

Research Article

Medición de la concentración de sedimentos en suspensión mediante dispositivos ópticos y acústicos: aplicación en sistemas tropicales (Delta del río Mira, Colombia)

Juan Camilo Restrepo¹ & Jorge Omar Pierini²

¹Universidad del Norte (Uninorte), km 5 vía Puerto Colombia, Departamento de Física
Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA), Barranquilla, Colombia

²Universidad Nacional del Sur, Departamento de Física (IFISUR-UNS-CIC-CCT)
CC 804 Florida 7500, Complejo CRIBABB. Edificio E1, B8000FWB, Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN. En los últimos años, la utilización de dispositivos ópticos (*e.g.* Optical Backscatter Sensor, OBS) y acústicos (*e.g.* Acoustic Doppler Current Profiler-ADCP) ha permitido monitorear con mayor resolución la variabilidad temporal y espacial de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en ambientes costeros y estuarinos. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas en ambientes tropicales ha tenido un desarrollo incipiente. En el presente trabajo se implementó un procedimiento de calibración para un dispositivo OBS-3A, tomando como patrón de calibración sedimento seco y desagregado de la zona de estudio. Además, se presentan las correcciones a las que se debe someter la señal de respuesta del ADCP, debido a la dispersión geométrica, la atenuación del sonido por el agua y las partículas en suspensión, para que sea útil en la estimación de CSS. El ADCP y el OBS-3A se utilizaron para realizar mediciones de CSS en el sistema deltaico del río Mira (isla del Morro y desembocadura principal), ubicado sobre la costa del Pacífico colombiano, un ambiente costero tropical donde algunos factores oceanográficos y estuarinos son determinantes en la señal de respuesta de los equipos.

Palabras clave: sedimento en suspensión, transporte de sedimento, instrumentos ópticos (OBS), equipo acústico (ADCP), deltas tropicales, Colombia.

Measurement of suspended sediment concentration using optical and acoustic devices: application in tropical systems (Mira River Delta, Colombia)

ABSTRACT. In recent years, the use of optical (Optical Backscatter Sensor, OBS) and acoustic (Acoustic Current Doppler Profiler, ADCP) instruments has allowed monitoring the temporal and spatial variation of the suspended sediment concentration (SSC) in coastal and estuarine environments with greater resolution. However, the development of the application of those techniques in tropical environments is incipient. For this study, an OBS-3A calibration procedure was implemented, taking dry and desegregated sediment from the study zone as a calibrating pattern. Moreover, we present the corrections required for the ADCP signal to be useful in the estimation of SSC due to geometrical spreading, the attenuation of sound by water, and the particles in suspension. The ADCP and OBS-3A were used to measure SSC in the Mira River delta system (Morro Island and principal river mouth), located on the Pacific coast of Colombia, a coastal tropical environment where some oceanographic and estuarine factors determine the signal response of the instruments.

Keywords: suspended sediment, sediment transport, optical instruments (OBS), acoustic equipment (ADCP), tropical deltas, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Los cambios en la línea de costa y la topografía submarina (Meadows & Campbell, 1981), el flujo de nutrientes y compuestos químicos hacia el océano, y la penetración de la luz a través del agua, son algunos de los procesos relacionados con la concentración de sedimentos en suspensión (CSS). A pesar de su importancia en los procesos estuarinos, la estimación de la CSS ha sido compleja debido a su alta variabilidad temporal y espacial (Dyer, 1995). La CSS depende, principalmente, del tipo de estuario (*i.e.* altamente estratificado, parcialmente mezclado, bien mezclado) (Dyer, 1995), magnitud y variabilidad de las descargas fluviales (Milliman & Meade, 1983), características de los procesos hidrodinámicos (*i.e.* efectos de fricción, circulación residual) (Nichols & Biggs, 1985; Dronkers, 1986), características del sedimento (*i.e.* granulometría, floculación, velocidad de sedimentación) (Krone, 1978), ocurrencia de zonas de máxima turbidez (Jiufa & Chen, 1998) y tasa de residencia de los sedimentos, entre otros.

Para determinar la CSS se han utilizado instrumentos como turbidímetros, trampas de sedimento, muestreadores mecánicos y botellas Niskin (USGS, 1999). Algunos autores (Jiufa & Chen, 1998; Creed *et al.*, 2001) han señalado que estos instrumentos modifican las condiciones físicas del muestreo (*i.e.* velocidad de captura, volumen de muestra) conduciendo a imprecisiones en el valor de CSS. Estos instrumentos realizan mediciones puntuales, y por lo tanto no permiten cuantificar la variabilidad temporal y espacial de la CSS (Holdaway *et al.*, 1999). En los últimos años se han utilizado instrumentos ópticos (*e.g.* Optical Backscatter Sensor-OBS) y acústicos (*e.g.* Acoustic Doppler Current Profiler-ADCP) para estimar la CSS (Holdaway *et al.*, 1999; Alvarez & Jones, 2001; Tattersall *et al.*, 2003; Kostaschuk *et al.*, 2005; Dinehart & Burau, 2005; Fettweis *et al.*, 2006; Merckelbach & Ridderinkhof, 2006). El OBS es un sensor óptico que mide turbidez y CSS, detectando la radiación infrarroja retrodispersada por las partículas en suspensión (Creed *et al.*, 2001). El ADCP es un dispositivo acústico utilizado principalmente para hacer perfiles de velocidad emitiendo pulsos sonoros a través de la columna de agua y registrando la intensidad y frecuencia del eco reflejado por las partículas en suspensión. Recientemente se ha demostrado que la intensidad de la señal registrada por el ADCP es proporcional a la CSS (Thorne & Hanes, 2002; Nortek, 2004; Dinehart & Burau, 2005). En tal sentido, el OBS y el ADCP permiten realizar mediciones durante largos periodos de tiempo sin interferir directamente con la dinámica de los sedimentos en

suspensión. Además, el ADCP registra variaciones espaciales de la CSS a través de las mediciones efectuadas en la columna de agua (Gartner, 2002). Investigaciones recientes han mostrado el alto desempeño y confiabilidad de los OBS y ADCP en la medición de CSS (Holdaway *et al.*, 1999; Creed *et al.*, 2001; Masselink & Hughes, 2003; Dinehart & Burau, 2005; Fettweis *et al.*, 2006). Sin embargo, en la actualidad no se tienen reportes del uso de esta tecnología en ambientes tropicales.

La mayoría de los estudios sobre concentración y transporte de sedimentos en zonas tropicales se ha dirigido hacia la obtención de mediciones puntuales y a la aplicación de ecuaciones empíricas y modelos con ecuaciones hidrodinámicas y de transporte promediadas en la vertical (Jiufa & Chen, 1998; Chen *et al.*, 2001; Shi *et al.*, 2003). En este trabajo se busca (*i*) obtener mediciones de CSS mediante dispositivos OBS-3A y ADCP en el delta del río Mira (Fig. 1), discutiendo las ventajas y desventajas en su implementación, y (*ii*) verificar la aplicación de las ecuaciones de calibración para la medición de concentración de sedimentos en suspensión en ambientes tropicales.

El delta del río Mira

El delta del río Mira (Fig. 1) tiene una superficie subaérea de 520 km² que se extiende desde el ápice ubicado aproximadamente a 20 km de la línea de costa. Está compuesto por un sistema de descarga principal localizada en la Boca de Milagros y siete distributarios menores al sur y al norte del canal principal. La desembocadura principal (Boca de Milagros) tiene ~370 m de ancho en su parte más extensa y se caracteriza por la presencia de deltas y espigas de marea bajante. Los esteros Guadarajo y Brazo del río Mira, principales distributarios (que desembocan cerca a la isla del Morro) se desprenden desde el ápice del delta, mientras que los demás distributarios lo hacen desde el curso del río sobre el plano deltaico (Monroy *et al.*, 2008) (Fig. 1). El plano deltaico subaéreo, con un gradiente de 0,053 m m⁻¹ (Restrepo & López, 2008), se divide en dos sectores según el dominio mareal o fluvial de los procesos hidrodinámicos que operan en el delta. Restrepo & López (2008) indicaron que el plano deltaico de dominio marino, definido por la extensión de manglar en los distributarios y canales de marea, se extiende hacia el continente entre 2 y 8 km, siendo mayor la extensión cerca al estero Guadarajo (Fig. 1) debido a que la influencia mareal en este sector es mayor.

