

## Fluidodinámica de residuos agroindustriales en lechos móviles con tubos de aspiración de diferentes configuraciones.

### *Hydrodynamics of Agroindustrial Waste in Conical Spouted Beds with Draft Tubes of Different configuration.*

Juan Fernando Saldarriaga\*



Tipo de artículo: Resultado de investigación.

Recibido: 26 de marzo, 2014

Aceptado: 14 de mayo, 2014

### Resumen

Se realizó un estudio de fluidodinámica para residuos agroindustriales (huesos de aceituna, aserrín de pino y cáscara de arroz) en un reactor cónico de lecho en surtidor con diferentes tubos de aspiración (tubos abiertos y tubos no porosos). El trabajo se basó en un diseño de experimentos factorial para evaluar el rendimiento de los lechos en surtidor con tubos de aspiración mediante la medición de diferentes parámetros (velocidad mínima de lecho en surtidor, caída de presión de operación) y la influencia de factores geométricos de los contactores cónicos y los tubos de aspiración (abiertos y no porosos), así como las propiedades de las partículas analizadas. Los resultados muestran que los factores estudiados (altura del lecho, ángulo del contactor, diámetro de entrada, ancho de las caras del tubo abierto de aspiración, diámetro de partículas, altura del tubo no poroso) tienen gran influencia en los parámetros fluidodinámicos de los residuos agroindustriales.

**Palabras clave:** fluidodinámica, residuos agroindustriales, tubos de aspiración.

### Abstract

A hydrodynamic study of conical spouted beds equipped with draft tube has been carried out for agroindustrial waste (olive pits, sawdust and rice husk). Based on a design of experiments, the performance of conical spouted beds provided with draft tube has been studied by measuring different hydrodynamic parameters (minimum spouting velocity, operation pressure drop) and the influence of the geometric factors of conical contactors and draft tubes (open-sided draft tubes and non-porous draft tube), and particle properties on these hydrodynamic parameters. The results show that the factors studied (bed height, angle, inlet diameter, width of the draft tube faces, particle diameter) have great influence on the hydrodynamic parameters.

**Keywords:** hydrodynamic, agroindustrial waster, draft tube.

\* Ph. D. (c) en Ing. Procesos Químicos y Desarrollo Sostenible. M.Sc. Ingeniería Urbana, M. Universidad del País Vasco-España. juanfelorza@gmail.com

## Introducción

Actualmente, la biomasa ha tenido un mayor interés como origen de la energía renovable en el contexto del cambio climático y mitigación de impactos; esta se basa en cultivos de ciclo corto y cultivos energéticos que pueden contribuir a las necesidades energéticas de la sociedad moderna. Acorde al tipo de materia prima utilizada y tecnología de conversión aplicada, los biocombustibles pueden ser divididos en dos categorías principales: de primera y segunda generación (y el potencial de la tercera) de biocombustibles (Huang et al., 2011).

Los procesos de valorización de biomasa requieren buen contacto gas-sólidos, lo que favorece la transferencia de masa y energía. Estudios de viabilidad de la eficiencia de los actuales reactores utilizados en combustibles de baja calidad presentan un alto contenido de ceniza y contenido de humedad, así como bajo poder calorífico, resultados que no han sido alentadores y han indicado la necesidad de desarrollar sistemas de lecho fluidizado adecuados (Abdullah et al., 2003). El lecho en surtidor es una novedosa tecnología con una alta eficiencia en el procesamiento de partículas grandes (diámetro de partícula  $d_p > 1$  mm), aunque la fluidodinámica de esas partículas ha sido poco estudiada (Saldarriaga et al., 2014).

Los contactores de lechos móviles (lecho fluidizado y lecho en surtidor) han sido estudiados en recientes años, Zhao et al. (1987) estudió la combustión de carbón en un combustor de columna media de lecho fluidizado, Passos et al. (1989) realizó secado en un lecho en surtidor para diferentes granos y Ye et al. (1992) evaluó la influencia de los parámetros fluidodinámicos en una columna media de lecho en surtidor a altas temperaturas. Bi et al. (1997) desarrolló una correlación para predecir la velocidad mínima de lecho en surtidor para un reactor cónico a escala de laboratorio. Dogan et al. (2000) propuso los lechos en surtidor de sección rectangular para superar las dificultades de escalado de los lechos

móviles convencionales y lechos móviles con tubo de aspiración.

