

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULACION EN UN FLOCULADOR DE DISCO

EXPERIMENTAL RESULTS AND SIMULATION IN A DISK FLOCCULATOR

Alfredo E. Trento^a

^a*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217, (3000)
Santa Fe, Argentina. alfredotrento@gmail.com*

Palabras clave: flóculos, disco, partículas.

Resumen. Se presentan resultados de la implementación de un modelo de partículas para simular el proceso de formación de agregados en un floculador de disco, a partir de sedimentos suspendidos. El modelo calcula la variación temporal de los tamaños medios de los agregados hasta alcanzar el tiempo de equilibrio. La masa de sedimentos se representa por una determinada cantidad de partículas, que se mueven gobernadas por la difusión y la velocidad de caída de los agregados los cuales se producen por el mecanismo de sedimentación diferencial. El modelo emplea un algoritmo empírico para calcular la velocidad de caída y adopta una densidad diferencial resultante de los experimentos de laboratorio. Estos ensayos se realizaron con sedimentos (98% de arcillas y limos) del estuario del río Paraíba do Sul (Brasil). Con esos sedimentos se prepararon en el floculador concentraciones de 100, 200 y 335 mg/l, tanto en agua destilada como en agua del estuario. Se determinaron los tamaños de aproximadamente 14000 flóculos y la densidad de 300 flóculos. Los tamaños medios de los agregados obtenidos en los ensayos con agua destilada estuvieron en el rango 91 a 104 micrones y con agua salada entre 95 y 147 micrones para las tres concentraciones respectivamente, los cuales resultan una representación aceptable.

Keywords: flocs, disk, particles.

Abstract. The results of the implementation of a particle model to simulate the process of formation of aggregates in a disk flocculator, from suspended sediments are presented. The model calculates the temporal variation of the average sizes of the aggregates until reaching the time of equilibrium. The mass of sediments is represented by a certain amount of particles, which move governed by the diffusion and the settling velocity of the aggregates, which are produced by the differential sedimentation mechanism. The model uses an empirical algorithm to calculate the settling velocity of the aggregates and adopts a differential density obtained from the laboratory experiments. These test were carried out with sediments (98% clay and silts) from the estuary of the Paraíba do Sul River (Brazil). Concentrations of 100, 200 and 335 mg/l were prepared in the flocculator with these sediments, both in distilled water and estuary water. The sizes of approximately 14,000 flocs and the density of 300 flocs was determined. The average sizes of the aggregates obtained in the tests with distilled water were in the range 91 to 104 microns and those with salt water between 95 to 147 microns for the three concentrations respectively, which are an acceptable representation.

1 INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos en los estuarios y cursos inferiores tiene la propiedad de cambiar continuamente la configuración del lecho y las márgenes, produciendo entonces un problema para la navegación comercial de esos cuerpos de agua. En general, una proporción sustancial de los sedimentos suspendidos que llega a los estuarios son finos, constituidos por arcillas (partículas menores a $2\ \mu\text{m}$) y limos (entre 2 y $63\ \mu\text{m}$). Debido a las propiedades físico-químicas de los sedimentos finos, más, poseen la capacidad de agregarse y formar flóculos, que contienen miles de partículas orgánicas e inorgánicas de distintos tamaños y por lo tanto presentan propiedades diferentes a las de las partículas que los componen. Mientras los sedimentos no cohesivos, como por ejemplo las arenas, siguen la ley de Stokes en cuanto al cálculo de la velocidad terminal de caída, W_s , los flóculos no satisfacen las hipótesis básicas de esa ley, pues se mueven verticalmente con números de Reynolds mayor a 1 y no son esféricos. Los flóculos pueden sedimentar con velocidades W_s sustancialmente mayores que sus partículas primarias, y por lo tanto su determinación es muy importante para predecir la tasa de sedimentación en vías navegables, puertos, embalses y estuarios. En zonas costeras y ríos, la turbulencia del escurrimiento puede producir agregación debido a las colisiones entre partículas suspendidas. Mientras que en la zona exterior de los estuarios y en lagos, todos ambientes caracterizados por una muy baja intensidad de la turbulencia, ocurren condiciones propicias para la agregación por sedimentación diferencial. En este proceso los flóculos se forman a medida que las partículas de mayor tamaño y velocidad sedimentan y en su descenso van capturando otras menores, produciendo agregados que finalmente se depositan en el lecho, pudiendo resuspenderse cuando aumenta la turbulencia por cambios en las condiciones hidroambientales. La dinámica de la floculación diferencial ha sido estudiado por [Stolzenbach y Elimelech \(1994\)](#) a partir de análisis teóricos, otros autores emplearon dispositivos experimentales como columnas de sedimentación, por ejemplo: [Gustafsson et al. \(2000\)](#) y [Curran et al. \(2003\)](#). Otros, como [Lick et al. \(1993\)](#), [Huang \(1994\)](#), [Logan y Kilps \(1995\)](#), estudiaron la sedimentación diferencial mediante ensayos en laboratorio con floculadores de disco, los cuales están formados por dos placas circulares concéntricas paralelas, separados por pocos centímetros, que forman un volumen para la mezcla agua-sedimentos. El disco se mueve a bajas revoluciones accionado por un motor de baja potencia, de modo tal que la turbulencia sea despreciable y por lo tanto los sedimentos se mueven en forma semejante a la de un tubo de sedimentación vertical de longitud infinita. Una vez suministrados los sedimentos al interior del floculador ocurre un proceso transitorio inicial de pocos minutos, luego del cual los sedimentos siguen el movimiento del disco, formando flóculos por sedimentación diferencial, hasta alcanzar un estado de equilibrio, donde se alcanza un diámetro de flóculos estacionario o de equilibrio, d_{fe} , para un tiempo de ensayo t_e . La velocidad angular pequeña es fundamental para que la fuerza centrífuga sea reducida y por lo tanto se minimice el efecto de pared, de modo tal que la floculación ocurra principalmente por colisión sólo entre partículas y no entre las partículas y la pared del disco. De este modo, es posible realizar ensayos de sedimentación diferencial en laboratorio, sin ocupar grandes espacios y a costos relativamente bajos.