Entre las principales características del río Mira se destaca su descarga de sólidos en suspensión, estimada en 9,77 x 10⁶ ton año⁻¹ (Restrepo & López,

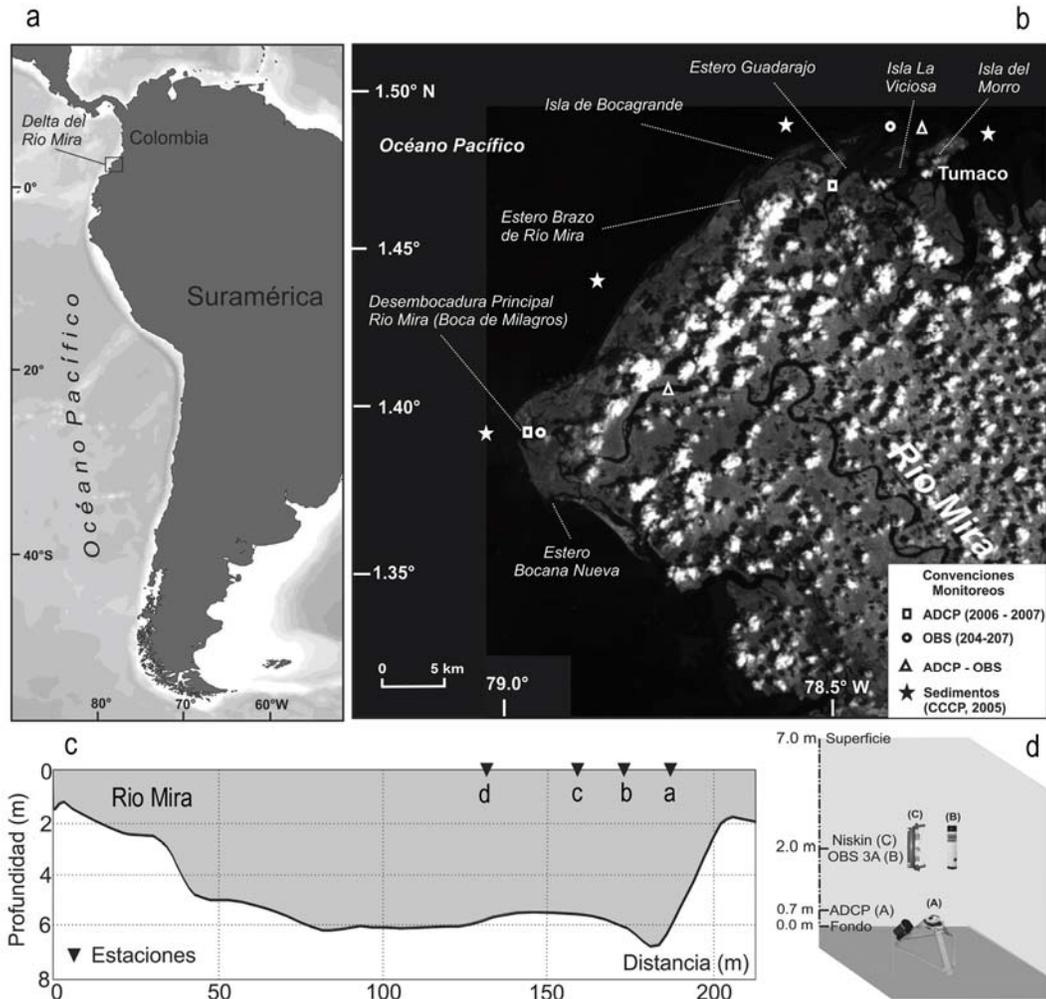


Figura 1. a) Delta del río Mira, ubicado en el sur-occidente de Colombia, b) sitios donde se realizaron mediciones y estimaciones de CSS utilizando dispositivos OBS-3A, correntómetros ADCP y botellas Niskin, c) localización de las estaciones en la sección transversal del río Mira, d) disposición de los equipos ADCP, OBS-3A y botella Niskin durante el muestreo.

Figure 1. a) Mira River Delta, located in Colombia, b) southwest the sites where measurements were made and estimates of SSC using devices OBS-3A, ADCP currentmeter, and Niskin bottles, c) location of stations in the cross section, and d) available teams ADCP, OBS-3A and Niskin bottle during sampling.

2008), que constituye junto con los ríos Patía (Nariño) y San Juan (Valle del Cauca, Chocó) cerca del 50% del aporte de sedimentos de los ríos del Pacífico colombiano, que se estima aproximadamente en $\sim 96 \times 10^6$ ton año⁻¹. Esta zona se caracteriza por una marea de tipo semidiurno (Otero & Restrepo, 2008). En Boca de Milagros (Fig. 1) hay rangos de marea media de 2,1 m, con máximos de 2,6 m (sicigia) y mínimos de 1,6 m (cuadratura). En Bocana Nueva (Fig. 1) se observan rangos medios de 2,0 m, que varían entre 2,7 m y 1,1 m durante sicigia y cuadratura, respectivamente; mientras que en el estero Guadaraja se estima una marea media de 2,20 m, con valores mínimos y máximos de 1,40 y 2,90 m, respectivamente (Otero &

Restrepo, 2008). El delta del río Mira se caracteriza además por la presencia de trenes de olas (en aguas profundas) con alturas significativas que varían entre 0,29 y 2,33 m, periodos máximos que oscilan entre 5 y 23 s, con direcciones predominantes suroeste y sur-suroeste (Restrepo & López, 2008; Restrepo *et al.*, 2008).

En cuanto a las características físicas del sedimento en esta zona, el estudio de las facies sedimentarias de la plataforma continental del Pacífico colombiano (CCCP, 2003) indica que los sectores central (Boca de Milagros) y norte (islas barrera de Bocagrande, la Viciosa, el Morro y Tumaco) del delta del río Mira (Fig. 1), están compuestos por sedimentos finos que

varían entre arenas y lodos de origen litoclástico. Muestreos puntuales adelantados por el Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP) indican que estos sitios presentan arenas finas a lodosas, con un D_{50} que varía entre 0,1 y 0,3 mm, una densidad de sedimento entre 2,2 y 3,1 g cm^{-3} y una porosidad media del 26% (CCCP, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Dispositivo óptico: Optical Backscatter Sensor-OBS-3A

El dispositivo OBS-3A cuenta con un sensor OBS (Optical Backscatter Sensor) que mide turbidez y CSS emitiendo radiación en el infrarrojo cercano y registrando la porción de radiación que es retrodispersada por las partículas en suspensión. Este sensor se encuentra constituido por un diodo de emisión de luz infrarroja (IRED) con un máximo de longitud de onda de 875 nm que produce un rayo cónico con una apertura de 50° , un arreglo de cuatro fotodiodos que registran la radiación infrarroja esparcida entre 140° y 160° , y un filtro que elimina la luz solar (D&A Instrument, 2004). El valor de CSS registrado por el OBS depende de las características físicas del sedimento. (i) La relación inversamente proporcional entre el diámetro de la partícula y la radiación retrodispersada hace que el tamaño de la partícula sea la variable de mayor influencia en la medición; (ii) altas concentraciones de sedimento ($\geq 5 \text{ g L}^{-1}$) absorben gran parte de la radiación incidente, dando como resultado valores de CSS inferiores a los esperados; (iii) el color de los sedimentos, que depende de su composición mineralógica; y (iv) la presencia de burbujas también puede generar cambios en la respuesta del OBS-3A (Butt & Ganderton, 2002; Fettweis *et al.*, 2006). La influencia de este último parámetro es menor en conjuntos de sedimentos compuestos principalmente por lodos y disminuye a medida que aumenta la salinidad (Puleo, 2004).

Para la calibración del OBS-3A se construyó un montaje experimental derivado del modelo propuesto por Butt & Ganderton (2002). Este montaje garantiza una mezcla homogénea de sedimento no cohesivo para concentraciones menores a 30 g L^{-1} . El tamaño medio de grano para la calibración se seleccionó a partir del análisis textural de 50 muestras desagregadas de sedimento de fondo ($0,07 \text{ mm} < \phi < 2,50 \text{ mm}$) recolectadas en el sector frontal del delta del río Mira (Fig. 1). Se determinó un tamaño medio de grano de $0,2 \pm 0,1 \text{ mm}$ (arenas finas). Por lo tanto, dos OBS-3A denominados OBS-204 y OBS-207 fueron calibrados con sedimentos de diámetro de 0,2 y 0,3 mm, respectivamente, para evaluar las diferencias en la

respuesta del OBS-3A frente a cambios en el tamaño medio de grano. Se estableció un rango de concentración de ~ 0 a 2000 mg L^{-1} para la calibración de los dispositivos. Este intervalo fue establecido a partir del registro histórico de la estación hidrológica San Juan (1980-2000), la más cercana a la desembocadura del río Mira ($\sim 30 \text{ km}$; $1,25^\circ\text{N}$, $78,39^\circ\text{W}$) y de cuatro mediciones puntuales desarrolladas por el CCCP en el 2005 en el sector frontal del delta (Fig. 1). Estos registros mostraron valores de CSS entre 10 y 570 mg L^{-1} .

Se obtuvieron ecuaciones de calibración (Ecuación 1 y 2) con coeficientes de correlación significativos a un nivel de confianza del 99% y un valor residual promedio de $0,001 \text{ mg L}^{-1}$ (*i.e.* magnitud promedio de los residuos inferior al 1% del rango de medición),

$$CSS_{204} = 8.671 \times 10^{-7}(c^3) - 0,088(c^2) + 2.898(c) - 3.225 \times 10^7 \quad (1)$$

$(n = 8, r^2 = 0,98)$

$$CSS_{207} = 8.781 \times 10^{-7}(c^3) - 0,092(c^2) + 2.941(c) - 3.224 \times 10^7 \quad (2)$$

$(n = 8, r^2 = 0,94)$

donde, c corresponde a la señal interna de respuesta del OBS-3A (*counts*) frente a las variaciones de la concentración de sedimentos en suspensión (D&A Instrument, 2004); CSS_{204} y CSS_{207} representan la concentración de sedimentos en suspensión (mg L^{-1}) estimada por los dispositivos OBS-204 y OBS-207, respectivamente.