Diferentes modificaciones con respecto al lecho en surtidor convencional han sido propuestas en la literatura con el principal objetivo de mejorar su eficiencia. Estas modificaciones conciernen principalmente a la geometría del contactor transformado de cilíndrico a cónico y/o la entrada del gas al lecho. De igual manera, se han desarrollado modelos para el cálculo de la velocidad mínima de lecho en surtidor y la pérdida de presión en contactores cónicos (Povrenovic et al., 1992). Otros autores han encontrado que la fluidodinámica de los reactores cónicos de lecho en surtidor es diferente a los convencionales y, de igual manera, en este tipo de reactores se favorece la manipulación de partículas de gran tamaño (Olazar et al., 1992).

Acorde a Altzibar et al. (2013b), un parámetro crucial que limita el escalado de los reactores de lecho en surtidor es la relación entre el diámetro de entrada y el diámetro de partícula. Así mismo, argumentan que el diámetro de entrada debe ser 20 ó 30 veces más grande que el diámetro promedio de partícula, con el fin de mejorar las condiciones del surtidor. La solución usual a este problema es el uso de tubos de aspiración. Se han propuesto diferentes configuraciones de tubos de aspiración: porosos, no porosos y abiertos, estos últimos han sido desarrollados en nuestro laboratorio y son particularmente adecuados para un contacto vigoroso (Altzibar et al., 2009; Altzibar et al., 2008; Altzibar et al., 2013a; Altzibar et al., 2013b; Olazar et al., 2012). La inserción de un tubo de aspiración es la solución usual a este problema. Sin embargo, un tubo de aspiración produce cambios en la fluidodinámica y la velocidad del flujo de circulación del sólido en los lechos de surtidor (Povrenovic et al., 1992). El uso de tubos de aspiración tiene las siguientes ventajas cuando son operados con lechos en surtidor: gran flexibilidad, bajo flujo de gas y

pérdida de presión, sólidos de cualquier tamaño o naturaleza pueden ser tratados y se alcanza una mayor estabilidad del lecho.

En una publicación reciente Altzibar et al. (2013a) recogieron correlaciones empíricas propuestas en la literatura (Tabla 1), pero estas no son recomendadas para residuos agroindustriales ya que fueron obtenidas con otros materiales con

diferentes propiedades (esfericidad, diámetro, densidad). Sin embargo, los lechos en surtidor son adecuados para el tratamiento de materiales diversos (de amplia distribución de partículas y tamaño irregular) y con alto contenido de humedad, como es mostrado en estudios que exponen una alta eficiencia en la combustión en lecho en surtidor y baja pérdida de presión (Olazar et al., 1994, Olazar et al., 1993).

**Tabla 1.** Correlaciones fluidodinámicas para la mínima velocidad de lecho en surtidor en reactores cónicos con tubo de aspiración

Autor	Correlación	Ec.
(Kmiec et al., 2009)	$(Re_0)_{ms} = 0.0137 Ar^{0.714} [V_r \phi / V_0]^{0.411} [D_g / D_0]^{-0.554} (\gamma)^{0.8}$ Donde $\phi = [L_T - H_0 / h_r]$	(1)
(Altzibar et al., 2009)	$(Re_0)_{ms} = 0.204 Ar^{0.475} [H_0 / D_0]^{1.24} [L_H / D_T]^{0.168} [\tan(\gamma / 2)]^{0.135}$	(2)
(San José et al., 2007)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} [D_b / D_0]^{1.68} [\tan(\gamma / 2)]^{0.57} [H_0 - L_T / H_0]^{0.45} [D_i / (D_i - D_T)]^{0.17}$ Donde $L_T = [H_0 - L_H]$	(3)
(Altzibar et al., 2013a)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} [D_b / D_0]^{1.68} [\tan(\gamma / 2)]^{0.57} [A_0 / A_T]^{0.30}$	(4)
(Altzibar et al., 2013a)	$(Re_0)_{ms} = 0.25 Ar^{0.5} [H_0 / D_0]^{1.2} [L_H / D_0]^{0.3}$	(5)

