



## Modelado del secado de lodos de la industria papelera en un secadero spouted bed cónico

**Autor:** María José San José Álvarez

**Institución:** Universidad del País Vasco

**Otros autores:** Sonia Alvarez Perez; Iris García Manzano; Francisco J. Velasco González

## Resumen

La prevención de la contaminación de la industria papelera constituye una preocupación a nivel mundial (European Commission, 2013), siendo los lodos el subproducto generado en mayor cantidad, por lo que su gestión requiere tratamientos alternativos a la aplicación en agricultura y a la valorización energética (Bajpai, 2012). Además, estos lodos contienen un alto contenido de humedad lo que incrementa los costes de transporte para su valorización en agricultura y dificulta la posible valorización energética posterior siendo el secado térmico la primera etapa de los procesos de valorización energética que reduce el contenido de humedad. Además, dado el gran tonelaje anual de lodos industriales producido, la valorización de estos lodos no sólo disminuiría el volumen de residuos sino que se llegaría a darle valor económico al residuo, cumpliendo la legislación medioambiental vigente en materia de residuos, además de una mejora de la economía de este sector Industrial por la disminución del coste de gestión de los lodos a vertedero.

En trabajos anteriores se ha probado con éxito la aplicabilidad de la tecnología de Spouted Bed para el secado de lodos residuales de la Industria Papelera (San José et al., 2010a, 2010b, 2013a) y de sarmientos (San José et al., 2013b). El buen comportamiento de estos contactores, se basa en el vigoroso movimiento cíclico de las partículas, lo que elimina las desventajas del tratamiento de materiales adherentes y/o con amplia distribución de diámetro de partícula como los lodos residuales.

En este trabajo se ha realizado un diseño de experimentos factorial a dos niveles (Montgomery, 2005) para analizar la influencia de los factores geométricos del contactor y de las condiciones de operación en el tiempo de secado de lodos residuales en un secadero spouted bed cónico, con objeto de determinar los valores de los parámetros que optimizan el tiempo de secado. Los resultados del modelo se han comprobado con valores experimentales de tiempos de secado. Además, se ha relacionado el tiempo de secado con el tiempo de ciclo, tiempo empleado por una partícula en describir un ciclo completo en el secadero.

La unidad experimental diseñada a escala de planta piloto consta básicamente de un secadero spouted bed cónico, una soplante, medidores de flujo másico, termopares. Los lodos residuales de la industria papelera tienen un diámetro medio de Sauter de 2.81 mm, una densidad de 1123 kg/m<sup>3</sup>, un 103% de humedad (base seca) medida con el higrómetro Mettler Toledo y un poder calorífico inferior, medido con la bomba calorimétrica PARR 1341, de 4500 kJ/kg.

Agradecimientos al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación del Proyecto CTQ2010-18697 y al Gobierno Vasco por el Proyecto S-PE13UN117.

**Palabras clave:** diseño de experimentos; lodos de papelera; lodos residuales; secado; spouted beds; tiempo de secado

## Introducción

La prevención de la contaminación de la Industria Papelera constituye una preocupación a nivel mundial (European Commission, 2013), siendo los lodos el subproducto generado en mayor cantidad, por lo que su gestión requiere tratamientos alternativos a la aplicación en agricultura y a la valorización energética (Bajpai, 2012). Además, estos lodos contienen un alto contenido de humedad lo que incrementa los costes de transporte para su valorización en agricultura y dificulta la posible valorización energética posterior siendo el secado térmico la primera etapa de los procesos de valorización energética que reduce el contenido de humedad. Además, dado el gran tonelaje anual de lodos industriales producido, la valorización de estos lodos no sólo disminuiría el volumen de residuos sino que se llegaría a darle valor económico al residuo, cumpliendo la legislación medioambiental vigente en materia de residuos, además de una mejora de la economía de este sector Industrial por la disminución del coste de gestión de los lodos a vertedero.

