Rodríguez (2000) y McCabe y col. (1991).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Reactor de lecho de chorro bidimensional y dispositivos de medición.

La línea proceso cuenta con un soplante centrifugo conectado a un variador de frecuencia que provee el aire a distintas velocidades, un sistema calefactor con control de temperatura, el reactor bidimensional de lecho de chorro cuya cámara rectangular de acero inoxidable contiene al lecho de inertes, y sus dimensiones son: ancho $\alpha=20\text{cm}$, una longitud $\gamma=70\text{cm}$ y un espesor $\beta=3,2\text{cm}$. Esta cámara está conectada con la tubería de entrada del aire con un rectificador de flujo y con la tubería de salida de aire ambas de 5cm de diámetro interno en acero inoxidable. La salida del lecho se conecta a un ciclón tipo lapple que colecta las partículas de polvo que arrastra la corriente de aire de salida. Toda la línea se opera desde un tablero de control, tal como lo muestra la figura 1.

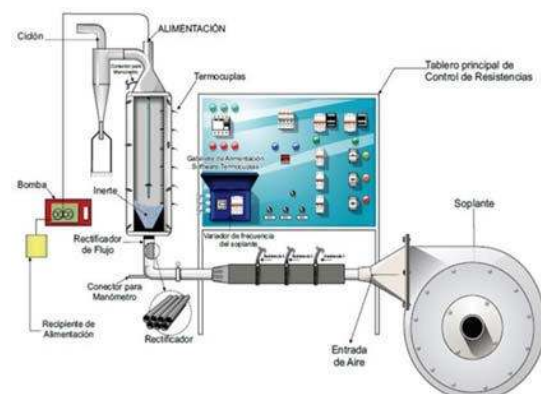


Figura 1: Equipo del lecho de chorro bidimensional con sus sistemas complementarios.

El fluido a secar ingresa de forma descendente a través de una manguera de silicona conectada a un tubo de vidrio con boquilla de goteo.

Para conocer las curvas características de la fluidodinámica se realizaron mediciones de los diferentes puntos de presión y velocidad de aire. Para la medición de la presión diferencial se utilizó un manómetro diferencial digital marca EXTECH modelo 407910, con lectura de la presión diferencial en Kg/m^2 . Y para la medición de la velocidad de aire se utilizó un anemómetro analógico marca Wilh Lambrecht N°1405 a/461347, con paletas de aluminio, con lectura de la velocidad del aire de salida en m/s.

2.2 Estudio de la fluidodinámica

2.2.1 Estudio de los parámetros globales ΔP_x y Q_{mn} .

En el estudio de la fluidodinámica del lecho de chorro bidimensional se determinaron la caída de presión máxima DP_x y el caudal de mínima fluidización Q_{mn} que fueron definidos a través de las curvas experimentales de caída de presión en función del caudal de aire ingresante.

En el equipo de lecho de chorro bidimensional construido se probaron 12 sistemas de lechos conformados por esferas de vidrio de diferentes diámetros, $D_p=3\text{mm}$; 4mm ; 6mm y 7mm con esfericidad $\phi=1$ y alturas estáticas de lecho $H_0=6\text{cm}$, 11cm y 15cm .

En condiciones de lecho seco se fluidizó aire a temperatura ambiente.

Para cada sistema de lecho se incrementó gradualmente el caudal de aire, y se registraron los valores obtenidos de velocidad de aire, caída de presión y altura de lecho.

Estos ensayos consistieron en aumentar el caudal de aire superando el lecho fijo hasta llegar a la fluidización plena, para luego disminuir paulatinamente el caudal de aire hasta que este fuera nulo. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

2.1.1. Pérdidas de carga originadas solo por el lecho de inertes.

A los efectos de mostrar la resistencia al pasaje del aire ejercida por el lecho de material inerte, sin interferencia de la parte estructural del equipo, se descontó la pérdida de carga registrada en el lecho vacío. Para ello, se tomaron los datos experimentales de caída de presión (ΔP) en función del caudal de aire (Q)

en el lecho vacío. Este ensayo se realizó por triplicado. Los datos de ΔP en lecho vacío obtenidos se descontaron de los datos de ΔP registrados durante el ascenso y descenso del caudal de aire Q en los 12 sistemas de lechos conformados. Luego se trabajó en el modelo ajustado de las ecuaciones por regresión no lineal del caudal de aire con la pérdida de presión en lecho vacío cuando aumenta y disminuye el caudal de aire.