Durante muchos años existió en la comunidad científica un consenso bastante generalizado en que los sedimentos cohesivos transportados por el agua dulce de los ríos tendía a flocular a medida que penetraban en las aguas salinas de los estuarios ([Edzwald et al., 1974](#); [Mehta y Parteniades, 1975](#)). En [Van Rijn \(1993\)](#) se ofrece una síntesis de resultados obtenidos por Krone, Allersma y Owen en cuanto a la relación positiva entre la salinidad y la velocidad de sedimentación. A pesar de estos argumentos que sustentaban la hipótesis del control de la

floculación por la salinidad, algunos investigadores la cuestionaron, por ejemplo [Gibbs \(1983\)](#), [Van Leussen \(1999\)](#), [Thill et al. \(2001\)](#), [Fox et al. \(2004\)](#) entre otros.

El objetivo de este trabajo es lograr una representación de los tamaños medios de equilibrio de los agregados, d_{fe} , y el tiempo correspondiente de equilibrio, t_e , obtenidos con un modelo de partículas, en base a resultados de experimentos efectuados con un floculador de disco con diferentes concentraciones de sedimentos, en agua salada y dulce.

2 METODOLOGIA

2.1 Descripción del floculador de disco

El floculador se construyó con dos discos paralelos de acrílico transparente de 50 cm de diámetro, separados 30 mm por una faja perimetral circular del mismo material, que le permitió contener un volumen de 6500 cm³ de suspensión ([Figura 1](#)). El movimiento lo facilitó un motor eléctrico de 30 W mediante una correa de transmisión en el eje del disco. Los experimentos consistieron en someter a la mezcla agua-sedimentos a un movimiento rotacional semejante al de un cuerpo rígido, libre de tensiones de corte en el fluido. Los ensayos se realizaron con diferentes concentraciones de sedimentos en agua salada y en agua dulce, según se muestra en la [Tabla 1](#). Para ello el disco giró a una velocidad angular ω constante de 2 rpm. Los sedimentos fueron suministrados al disco por una válvula en 5 segundos aproximadamente. Todos los experimentos se realizaron a una temperatura del agua constante y pH=6.5. Las otras variables de los experimentos se indican en la [Tabla 1](#), siendo C la concentración de sedimentos, S la salinidad, T la temperatura del agua, CE la conductividad específica. En cada muestreo se detuvo el motor por un lapso de tiempo no mayor a 45 s. Las muestras fueron inmediatamente observadas en un microscopio de 30 aumentos y fotografiadas con una máquina digital Nikon Coolpix 4500, con una resolución de 5 micrones por pixel. Todo el procedimiento de detalle está documentado en [Trento y Vinzón \(2014\)](#). Se preparó una muestra patrón con sedimentos finos del lecho del estuario del río Paraíba do Sul (Brasil), se secaron a estufa a 105 °C, se tamizaron con el tamiz 230, el sedimento pasante se homogeneizó y se determinó su granulometría mediante difracción laser con un equipo Malvern. El diámetro d_{50} (correspondiente a la mediana, diámetro para el cual es más fina la mitad de la muestra) fue 16.8 μm , con el 10% correspondiente a las arcillas (hasta 2 μm), el 88.1 % a los limos (2 a 62 μm) y una fracción menor al 2% a las arenas finas. La toma de muestras se realizó a intervalos predeterminados, en volúmenes de aproximadamente 3 cm³.