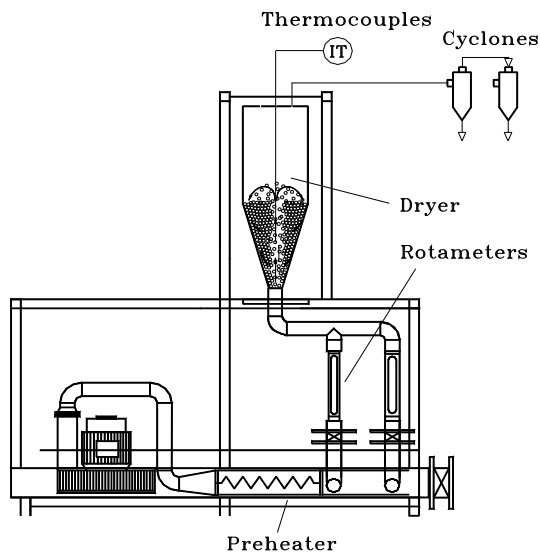
En trabajos anteriores se ha probado con éxito la aplicabilidad de la tecnología de Spouted Bed para el secado de lodos residuales de la Industria Papelera (San José et al., 2010a, 2010b, 2013a, 2014) y de sarmientos (San José et al., 2013b). El buen comportamiento de estos contactores, se basa en el vigoroso movimiento cíclico de las partículas, lo que elimina las desventajas del tratamiento de materiales adherentes y/o con amplia distribución de diámetro de partícula como los lodos residuales.

En este trabajo se ha realizado un diseño de experimentos factorial a dos niveles (Montgomery, 2005) que permite analizar la influencia de los factores geométricos del contactor y de las condiciones de operación en el tiempo de secado de lodos residuales en un secadero Spouted Bed cónico, con objeto de determinar los valores de los parámetros que optimizan el tiempo de secado. Los resultados del modelo se han comprobado con valores experimentales de tiempos de secado. Además, se ha relacionado el tiempo de secado con el tiempo de ciclo, del tiempo utilizado por una partícula en describir un ciclo completo en el secadero en el régimen de operación.

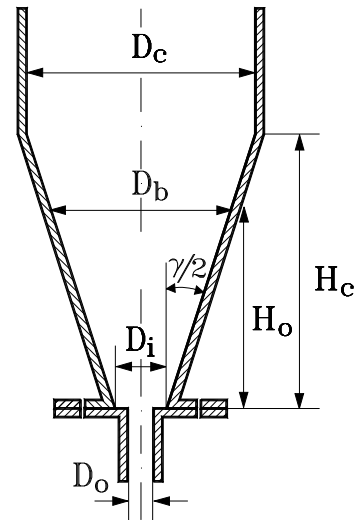
### 1. Equipo experimental

La unidad experimental diseñada a escala de planta piloto, Figura 1, consta básicamente de un secadero Spouted Bed cónico, una soplante, medidores de flujo másico, controlados por ordenador, para la medida del caudal, termopares para la medida de la temperatura, sondas para la medida de la presión, una resistencia eléctrica para calentar el aire de entrada al secadero y dos ciclones de alta eficacia para la recogida de los sólidos finos.

El secadero, Figura 2, es un Spouted Bed cónico cuyos factores geométricos se muestran en la Tabla 1. Se ha llevado a cabo un estudio con diferentes relaciones de  $D_o/d_p$  y  $D_o/D_i$  a diferentes condiciones de operación recogidas en la Tabla 1. El secado se ha realizado a temperaturas del gas desde temperatura ambiente hasta 120 °C.



**Figura 1.** Unidad experimental



**Figura 2.** Factores geométricos del secadero

**Tabla 1.** Factores geométricos del secadero y condiciones de operación

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valores</i>
Diámetro de columna	$D_c$ (m)	0.36
Diámetro de la base del secadero	$D_b$ (m)	0.03
Angulo de la base del secadero	$\gamma$ (deg)	36
Diámetro de entrada del gas	$D_o$ (m)	0.015, 0.02, 0.03
Altura de lecho estancado	$H_o$ (m)	entre 0.03 y 0.25
Temperatura del gas de entrada	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	desde 20 hasta 120

Los lodos residuales de la industria papelera tienen un diámetro medio de Sauter de 2.81 mm, una densidad de  $1123 \text{ kg/m}^3$ , un 103% de humedad (base seca) medida con el higrómetro Mettler Toledo y un poder calorífico inferior, medido con la bomba calorimétrica PARR 1341, de 4500 kJ/kg.

Se ha obtenido una aproximación general mediante un diseño de experimentos factorial a dos niveles con objeto de estimar el efecto de los factores geométricos y de las condiciones de operación para optimizar el proceso de secado a baja temperatura.