2.2.4. Estudio del caudal de alimentación apropiado para el lecho de chorro bidimensional.

En este estudio se buscó encontrar el caudal de solución patrón apropiado para la alimentación en el equipo de lecho de chorro bidimensional.

En condiciones de lecho húmedo, se utilizó agua destilada como solución patrón y las determinaciones se realizaron sobre cuatro lechos seleccionados de los resultados volcados del estudio de la fluidodinámica. Los lechos conformados por partículas de diámetro fueron, E2 ($D_p=3\text{mm}$, $H_0=11\text{cm}$), E3 ($D_p=3\text{mm}$, $H_0=15\text{cm}$), E5 ($D_p=4\text{mm}$, 11cm) y E6 ($D_p=4\text{mm}$, $H_0=15\text{cm}$)

Una probeta calibrada de 100ml, permitió el control del consumo de la solución patrón en cada experiencia.

Los caudales de agua se controlaron con la bomba peristáltica, que permitió la variación progresiva de los caudales ensayados. Estos caudales fueron $W_{\text{agua1}}=3\text{ml/min}$ y $W_{\text{agua2}}=9\text{ml/min}$.

Los ensayos consistieron en repetir el mecanismo de acción realizado para el estudio de fluidodinámica. El caudal de aire Q , se incrementó hasta lograr un chorro estable en el interior de la cámara. La temperatura se estableció en $100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ para calefaccionar el aire de entrada al lecho, seguidamente se inició la alimentación con la solución patrón, con el caudal $W_{\text{agua1}}=3\text{ ml/min}$, y se realizaron los registros de DP , Q , y el registro de las temperaturas como de la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco. Posteriormente se realizó el mismo ensayo, pero esta vez para el caudal de agua $W_{\text{agua2}}=9\text{ml/min}$.

Todos los registros fueron tomados en periodos de 1 (un) minuto de tiempo para el ascenso y descenso del caudal Q .

Concluidos el ensayo, se cambió la composición del lecho para continuar con las determinaciones.

De la misma manera que se realizó la corrección del lecho vacío para el estudio de la fluidodinámica, se realizó también, para el estudio del caudal de solución patrón.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros globales: ΔP_x , Q_{mn} y corrección de lecho vacío.

La determinación de los parámetros globales del lecho de chorro bidimensional, caída de presión máxima ΔP_x , y el caudal de mínima fluidización Q_{mn} fueron determinados a través de las curvas de presión en función del caudal de aire. Se obtuvieron 12 curvas de caudal de aire creciente y otras 12 curvas caudal de aire decreciente. Una de ellas se muestra como ejemplo en la figura 2, correspondiente al lecho E12.

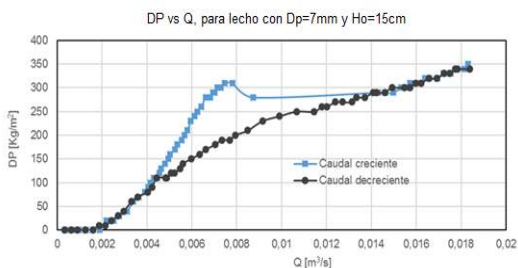


Figura 2: Caída de presión ΔP en el lecho versus caudal de aire creciente y decreciente Q , para lecho E12 (D_p :7mm; H_0 :15cm).

Las curvas permiten visualizar el comportamiento del proceso fluidodinámico y las variables críticas de los diferentes lechos probados en el equipo del lecho de chorro bidimensional.

La corrección del tratamiento de los datos experimentales de caída de presión (DP) en función del caudal de aire (Q) (figura 3) arrojó la ecuación siguiente y representa el modelo ajustado de regresión no lineal, que describe la relación entre el caudal de aire (variable independiente) y la diferencia de presión en el lecho vacío (variable dependiente).



Figura 3: Caída de presión ΔP en el lecho de chorro vacío vs. Caudal de aire de entrada Q .

La ecuación (1) permite calcular la pérdida de carga que produce el lecho vacío para diferentes caudales de aire, con un intervalo de confianza del 99%.

$$\Delta P = 530520Q^2 + 2231,2Q + 9,4662 \quad (1)$$

De las curvas obtenidas experimentalmente y por triplicado se calcularon los promedios, y se descartaron los datos de lecho vacío arrojando valores mostrados en tabla 1.