Dispositivo acústico: correntómetro AWAC-ADCP

El ADCP es un dispositivo acústico utilizado para medir velocidad de corrientes en la columna de agua. Mediante un conjunto de transductores emite pulsos de sonido a través de la columna de agua con una frecuencia fija. En este estudio se trabajó con un correntómetro Nortek AWAC ADCP con una frecuencia de emisión de 600 kHz. A medida que el pulso de sonido se propaga es reflejado en todas las direcciones por las partículas en suspensión. Parte de esta energía retorna al ADCP, que registra el nuevo valor de frecuencia de esta señal. Usando el efecto Doppler y el cambio en la frecuencia emitida se determina la velocidad de las partículas, que se considera igual a la del fluido que las transporta (Kostashchuk *et al.*, 2005). El ADCP (600 kHz) registra la amplitud de la señal recibida (medida en “counts”-unidades internas del equipo), la cual se ha determinado que es proporcional a la CSS (Holdaway *et al.*, 1999).

La transformación de counts a valores de CSS requiere: (i) ajustar los valores de counts a una escala lineal de medición, y (ii) lograr que los valores escalados sean función de las partículas en suspensión e independientes de la profundidad y velocidad de

propagación del sonido (Lohrmann, 2001). Por lo tanto, es necesario someter la señal a una serie de correcciones debido a la pérdida de intensidad que sufre a medida que se propaga a través de la columna de agua: (i) forma cónica del haz acústico, (ii) absorción de la onda acústica por el agua, y (iii) dispersión y absorción de la energía acústica por las partículas suspendidas (Lohrmann, 2001) (Ecuación 1):

$$EL = counts \times 0,43 + 20 \log_{10}(R) + 2\alpha_w R + 20R \int \alpha_p dr \quad (3)$$

donde EL es el nivel de eco acústico; 0,43 es un factor de escalamiento (AWAC ADCP 600 kHz); R es el rango a lo largo del haz acústico; α_w es el coeficiente de absorción del agua en dB m^{-1} , este valor depende de la frecuencia del ADCP, la salinidad y la presión (profundidad donde se encuentra el equipo) y se calculó utilizando el modelo de François & Garrison (1982a, 1982b) (ecuación 4); α_p (dB m^{-1}) es la atenuación de las partículas integrada en profundidad.

$$\alpha_w = \frac{A_1 P_1 F_1 f^2}{F_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 F_2 f^2}{F_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (4)$$

donde,

$$A_1 = \frac{8,86}{c} 10^{0,78 pH - 5}$$

$$A_2 = \frac{21,44S(1 + 0,025T)}{c}$$

$$A_3 = (4,937 \times 10^{-4}) - 2,59 \times 10^{-5} T - 9,11 \times 10^{-7} T^2 - 1,5 \times 10^{-8} T^2$$

$$F_1 = 2,8 \left(\frac{S}{35} \right)^{0,5} \times 10^{4 - \frac{1245}{\phi(T)}}$$

$$F_2 = \frac{8,17 \times 10^{8 - 1990/(T+273)}}{1 + 0,0018(S - 35)}$$

$$P_1 = (1 - 3,93 \times 10^{-4} d) + 4,9 \times 10^{-10} d^2$$

$$P_2 = 1 - 1,37 \times 10^{-4} d + 6,2 \times 10^{-9} d^2$$

$$P_3 = 1 - 3,83 \times 10^{-5} d + 4,9 \times 10^{-10} d^2$$

T es la temperatura del agua en $^{\circ}\text{C}$; f es la frecuencia de emisión del correntómetro, S es la salinidad; y d la profundidad en m. Además, este grupo de ecuaciones mostraron que el coeficiente de absorción también está determinado por la velocidad a la cual se propaga el sonido a través del agua, c (Ecuación 5). Este valor depende a su vez de la temperatura, salinidad y presión, que se relaciona con el aumento de la profundidad,

$$c = 1410 + 421t - 3,7t^2 + 110S + 0,18d \quad (5)$$

La Ecuación 3 (ecuación con correcciones) se aplicó a un conjunto de datos registrados por el ADCP (600 kHz) (Fig. 4) durante campañas realizadas en los

años 2006 y 2007 en el delta del río Mira (Fig. 1). El ADCP permaneció fijo en el fondo con los transductores dirigidos a la superficie, a una distancia de 0,70 m del fondo. Los valores de *counts* de la última celda de medición (~0,5 m) fueron eliminados puesto que están influenciados por la intensidad de la señal que se refleja en la superficie (Lohrmann, 2001; Nortek AS, 2004).

Mediciones de CSS en el delta del río Mira

Para evaluar la respuesta de los dispositivos OBS-3A frente a los cambios del ciclo mareal se realizó un monitoreo de CSS y turbidez en la isla del Morro cerca al estero Guadaraja (Fig. 1). Los instrumentos (OBS-204, OBS-207) fueron instalados a 2,1 m. del fondo y programados para realizar mediciones de CSS, turbidez y nivel del mar durante 72 h. Se utilizó un intervalo de medición de 10 min, con valores de CSS y turbidez promediados a partir de 2 min de obtención de datos. Considerando que los OBS-3A fueron calibrados con sedimento de tamaño de grano diferente se aplicó una prueba t pareada y una prueba de regresión para comparar los registros de CSS y turbidez obtenidos por cada dispositivo (Montgomery & Runger, 1996).

Para comparar la respuesta de los dispositivos (OBS-3A y ADCP) y evaluar su desempeño en diferentes ambientes se realizaron dos muestreos con mediciones simultáneas en el delta del río Mira: (i) Boca de Milagros (ambiente fluvial), e (ii) isla del Morro (ambiente costero) (Fig. 1). También se utilizó una botella Niskin para extraer muestras de agua y determinar CSS por proceso de filtrado y gravimetría. Aun cuando la botella Niskin es un muestreador no iso-cinético e intrusivo, se ha utilizado para ajustar los coeficientes de calibración de dispositivos acústicos y ópticos (Baker & Lavelle, 1984; Campbell & Spinrad, 1987; Jones & Jago, 1994; Holdaway *et al.*, 1999; Gartner, 2002). (i) En Boca de Milagros (desembocadura del río Mira, ambiente fluvial) se seleccionó una sección transversal con profundidades entre 1,75 y 6,75 m y ancho de 210 m (Fig. 1). Para el análisis se tomaron cuatro estaciones ubicadas a 133, 163, 173 y 183 m del origen de la sección, con profundidades entre 5,7 y 6,7 m (Fig. 1). En cada estación se tomaron datos con el OBS-3A, el ADCP y se extrajeron muestras de agua con la botella Niskin a intervalos de 1 m de profundidad hasta alcanzar el fondo del canal. Estas estaciones fueron seleccionadas porque sus profundidades permiten obtener un mayor número de datos en la columna de agua y registran las mayores velocidades de la sección. (ii) En la isla del Morro (ambiente costero) se utilizó un montaje estático (Fig. 1). El ADCP permaneció fijo en el

fondo, con los transductores a una distancia de 0,70 m del fondo dirigidos hacia la superficie. El OBS-3A (207) fue sumergido a una distancia vertical de ~1,3 m respecto al ADCP. Considerando que el tamaño de las celdas de muestreo y de la distancia de blanqueo es de 0,5 m se determinó que la región monitoreada por el OBS-3A corresponde a la segunda celda de medición del ADCP. Además, se recolectaron 25 muestras de agua con una botella Niskin a una profundidad de ~6 m (Fig. 1). Por las restricciones del lugar donde se instalaron los equipos (muelle-base militar) no se adquirieron datos continuos. Se obtuvieron datos simultáneos durante condiciones de refluo marea, durante el inicio del flujo marea y al final del periodo de flujo marea.

RESULTADOS

Mediciones de CSS registradas con el dispositivo OBS-3A

El dispositivo OBS-204 estimó un valor máximo de 18,3 NTU, mientras que el OBS-207 registró valores hasta de 19,2 NTU (Fig. 2a). Aun cuando existe una correlación significativa ($r = 0,86$; $P < 0,001$) entre la turbidez registrada por ambos dispositivos, y que además estos valores presentan la misma tendencia (Fig. 2a), se encontraron diferencias significativas (prueba t pareada, $P < 0,1$) entre las mediciones de turbidez efectuadas por cada OBS-3A. En promedio, se observaron diferencias hasta del 5% entre las mediciones de turbidez registradas por los dispositivos (Fig. 2a). Los OBS-207 y OBS-204 midieron CSS hasta de 61,8 y 421,4 mg L⁻¹, respectivamente. Aunque las series de CSS medidas por cada dispositivo presentan una correlación significativa (Fig. 2b), la comparación entre los valores registrados mostró diferencias significativas (prueba t pareada, $P < 0,1$).

Existe una relación entre las variaciones de CSS y turbidez con los cambios en el nivel del mar (Jiufa & Chen, 1998; Tattersall *et al.*, 2003; Merckelbach & Ridderinkhoff, 2006). En periodos de bajamar se presentan las menores concentraciones de sedimento con valores de 0,4 mg L⁻¹ (OBS-204) y 5,1 mg L⁻¹ (OBS-207), así como los menores registros de turbidez con niveles de 1,4 NTU (OBS-204) y 0,8 NTU (OBS-207). Durante las fases de marea creciente se dan los mayores incrementos de turbidez y de concentración de sedimentos en suspensión, hasta llegar durante pleamar a valores de 18,3 NTU y 472 mg L⁻¹ con el OBS-204, y de 19,2 NTU y 61,8 mg L⁻¹ con el OBS-207 (Fig. 2).

