

# ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE FLOCULACIÓN DEL RÍO SALADO CON UN DISPOSITIVO JAR TEST

Leonardo Filippa<sup>1,2</sup>, Alfredo Trento<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

E-mail: leofi2004@yahoo.com.ar

## Introducción

El río Salado, en su tramo inferior (Santa Fe) transporta mayoritariamente sedimentos finos en suspensión, entre ellos limos finos y arcillas, los cuales junto a la salinidad natural de este río conforman un escenario propicio para la ocurrencia de floculación. La floculación de sedimentos finos es un fenómeno característico de numerosos ríos, estuarios y lagos que cambia considerablemente la dinámica del transporte de los sedimentos (Lick, 2009). El aumento en el tamaño medio del material suspendido, y el incremento en su densidad relativa producto de la agregación de partículas, modifican las velocidades de sedimentación de los sedimentos, parámetro fundamental en estudios de transporte (Droppo *et al.*, 1997; Ji, 2008). En este trabajo se presentan resultados sobre tamaños de agregados, tiempos de equilibrio y fracción floculada, determinados en pruebas de laboratorio con sedimentos suspendidos del río Salado en un equipo Jar Test.

## Objetivo

Estudiar bajo condiciones controladas la dinámica de floculación en el río Salado, con especial énfasis en la determinación de los tamaños de agregados y su relación con las variables hidro-sedimentológicas.

## Materiales y métodos

La tecnología Jar Test ha sido ampliamente utilizada por diversos autores en estudios de floculación por tensiones de corte (Logan & Kilps, 1994; Bouyer *et al.*, 2005; Mietta *et al.*, 2009), mecanismo predominante en cursos fluviales como el río Salado. El dispositivo utilizado en este trabajo posee capacidad para 4 jarras y velocidades de giro en el rango 10-300 rpm, que permite obtener valores del parámetro de disipación  $G$  entre 3 y 451  $s^{-1}$  (Nagata, 1975). Se empleó agua del río Salado con sedimentos suspendidos del mismo río. El  $pH$  del agua fue 7.5, la conductividad eléctrica 2.8 mS/cm y la concentración de sólidos disueltos totales ( $SDT$ ) de 2250 mg/L. La granulometría de los sedimentos suspendidos se determinó por difracción láser con un equipo Malvern Mastersizer 2000. Los porcentajes de arcillas y limos finos fueron del 11 % y 72 %, respectivamente, siendo la mediana de la distribución de diámetros ( $d_{50}$ ) igual a 7.3  $\mu m$ . Fueron implementados 4 valores de  $G$ : 15, 44, 75 y 100  $s^{-1}$  con concentración de sólidos suspendidos totales ( $S_w$ ) de 369 mg/L. La primera etapa de cada ensayo consistió en una agitación del agua a elevada velocidad,  $G=451 s^{-1}$ , durante 30 minutos de modo de garantizar uniformidad en las condiciones iniciales para todos los experimentos. En la segunda etapa se disminuyó gradualmente la agitación hasta el correspondiente valor de  $G$  (15, 44, 75 ó 100  $s^{-1}$ ) y luego se mantuvieron constantes las condiciones experimentales a lo largo de 4 horas. Durante este período se efectuaron un total de 18 extracciones de muestras, a intervalos de tiempo prefijados: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 200, 220 y 240 minutos, respectivamente. Las muestras fueron extraídas a 2 cm por debajo de la superficie del agua, con una jeringa y

manguera plásticas de 3 mm de sección. Las muestras (todas de un volumen  $V_T = 7$  mL) fueron ubicadas en cajas de petri para las posteriores determinaciones de tamaños de floculos y velocidades de sedimentación ( $W_s$ ). Las determinaciones de tamaños se realizaron mediante microscopía óptica en combinación con análisis de fotografías digitales. El microscopio, de la serie Boeco 2000, fue empleado con un aumento de 40X y la cámara digital, Sony Cibershot DSC-T20 de 8MP, con aumento de 2.7X, permitiendo un tamaño mínimo observable de 0.26  $\mu m$ . Las fotografías fueron procesadas con el software ImageJ (Kumar *et al.*, 2010) en combinación con Matlab<sup>®</sup> R2008b, de los cuales se obtuvo la distribución de tamaños de floculos para cada muestra extraída. Se adoptó a la mediana de la distribución de floculos ( $df_{50}$ ) como diámetro representativo de los floculos correspondientes a cada muestra. Las determinaciones del software ImageJ fueron previamente calibradas en base a imágenes artificiales con tamaños de partículas prefijados, y a partir de fotografías de micro-esferas de vidrio (Whitehouse Sci.) de tamaños conocidos. Las velocidades de sedimentación fueron medidas en un tubo de sedimentación de vidrio de 1 L, mediante observación del tiempo de caída de los agregados. La tercera etapa de los experimentos consistió en el cálculo de las propiedades físicas de los agregados. El tiempo de equilibrio de floculación para cada ensayo ( $T_{eq}$ ), fue determinado como el tiempo para el cual los  $df_{50}$  se estabilizaron. La densidad diferencial de los agregados ( $\Delta\rho_f$ ) se calculó según la ecuación de Stokes corregida por efectos inerciales (Kumar *et al.*, 2010):

$$\Delta\rho_f = \frac{18\nu W_s \rho_w}{\zeta g d_f^2} \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{W_s d_f}{\nu} \right)^{0.687} \right] \quad [1]$$