Figura 1: Floculador de disco accionado por un motor.

C mg l ⁻¹	S psu	T °C	CE μS cm ⁻¹
100	0.0	25.6	22.9
200	0.0	25.5	31.8
335	0.0	25.3	38.2
100	31.0	25.9	47500
200	32.6	25.5	49500
335	29.8	26.1	45800

Tabla 1: Variables empleadas en los experimentos.

2.2 Descripción del modelo de partículas

La ecuación básica empleada es 2D integrada en la transversal para la mezcla agua-sedimentos girando en el disco, Ec. (1):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + (W - W_s) \frac{\partial C}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

con C la concentración media de sedimentos suspendidos en la vertical, U y W las velocidades medias en la dirección horizontal x y vertical z , respectivamente, D_z el coeficiente de dispersión en la dirección vertical, t el tiempo y W_s la velocidad media de sedimentación de los flóculos. El modelo empleado para resolver la ecuación de transporte (1) emplea el esquema numérico Lagrangiano, Random Walk Particle Tracking (RWPT) (Dimou y Adams, 1993). La teoría del método de trayectoria de partículas está basada sobre la analogía entre la ecuación de Fokker-Planck y la ecuación de advección-difusión (Jin, 1993). De acuerdo con el método, la posición de cada partícula en el sistema coordenado cartesiano con origen en el centro del floculador, está representada por el vector $X(t)$. El movimiento aleatorio de cada partícula esta descrita por la ecuación no lineal de Langevin (2) (Dimou and Adams, 1993):

$$\frac{dX}{dt} = A(X, t) + B(X, t) \xi(t) \quad (2)$$

en la cual $A(X, t)$ es el vector que representa la componente determinística del movimiento, la variable $B(X, t)$ es el tensor que caracteriza la componente aleatoria, y $\xi(t)$ es el vector compuesto por números aleatorios. Luego, por la analogía citada, puede obtenerse para la ecuación bidimensional el desplazamiento en la dirección vertical, según la Ec. (3):

$$\Delta z = (W - W_s) \Delta t + Z \sqrt{2D_z \Delta t} \quad (3)$$

con Z un número aleatorio independiente. El primer término de la derecha representa el desplazamiento determinístico y el segundo el aleatorio. Mientras que el desplazamiento horizontal de cada partícula en el intervalo temporal Δt es $\Delta x = U \Delta t$. La distancia radial r de cada partícula se calcula de modo convencional, $r = (\Delta x^2 + \Delta z^2)^{0.50}$, y con la velocidad angular constante, se determinan las componentes de velocidad U y W en cada punto. Se adoptó $D_z = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, el cual es un valor típico para condiciones ambientales semejantes (Thomann y Mueller, 1987).

Para calcular W_s se empleó el algoritmo empírico de Farley and Morel (1986), elaborado en base a ensayos en columnas de sedimentación, que plantea la siguiente Ec. (4) para la derivada sustancial de C :

$$\frac{dC}{dt} = -B_{ds} C^{2.3} - B_{sh} C^{1.9} - B_b C^{1.3} \quad (4)$$

En las hipótesis del algoritmo se consideran los siguientes mecanismos para la floculación de sedimentos: la sedimentación diferencial, el movimiento Browniano y las tensiones de corte turbulentas. En este trabajo solo se tendrá en cuenta el primero, considerándose despreciables los restantes. El algoritmo asume que todos los sedimentos están floculados. Las variables B_{ds} , B_{sh} y B_b son relaciones funcionales que representan cada mecanismo de floculación, sedimentación diferencial, turbulencia y el movimiento Browniano respectivamente. La implementación del algoritmo para estuarios está detallada en Hayter y Pakala (1989). En este trabajo se describe sólo la expresión para B_{ds} en las Ec. (5) y (6):

