



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

Leonardo Filippa^{1,2}, Alfredo Trento¹

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

CC 217, (3000) Santa Fe, Argentina

E-mail: leofi2004@yahoo.com.ar

RESUMEN

La fragilidad de los flóculos originados en ambientes naturales, como el río Salado, dificulta el estudio de sus propiedades in-situ; luego resulta necesaria la aplicación de metodologías de laboratorio que complementen las mediciones de campo de manera de lograr una comprensión integral del fenómeno de floculación.

En este trabajo se presentan resultados sobre tamaños de agregados, velocidades de sedimentación y fracción floculada, determinados en pruebas de laboratorio con sedimentos suspendidos del río Salado. Los ensayos se realizaron en jarras de floculación (Jar Test), bajo diferentes condiciones de turbulencia, concentraciones de sólidos suspendidos totales y salinidad.

Los diámetros de equilibrio obtenidos: 157, 75, 56 y 47 μm , muestran la variabilidad que los tamaños de flóculos y, consecuentemente, las velocidades de sedimentación pueden presentar ante cambios en las condiciones de turbulencia, bajo las condiciones de concentración y salinidad evaluadas. La escala espacial estimada del proceso de sedimentación en la dirección del escurrimiento, con los diámetros y las velocidades de sedimentación determinadas en los ensayos, fue de un orden de magnitud menor para un escenario con floculación en comparación con un escenario sin floculación. La fracción floculada no mostró sensibilidad a las condiciones de turbulencia, con valores promedio dentro del rango 0.97-0.99.

ABSTRACT

The fragility of flocs originating in natural environments, such as the Salado River, makes the in situ study of their properties to be difficult; hence it turns necessary to implement laboratory methodologies which complement field measurements in order to reach an integral comprehension on the flocculation phenomena.

In this work, results of aggregate sizes, fall velocities and floc fraction, are presented. They were determined in laboratory tests using suspended sediments from the Salado River. The tests were performed with a Jar Test instrument under different turbulence conditions, total suspended solid concentrations and salinity.

The equilibrium diameters obtained: 157, 75, 56 y 47 μm , show the variability that floc sizes and hence fall velocities may present because of changes in turbulence conditions, under the evaluated concentrations and salinity. The estimated length scale of the sedimentation process in the flow direction, using the diameters and fall velocities determined in the tests, was an order of magnitude lower for a scenery presenting flocculation when comparing with another one not presenting flocculation. The floc fraction did not show sensibility to the turbulence conditions, with averages values in the 0.97-0.99 range.

INTRODUCCIÓN

El río Salado, en su tramo inferior (Santa Fe), presenta características de río de llanura, se caracteriza por la meandrosidad de su cauce, por sus albardones bien definidos en sus orillas y por la amplitud de sus planicies de inundación. Posee un caudal módulo de $137 \text{ m}^3/\text{s}$ (SSRH, 2009), un ancho medio de 80 m y planicies de inundación de hasta 5 km de extensión. El cauce transporta mayoritariamente sedimentos finos en suspensión, entre ellos limos finos y arcillas, en un rango de concentraciones de 50 a 1000 mg/L, variable según el estado hidrométrico. Su salinidad puede variar entre los 1000 y 7000 mg/L, también como función de la altura y el caudal del río.

El tipo de sedimentos transportados junto a la salinidad natural de este río conforman un ambiente 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 la variación en su densidad relativa producto de la agregación de partículas, modifican las velocidades de sedimentación, parámetro fundamental en estudios de transporte (Droppo *et. al*, 1997; Ji, 2008). La fragilidad de los flóculos originados en ambientes naturales, dificulta el estudio de sus propiedades in-situ, luego resulta necesaria la aplicación de metodologías de laboratorio que complementen las mediciones de campo de manera de lograr una comprensión integral del fenómeno de floculación. Los mecanismos de floculación posibles en ambientes naturales pueden ser: el movimiento Browniano, la floculación por tensiones de corte y la sedimentación diferencial. En cursos fluviales como el río Salado el mecanismo predominante es el de tensiones de corte turbulentas, donde la turbulencia se caracteriza mediante el parámetro de disipación G .

El objetivo del trabajo es 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.