Basándose en observaciones previas, se han variado las variables que pueden afectar al tiempo de secado mediante un diseño de experimentos factorial  $2^k$  a dos niveles. El diseño  $2^k$  es apropiado cuando hay varios factores que influyen en un experimento (Montgomery, 2003). Estos factores son los siguientes: relación entre el diámetro de entrada del gas y el diámetro del secadero,  $D_o/D_i$ , de la relación entre el flujo de gas y el flujo mínimo de spouting,  $Q/Q_{ms}$ , del contenido inicial de humedad del sólido,  $X$  y de la temperatura del gas de secado,  $T$ . En la Tabla 2 se muestran los valores de los dos niveles de los factores estudiados.

**Tabla 2** Factores de diseño y niveles

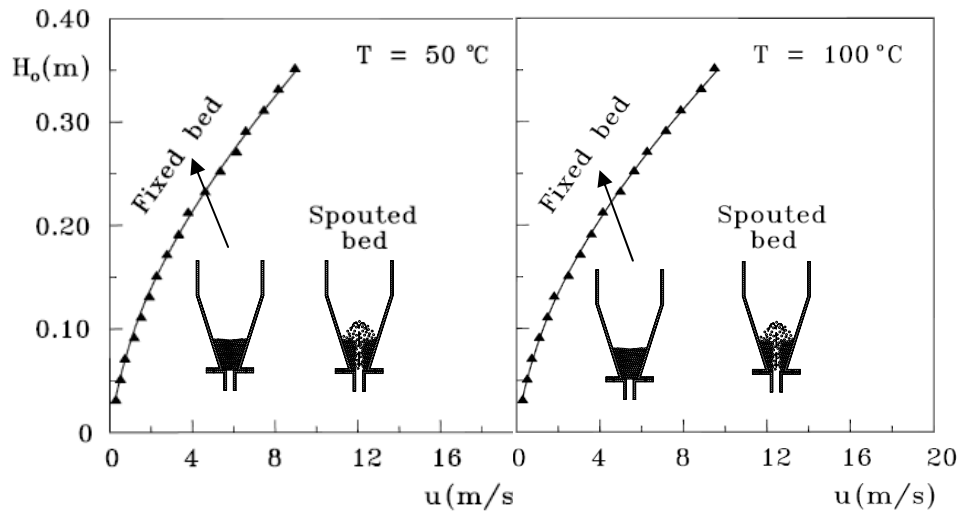
<i>Nº</i>	<i>Factor</i>	<i>Nivel 1</i>	<i>Nivel</i>
1	$D_o/D_i$ (m)	0.5	1
2	$Q/Q_{ms}$ ( $m^3/h$ )	Mínimo spouting	Spouted bed moderado 1.3
3	X (wt %)	1	2
4	T ( $^{\circ}C$ )	25	100

## 2. Resultados

Con el fin de identificar los distintos regímenes de lechos de partículas gruesas húmedas a las temperaturas de secado, se ha llevado a cabo un estudio fluidodinámico desde temperatura ambiente hasta 120  $^{\circ}C$ .

Se han delimitado los diferentes regímenes de operatividad de lechos de partículas de lodo húmedo en un secadero Spouted Bed cónico a diferentes temperaturas de secado a partir de la desviación standard de las fluctuaciones de las señales de presión. En la Figura 3 se muestran a modo de ejemplo los mapas de operación (altura de lecho estancado,  $H_o$ , frente a velocidad del gas,  $u$ ) de un lecho de lodos con un contenido de humedad de 103% (base seca) a temperaturas de entrada del gas de 50 y 100  $^{\circ}C$ , junto con la representación del estado de las partículas en el secadero en los distintos regímenes. Los límites entre los diferentes regímenes, dibujados con línea continua, se han obtenido experimentalmente (los puntos son la base experimental para el trazado de las líneas), al aumentar la velocidad del gas para cada altura del lecho estancado.

Como se observa en la Figura, a partir del lecho fijo, obtenido cuando la desviación standard aumenta súbitamente, al aumentar la velocidad del gas, se obtiene el régimen estable de spouted bed, caracterizado por pequeñas fluctuaciones de la desviación standard. La velocidad correspondiente al comienzo de este régimen es la velocidad mínima de spouting. El régimen de spouted bed se mantiene estable hasta un 30% por encima de la velocidad mínima de spouting. Los valores de esta velocidad se han determinado a partir de los valores de pérdida de carga al disminuir lentamente la velocidad hasta que disminuye la pérdida de carga del lecho (Olazar et al., 2004, San José et al., 1992) y desaparece la fuente, ya que esta velocidad es más exacta y reproducible que la obtenida al aumentar el caudal de gas. Cabe destacar que los sistemas son estables a todas las alturas de lecho estancado estudiadas, definiendo la situación inestable cuando la desviación standard de las fluctuaciones de presión es mayor de 100 MPa (San José et al., 1992). Se aprecia que la velocidad mínima de spouting aumenta tanto con la altura del lecho estancado como con la temperatura del gas a la entrada.