$$B_{ds} = 3.12(S/h)^{-0.32} \rho_p^{-1.3} (\alpha_b K_b)^{0.17} (\alpha_{ds} K_{ds})^{1.15} \quad (5)$$

$$S/h = (1/6\pi^2)^{0.33} (g/3\nu h) \Delta\rho_f / \rho_w \quad (6)$$

en la Ec. (5), S/h es un parámetro adimensional para la sedimentación según la ley de Stokes, Ec. (6), donde $\Delta\rho_f = \rho_f - \rho_w$ es la densidad diferencial de los flóculos y h es la profundidad de la columna de agua verticalmente homogénea, escalada como parámetro en función de ω , del radio medio del disco y de una W_s media de referencia según ensayos de laboratorio, de 0.0001 mm/s.

$$K_b = 2kT/(3\mu) \quad (7)$$

$$K_{ds} = (6/\pi)^{1/3} g/(12\nu) \Delta\rho_f / \rho_w \quad (8)$$

K_b y K_{ds} son parámetros dimensionales para las funciones de frecuencia de colisión del

movimiento Browniano y la sedimentación diferencial, Ec. (7) y (8) respectivamente, g es la aceleración gravitacional, T es la temperatura absoluta, k es la constante de Boltzmann, μ y ν son las viscosidades dinámica y cinemática del fluido, respectivamente, ρ_f es la densidad de los flóculos, ρ_w es la densidad del agua, α_b y α_{ds} representan la eficiencia de colisiones entre partículas para el movimiento Browniano y la sedimentación diferencial, respectivamente. El movimiento Browniano fue demostrado irrelevante para partículas mayores a 1 μm , de acuerdo a [Tsai et al. \(1987\)](#) y por lo tanto se adoptó $\alpha_b=0.01$ para todas las simulaciones, mientras que α_{ds} fue uno de los parámetros del modelo. Para la densidad de los agregados se adoptaron 1090 kg m^{-3} para los generados en agua dulce y 1100 kg m^{-3} para los de agua salada, de acuerdo a los resultados de laboratorio ([Trento y Vinzon, 2014](#)). La velocidad terminal de caída se obtuvo a partir de las Ec. (9) y (10) siguientes, para estados de equilibrio ([Hayter y Pakala, 1989](#)):

$$\frac{dC}{dt} = -W_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (9)$$

donde $\partial C/\partial z$ es el gradiente vertical de concentraciones de sedimentos, representado en este caso por una relación de escala C/h ; y la ecuación para el balance de fuerzas, para un agregado cayendo en forma estacionaria en un medio infinito puede escribirse con la Ec. (10) ([Wu y Lee, 1998](#); [Neale et al., 1973](#)):

$$\frac{\pi d_f^3}{6} g (\rho_f - \rho_w) = C_D \rho_w \Omega \frac{\pi d_f^2}{4} \frac{W_s^2}{2} \quad (10)$$

con C_D el coeficiente de arrastre de los agregados, d_f el tamaño característico de un agregado y Ω la relación de resistencia experimentada por cada flóculo en relación al de una esfera sólida. En este trabajo se adoptó $\Omega=1$, verificado luego en forma experimental. Para esferas con números de Reynolds, $Re=W_s d_f/\nu$, en el intervalo $0.1 < Re < 120$, se emplearon para C_D las fórmulas propuestas por [Masliyah y Polikar \(1980\)](#). Luego se empleó el esquema iterativo de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones, las cuales están detalladas en [Trento y Vinzón \(2014\)](#).

La distribución espacial y temporal de concentraciones se calculó en base a la determinación del número de partículas en sectores circulares de ángulo $\theta=\pi/180$, luego se verificó que la concentración promedio entre la suma de todos los sectores sea igual a la C total inicial. La masa de sedimentos se representó mediante el ingreso de 10 partículas en cada intervalo temporal $\Delta t=0.10$ s, durante 60 s para cada ensayo, de modo de generar las distintas C . La salinidad se calculó mediante la CE con una ecuación de estado, al igual que con la densidad del agua en función de la temperatura y la salinidad.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados de laboratorio

Se determinaron en total los tamaños de casi 14000 agregados generados en el disco. Los diámetros de equilibrio d_{fe} para cada C se muestran en la [Tabla 2](#). Se obtuvieron d_{fe} mayores en todos los casos para las muestras de agua salada. Desde el punto de vista de los tamaños, los flóculos más grandes se corresponden con las concentraciones más elevadas, pues son generados por el mayor número de colisiones entre los agregados, lo cual no es sorprendente pues está en completo acuerdo con la teoría de la floculación. Las diferencias de tamaños a igualdad de C , tuvieron relevancia para 0.200 y 0.335 g l^{-1} .