Se utilizará la tecnología de jarras de floculación, con agua y sedimentos del río Salado bajo diferentes condiciones de turbulencia, concentraciones de sedimentos suspendidos y salinidad. Esta tecnología 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), con resultados ampliamente validados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El dispositivo Jar Test utilizado (Figura 1) posee capacidad para 4 jarras y velocidades de giro en el rango de 10 a 300 rpm. Estas velocidades permiten obtener valores de G entre 3 y 451 s^{-1} (Nagata, 1975), y números de Reynolds de 900 a 27000.

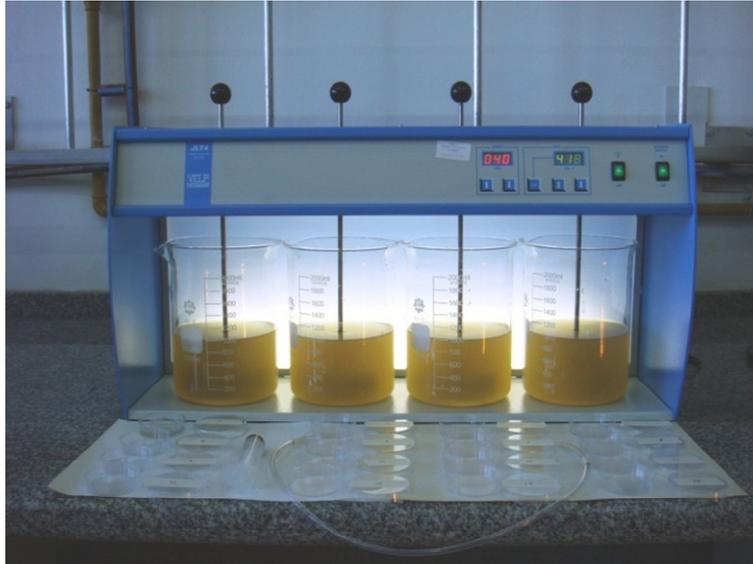


Figura 1.- Imagen dispositivo Jar Test y accesorios para extracción de muestras: cajas de Petri, jeringa plástica y manguera.

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 (Figura 2) 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_{50p}) igual a 7.3 μm .

Fueron implementados 4 valores de G : 15, 44, 75 y 100 s^{-1} . Los números de Reynolds fueron de: 2660, 5500, 7980 y 9730, respectivamente. La concentración de sólidos suspendidos totales (S_w) fue de 369 mg/L.

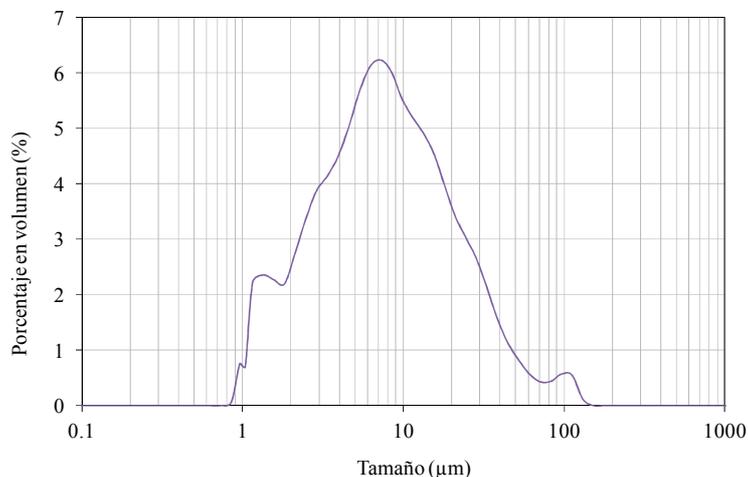


Figura 2.- Curva granulométrica correspondiente a los sedimentos suspendidos en el agua empleada en los ensayos.

La primera etapa de cada ensayo consistió en el llenado de las jarras con un 1 L de agua de río, seguido por una agitación a elevada velocidad, $G=451 \text{ s}^{-1}$, durante 30 minutos de modo de garantizar uniformidad en las condiciones iniciales para todos los experimentos.