Fuente: Elaboración propia (2014)

En este trabajo, el lecho en surtidor tiene geometría cónica y ha sido aplicado al tratamiento potencial de residuos agroindustriales. El objetivo ha sido tener en cuenta la naturaleza no uniforme de estos materiales, el rango de los factores geométricos de los contactores y delimitar las condiciones de operación requeridas para llevar a cabo la operación en régimen estable. En estas condiciones, las correlaciones fluidodinámicas han sido evaluadas para el cálculo de la velocidad mínima de lecho en surtidor, de acuerdo a las publicadas por Olazar et al. (1993) y Altzibar et al. (2013a).

### Metodología

Experimental, Tres tipos de residuos agroindustriales han sido identificados y caracterizados: huesos de aceituna (olivo), cáscara de arroz y aserrín de pino. Estos materiales,

cuya caracterización es mostrada en la Tabla 2, pertenecen al grupo D de la clasificación de Geldart. El contenido de humedad fue realizado de acuerdo a la norma ISO-589, por medio de un analizador de humedad halógeno HR83, Mettler Toledo. La densidad de partícula fue obtenida por medio de la porosidad de mercurio (Saldarriaga et al., 2014) necesaria para el cálculo requerido del módulo adimensional Reynolds  $(Re_0)_{ms}$  y el módulo de Arquímedes  $Ar$ . El diámetro promedio de partícula fue calculado mediante la siguiente expresión (promedio ponderado):

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{p_i}}} \quad (6)$$

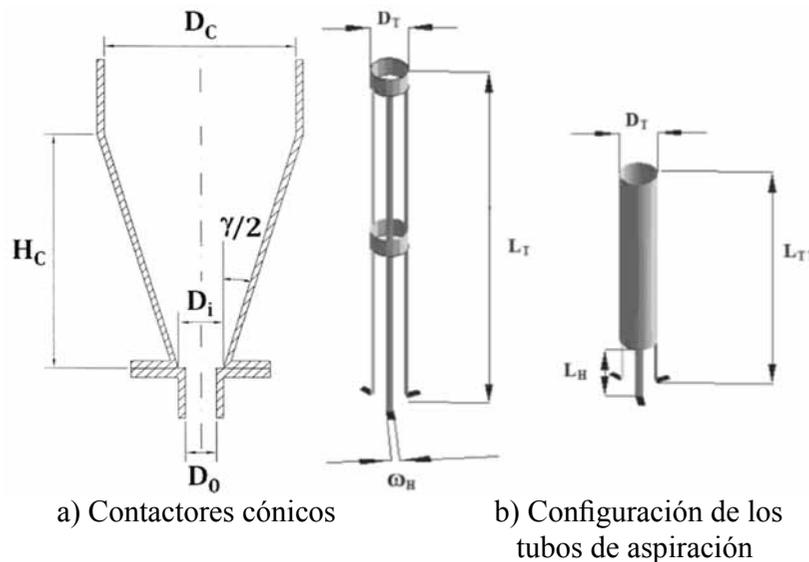
**Tabla 2.** Propiedades de los sólidos utilizados

Propiedades	Olivo	Arroz	Aserrín
Diámetro medio, $d_p$ , mm	2,33	1,48	0,76
Densidad de la partícula, $\rho_b$ , ( $\text{kg/m}^3$ )	1292,2	957,4	496,4
Densidad del lecho, $\rho_s$ , ( $\text{kg/m}^3$ )	650	126,67	188,67
Contenido de humedad, (%)	9,77	8,96	9,66
Arquímedes, (Ar)	$4,96 \times 10^5$	$9,44 \times 10^4$	$6,80 \times 10^3$
Clasificación de Geldart	D	D	D

Fuente: Elaboración propia (2014)

La unidad experimental utilizada ha sido descrita en trabajos previos (Altzibar et al., 2013a; Olazar et al., 1992; Olazar et al., 1994). El estudio ha sido realizado usando contactores de polimetil-acrilato con ángulos ( $\square$ ) de 28, 33, 36 y 45°, dos

diámetros de entrada ( $D_0$ ) fueron utilizados (0,04 m y 0,05 m). Diámetro de la columna es el mismo para todos los ángulos utilizados,  $D_c$ , 0,36 m. La altura del lecho estancado,  $H_c$ , es 0,20 y 0,30 m (Figura 1a).