Resultados de laboratorio con agua salada			Resultados modelo
C (g l ⁻¹)	N	d_{fe} (μm)	d_{fe} (μm)
0.100	4023	96	95
0.200	4233	125	124
0.335	2678	145	144
Resultados de laboratorio con agua dulce			Resultados modelo
C (g l ⁻¹)	N	d_{fe} (μm)	d_{fe} (μm)
0.100	651	90	90
0.200	1250	95	93
0.335	1087	105	104

Tabla 2: Síntesis de resultados obtenidos en el floculador. N es el número de flóculos, d_{fe} es el diámetro de equilibrio de los flóculos, para cada C , (Trento y Vinzón, 2014).

3.2 Resultados del modelo

Se calcularon los diámetros promedio de los flóculos, d_{fprom} , en función del tiempo de muestreo para cada una de las tres concentraciones, los resultados se graficaron en la Figura 2, la Figura 3 y la Figura 4. Se adoptó la mediana de la muestra de sedimentos, 16.8 μm, como la condición de borde en cada simulación.

En la Tabla 2 se muestran los tamaños de equilibrio calculados, d_{fe} , los que guardan un aceptable acuerdo con los obtenidos a partir de las observaciones de laboratorio. Las tasas de crecimiento de los d_{fprom} , calculados en el intervalo entre 0 y 60 minutos, siguieron un patrón similar al determinado en los ensayos de laboratorio, fundamentalmente para $C=0.100$ y 0.200 g l⁻¹ en ambas condiciones. Cuando C fue 0.335 g l⁻¹ se calculó un gradiente temporal mayor al determinado en los ensayos de laboratorio. Esto puede deberse a la formación de flóculos de mayor tamaño debido a la mayor C , y de menor densidad que los de las otras dos C ensayadas, y que por lo tanto tienen estas últimas una tasa de agregación relativamente menor.

El parámetro más importante fue la eficiencia de colisión α_{ds} . En agua salada fue $\alpha_{ds}=0.042$, 0.031 y 0.020 , para $C=100$, 200 y 335 g l⁻¹ respectivamente. Mientras que para agua dulce fue, para dichos C , $\alpha_{ds}=0.040$, 0.030 y 0.024 respectivamente. Otro parámetro importante fue la densidad de los flóculos, adoptada constante según los resultados de laboratorio. El análisis de sensibilidad mostró que para aumentos de ρ_f los d_{fe} tendieron a disminuir y viceversa, para iguales niveles de eficiencia de colisión. Los intervalos de tiempo Δt no fueron determinantes para lograr los d_{fe} en cada C , en cambio resultaron importantes para el cálculo de la trayectoria aproximadamente circular de los flóculos. El número de partículas ingresantes en cada Δt no fue relevante en cuanto a d_{fe} , pues se obtuvieron casi iguales d_{fe} para NP=4, 5 y 20 partículas/ Δt . Los tiempos en que se obtuvo el equilibrio en los tamaños de los agregados difirió de los resultados del modelo en un 9%-36% en agua dulce, y 11%-100%, para agua salada, con los menores errores para $C=0.335$ g l⁻¹.