Tabla 1. Parámetros globales promedios corregidos con lecho vacío.

Lecho	DP_{prom} [Kgm ²]	Q_{prom} [m ³ /s]	$V_{mf,prom}$ [m/s]	HDP_x [m]	$Hv_{mf,prom}$ [m]	$Sleprom$ [m ³]
E1	94,98	0,01	3,04	0,06	0,070	20872,00
E2	230,89	0,02	4,84	0,11	0,116	38264,00
E3	317,80	0,02	6,61	0,15	0,162	52178,00
E4	94,65	0,01	4,09	0,06	0,073	16401,00
E5	237,71	0,02	6,66	0,11	0,122	12027,00
E6	326,48	0,02	7,92	0,15	0,158	6561,00
E7	94,05	0,01	5,13	0,06	0,069	1268,00
E8	222,39	0,02	7,76	0,11	0,117	2325,00
E9	274,25	0,02	8,57	0,15	0,158	3171,00
E10	88,37	0,01	5,82	0,06	0,065	675,00
E11	214,86	0,02	8,12	0,11	0,117	1235,70
E12	273,03	0,02	10,06	0,15	0,157	1685,70

3.2 Caudal apropiado para el lecho de chorro bidimensional.

Los resultados arrojados del estudio del caudal apropiado fueron observados a través de las curvas de variación de las pérdidas de carga DP del lecho de chorro bidimensional corregidas con lecho vacío vs. el caudal de aire Q para los diferentes lechos con la alimentación simultánea de los caudales Wagua1=3ml/min y Wagua2=9 ml/min. Como se muestra en la figura 4 para el lecho E3 a modo de ejemplo. Los valores arrojados de DP_x y Q_{mn} con adición de solución patrón en los lechos E2, E3, E5 y E6 estudiados, se muestran en tabla 2.

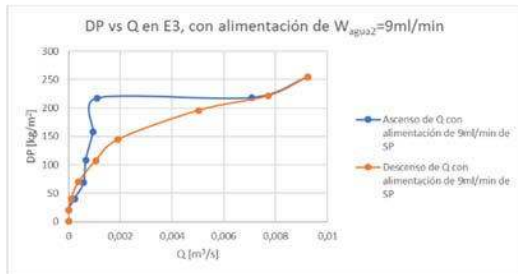


Figura 4: ΔP vs Q en lecho E3, con alimentación de $W_{\text{agua}2}$.

Tabla 2: Datos de ΔP_x y Q_{mn} de los lechos estudiados con $W_{\text{agua}1}$ y $W_{\text{agua}2}$.

Lechos	$W_{\text{agua}1}=3\text{ml/min}$		$W_{\text{agua}2}=9\text{ml/min}$	
	ΔP_x	Q_{mn}	ΔP_x	Q_{mn}
E2	238,95	0,0062	260	0,0095
E3	248,63	0,0097	217	0,005
E5	203,58	0,0011	190,95	0,0124
E6	236,47	0,0107	214,22	0,0083

El incremento del caudal de agua de alimentación afecta progresivamente la estabilidad del chorro. Este efecto se verificó mediante movimientos desalineados del chorro con pérdida de simetría y fluctuación de intensidad del chorro. En los lechos E3 y E5 con alimentación de ambos caudales $W_{\text{agua}1}$ y $W_{\text{agua}2}$, pudo observarse que la cantidad de partículas de vidrio transportadas por el chorro disminuyó progresivamente, asimismo, se observó la formación de canales preferenciales para el pasaje del aire en la región del chorro, este fenómeno también lo reportó la autora Coronel (2007) aduciendo este comportamiento del lecho al incremento de las fuerzas de adhesión partícula-partícula, causada por puentes líquidos y fuerzas de tensión originadas en la viscosidad de la suspensión, que genera la aglomeración de partículas perjudicando la circulación de las mismas y promoviendo la inestabilidad del lecho. Los lechos E3 y E5, presentan una disminución en la caída de presión ΔP cuando se alimenta el lecho con $W_{\text{agua}1}$ y $W_{\text{agua}2}$ y en el lecho E6 con $W_{\text{agua}2}$, como lo reportaron los autores Freire y col., (2012) y Spitzner Neto y col., (2002), alegando que este comportamiento se visualiza en la mayoría de los estudios que investigaron los lechos húmedos con agua, en estos estudios se muestra la fluidización del aire preferentemente a través de un canal central, reduciendo así la caída de presión. Estos ΔP son menores en comparación con los ΔP en lechos