Comparación entre los datos de turbidez y concentración registrados por el OBS

Con el OBS-207 se registraron datos de CSS y turbidez en la isla del Morro (ambiente costero) y la Boca de Milagros (ambiente estuarino) (Fig. 1). Por medio de un ajuste de mínimos cuadrados se estableció la correlación entre la turbidez y la CSS (Ecuaciones 5 y 6):

$$CSS_a = 3,75 \times NTU + 5,05 \quad (r^2 = 0,871) \quad (6)$$

$$CSS_b = 3,21 \times NTU + 7,97 \quad (r^2 = 0,875) \quad (7)$$

donde, CSS_a – concentración de sedimentos en suspensión medida en la isla del Morro, CSS_b – concentración de sedimentos en suspensión medida en la Boca de Milagros, y NTU valores de turbidez. En ambos casos se encontró una relación lineal entre la turbidez y la CSS, con coeficientes de correlación relativamente altos y significativos para un nivel de confianza del 99% (Fig. 3, Ecuaciones 6 y 7). En la isla del Morro, ambiente costero, se observaron menores rangos de variación en la CSS (4,0-38,6 mg L⁻¹) y la turbidez (0,1-11,8 NTU) (Fig. 3a), en comparación con la variabilidad de CSS (4,8-93,5 mg L⁻¹) y turbidez (0,2-14,0 NTU) registrada en Boca de Milagros, desembocadura principal del río Mira (Fig. 3b).

Estimación de CSS a partir de registros de ADCP

A partir de matrices de *counts* se obtuvo el nivel de eco (EL) en Boca de Milagros, durante condiciones de baja y alta descarga fluvial, y en el estero Guadaraja (Fig. 4). En Boca de Milagros el nivel de eco está relacionado con la magnitud y estratificación de la velocidad de las corrientes en la columna de agua (Fig. 4a). Cuando la velocidad en la columna de agua es homogénea, o parcialmente homogénea, se produce una débil estratificación del EL. Además, los mayores niveles de eco (≥ 90 dB) se observaron durante los periodos de refluo marea y las primeras horas del flujo marea, cuando se presentaron las mayores velocidades netas ($\geq 1,2$ m s⁻¹). Durante marea alta sólo se observan altos niveles de eco (≥ 80 dB) en las capas más superficiales de la columna de agua (Fig. 4a). Por el contrario, en Boca de Milagros durante condiciones de altas descargas fluviales se observó una marcada estratificación del EL en la columna de agua (Fig. 4b). Se mantiene por encima de 60 dB en los estratos más superficiales (~1,5 m de la superficie), alcanzando valores hasta de 90 dB en condiciones de refluo marea. Los niveles de eco más bajos (~30-50 dB) se presentaron durante la última fase de flujo marea y la fase temprana de refluo marea, en las capas más profundas de la columna de agua (Fig. 4b).

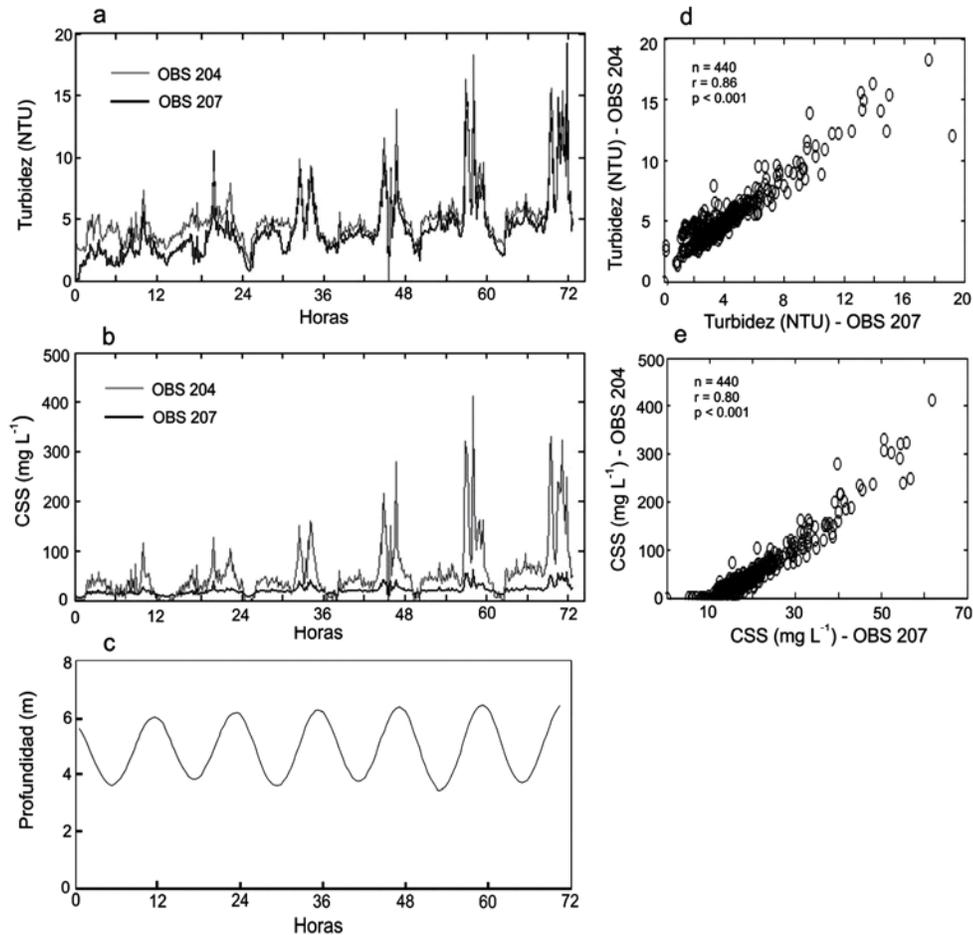


Figura 2. Mediciones de a) turbidez (NTU), b) concentración de sedimentos en suspensión (CSS) (mg L^{-1}) obtenidas con OBS-3A calibrados con sedimento no-cohesivo con diámetro de 0,2 mm (OBS-204) y 0,3 mm (OBS-207), c) nivel del mar (m) durante el muestreo, regresión lineal entre los valores registrados por los OBS-204 y OBS-207 para d) turbidez (NTU) y e) CSS (mg L^{-1}). n: número de datos registrados, r: coeficiente de correlación, P: valor de probabilidad de la prueba F de significancia,

Figure 2. (Right) Measurements a) turbidity (NTU), b) suspended sediment concentration (SSC) (mg L^{-1}) obtained with calibrated OBS-3A-cohesive sediment diameter of 0.2 mm (OBS-204) and 0.3 mm (OBS-207) and c) sea level (m) at sampling. Linear regression between recorded data of OBS-204 and OBS-207 for d) turbidity (NTU) and e) (SSC) (mg L^{-1}). N: number of recorded data, r: correlation coefficient, P: probability value of the F test of significance.

En el estero Guadarajo, un canal de circulación mareal del delta del río Mira (Restrepo & López, 2008), se encontró una distribución homogénea del EL en la columna de agua (Fig. 4b). Los mayores valores de EL (> 74 dB) coinciden con la fase inicial del flujo mareal (Fig. 4b). Durante marea alta se observaron valores bajos de EL (~ 60 dB) en las capas más superficiales, pero también se registraron valores altos de EL (~ 70 -80 dB) cerca al fondo (1,5-3,0 m por encima del fondo) (Fig. 4b). En promedio, en Boca de Milagros se registraron mayores niveles de eco que en el estero Guadarajo (Fig. 4).

Comparación de registros de CSS y nivel de eco (EL)

Desembocadura principal del río Mira (ambiente fluvial)

La CSS estimada a partir de los registros del OBS-3A mostró una sobre-estimación superior al 22% respecto a los valores obtenidos por el filtrado de muestras de agua recolectadas con botellas Niskin (Tabla 1). Los valores registrados por el OBS-3A muestran un incremento de la CSS en función de la profundidad de la columna de agua (Fig. 5a). De igual forma, el EL registrado por el ADCP, directamente comparable con valores de concentración (Holdaway *et al.*, 1999;

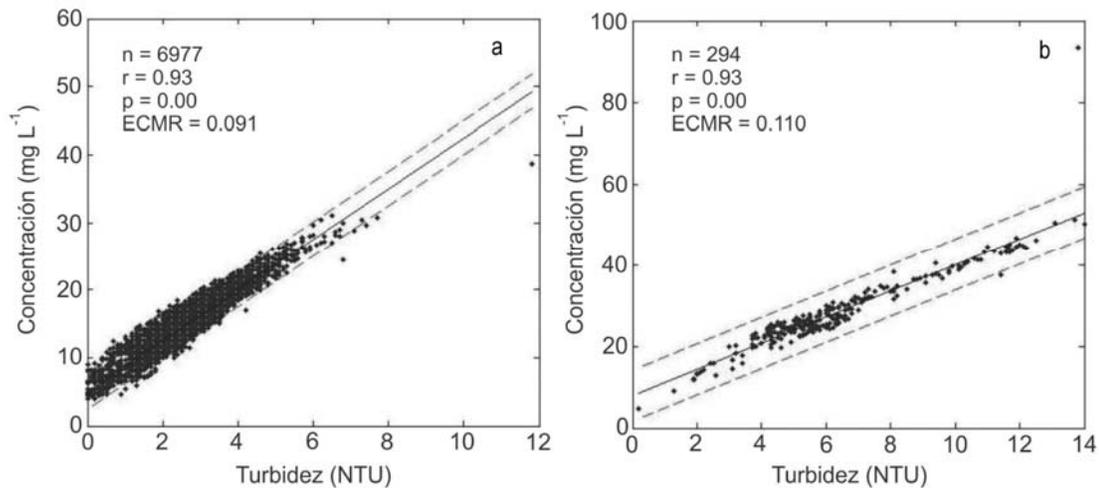


Figura 3. Comparación entre los registros de turbidez (NTU) y CSS (mg L^{-1}) registrados con el OBS-207 en a) isla del Morro y b) Boca de Milagros. n: número de datos registrados, r: coeficiente de correlación, P : valor de probabilidad de la prueba F de significancia, $ECMR$: error cuadrático medio de la estimación.