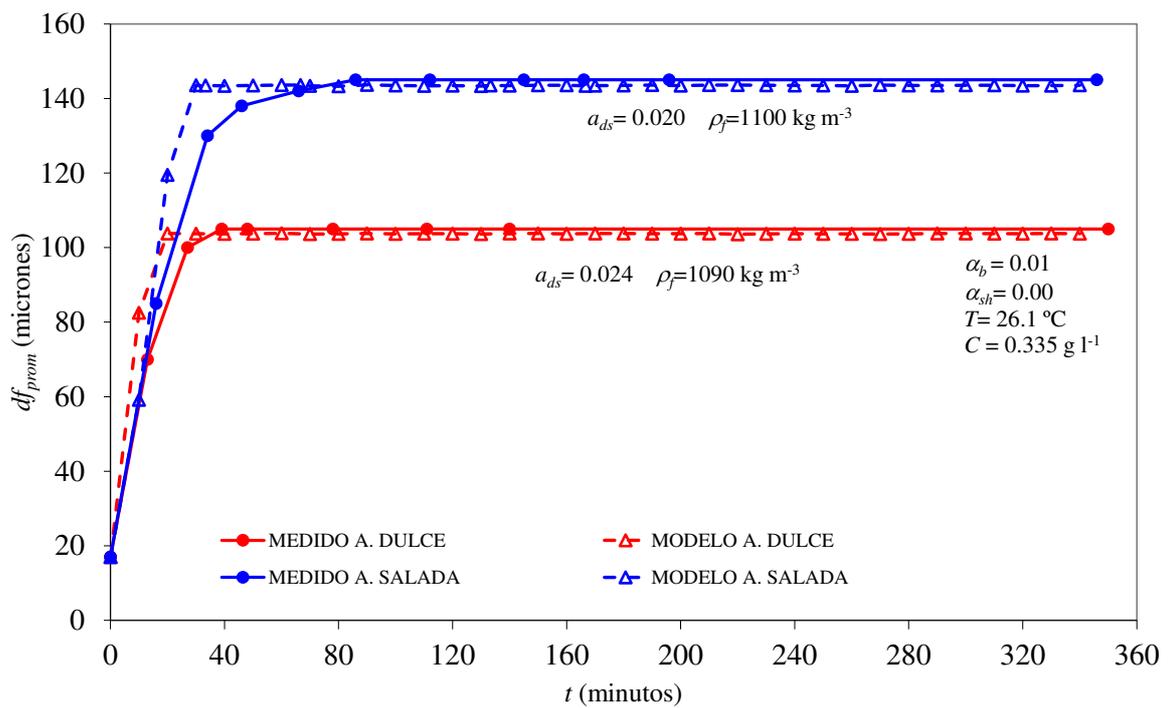


Figura 2: Variación temporal de d_{fprom} , medidos y calculados, para $C=0.335 \text{ g l}^{-1}$.

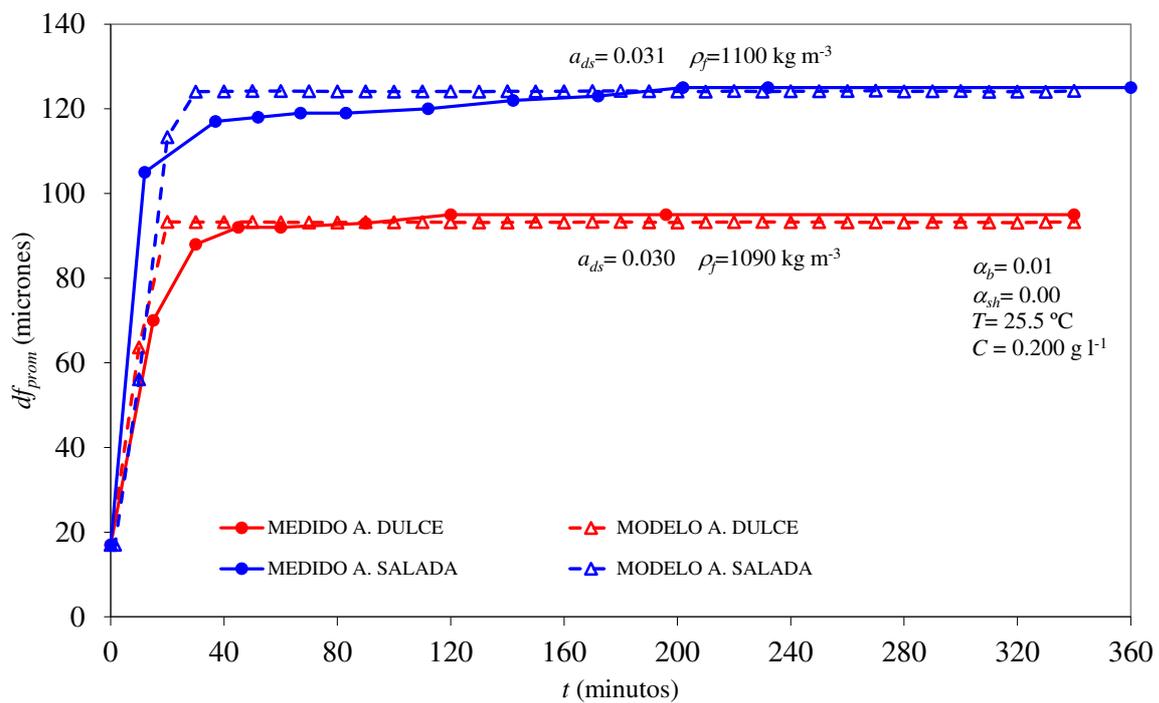


Figura 3: Variación temporal de d_{fprom} , medidos y calculados, para $C=0.200 \text{ g l}^{-1}$.