secos. Idéntico comportamiento fue observado en este trabajo. Los datos de ΔP y Q_{mn} en el lecho E2 son del mismo rango del estudio de la fluidodinámica, esto podría deberse a que los canales generados por las pequeñas partículas de inerte permiten un pasaje menor de agua destilada y con ello menor cantidad de uniones de puente líquido como también menor fuerzas de tensión, por lo que imitaría un comportamiento similar al del aire a través del lecho. El lecho E5 presentó el ΔP_x menor para los dos caudales de alimentación $W_{\text{agua}1}=3\text{ml/min}$ y $W_{\text{agua}2}=9\text{ml/min}$. Todos los lechos ensayados mostraron disminución de V_{mf} y Q_{mn} para la alimentación con $W_{\text{agua}1}$ y $W_{\text{agua}2}$. Esto coincide con lo reportado por Spitzner Neto y col., (2002). Además, pudo observarse que elevar la frecuencia del motor del soplante a 50Hz o más, afecta negativamente la hermeticidad del equipo.

4. CONCLUSIÓN

4.1 Resultados del estudio de la fluidodinámica.

En la experimentación se comprobó que el comportamiento general del lecho de chorro bidimensional responde a lo descrito por bibliografía con las curvas características de este proceso operativo. Al incrementar el caudal de aire de entrada, las variaciones de las pérdidas de presión en el lecho presentaron la caída de presión máxima ΔP_x , dividiendo claramente el estado de lecho fijo con el de lecho fluidizado, verificándose luego un incremento gradual de la presión en que surge el chorro estable. Respecto a la velocidad mínima de fluidización V_{mf} y el Q_{mn} se manifiesta de manera característica justo después del ΔP_x , para luego aumentar con el incremento del caudal de aire de entrada en el lecho. Al experimentar el decrecimiento del caudal de aire de entrada en el lecho bidimensional, la curva presenta una histéresis característica del proceso ya que no se verifica nuevamente el aumento de la ΔP_x . Evidenciando el acomodamiento diferente al original de las partículas del inerte que conforman el lecho.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de fluidodinámica, se avanzó en la selección de los lechos para el estudio del caudal apropiado para el equipo de lecho de chorro bidimensional y que permitieran una

mejor operación del proceso con la solución patrón.

Los criterios aplicados para seleccionar las cuatro composiciones de lechos se basaron en los ensayos de fluidodinámica realizados como también en las condiciones físicas del equipo de secado y sus sistemas complementarios de funcionamiento, que para algunos de los ensayos resultaron ser condiciones limitantes.

Criterio 1: se evaluaron como positivas, las condiciones de trabajo que permitieran el desarrollo completo del lecho al ser alimentado con solución patrón de agua destilada. El incremento de flujo de aire fue logrado con la regulación del variador de frecuencia del motor del soplante desde 5Hz hasta el máximo de 50Hz. Las partículas inertes de menores diámetros, (esferas de vidrio con $D_p=3\text{mm}$ y $D_p=4\text{mm}$) respondieron mejor a la generación de un lecho plenamente desarrollado, mientras que los $D_p=6\text{mm}$ y 7mm al tener mayor peso, demandaron mayor flujo de aire del soplante por lo que fue necesario llevar a valor máximo de 60Hz el variador de frecuencia, lo que generó una sobre exigencia al motor del soplante con recalentamiento del mismo bajo tales condiciones. Criterio 2: el sistema calefactor de aire con resistencias eléctricas, permitió calentar el aire de entrada a 100°C . La inercia térmica del sistema fue de 10°C , por su parte, la pérdida de carga más elevada en las partículas inertes de mayor diámetro ofreció una resistencia mayor al paso del flujo de aire caliente verificándose daño a la junta de caucho de alta temperatura, mientras que en los ensayos con los inertes de menores diámetros no se verificó tal situación. Por lo que también por ello el sistema resultó inadecuado para los diámetros de inerte mayores $D_p=6$ y 7mm . Criterio 3: con respecto a la altura de lecho, se escogieron las alturas H_0 de 11cm y 15cm , por tener una masa de inerte mayor, permitiendo así contar con mayor superficie de transferencia térmica en el interior del lecho. Además, la superficie específica del lecho aumenta cuando disminuye D_p hasta un valor mayor de 52000m^{-1} y aumenta cuando mayor es la H_0 . La caída de presión máxima para $H_0=11\text{cm}$ es un valor intermedio respecto a las otras alturas estáticas y podría considerarse como una alternativa para el estudio de la hidrodinámica.