La dimensión fractal ( $n_f$ ) según la ecuación de Kranenburg (1994):  $n_f = 3 + \ln(\Delta\rho_f / \Delta\rho_s) / \ln(d_f / d_p)$ . Siendo  $d_p$  el diámetro mediano de las partículas individuales y  $\Delta\rho_s$  la densidad diferencial de los sedimentos. La fracción floculada ( $f$ ) se calculó a partir de una adaptación de la metodología propuesta por Fox, *et al.* (2004):

$$f = \frac{Sfloc_w}{S_w} \quad [2]$$

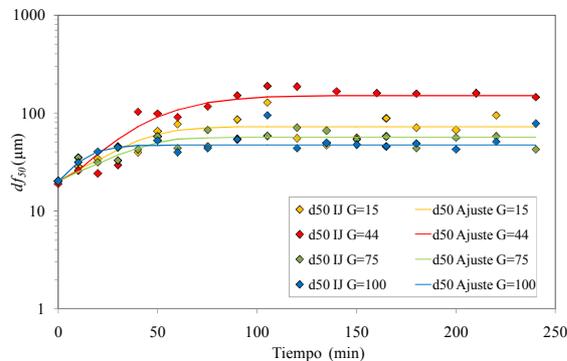
Siendo  $Sfloc_w$  la concentración de floculos en suspensión, definida como:  $Sfloc_w = \sum M_f / V_T$ . Con  $M_f$  la masa de cada floculo, calculada según:

$$M_f = \frac{1}{6} \pi d_f^3 \rho_f \quad [3]$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad del floculo considerado. Para cada muestra extraída se disponía de una determinación de  $W_s$  que fue asociada al diámetro máximo en la muestra ( $df_{max}$ ). Luego para cada par de valores ( $df_{max}$ ,  $W_s$ ) fueron calculadas la correspondientes  $\Delta\rho_f$ ,  $\rho_f$  y  $n_f$  (Ecuaciones 1 y 2). La ecuación (3) plantea la necesidad de conocer la  $\rho_f$  relacionada a cada  $d_f$  presente en las imágenes; no obstante sólo se disponía de valores de  $\Delta\rho_f$  para los  $df_{max}$ . Luego fueron establecidas correlaciones entre los  $df_{max}$  y las  $n_f$  y de este modo fue posible asociar una  $n_f$  a cada  $d_f$  presente en las fotos. Finalmente, empleando la ecuación de Kranenburg se pudieron obtener las correspondientes  $\Delta\rho_f$  y  $\rho_f$ .

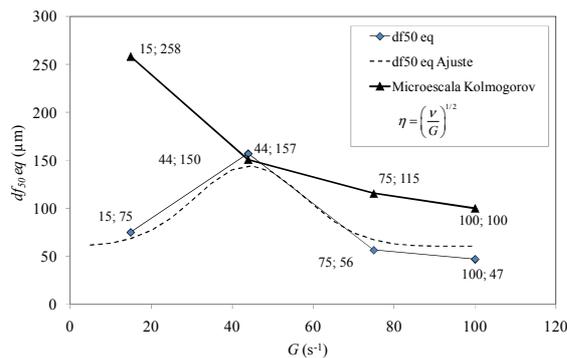
### Evaluación de Resultados

**Diámetros de equilibrio y tiempos de equilibrio:** en la Figura 1 se presenta la evolución temporal del  $df_{50}$  para  $G = 15, 44, 75$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente; con  $Sw=369 \text{ mg/L}$  y  $SDT=2250 \text{ mg/L}$ .



**Figura 1.-** Diámetro de flóculos vs. tiempo para  $G = 15, 44, 75, 100 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

Se observa que los mayores tamaños se obtuvieron para  $G=44 \text{ s}^{-1}$ , seguidos por los tamaños correspondientes a  $G = 15, 75$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ . En la Figura 2 se presentan los  $df_{50}$  de equilibrio en función de  $G$  graficados junto a la microescala de Kolmogorov.