**Figura 1.** Factores geométricos utilizados

Fuente: Altzibar et al. (2013a)

Para este estudio se han utilizado dos tipos de tubos de aspiración: abiertos y no porosos (Figura 1b). Los tubos no porosos tienen en cuenta la diferencia en la altura de la zona de descenso (distancia entre el conducto de entrada del gas y el extremo inferior del tubo),  $L_H$ , y el diámetro del tubo,  $D_T = 0,05$  m. El largo del tubo es aproximadamente igual a la altura del lecho (0,30 m). Los tubos de aspiración abiertos presentan tres aperturas a los lados del

tubo con relaciones diferentes ( $WH$ ). Para estos experimentos se variaron las aperturas de las caras, con el fin de encontrar la mejor relación, de igual manera, se utilizó el mismo diámetro de los tubos no porosos. El largo del tubo es 0,50 m, estando este 0,20 m por encima del lecho estancado.

Los datos experimentales fueron optimizados, ajustando cuatro correlaciones empíricas en su forma

original para el caso de los no porosos (Altzibar et al., 2013a), con el fin de encontrar la mejor ecuación que permita evaluar el comportamiento de este tipo de residuos en un lecho en surtidor. Para el caso de los tubos abiertos solo fue utilizada la única correlación que existe en la literatura (Altzibar et al., 2013a). Los valores de los coeficientes fueron obtenidos por la optimización de una función objetivo definido como la diferencia entre los resultados experimentales y los calculados por el modelo probado. Un algoritmo en Scilab que incluía una función *fminsearch* (que calcula el mínimo no contenido con el algoritmo Nelder-Mead), fue realizado para los cálculos de optimización. Al modificar los parámetros originales, en lugar del cambio libre de todos los parámetros en una misma evaluación, el algoritmo diseñado prueba cada parámetro por separado y luego agrupado y, por último, compara los resultados con los obtenidos de la correlación original por medio de la prueba F, con el fin de comprobar la significancia estadística de cada modificación.

## Resultados

La Tabla 3 muestra los valores de las constantes de los mejores ajustes. Para los tubos de aspiración abiertos fue necesario incluir un nuevo módulo que en este caso es la esfericidad de las partículas, mientras que para los tubos de aspiración no porosos, este no fue requerido. En la Tabla 3 también se puede observar que con la ecuación de San José et al. (2007) se consigue una mejor respuesta (promedio del error relativo cuadrado -ASRE- de 8,92%), pero se debe considerar que necesita una gran cantidad de parámetros para la evaluación, mientras que la desarrollada por Kmiec et al. (2009) considera pocos parámetros y en la optimización solo fueron ajustadas las constantes *d* y *e*.

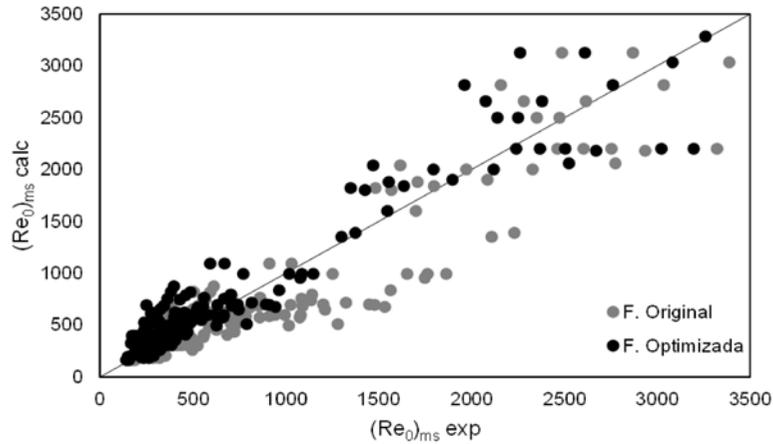
**Tabla 3.** Coeficientes ajustados de las ecuaciones con tubos de aspiración abiertos y no porosos