4.1. Resultados del estudio del caudal apropiado.

En base a los datos obtenidos en este estudio se puede concluir que el lecho que mejor responde a las condiciones operacionales con el incremento de caudales de agua destilada es el lecho E5 conformado por $D_p=4\text{mm}$ y $H_0=11\text{cm}$ ya permite una fluidización de la solución patrón con menor pérdida de carga evitando generar grandes esfuerzos al motor del soplante y mostrar un buen comportamiento del equipo construido durante la operación de secado.

Del estudio del diseño factorial se puede concluir lo siguiente:

La ΔP_x se ve afectada de igual manera por los dos diámetros mayores 6 y 7mm que por los dos diámetros menores 3 y 4mm , encontrando una diferencia significativa entre ambos grupos. ΔP_x muestra diferencia significativa con respecto a todos los niveles de H_0 , es decir, es diferente el uso de la altura estática de 6 , 11 o 15cm .

Además, ΔP_x con respecto a la interacción de los factores D_p y H_0 no encuentra diferencia significativa para cuando la altura estática es igual a 6cm , pero muestra diferencia en el uso de los niveles de H_0 restantes. Cuando se está en presencia de las combinaciones con 11cm de altura hay diferencia significativa con los diámetros extremos, 7mm y 4mm . Cuando se usa la altura 15cm se diferencian dos grupos, un grupo formado por los lechos con D_p mayores y otro con los lechos con D_p menores, presentando diferencia significativa entre el uso de cualquiera de estos dos grupos. Esto se debe a que cuando el lecho está conformado por partículas de menor tamaño con D_p 3mm y 4mm , la resistencia que ofrece este lecho al flujo de aire ascendente es menor con respecto a la resistencia que ofrece el lecho conformado por partículas de mayor tamaño, 6mm y 7mm . Como consecuencia de ello el valor ΔP_x es mayor para los lechos de D_p 3mm y 4mm y es de menor valor para los lechos con D_p 6mm y 7mm .

Respecto a Q_{mn} , ésta no afecta de forma significativa a los factores de estudio ni a su interacción. Esta variable no se debería tomar en cuenta para una selección de un lecho adecuado para el equipo construido.

Respecto al caudal de alimentación apropiado con el uso de los 4 (cuatro) lechos seleccionados los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de ΔP_x y Q_{mn} de los lechos estudiados con W_{agua1} y W_{agua2} .

L	$W_{agua1}=3\text{ml/min}$		$W_{agua2}=9\text{ml/min}$	
	ΔP_x	Q_{mn}	ΔP_x	Q_{mn}
E2	238,95	0,0062	260	0,0095
E3	248,63	0,0097	217	0,005
E5	203,58	0,0011	190,95	0,0124
E6	236,47	0,0107	214,22	0,0083

5. REFERENCIAS

- Coronel E.L. Secado de okara en lecho de chorro. Tesis doctoral. Universidad nacional de Santiago del Estero -Universidad Estadual de Campinas, Santiago del Estero, Argentina y Campinas, Brasil, 2007.
- Freire J.T, Freire F.B., Ferreira M.C. y Nascimento B.S. A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. *Drying Technology: An International Journal* p. 1342-1353, 2012.
- McCabe W.L., Smith J.C. y Harriott P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. McGraw-Hill, España, Madrid, 1991.
- Rodríguez A. M. C. Secagem de pasta de peixe em leito de jorro. Tesis doctoral. Universidade estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2000.
- Spitzner Neto P.I., Cunha F.O. y Freire J.T. Effect of the presence of paste in a conical Spouted bed dryer with continuous feeding, *Drying Technology: An International Journal*, 20:4-5, 789-811, 2002.