**Figura 3.** Mapa de operación y esquema de circulación de partículas de lodo con un contenido de humedad de 103% (base seca) en un secadero Spouted Bed cónico a diferentes regímenes. Sistema experimental:  $\gamma = 36^\circ$ ,  $D_o = 0.03$  m a diferentes temperaturas de entrada, (a)  $T = 50$  °C; (b)  $T = 100$  °C.

El diseño de experimentos emplea la combinación de los dos niveles de las condiciones de operación para obtener una matriz con 16 diferentes experimentos. En la Tabla 3 se muestra la matriz de diseño para los 16 experimentos, donde en cada fila los valores superior e inferior de cada factor se representan con +1 y -1, respectivamente y en la última columna se recogen los resultados experimentales del tiempo de secado obtenido con cada combinación de condiciones experimentales. Las variables 1, 2, 3 y 4, representan la relación entre el diámetro de entrada del gas y el diámetro del secadero,  $D_o/D_i$ , el contenido inicial de humedad del sólido,  $X$ , la relación entre el flujo del gas y el flujo mínimo del gas,  $Q/Q_{ms}$  y la temperatura del gas a la entrada,  $T$ , respectivamente.

Se ha resuelto el diseño de experimentos mediante el algoritmo de Box (1965) y se ha calculado el número de efectos y de interacciones del diseño de experimentos  $2^4$  mediante la ec. (1) y se ha determinado que hay cuatro factores principales, seis interacciones de dos variables, cuatro interacciones de tres variables y una interacción de cuatro variables.

$$n_i = \frac{k!}{i! (k - i)!} \quad (1)$$

**Tabla 3** Matriz de diseño y resultados experimentales de tiempos de secado

Exp	Media	1	2	3	4	t <sub>d</sub> (s)
1	+	-	-	-	-	1226.48
2	+	+	-	-	-	1148.32
3	+	-	+	-	-	981.31
4	+	+	+	-	-	918.78
5	+	-	-	+	-	1145.14
6	+	+	-	+	-	1072.16
7	+	-	+	+	-	916.23
8	+	+	+	+	-	857.84
9	+	-	-	-	+	657.25
10	+	+	-	-	+	615.37
11	+	-	+	-	+	525.87
12	+	+	+	-	+	492.36
13	+	-	-	+	+	613.66
14	+	+	-	+	+	574.56
15	+	-	+	+	+	491.00
16	+	+	+	+	+	459.71

Los efectos principales y las interacciones, mostrados en la Tabla 4, se han calculado mediante la ec. (2), multiplicando el tiempo de secado de la cuarta columna de la Tabla 3 por el signo de la columna correspondiente al efecto o a la interacción y sumando éstos y posteriormente dividiendo el valor obtenido entre la mitad del número de experimentos de la matriz (Montgomery, 2003).

$$\text{Efecto} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{d(+)} - t_{d(-)}}{2^{k-1}} \quad (2)$$

La probabilidad normal es un método adecuado para determinar la importancia de los efectos y de las interacciones (Montgomery, 2003). En la Figura 4 se representa la probabilidad normal de los 16 efectos ordenados (efectos principales e interacciones). Como se observa, la mayoría de los efectos son despreciables ya que están distribuidos normalmente con media cero y próximos a la línea recta, por lo que se explican por ruido aleatorio (Montgomery, 2003). No obstante, los efectos principales 2 y 4 y la interacción de las variables 123 son significativas, ya que su media no es cero y no se ajustan a la línea recta.