Figure 3. Comparison between records of turbidity (NTU) and SSC (mg L^{-1}) registered with the OBS-207 in a) Morro Island and b) Milagros mouth. n: number of recorded data, r: correlation coefficient, P : probability value of the F test of significance, $ECMR$: mean square error estimated.

Kostaschuck *et al.*, 2005; Merckebach & Ridderinkhoff, 2006), se incrementó a medida que los registros se acercaron al fondo del río (Fig. 5c). Si se considera que la distribución vertical del tamaño de las partículas en suspensión fue estable durante el tiempo de muestreo, es posible afirmar que un aumento en el EL correspondió a un incremento en la concentración de sedimento en suspensión (Thorne & Hanes, 2002; Merckelbach & Ridderinkhoff, 2006). Con excepción de los resultados observados en la estación A, los valores de CSS obtenidos mediante el análisis gravimétrico de las muestras recolectadas con las botellas Niskin no variaron en función de la profundidad de la columna de agua (Fig. 5a). Las mediciones del OBS-3A y el ADCP se ajustaron más al perfil vertical formulado por Rouse (Martín-Vide, 2000) para describir la distribución del sedimento en suspensión en la columna de agua, así como a mediciones desarrolladas por algunos autores (*i.e.* Masselink & Hughes, 2003; Kostaschuck *et al.*, 2005).

Isla del Morro (ambiente costero)

La serie de datos obtenida se dividió en tres regiones para su análisis (Fig. 6) considerando los horarios de muestreo, los ciclos de marea y las restricciones de seguridad (instrumentos instalados en el muelle de una unidad militar). Se obtuvieron datos simultáneos durante condiciones de refluo mareal (región I – $\Delta h = 0,1$ m), durante el inicio del flujo mareal (región II – $\Delta h = 0,8$ m) y al final del periodo de flujo mareal (región III – $\Delta h = 0,2$ m). En la región I los resultados

de la botella Niskin mostraron una concentración promedio de $6,4 \text{ mg L}^{-1}$, con mínimo y máximo de $4,2$ y $8,2 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Para esta región, el OBS-3A señaló un rango de concentración que varió entre $17,4$ y $30,1 \text{ mg L}^{-1}$ (Fig. 6a). En la región II se observó una mayor variabilidad en la CSS, encontrando concentraciones entre $4,9$ y $15,7 \text{ mg L}^{-1}$ con la botella Niskin, y entre $21,1$ y $31,3 \text{ mg L}^{-1}$ con el OBS-3A (Fig. 6a). Finalmente, en la región III se observaron los valores más altos de toda la serie de datos, encontrando CSS de $16,9$ y $20,4 \text{ mg L}^{-1}$ con la botella Niskin, mientras que el OBS-3A mostró concentraciones superiores a $38,8 \text{ mg L}^{-1}$ (Fig. 6a). Aun cuando se observaron algunas tendencias similares entre los datos de CSS obtenidos por medio de la botella Niskin y el OBS-3A, una prueba t pareada indicó diferencias significativas ($P < 0,1$) entre estas concentraciones, y en general, se encontró una sobrestimación del $\sim 64,2\%$ en los valores de CSS registrados por el OBS-3A con respecto a las concentraciones obtenidas con la botella Niskin (Fig. 6a). La tendencia en los registros de nivel de eco del ADCP presentó un comportamiento similar al mostrado por el OBS-3A (Fig. 6b). Los valores más bajos se presentaron en la región II (64 - 66 dB), mientras que en la región III se alcanzaron valores de hasta 76 dB. La mayor variabilidad se observó en la región II, con valores de EL entre 62 y 70 dB (Fig. 6b). No se encontró una relación estadística significativa entre el nivel de eco y la CSS estimada por medio del OBS-3A o la botella Niskin.

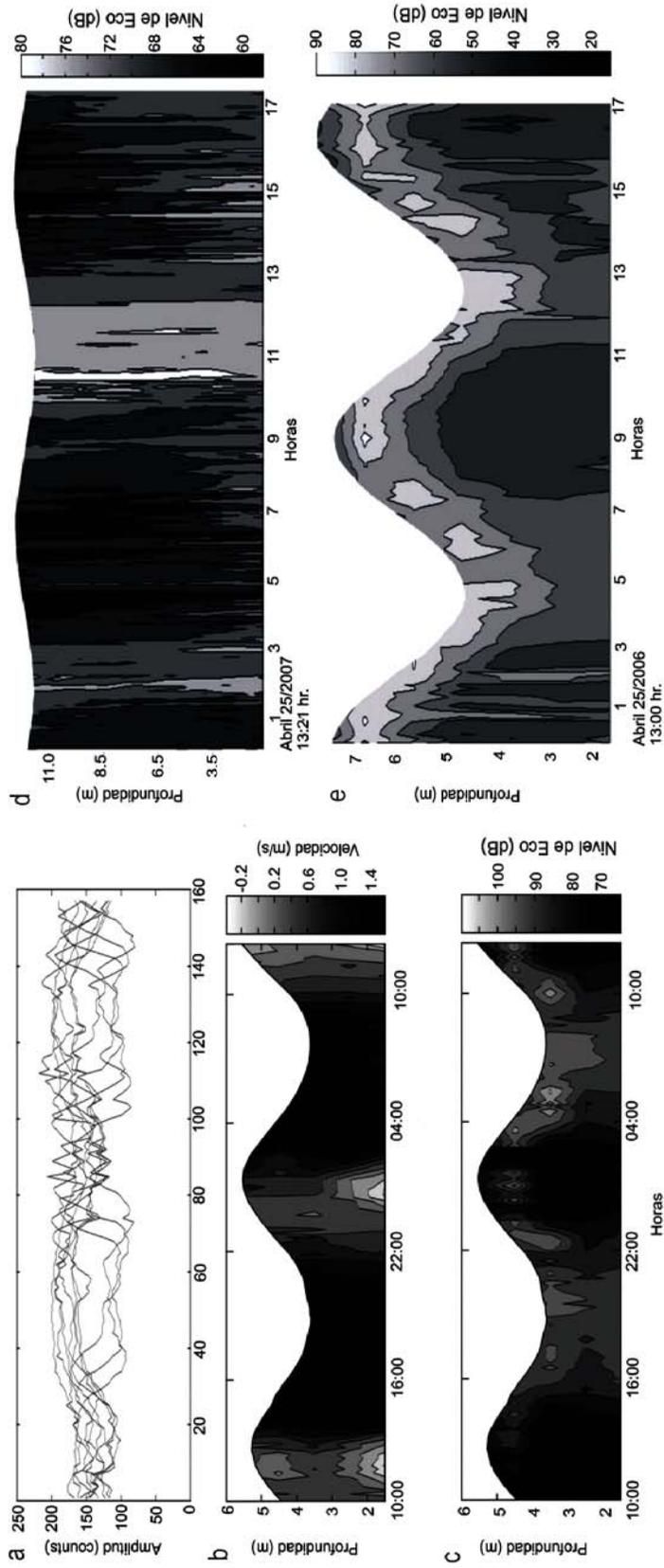


Figura 4. a) Amplitud de la señal de respuesta acústica (counts), b) variabilidad vertical y temporal de la velocidad neta de corrientes ($m s^{-1}$), c) nivel de eco (dB) registrados en Boca de Milagros (estación de baja descarga fluvial). Variabilidad vertical y temporal del nivel de eco (dB) registradas en d) Estero Guadaraja e) Boca de Milagros (estación de alta descarga fluvial).

Figure 4. a) Amplitude of the acoustic response signal (counts), b) vertical and temporal variability of the net rate of flow ($m s^{-1}$), c) the level of echo (dB) recorded in the Boca de Milagros (low fluvial discharge season), Vertical and temporal variability of echo level (dB) recorded at the Estero Guadaraja and d) Boca de Milagros (high fluvial discharge season).

Tabla 1. Concentración de sedimentos en suspensión obtenidos con el OBS-3A y una botella Niskin en cuatro estaciones (Estaciones A, B, C y D) ubicadas sobre una sección transversal de río Mira junto a la bocatoma del acueducto de la ciudad de Tumaco (Figs. 1 y 5).

Table 1. Suspended sediment concentration measured with OBS-3A and Niskin Bottle in four sites (A, B, C and D) in a cross section of the Mira River near the aqueduct intake of Tumaco City (Figs. 1 y 5).