En la segunda etapa se disminuyó gradualmente la velocidad del equipo 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; siendo mayor la frecuencia

de muestreo durante los primera hora donde se espera ocurra el mayor gradiente de crecimiento de tamaños. 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, amplitud que garantiza la no ruptura de los flóculos durante las extracciones. Las muestras (todas de un volumen $V_T = 7 \pm 0.5$ mL) fueron ubicadas en cajas de Petri para las posteriores determinaciones de tamaños de flóculos 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 $0.26 \mu\text{m}$. Fueron tomadas 5 fotografías por cada muestra. Las fotografías (ver Figura 3) fueron procesadas con el software ImageJ (Kumar et al., 2010) en combinación con Matlab[®] R2008b, de los cuales se obtuvo la distribución de tamaños de flóculos para cada muestra extraída. Se adoptó a la mediana de la distribución de flóculos (df_{50}) como diámetro representativo de los flóculos correspondientes a cada muestra. Las determinaciones del software ImageJ fueron previamente calibradas en base a imágenes artificiales con tamaños de partículas prefijados generadas en Corel Draw 12[®]; y a partir de fotografías de micro-esferas de vidrio (Whitehouse Sci.) de tamaños en los rangos $25\text{-}32 \mu\text{m}$ y $72\text{-}90 \mu\text{m}$.

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 flóculos. 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):

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

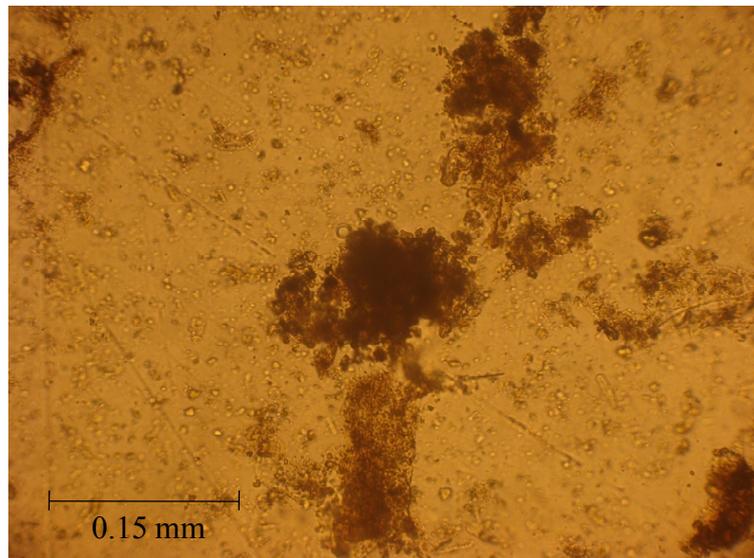


Figura 3.- Imagen flóculos para $G = 24 \text{ s}^{-1}$, $t = 180 \text{ min}$.

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 1 de las 3 metodologías presentadas por Fox, *et al.* (2004):

$$f = \frac{S_{floc_w}}{S_w} \quad (2)$$

Siendo S_{floc_w} la concentración de flóculos en suspensión, definida como: $S_{floc_w} = \Sigma M_f / V_T$. Con M_f la masa de cada flóculo, calculada según:

$$M_f = \frac{1}{6} \pi d_f^3 \rho_f \quad (3)$$

Donde ρ_f es la densidad del flóculo 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 $\Delta\rho_f$, ρ_f y n_f (Ecuaciones 1 y 2). La ecuación (3) plantea la necesidad de conocer la ρ_f relacionada a cada df 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 df presente en las fotos. Finalmente, empleando la ecuación de Kranenburg se pudieron obtener las correspondientes $\Delta\rho_f$ y ρ_f .

RESULTADOS

Diámetros de equilibrio y tiempos de equilibrio:

En la Figura 4 se presenta la evolución temporal del df_{50} para $G = 15, 44, 75$ y 100 s^{-1} , respectivamente; con $S_w=369 \text{ mg/L}$ y $SDT=2250 \text{ mg/L}$. 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 s^{-1} .