Tubo de aspiración	Autor	Constantes							ASRE (%)
		a	b	c	D	E	f	$\emptyset$	
Abierto	(Altzibar et al., 2013a)	0,126	0,5	1,68	-0,57	-0,22	-	0,3	8,07
No poroso	(Altzibar et al., 2013a)	0,25	0,5	1,2	0,8	-	-	-	11,85
	(Altzibar et al., 2009)	0,204	0,475	1,24	3,368	0,429	-	-	11,32
	(Kmiec et al., 2009)	0,0137	0,494	0,411	3,721	-1,9	-	-	11,08
	(San José et al., 2007)	0,126	0,5	1,68	-0,57	0,53	0,17	-	8,92

Fuente: Elaboración propia (2014)

En la Figura 2, se puede observar la calidad de los datos optimizados para todas las biomásas trabajadas utilizando tubos de aspiración abiertos. Se puede ver que los datos originales tienen una desviación por debajo de la línea recta, mientras que los datos optimizados se ajustan mucho mejor

a la recta, esto adicionando un módulo más que es la esfericidad y ninguna constante fue tocada por el algoritmo, comprobándose de esta manera que dicha fórmula no tuvo en cuenta la geometría irregular de las partículas de biomasa.



**Figura 2.** Comparación entre los datos  $(Re_0)_{ms}$  experimentales y el  $(Re_0)_{ms}$  calculado usando la Fórmula (4) para sistemas con tubos de aspiración abiertos  
Fuente: Elaboración propia (2014)

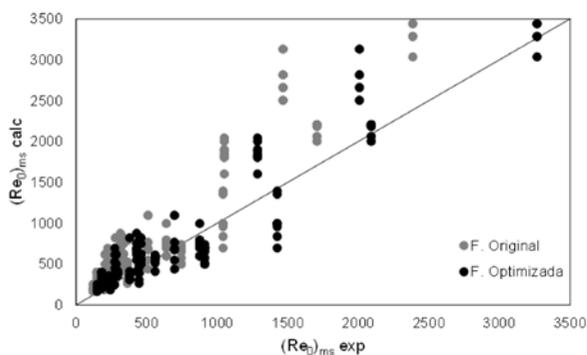
En la Figura 3, se muestran los ajustes de las ecuaciones para tubos de aspiración no porosos. Aunque la ecuación de Kmiec et al. (2009) presenta un buen ajuste (ASRE 11,08%), todos los datos evaluados con la fórmula original están sobre el eje Y, mientras que los datos con la fórmula optimizada se logran separar un poco del eje, indicando esto que la ecuación no fue desarrollada para este tipo de materiales y que a pesar de ser optimizada y buscar la adición de nuevos módulos, no se logró un buen ajuste (Figura 3c).

Para los ajustes realizados con la ecuación de San José et al. (2007), muestran que todos los datos están sobre la línea recta y que no se ajustan bien

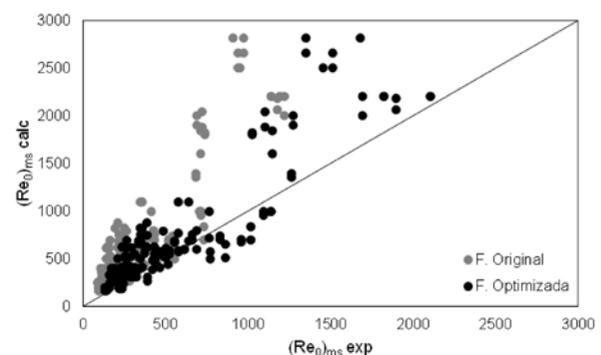
(Figura 3d).