Profundidad (m)	Concentración de sedimentos en suspensión – CSS (mg L ⁻¹)							
	Estación A (1°40'51,4''N, 78°75'31,0''W)		Estación B (1°40'51,8''N, 78°75'30,6''W)		Estación C (1°40'52,2''N, 78°75'30,2''W)		Estación D (1°40'53,2''N, 78°75'29,1''W)	
	OBS-3A	B. Niskin	OBS-3A	B. Niskin	OBS-3A	B. Niskin	OBS-3A	B. Niskin
1	68,3	36,3	66,1	52,3	70,1	35,2	72,3	31,9
2	70,8	42,8	72,8	54,3	71,8	40,6	74,2	56,7
3	72,3	43,4	74,9	32,8	74,9	49,4	76,6	53,4
4	75,9	49,2	74,6	51,5	72,8	49,5	79,3	23,4
5	-	-	79,2	45,2	77	42,9	84,8	69,2

DISCUSIÓN

Calibración de equipos OBS-3A y ADCP

Las señal óptica del OBS-3A fue calibrada para cuantificar la CSS, y la respuesta acústica del ADCP fue corregida para obtener un indicador (*i.e. proxy*) de la variabilidad de la CSS en el delta del río Mira. La aplicación de este procedimiento en un delta tropical permitió estimar la variabilidad (*i*) temporal (OBS-3A y ADCP) y (*ii*) espacial (ADCP) de la CSS, (*iii*) relacionar la variabilidad de la CSS con los procesos hidrodinámicos del delta (OBS-3A y ADCP), y (*iv*) estimar flujos netos de transporte de sedimentos a partir de la integración de datos de velocidad y CSS (ADCP). Sin embargo, la ausencia de una correlación estadística significativa entre los datos del OBS-3A y el ADCP (Figs. 5 y 6) indicó que la cuantificación de la CSS en el delta no es concluyente. Lo anterior puede estar relacionado con (*i*) el efecto del tamaño de grano en la calibración de los dispositivos, (*ii*) la variabilidad espacial de las características texturales del sedimento, (*iii*) dificultades en la logística del diseño experimental, y (*iv*) el efecto de la atenuación por la concentración de partículas en suspensión en la corrección de la señal acústica (Baker & Lavelle, 1984; Jiufa & Chen, 1998; Creed *et al.*, 2001; Thorne & Hanes, 2002; Williams *et al.*, 2003; Kostaschuck *et al.*, 2005).

La calibración de dos OBS-3A con diferentes tamaños de grano mostró que una variación de sólo 0,1 mm conduce a diferencias hasta de ~37% en los valores de CSS (Fig. 2b). Esta significativa diferencia implica que la relación entre la radiación registrada por el OBS-3A y la CSS varía exponencialmente, ya

que la cantidad de radiación retrodispersada es inversamente proporcional al diámetro de la partícula (D&A Instruments, 2004; Fettweis *et al.*, 2006). Lo anterior indica que la variabilidad temporal y espacial del tamaño de grano constituye una restricción fundamental en la calibración de la señal óptica del OBS-3A. De acuerdo con Bunt *et al.* (1999), una relación lineal entre la turbidez y la CSS indicó que durante el tiempo de muestreo el tamaño de grano se mantuvo relativamente constante, y que este último determinó la pendiente de la recta de ajuste (Bunt *et al.*, 1999). En el delta del río Mira se obtuvieron relaciones lineales significativas entre turbidez y CSS (Fig. 3). Además, las pendientes de las rectas de ajuste en la isla del Morro y la Boca de Milagros mostraron valores de 3,75 y 3,21, respectivamente (Ecuación 5 y 6). Lo anterior sugiere que en el delta del río Mira el tamaño de grano permaneció relativamente constante durante el tiempo de muestreo y también a escala geográfica (Isla del Morro y Boca de Milagros (Fig. 1)). Considerando que la respuesta del OBS-3A está determinada por algunas de las características del sedimento (*i.e.* tamaño, forma, color), esta relación lineal es un indicador favorable para el uso del OBS-3A en la estimación de la CSS en el delta del río Mira. Sin embargo, las curvas de ajuste entre turbidez y CSS únicamente tienen validez a escala local y sólo deben ser empleadas para propósitos descriptivos o semi-cuantitativos.

Para comparar los resultados de cada uno de los dispositivos (OBS-3A y ADCP) se requieren mediciones simultáneas en un mismo punto de la columna de agua. Esta condición es difícil de asegurar (Kostaschuck *et al.*, 2005). El OBS-3A requiere estar

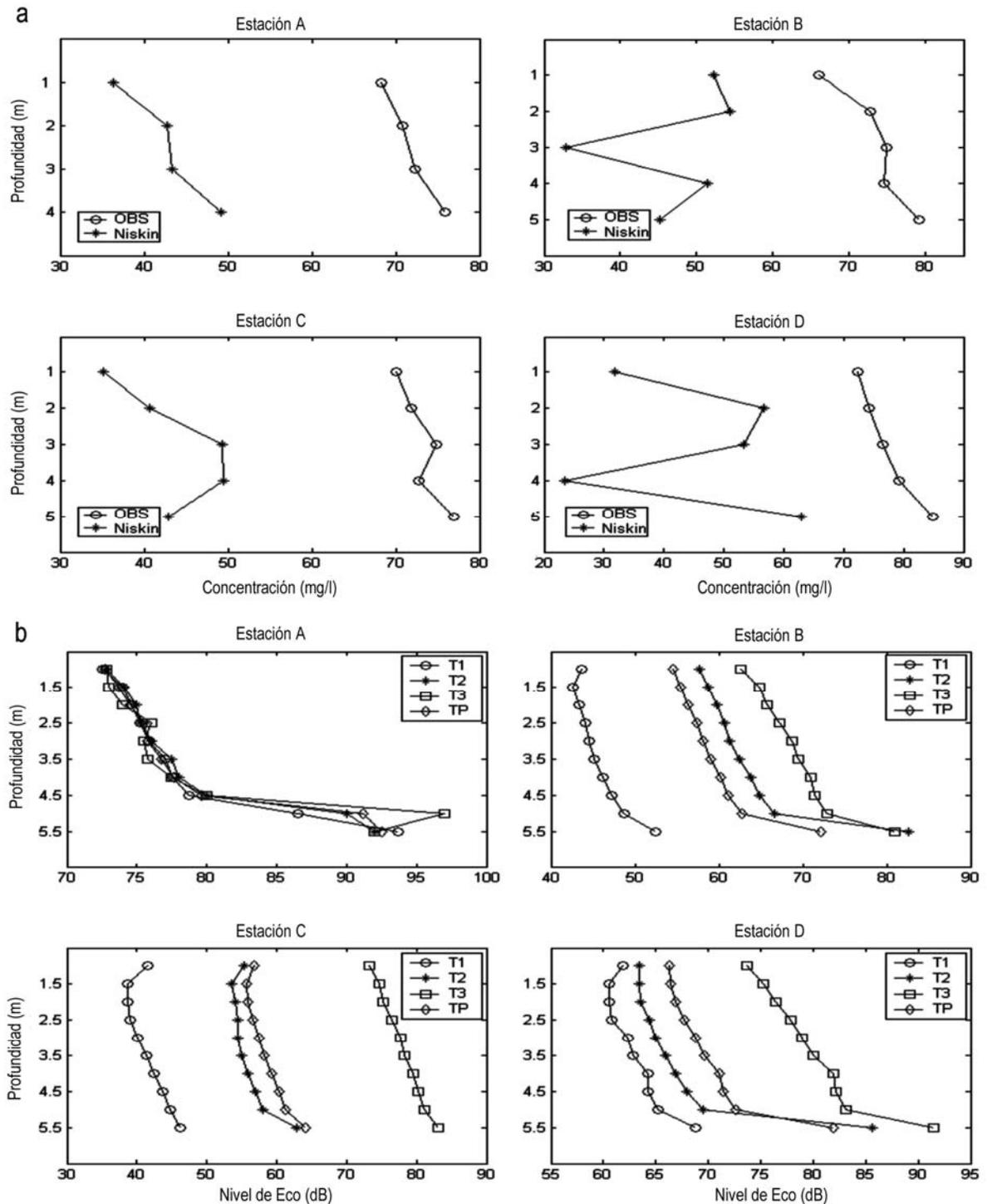


Figura 5. Muestreo en cuatro estaciones ubicadas en una sección transversal de la desembocadura del río Mira: a) Valores de CSS (mg L^{-1}) obtenidos con la botella Niskin y el dispositivo OBS-3A, y b) nivel de eco (dB) registrado por cada uno de los de transductores ($T1$, $T2$ y $T3$) del correntómetro ADCP (TP: valor medio de nivel de eco).

Figure 5. Sampling at four stations in a cross section of the Mira River estuary: a) Values of SSC (mg L^{-1}) obtained from the Niskin bottle and OBS-3A device, and b) echo level (dB) recorded by each of the transducers ($T1$, $T2$ and $T3$) of the ADCP current meter (TP: mean echo level).