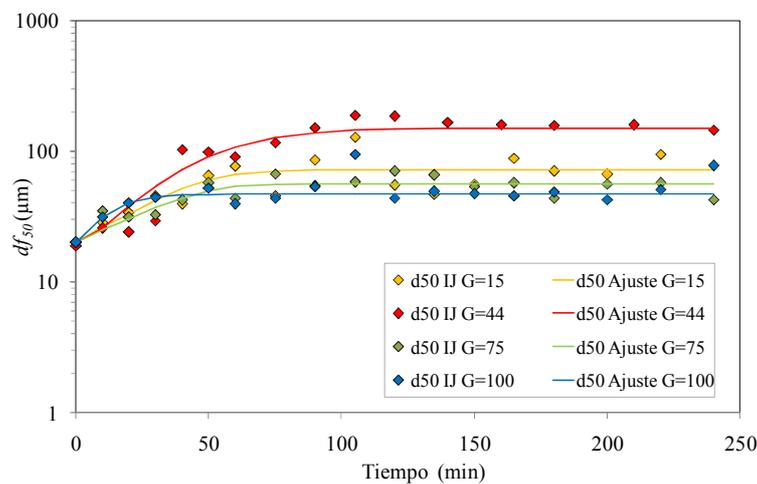


Figura 4.- Diámetro de flóculos vs. tiempo para $G = 15, 44, 75, 100 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

En la Figura 5 se presentan los df_{50} de equilibrio en función de G , graficados junto a la microescala de Kolmogorov, η . Los df_{50} de equilibrio mostraron un comportamiento aproximadamente gaussiano, presentando un incremento en el diámetro de agregados hasta G aproximadamente 44 s^{-1} , decayendo luego. Los diámetros de equilibrio para $G = 44, 15, 75$ y 100 s^{-1} fueron: $157, 75, 56$ y 47 µm ; con coeficientes de variación de $0.12, 0.53, 0.16$ y 0.29 , respectivamente. La microescala de Kolmogorov calculada según la ecuación (4) representa el tamaño de los menores remolinos producidos por la turbulencia dentro de las jarras.

$$\eta = \left(\frac{\nu}{G} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Siendo ν la viscosidad cinemática del agua.

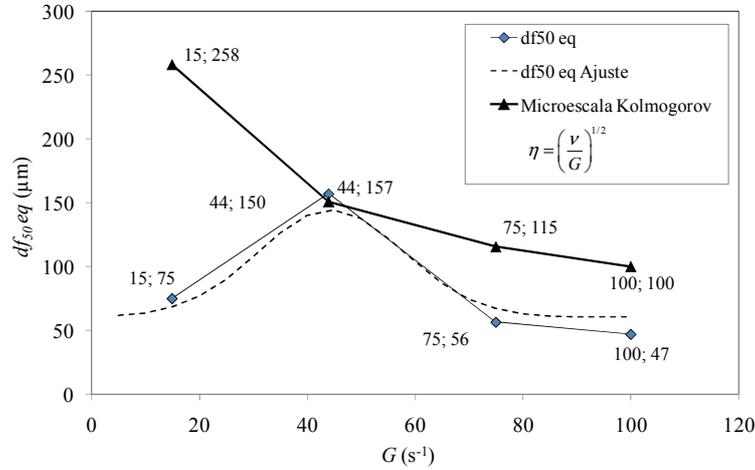


Figura 5.- Diámetros de equilibrio vs G y Microescala de Kolmogorov.

Los valores de η resultaron en todos los casos mayores 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 s^{-1} , en ese orden. En general, cuanto mayor fue la turbulencia, más rápidamente se alcanzó el estado de equilibrio.

Velocidades de sedimentación:

Las velocidades de sedimentación de los flóculos se ubicaron en el rango de 0.7 a 3.9 mm/s, y presentaron una elevada dispersión. No se observó relación clara entre las W_s y las condiciones de turbulencia G . La W_{sp} asociada a las partículas individuales, no floculadas, fue aproximada a partir de la ecuación de Stokes (5), asumiendo un diámetro igual al d_{50p} (7.3 μm) de las partículas individuales obtenido con Malvern.

$$W_{sp} = \frac{2}{9} \left(\frac{d_{50p}}{2} \right)^2 \frac{g(\rho_p - \rho_w)}{\mu} \quad (5)$$

Con ρ_p y ρ_w la densidad de las partículas y el agua, respectivamente; μ la viscosidad dinámica del agua y g la aceleración de la gravedad. Se obtuvo un valor de $W_{sp} = 0.05 \text{ mm/s}$, la cual es de 1 a 2 órdenes de magnitud menor a las W_s asociadas a los flóculos.