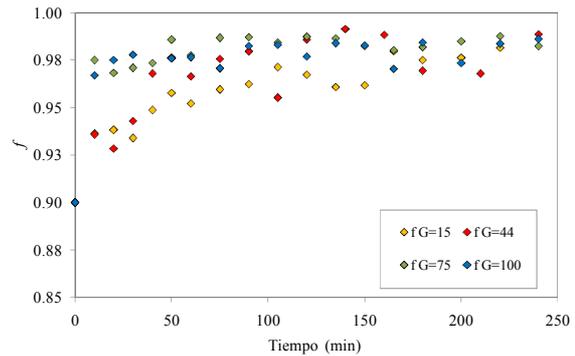


**Figura 2.-** Diámetros de equilibrio vs  $G$  y Microescala de Kolmogorov.

Los  $df_{50}$  de equilibrio mostraron un comportamiento aproximadamente gaussiano, presentando un incremento en el diámetro de agregados hasta  $G$  aproximadamente  $44 \text{ s}^{-1}$ , decayendo luego. Los diámetros de equilibrio fueron:  $157, 75, 56$  y  $47 \mu\text{m}$  para  $G = 44, 15, 75$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. La microescala de Kolmogorov, representativa del tamaño de los menores remolinos producidos por la turbulencia dentro de las jarras, resultó en todos los casos mayor o del mismo orden que los diámetros de equilibrio. Los tiempos de equilibrio fueron de  $90, 100, 75$  y  $50$  minutos para  $G = 15, 44, 75$  y  $100 \text{ s}^{-1}$ , en ese orden. En general, cuanto mayor fue la turbulencia, más rápidamente se alcanzó el estado de equilibrio.

**Velocidades de sedimentación:** las  $W_s$  de los flóculos se ubicaron en el rango de  $0.7$  a  $3.9 \text{ mm/s}$ . Comparadas con  $W_s = 0.05 \text{ mm/s}$  asociada al  $d_{50}$  de las partículas individuales (calculada con la ecuación de Stokes), las  $W_s$  de los flóculos resultaron de  $1$  a  $2$  órdenes de magnitud mayores.

**Fracción floculada:** La evolución temporal de la fracción floculada para las diferentes condiciones de turbulencia se muestra en la Figura 3. Se observa que para  $G = 100$  y  $75 \text{ s}^{-1}$ , la fracción floculada de equilibrio se alcanzó más rápidamente. Sin embargo, la  $f$  de equilibrio fue en todos los casos aproximadamente  $0.98-0.99$ .



**Figura 3.-** Evolución temporal de la fracción floculada para las diferentes condiciones de turbulencia.

### Conclusiones

A partir de los tamaños de equilibrio obtenidos:  $157, 75, 56$  y  $47 \mu\text{m}$  se puede observar la variabilidad que éstos pueden presentar en el río ante cambios en las condiciones de turbulencia, bajo las condiciones de  $Sw$  y  $SDT$  aquí evaluadas.

La fracción floculada de equilibrio, bajo las condiciones experimentales analizadas, tiende hacia un valor constante de aproximadamente  $0.98$ . Esto indicaría su no dependencia respecto de la turbulencia.

Nuevos ensayos, bajo otras condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas, deberán realizarse para lograr una comprensión más general del grado de dependencia de los tamaños de agregados y de la fracción floculada con  $G, Sw$  y  $SDT$ .

### Referencias Bibliográficas

**Bouyer, D., Coufort, C., Line, A. & Zdravka, D.** (2005): "Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 292, pp. 413-428.

**Droppo, I., Leppard, G., Flannigan, D., Liss, S.** (1997): "The freshwater floc: a functional relationship of water and organic and inorganic floc constituents affecting suspended sediment properties", *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 99, pp. 43-54.

**Fox, J., Hill, P., Milligan, T., Ogston, A., Boldrin, A.** (2004): "Floc fraction in the waters of the Po River Delta", *Continental Shelf Research*, Vol. 24, pp. 1699-1715.

**Ji, Z.H.** (2008): *Hydrodynamics and water quality*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, US.

**Kranenburg, C.** (1994): "The fractal structure of cohesive sediment aggregates", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 39, pp. 451-460.

**Kumar, R., Strom, K., Keyvani, A.** (2010): "Floc properties and settling velocity of San Jacinto estuary mud under variable shear and salinity conditions", *Continental Shelf Research*, Vol. 30, pp. 2067-2081.

**Lick, W.** (2009): *Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters*. Boca Raton, US: CRC Press.

**Logan, B., Kilps, J.** (1994): "Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments", *Water Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 443-453.

**Mietta, F., Chassagne, C. & Winterwerp, J.** (2009): "Shear-induced flocculation of a suspension of kaolinite as function of pH and salt concentration", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 336, pp. 134-141.

**Nagata, S.** (1975): *Mixing: Principles and Applications*. Halsted Press Wiley, Chichester.