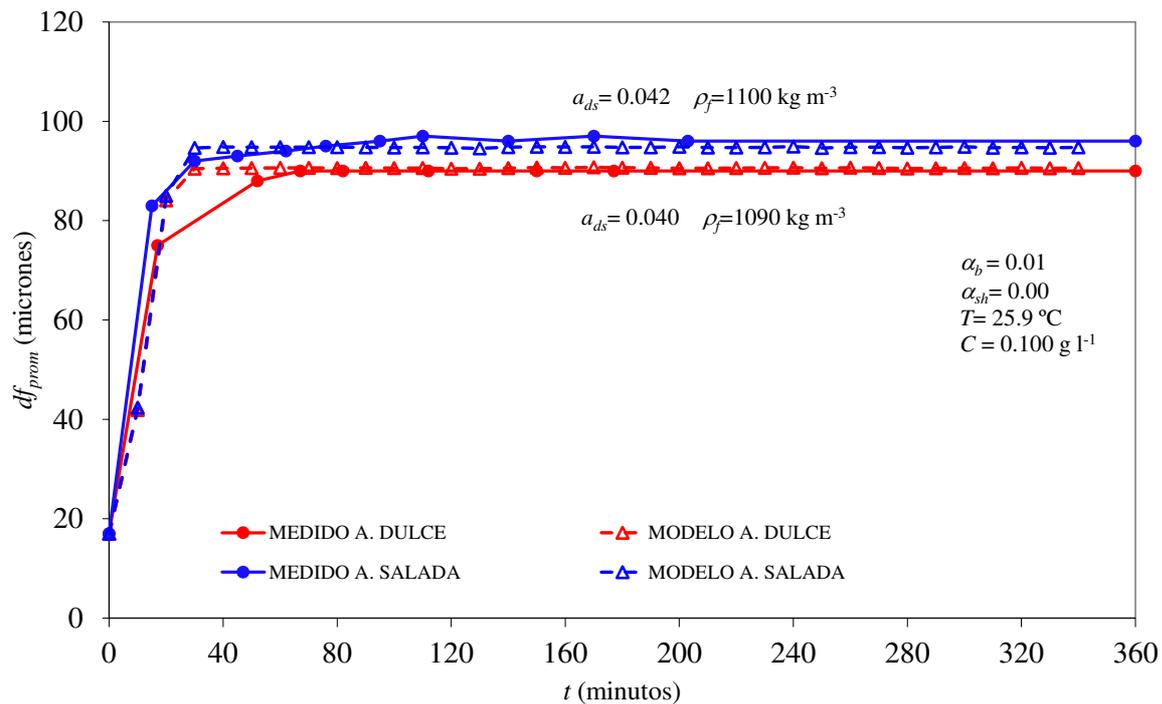


Figura 4: Variación temporal de d_{prom} , medidos y calculados, para $C=0.100 \text{ g l}^{-1}$.

4 CONCLUSIONES

Los diámetros de equilibrio d_{fe} , tanto los observados en laboratorio como los calculados con el modelo, se correlacionaron con las C , para agua dulce y salada, obteniéndose mayor tamaño de agregados siempre para agua salada a igualdad de concentración. Los resultados del modelo para los d_{fe} muestran un aceptable acuerdo con los determinados en los ensayos de laboratorio.

El análisis de sensibilidad mostró que para aumentos de ρ_f los d_{fe} tendieron a disminuir y viceversa, para iguales niveles de eficiencia de colisión, en completo acuerdo con la teoría de la floculación. Los intervalos de tiempo Δt no fueron determinantes para lograr los d_{fe} en cada C , en cambio resultaron importantes para el cálculo de la trayectoria aproximadamente circular de los flóculos.

En cuanto a los tiempos en que se obtuvo el equilibrio en los tamaños de los agregados, t_e , se obtuvieron diferencias apreciables, fundamentalmente para agua salada. Un motivo puede deberse a la parametrización del proceso simulado. Este aspecto, debería ser tenido en cuenta en futuros trabajos de modelación.