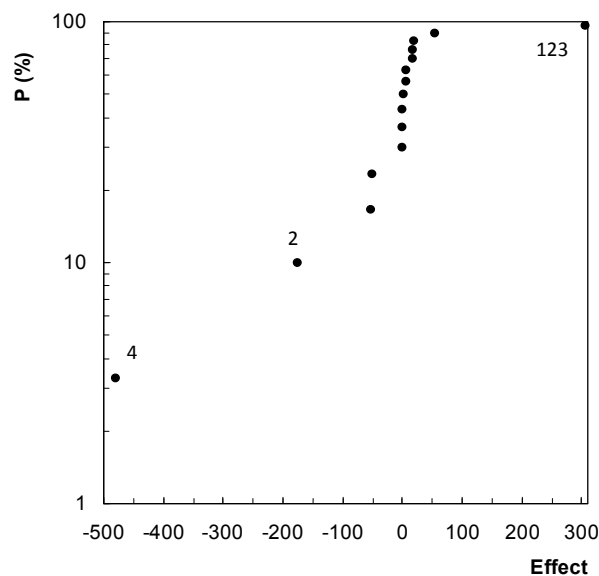
**Tabla 4** Efectos principales e interacciones en el tiempo de secado

Efectos	Valores
Principales	1 -52.23
	2 -176.23
	3 -54.43
	4 -479.56
Interacciones de dos variables	12 5.80
	13 1.79
	14 15.78
	23 6.04
	24 53.25
	34 16.45
Interacciones de tres variables	123 306.42
	124 -1.75
	134 -0.54
	234 -1.83
Interacciones de cuatro variables	1234 18.30

A partir de la representación normal de los residuos, se obtiene el modelo de regresión dado por la ec. (3) para predecir los valores del tiempo de secado. En la Tabla 5 se resumen los residuos de los 16 experimentos en el punto de diseño.

$$\hat{t}_d = 793.5 - 26.11x_1 - 88.11x_2 - 27.21x_3 - 239.98x_4 + 153.21x_1x_2x_3 \quad (3)$$

donde  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  y  $x_4$  representan los factores 1, 2, 3 y 4 factores, respectivamente y  $x_1x_2x_3$  representa la interacción 123.



**Figura 4.** Probabilidad normal de los efectos

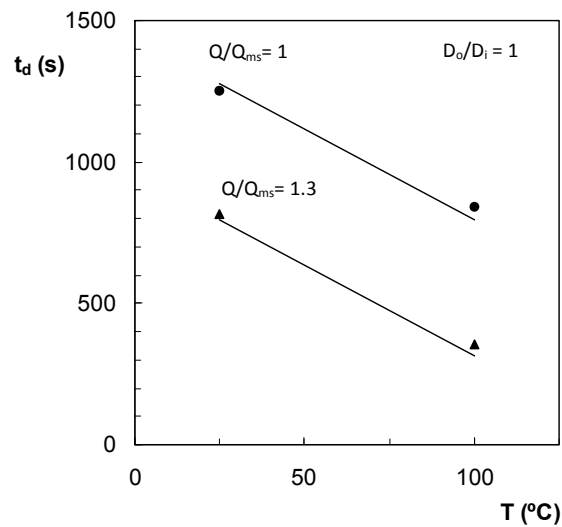


A partir de los efectos de los factores, se analiza el orden de importancia de los factores. Como se observa el factor de mayor importancia en el tiempo de secado es la temperatura del gas a la entrada seguido de la velocidad del gas. Como el valor del efecto de ambos factores es negativo, significa que el aumento de la temperatura y el caudal de gas disminuyen el tiempo de secado. Además, se deduce que la relación entre el diámetro de entrada del gas y el diámetro del secadero afecta ligeramente al tiempo de secado.

Se ha verificado la validez del modelo de regresión del tiempo de secado de partículas gruesas de lodos residuales de papel con ensayos experimentales de secado en diferentes regímenes. En la Figura 5 se muestra el buen ajuste de los valores experimentales de tiempos de secado (puntos) de partículas gruesas humedad a los valores calculados (líneas) para diferentes valores de la temperatura y del caudal de gas, al ser los factores de mayor influencia en el tiempo de secado.

**Tabla 5** Residuos de las variables y de las interacciones en el tiempo de secado

$t_d$	$\hat{t}_d$	$t_d - \hat{t}_d$
1226.48	1021.7	204.78
1148.32	1275.9	-127.58
981.31	1151.9	-170.59
918.78	793.26	125.52
1145.14	1273.7	-128.56
1072.16	915.06	157.10
916.23	791.06	125.17
857.84	1045.26	-187.42
657.25	541.74	115.51
615.37	795.94	-180.57
525.87	671.94	-146.07
492.36	313.3	179.06
613.66	793.74	-180.08
574.56	435.1	139.46
491.00	311.1	179.90
459.71	565.3	-105.59



**Figura 5.** Tiempo de secado frente a la temperatura del gas. Valores experimentales (puntos), valores calculados (líneas). Sistema experimental:  $D_o/D_i = 1$ .