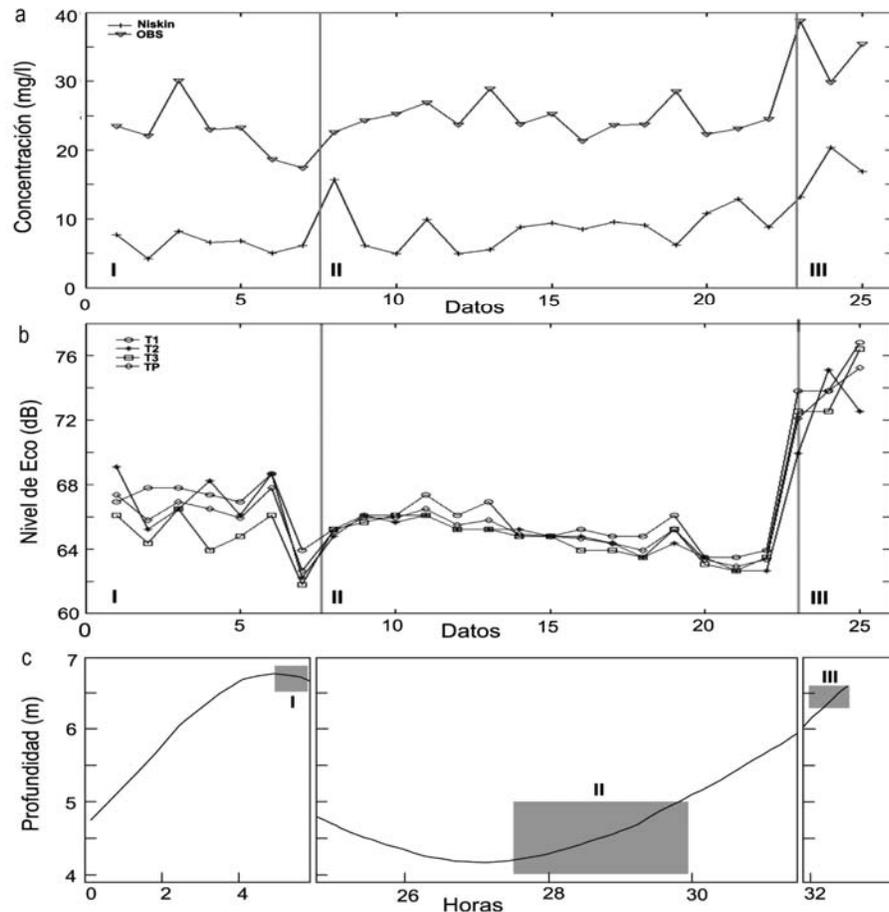


Figura 6. Muestreo en isla del Morro. a) valores de CSS (mg L^{-1}) obtenidos con la botella Niskin y el dispositivo OBS-3A, b) nivel de eco (dB) registrado por los transductores (T1, T2 y T3) del correntómetro ADCP (TP: valor medio de nivel de eco). Los numerales I, II, III indican las diferentes etapas del muestreo y entre paréntesis se señala su duración; y c) localización de las etapas de muestreo dentro del ciclo de nivel del mar registrado durante la campaña de medición.

Figure 6. Sampling at Morro Island. a) values of SSC (mg L^{-1}) obtained from the Niskin bottle and the device OBS-3A, b) echo level (dB) recorded by transducers (T1, T2 and T3) ADCP current meter (TP: mean echo level). The numerals I, II, III indicate the different stages of sampling and in brackets indicates the length, and c) location of the sampling stages in the cycle of sea level recorded during the measurement campaign.

sumergido a diferentes profundidades de la columna de agua para realizar mediciones puntuales de CSS. En zonas donde se registraron altas velocidades ($> 0,6 \text{ m s}^{-1}$) el OBS-3A puede sufrir un desplazamiento longitudinal. Por lo tanto, no es posible garantizar que en estas condiciones las lecturas (OBS-3A y ADCP) sean efectuadas a la misma profundidad en la columna de agua. Además, se ha señalado que durante condiciones de turbulencia generadas por corrientes con velocidades $> 0,7 \text{ m s}^{-1}$ se generan señales adicionales de retrodispersión acústica, que afectan las mediciones de los dispositivos (Reichel, 1998; Kostaschuck *et al.*, 2005; Merkelbach & Ridderinkhoff, 2006).

El proceso de conversión de la señal acústica del ADCP a CSS requiere la corrección de la señal

acústica a nivel de eco (EL) (Ecuación 3) y la obtención de una curva de ajuste (lineal o logarítmica) entre CSS y EL (*e.g.* Holdaway *et al.*, 1999; Gartner, 2002; Thorne & Hanes, 2002; Kostaschuck *et al.*, 2005). Los valores de *counts* entregados por el ADCP (Fig. 4a) fueron corregidos considerando las pérdidas en intensidad de la señal originadas por la dispersión geométrica y la atenuación causada por la propagación del haz acústico en un medio líquido (Ecuación 3). Aun cuando la Ecuación 3 considera la influencia de las partículas en suspensión en la atenuación de la señal, algunos autores (Álvarez & Jones, 2001; Merkelbach & Ridderinkhoff, 2006) señalan que los procesos de ajuste *in situ*, y la implementación de modelos de retrodispersión (*i.e.* *backscatter*) en la corrección de la intensidad de la señal acústica del

ADCP, hacen innecesaria la corrección por atenuación de las partículas en suspensión al incluirla en forma implícita dentro de los términos y constantes del ajuste (Merkelbach & Ridderinkhoff, 2006; USGS, 2006). Las aproximaciones que no incluyen el efecto de las partículas en suspensión en la atenuación de la señal del ADCP han sido aplicadas con bastante éxito en ambientes dominados por sedimentos no-cohesivos (Thorne & Hanes, 2002). Sin embargo, la corrección por dispersión y absorción de la energía acústica por partículas en suspensión puede mejorar en forma significativa la estimación de la CSS en otro tipo de ambientes (e.g. Holdaway *et al.*, 1999; Creed *et al.*, 2001; Kostaschuck *et al.*, 2005). Por ejemplo, Creed *et al.* (2001) utilizaron un OBS-3A y un LISST-100 para examinar la variación de la señal de un ADCP con respecto a gradientes de concentración y distribución vertical del tamaño de los sedimentos. Holdaway *et al.* (1999) emplearon un transmisómetro para calibrar la respuesta del ADCP en función de la distribución vertical del tamaño de sedimento y la profundidad de las mediciones en la columna de agua. En ambos casos, la relación estadística entre EL y CSS mejoró hasta un 35%. Thorne & Hanes (2002) determinaron que en ambientes mixtos, con presencia de sedimentos cohesivos y no-cohesivos, se debe incluir la corrección por dispersión y absorción de la energía acústica de partículas en suspensión (Ecuación 3) para obtener resultados más confiables en la estimación de la CSS. La presencia de arenas finas es dominante en el delta del río Mira, pero también se encuentran arcillas, limos y materia orgánica en suspensión (CCCP, 2003). Por lo tanto, se puede afirmar que en el delta del río Mira la corrección por dispersión y absorción asociada a partículas en suspensión debe ser considerada en el ajuste de la señal acústica del ADCP (Ecuación 3), para incluir los procesos de floculación y variabilidad vertical del diámetro de la partícula, y obtener una mejor estimación de la CSS (Jiufa & Chen, 1998; Holdaway *et al.*, 1999; Thorne & Hanes, 2002).

Concentración de sedimentos en suspensión en el delta del río Mira

Aunque las estimaciones de CSS en el delta del río Mira no fueron concluyentes, las mediciones efectuadas permiten analizar preliminarmente el efecto de los procesos hidro-sedimentarios sobre la variabilidad de la CSS en el delta. Los mayores y menores valores de CSS y EL se encontraron en Boca de Milagros y en isla del Morro, respectivamente. Mientras que el estero Guadarajo mostró valores intermedios (Figs. 2, 4, 5 y 6). Este patrón destaca la predominancia de los procesos fluviales en la variabilidad y distribución de los sedimentos en

suspensión en el delta, conforme a lo expuesto por Restrepo & López (2008) y Monroy *et al.* (2008). La Boca de Milagros ha sido catalogada como un delta de marea bajante, con una circulación general de descarga neta durante altos y bajos aportes fluviales (Monroy *et al.*, 2008). Mientras que el estero Guadarajo, se ha clasificado como un sistema mareal de bajos aportes fluviales con altos valores de estratificación vertical (Monroy *et al.*, 2008) y la isla del Morro como un sistema de captación de sedimentos (Molares, 2008).

La variabilidad de la CSS en un estuario depende principalmente de descargas fluviales, circulación gravitacional, procesos de sedimentación y resuspensión de sedimentos finos (Dyer, 1995; Jiufa & Chen, 1998). En la isla del Morro (Figs. 2 y 6) la variabilidad de la CSS está controlada por los procesos de deriva litoral y resuspensión de partículas finas. Durante los periodos de flujo mareal aumenta la velocidad de las corrientes y se produce un flujo neto hacia el continente. Estos flujos transportan sedimentos en suspensión producidos en el sistema de descarga principal del río Mira, los cuales han definido el sistema de islas barrera localizado al nororiente del delta (Fig. 1) (Restrepo & López, 2008). Aunque en reflujos se presentan corrientes de magnitud similar que originan procesos de resuspensión, éstos están limitados por la compactación de los sedimentos depositados, procesos de floculación y un ambiente de moderada energía de oleaje (Jiufa & Chen, 1998; Tattersall *et al.*, 2003; Restrepo *et al.*, 2008). Un balance sedimentario realizado por Molares (2008) entre 2005 y 2007 indicó que la isla del Morro presenta un balance sedimentario positivo, controlado por los aportes fluviales del río Mira. Lo expuesto por Molares (2008) coincide con los resultados de este estudio, e indica que la isla del Morro constituye un ambiente de captación de sedimentos de plataforma, que son transportados por deriva litoral. Los máximos valores de CSS en el estero Guadarajo, también están relacionados con los aportes de plataforma por deriva litoral (Fig. 4b). Los aportes fluviales son muy limitados en este estero. En condiciones de flujo mareal experimenta un transporte neto hacia el continente, con bajas velocidades ($< 0,3 \text{ m s}^{-1}$) (Monroy *et al.*, 2008). En estas condiciones de flujo, es probable que la resuspensión sea inhibida por los umbrales requeridos para generar el arrastre del sedimento de fondo (*i.e. shear bottom stress*) (e.g. Holdaway *et al.*, 1999). En ambientes con presencia de sedimentos cohesivos y materia orgánica, los umbrales del esfuerzo cortante de fondo son relativamente altos (Dyer, 1986).