En el caso de la ecuación de Altzibar et al. (2013a) se observa que la falta de un módulo que relacione la geometría de la partícula es fundamental para un buen ajuste de la ecuación, lo cual se evidencia en la Figura 3a, en la que se muestra una estratificación de los residuos.

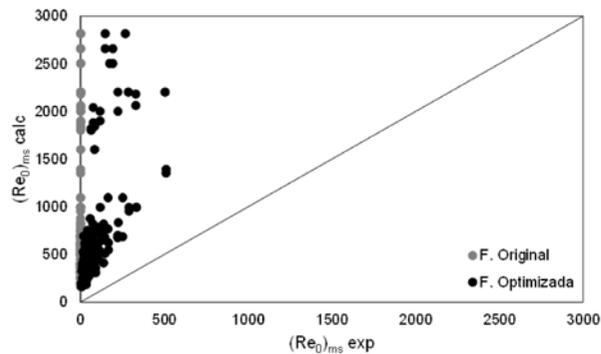
Mientras que para la ecuación desarrollada por Altzibar et al. (2009), hay un mejor ajuste de los resultados fluidodinámicos evaluados de los diferentes residuos agroindustriales (ASRE 11,32%), por lo cual es la única que puede ser utilizada para la evaluación de este tipo de materiales en lechos en surtidor.



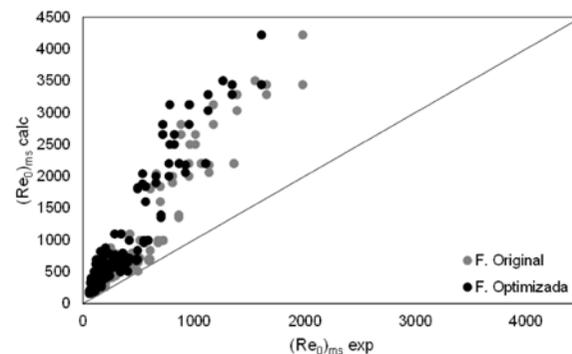
a) (Altzibar et al., 2013a)



b) (Altzibar et al., 2009)



c) (Kmiec et al., 2009)



d) (San José et al., 2007)

**Figura 3.** Comparación entre los datos experimentales y los calculados para sistemas de tubos de aspiración no porosos

Fuente: Elaboración propia (2014)

La fórmula (2) (Altzibar et al., 2009) incluye los siguientes módulos adimensionales, módulo de Arquímedes ( $Ar$ ) que representa las propiedades del gas y las partículas, la relación entre la altura del lecho estancado y el diámetro de entrada del gas ( $H_0/D_i$ ), y el diámetro de la sección cilíndrica superior entre la altura de la zona de arrastre y el diámetro de entrada del gas ( $D_c/D_i$ ). Igualmente, se tuvo en cuenta la diferencia en la altura de la zona de descenso (distancia entre el tubo de entrada del gas y el extremo inferior del tubo),  $LH$ , y el diámetro del tubo,  $DT$ .

## Conclusiones

Las ecuaciones colectadas por Altzibar et al. (2013a) para el cálculo del  $(Re_0)_{ms}$  han sido evaluadas y validadas para residuos agroindustriales que puedan ser usados como potenciales biocombustibles para generación de energía alternativa.