### 3. Conclusiones

A partir de la variación de la desviación estándar de las fluctuaciones de la señal de presión, se han delimitado cualitativamente los regímenes de operación de lechos de partículas de lodo residual húmedas, procedentes de la industria papelera, desde 25 hasta 120 °C. Se ha determinado que la velocidad mínima de spouting aumenta con la altura del lecho estancado y con la temperatura del gas de entrada al secadero.

Se han obtenido los parámetros de mayor influencia en el tiempo de secado de los lodos de papel en un nuevo secadero Spouted Bed, mediante un diseño de experimentos factorial a dos niveles.

El factor de mayor influencia en el tiempo de secado es la temperatura del gas a la entrada, seguido de la relación entre el caudal de gas y el caudal mínimo de gas y el contenido inicial de humedad del sólido. Un aumento en la temperatura del gas a la entrada y de la relación del caudal del gas y una disminución del contenido inicial de humedad del sólido dan lugar a una disminución del tiempo de secado. Sin embargo, el efecto de la relación entre el diámetro de entrada del gas y el diámetro del secadero no es tan influyente.

Se ha verificado la validez de los resultados del modelo obtenido mediante el diseño de experimentos se han comprobado con tiempos de secado experimentales obtenidos en diferentes regímenes (lecho fijo y spouted bed), correspondientes a diferentes tiempos de ciclo a diferentes temperaturas del gas de entrada desde temperatura ambiente hasta 120 °C y se han obtenido los valores de los parámetros para el tiempo de secado óptimo.

## Nomenclatura

$D_b, D_o, D_i, D_c$	Diámetro superior del lecho estancado, diámetro de la entrada al contactor, diámetro de la base del contactor y diámetro de la columna, respectivamente, L
$d_p$	Diámetro de partícula, L
$H_o$	Altura del lecho estancado, respectivamente, L
$T$	Temperatura, °C
$t_d$	tiempo de secado, s
$u$	Velocidad del aire referida a $D_i$ , $LT^{-1}$
$X$	contenido de humedad (base seca), porcentaje en peso %

## Símbolos griegos

$\gamma$	Angulo del contactor cónico, grados.
$\rho, \rho_s$	Densidad del gas y del sólido, $ML^{-3}$
$\mu$	Viscosidad del aire, $ML^{-1}T^{-1}$

*Agradecimientos al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación del Proyecto CTQ2010-18697 y al Gobierno Vasco por el Proyecto S-PE13UN117.*

## Bibliografía

- Bajpai, P., 2012. En *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Bajpai, P. Ed., New York: Springer, pp. 349–373.
- Box M.J., 1965. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with others Methods, *Comput. J.*, 1, 42-52.
- European Commission, 2013. *Best Available Techniques: Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. Institute for Prospective Technological Studies, Seville.
- Montgomery, C., Runger, G.C., 2003. En: *Applied Statistics and probability for engineers*, 3<sup>a</sup> ed., New York: John Wiley & Sons-.
- Montgomery, D.C., 2005. New York, McGraw Hill Corporation.
- San José, M.J., Alvarez, S., López, L.B., Olazar, M., Bilbao, J., 2010a, *Drying 2010 (Vol B)*, 1242-1248.
- Olazar, M., San José, M.J., Alvarez, S., Morales, A., Bilbao, J., 2004. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 655-661.
- San José, M.J., Olazar, M., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., Bilbao, J., 1992. In *Fluidization VII*, New York, 381-388.
- San José, M.J., Alvarez, S., Ortiz de Salazar, A., Morales, A., Bilbao, J., 2010b. *Chem. Eng. Transactions*, 21, 145-150.
- San José, M.J., Alvarez, S., Peñas, F.J., García, I., 2013a. *Chem. Eng. Sci.*, 100, 413-420.
- San José, M.J., Alvarez, S., García, I., Peñas, F.J., 2013b. *Fuel*, 110, 178-184.
- San José, M.J., Alvarez, S., García, I., Peñas, F.J., 2014. *Chem. Eng. Res. Des.* 92(4), 672-678.