A partir de las W_s y W_{sp} se puede realizar una comparación aproximada de las escalas espaciales del proceso de sedimentación para escenarios sin floculación y con floculación en un tramo del río Salado. Asumiendo que la escala de tiempo de sedimentación de una partícula o flóculo de diámetro d , se puede aproximar mediante $t = h/W$, siendo h la altura del río y W la velocidad de sedimentación de la partícula o flóculo considerado; luego la escala espacial del proceso de sedimentación en la dirección del escurrimiento estará dada por $L = Ut$, donde U representa la velocidad media del escurrimiento. Al aplicar la ecuación de escala con $d_{50p} = 7.3 \text{ μm}$, $d_{f50} = 50 \text{ μm}$, $W_{sf} = 0.7 \text{ mm/s}$, $W_{sp} = 0.05 \text{ mm/s}$ y $U = 0.1 \text{ m/s}$ (velocidad representativa para aguas bajas en el río Salado); se tiene que L será de 1900 m para un

escenario sin floculación, mientras que para un escenario con ocurrencia de floculación L será de 157 m.

Fracción floculada:

La evolución temporal de la fracción floculada, calculada según la ecuación (2) para las diferentes condiciones de turbulencia se muestra en la Figura 6.

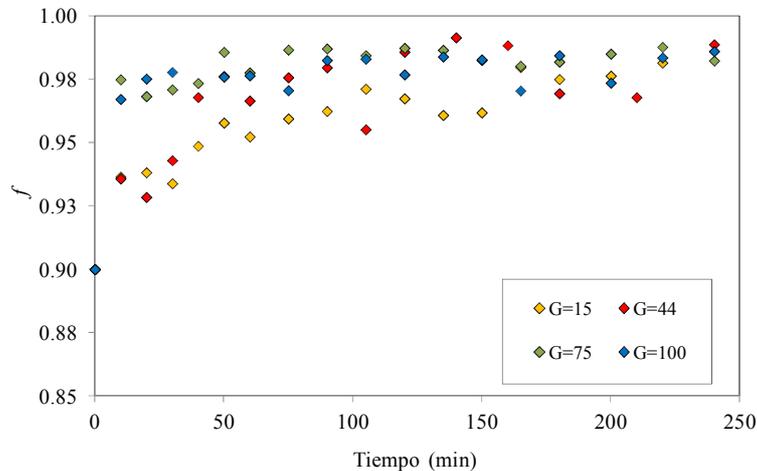


Figura 6.- Evolución temporal de la fracción floculada para las diferentes condiciones de turbulencia.

Se observa que para $G = 100$ y 75 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.

CONCLUSIONES

A partir de los tamaños de equilibrio obtenidos: 157, 75, 56 y 47 μm se puede observar la variabilidad que éstos, y consecuentemente las velocidades de sedimentación, pueden presentar en el río ante cambios en las condiciones de turbulencia, bajo las condiciones de S_w y SDT aquí evaluadas.

La escala espacial estimada del proceso de sedimentación en la dirección del escurrimiento, muestra el impacto que la floculación puede generar en el transporte de sedimentos, siendo L un orden de magnitud mayor para un escenario hipotético sin floculación.

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, de las velocidades de sedimentación y de la fracción floculada con G , S_w y SDT .

En próximos ensayos el número de fotografías tomadas para la determinación de tamaños deberá ser mayor para incrementar el nivel de precisión en los tamaños estimados.

Agradecimientos. Este trabajo fue realizado en el marco de los Proyectos CAI+D 2009 PI 38-194 subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y PICT 35885 subsidiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina y la UNL.

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*, CRC Press, Boca Raton, US.
- 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.
- SSRH** (2009): Subsecretaría de Recursos Hídricos, Estadística Hidrológica de la República Argentina, Presidencia de la Nación, Rep. Argentina.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



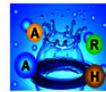
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRÁULICA