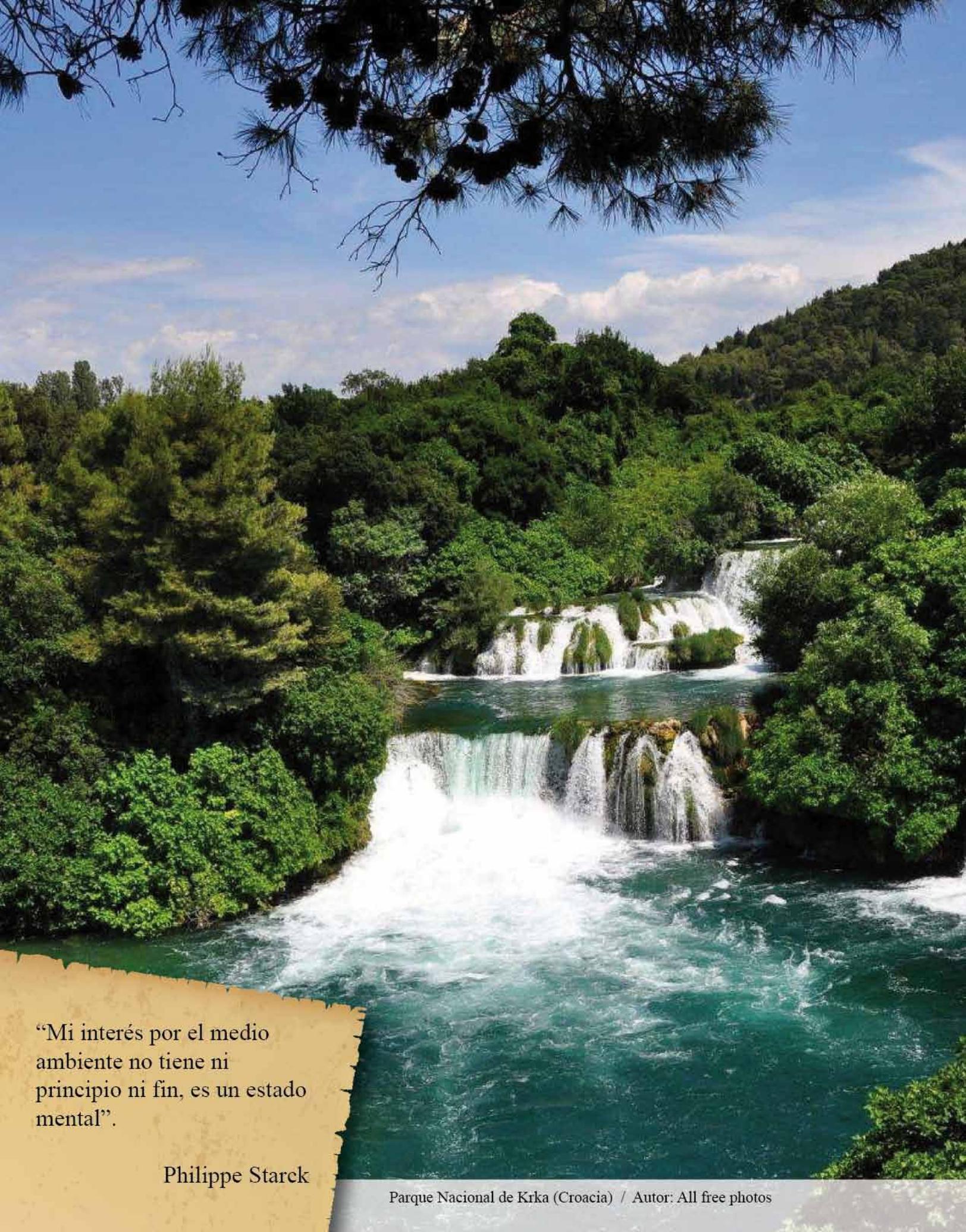
De las cinco ecuaciones evaluadas, las propuestas por Altzibar et al. (2009) para el caso de los tubos no porosos y Altzibar et al., (2013a) para el caso de los tubos abiertos, han sido escogidas debido al hecho de que consideran el  $H_0$ ,  $D_c$  y  $D_i$ , y estos parámetros reflejan el efecto del ángulo del contactor como factor principal para procesos de escalado, así como la densidad de partícula y la viscosidad por medio del Reynolds y Arquímedes. Estos resultados son interesantes en vista de las pocas correlaciones y estudios para el diseño de lechos en surtidor en condiciones reales para el uso de este tipo de residuos.

Considerando los materiales probados en este estudio con diferentes tamaños de partículas y densidades, la ecuación propuesta por Altzibar et al. (2009) para tubos de aspiración no porosos y la de Altzibar et al. (2013a) para tubos de aspiración abiertos, son las más adecuadas para el cálculo del  $(Re_0)_{ms}$  de residuos agroindustriales.