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Sedimentos Coesivos de la COPPE-UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro-Brasil) por los subsidios para la construcción del equipamiento y desenvolvimiento del trabajo, así como la colaboración de los Dres. Susana Vinzon y Marcos Gallo (UFRJ) en las tareas de laboratorio y consejos recibidos.

REFERENCIAS

Curran K. J., Hill P. S. and Milligan T.G., Time variation of floc properties in a settling column. *Journal of Sea Research*, 49:1-9, 2003.

- Dimou K. N. and Adams E.E., A Random-walk, Particle Tracking Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37:99-110, 2003.
- Edzwald J.K., Upchurch J.B. and O'Melia C.R., Coagulation in Estuaries. *Environmental Science & Technology*, 8:1:58-63, 1974.
- Farley K.J. and Morel F.M., Role of coagulation in the kinetics of sedimentation. *Environmental Science Technology*, 20:187-195, 1986.
- Fox J., Hill P.S., Milligan T.G. and Boldrin A., Flocculation and sedimentation on the Po River Delta. *Marine Geology*, 203: 95-107, 2004.
- Gibbs R. J. 1983, Effect of Natural Organic Coatings on the Coagulation of Particles. *Environmental Science and Technology*, 17:4:237-240, 1983.
- Gustafsson O., Duker A., Larsson J., Andersson P. and Ingri J., Functional separation of colloids and gravitoids in surface waters based on differential settling velocity: Coupled cross-flow filtration-split flow thin-cell fractionation (CFF-SPLITT), *Limnology and Oceanography*, 45:8:1731-1742, 2000.
- Hayter E. J. and Pakala C.V., Transport of Inorganic Contaminants in Estuarial Waters. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 5:217-230, 1989.
- Huang H., Fractal properties of flocs formed by shear and differential settling. *Physical Fluids*, 6:10:3229-3236, 1994.
- Jin, X.Y., *QuasiThree-Dimensional Numerical Modelling of Flow and Dispersion in Shallow Water*, Department of Civil Engineering, Delft Univ. of Technology. 1993.
- Kim A. S. and Stolzenbach K. D., Aggregate formation and collision efficiency in differential settling. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271:1:110-119, 2004.
- Lee D. J., Chen G. W., Liao Y.C. and Hsieh C.C., On the free-settling test for estimating activated sludge floc density. *Water Research*, 30:3:541-550, 1996.
- Logan B. and Kilps J. R., Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments. *Water Research*, 29:2:443-453, 1995.
- Lick W., Huang H. and Jepsen R., Flocculation of fine-grained sediments due to differential settling. *Journal of Geophysical Research*, 98:6:10279-10288, 1993.
- Masliyah J.H., and Polikar M., Terminal velocity of porous spheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58:299-302, 1980.
- Mehta A.J. and Partheniades E., An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. *Journal of Hydraulic Research*, 13:4:361-381, 1975.
- Neale G., Epstein N. and Nader W., Creeping flow relative to permeable spheres, *Chemical Engineering Science*, 28:1865-1874, 1973.
- Stolzenbach K.D. and Elimelech M., The effect of density on collisions between sinking particles: implications for particle aggregation in the ocean. *Journal of Deep Sea Research I*, 41:3:469-483, 1994.
- Thill A., Moustier S., Aziz J., Wiesner M. R. and Bottero J. Y., Flocs Restructuring during Aggregation: Experimental Evidence and Numerical Simulation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 243: 171-182, 2001.
- Thomann R. and Mueller J., *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper Collins Publishers, 1987.
- Trento A. and Vinzón S., Experimental study and modelling flocculation processes. The case of Paraíba do Sul estuary. *International Journal of Sediment Research*, 29:378-390, 2014.
- Tsai C-H, Iacobellis S. and Lick W., Flocculation of fine-grained lake sediments due to a uniform shear stress. *Journal Great Lakes Res.*, 13:2:135-146, 1987.
- Van Leussen W., The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Sem estuary. *Journal Sea Research*, 41:109-118, 1999.
- Wu R.M. and Lee D.J., Hydrodynamic drag force exerted on a moving floc and its

- implication to free-settling tests. *Water Research*, 32:3:760-768, 1998.
- Van Rijn, L. C, *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, The MIT Press, 1993.
- Winterwerp J. and Van Kesteren W., *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment*, Elsevier, 2004.