## Referencias

- Abdullah, M. Z., Husain Z., & Pong S. L. Y. (2003). Analysis of Cold Flow Fluidization Test Results for Various Biomass Fuels. *Biomass & Bioenergy*, 24, 487-494.
- Altzibar, H., López G., Aguado R., Álvarez S., San José M. J., & Olazar M. (2009). Hydrodynamics of Conical Spouted Beds Using Different Types of Internal Devices. *Chemical Engineering & Technology*, 32, 463-469.
- Altzibar, H., López G., Álvarez S., S. José M. J., Barona A., & Olazar M. (2008). A Draft-tube Conical Spouted Bed for Drying Fine Particles. *Drying Technology*, 26, 308-314.
- Altzibar, H., López G., Bilbao J., & Olazar M. (2013a). Minimum Spouting Velocity of Conical Spouted Beds Equipped with Draft Tubes of Different Configuration. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 2995-3006.
- Altzibar, H., López G., Estiati I., Bilbao J., & Olazar M. (2013b). Particle Cycle Times and Solid Circulation Rates in Conical Spouted Beds with Draft Tubes of Different Configuration. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 15959-15967.
- Bi, H. T., Macchi A., Chaouki J., & Legros R. (1997). Minimum Spouting Velocity of Conical Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75, 460-465.
- Dogan, O. M., Freitas L. A. P., Lim C. J., Grace J. R., & Luo B. (2000). Hydrodynamics and Stability of Slot-rectangular Spouted Beds. Part I: Thin Bed. *Chemical Engineering Communications*, 181, 225-242.
- Huang, Y. F., Kuan, W. H., Chiueh, P. T., & Lo S. L., (2011). A Sequential Method to Analyze the Kinetics of Biomass Pyrolysis: *Bioresource Technology*, 102, 9241-9246.
- Kmiec, A., Englart S., & Ludwinska A. (2009). Mass Transfer During Air Humidification in Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87, 163-168.
- Olazar, M., López G., Altzibar H., Amutio M., & Bilbao J. (2012). Drying of Biomass in a Conical Spouted Bed with Different Types of Internal Devices. *Drying Technology*, 30, 207-216.
- Olazar, M., San José M. J., Aguayo A. T., Arandes J. M., & Bilbao J. (1992). Stable Operation Conditions for Gas Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 31, 1784-1792.
- Olazar, M., San José M. J., Llamosas R., & Bilbao J. (1994). Hydrodynamics of Sawdust and Mixtures of Wood Residues in Conical Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33, 993-1000.
- Olazar, M., San José M. J., Penas F. J., Aguayo A. T., & Bilbao J. (1993). Stability and Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary-mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32, 2826-2834.
- Passos, M. L., Mujumdar A. S., & Raghavan V. G. S. (1989). Spouted and Spout-fluidized Beds for Grain Drying. *Drying Technology*, 7, 663-696.

- Povrenovic, D. S., Hadzismajlovic D. E., Grbavcic Z. B., Vukovic D. V., & Littman H. (1992). Minimum Fluid Flow-rate, Pressure-drop and Stability of a Conical Spouted Bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70, 216-222.
- Saldarriaga, J. F., Pablos, A., Aguayo, A. T., Aguado R. & Olazar, M. (2014). Determinación de la densidad de partícula mediante porosimetría de mercurio para el estudio fluidodinámico de biomas en lechos móviles. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5.
- San José, M. J., Álvarez S., de Salazar A. O., Olazar M., & Bilbao J. (2007). Operating Conditions of Conical Spouted Beds with a Draft Tube. Effect of the Diameter of the Draft Tube and of the Height of Entrainment Zone. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46, 2877-2884.
- Ye, B., Lim C. J., & Grace J. R. (1992). Hydrodynamics of Spouted and Spout Fluidized-beds at High-temperature. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70, 840-847.
- Zhao, J., Lim C. J., & Grace J. R. (1987). Flow Regimes and Combustion Behavior in Coal-burning Spouted and Spout Fluid Beds. *Chemical Engineering Science*, 42, 2865-2875.



“Mi interés por el medio ambiente no tiene ni principio ni fin, es un estado mental”.

Philippe Starck