En Boca de Milagros se presenta un dominio fluvial durante todo el ciclo de marea, especialmente durante condiciones de reflujo mareal cuando el efecto de la cuña salina disminuye (Fig. 4). Se observa una estratificación vertical de la CSS (*i.e.* valores de EL), con mayores concentraciones en la superficie, incluso en periodos de aguas quietas (*i.e.* *slack water*). En este caso se presentan altas CSS (*i.e.* altos valores de EL) como resultado del transporte de sedimentos del río Mira; un sistema fluvial con alto gradiente hidráulico, localizado en una zona de convergencia de placas tectónicas activas, e intensas precipitaciones, y por ende, con una alta producción de sedimentos ($1025 \text{ ton km}^2 \text{ año}^{-1}$) (Restrepo & López, 2008). Durante pleamar, se observan aguas con muy bajas CSS en la parte más profunda de la columna de agua y altas CSS en las capas superficiales. Lo anterior indica que los procesos de resuspensión (inducidos por marea y oleaje) no son tan competentes como el transporte fluvial (Shen *et al.*, 1982; Dyer, 1986; Jiufa & Chen, 1998; Williams *et al.*, 2003), y que la mezcla de masas de agua, por efectos de la circulación gravitacional, está limitada por la magnitud de las descargas fluviales (Fig. 4). Cuando las descargas fluviales disminuyen, la circulación gravitacional es más efectiva y se presentan CSS más homogéneas en la columna de agua, especialmente durante pleamar (Fig. 4a). Los resultados obtenidos coinciden con los rasgos geomorfológicos predominantes en el delta del río Mira (Monroy *et al.*, 2008; Restrepo & López, 2008). Debido a que la asimetría en la magnitud de las velocidades en un delta de marea bajante no necesita ser muy marcada para producir una dirección predominante en el transporte de sedimentos, la dominancia del reflujo mareal se refleja directamente en el transporte neto de sedimentos hacia el mar y la formación de bajos frontales (Dyer, 1986), como los descritos por Monroy *et al.* (2008). A su vez, estos bajos disipan la energía del oleaje incidente (Restrepo *et al.*, 2008) y limitan la resuspensión inducida por el oleaje.

CONCLUSIONES

Los resultados variables encontrados en la medición de CSS por medio de dispositivos OBS-3A calibrados con sedimento de diámetro diferente, señalan la importancia de utilizar este dispositivo de medida en aguas donde el tamaño de los sedimentos permanezca lo más homogéneo posible. Considerando que lo anterior es difícil de garantizar en un ambiente deltaico y estuarino, es conveniente efectuar un estudio previo acerca del diámetro medio de los sedimentos y de su variabilidad en la columna de

agua, con el fin de ajustar el proceso de calibración, y así garantizar mediciones más precisas.

A objeto de utilizar la amplitud de la señal registrada por el ADCP como un estimador de la concentración de los sedimentos en suspensión, se aplicó una ecuación de ajuste para la dispersión del haz acústico y la absorción de energía por el agua. Con esta ecuación se obtuvieron valores de intensidad que son función de la concentración de sedimentos en suspensión e independientes de la dispersión de la señal acústica en el agua o la absorción de la señal en el agua y en los sedimentos. En este contexto se considera que el valor de intensidad ya corregido (nivel de eco, EL), es directamente comparable con valores de concentración. Al aplicar la ecuación de corrección a una serie de datos registrados durante campañas realizadas en los años 2006 y 2007 en el delta del río Mira, se encontraron relaciones con el ciclo mareal, asociados con los periodos de descarga del río.

Se realizaron dos muestreos conjuntos utilizando el OBS-3A y el ADCP, con el fin de realizar una comparación entre las dos mediciones. En el primero de ellos, realizado en la desembocadura principal del río Mira (alta influencia fluvial), no se encontró una relación significativa entre los registros obtenidos con los dispositivos OBS-3A y ADCP, debido principalmente a las condiciones del muestreo. Sin embargo, los datos del OBS-3A y del ADCP mostraron una tendencia similar al registrar incrementos simultáneos de concentración y EL hacia el fondo, respectivamente. En el segundo muestreo, realizado en la isla del Morro, aunque no fue posible establecer relaciones cuantitativas entre los datos de EL y concentración (OBS-3A), es posible apreciar la sensibilidad de estos instrumentos frente a la variación espacial y temporal de la CSS. Sin embargo, para mejorar las relaciones cuantitativas entre las mediciones del OBS-3A y el ADCP es preciso diseñar un muestreo experimental que incorpore los efectos de la variabilidad del diámetro de partícula, así como un mayor número de mediciones de CSS para encontrar una ecuación de ajuste para las lecturas del ADCP.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto “Modelos de Morfodinámica Litoral para definir Escenarios de Vulnerabilidad ante Amenazas Naturales: Bahía de Tumaco-Delta del Río Mira”, ejecutado por el Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP) y la Universidad EAFIT, con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (Código: 12160517616). Los autores expresan su sincero agra-

decimiento a los evaluadores, quienes contribuyeron a mejorar el manuscrito de manera significativa.

REFERENCIAS

- Alvarez, L.G. & S.E. Jones. 2001. Factor influencing suspended sediments flux in the upper gulf of California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 54: 747-759.
- Baker, T.E. & J.W. Lavelle. 1984. The effect of particle size on the light attenuation coefficient of natural suspensions. *J. Geophys. Res.*, 89(65): 8197-8203.
- Bunt, J.A.C., P. Larcombe & J.C. Jago. 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter. *Cont. Shelf Res.*, 19: 1199-1220.
- Butt, M. & R. Ganderton. 2002. A simple method for calibrating optical backscatter sensor in high concentrations of non-cohesive sediments. *Mar. Geol.*, 192: 419-424.
- Campbell, D.E. & R.W. Spinrad. 1987. The relationship between light attenuation and particle characteristic in a turbid estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 25: 53-65.
- Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP). 2003. Aportes al entendimiento de la bahía Tumaco: entorno oceanográfico, costero y de riesgos. CCCP: Tumaco, 236 pp.
- Creed, E., A. Pence & K. Rankin. 2001. Inter-comparison of turbidity and sediment concentration measurements from an ADCP, an OBS-3, and a LISST. *Dept. Environ. Prot. New Jersey*, pp. 27.
- D&A Instrument. 2004. OBS-3A Instruction manual. D&A Instrument, 46 pp.
- Dinehart, R.L. & J.R. Burau. 2005. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. *J. Hydrol.*, 314: 1-21.
- Dronkers, J. 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Neth. J. Sea Res.*, 20: 117-131.
- Dyer, K. 1986. Coastal and estuarine sediment dynamics: Wiley Interscience, Chichester, pp. 257.
- Dyer, K. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: G.M. Perillo (ed.). *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. *Dev. Sedimentol.*, pp. 45-79.
- Fettweis, M., F. Francken, V. Pison & D. Van Den Eynde. 2006. Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Mar. Geol.*, 235: 63-74.
- Francois, R. & G. Garrison. 1982. Sound absorption based on ocean measurements. Part I. Pure and magnesium sulphate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(3): 896-907.
- Francois, R. & G. Garrison. 1982. Sound absorption based on ocean measurements, Part II. Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(6): 1879-1890.
- Gartner, W. 2002. Estimation of suspended solids concentration based on acoustic backscatter intensity: theoretical background. *Turbidity and other sediments surrogates workshop*, pp. 1-3.
- Holdaway, P., D. Thorne, R. Flatt, E. Jones & A. Prandle. 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Cont. Shelf Res.*, 19: 421-441.
- Jiufa, L. & Z. Chen. 1998. Sediment resuspension and implications for turbidity maximum in the Changjiang Estuary. *Mar. Geol.*, 148: 117-124.
- Jones, S.E., C.F. Jago, D. Prandle & D. Flatt. 1994. Suspended sediment dynamics: measurements and modeling in the Dover strait. In: K.J. Beven, P.C. Chatwin & T.H. Millbank (eds.). *Mixing and transport in the environment*. Wiley, New York, pp. 183-201.
- Kostaschuk, R., J. Best, P. Villard, J. Peakal & M. Franklin. 2005. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68: 25-37.
- Krone, R. 1978. Aggregation of suspended particles in estuaries. In: B. Kjerfve (ed.). *Estuarine transport processes*. University South Carolina Press, South Caroline, pp. 177-190.
- Lohrmann, A. 2001. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. Nortek Technical Note N°003. Document No. N4000-712; 2001. Nortek, Norway, pp. 9.
- Martin-Vide, J. 2000. Ingeniería fluvial. Ediciones UPC, Barcelona, pp. 209.
- Masselink, G. & M. Hughes. 2003. An introduction to coastal processes and geomorphology. Oxford University Press, Londres, pp. 345.
- Meadows, P.S. & J.L. Campbell. 1981. Introducción a las ciencias del mar. Acribia, Zaragoza, pp. 325.
- Merckelbach, L. & H. Ridderinkhof. 2006. Estimating suspended sediment concentration using backscatterance from an acoustic Doppler profiling current meter at a site with strong tidal currents. *Ocean Dynam.*, 56: 153-168.
- Milliman, J. & R. Meade. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, 91:1-21.
- Molares, B. 2008. Impactos de los deltas en la seguridad y transporte marítimo: sedimentación en la bahía de Tumaco, delta del río Mira. In: J.D. Restrepo (ed.). *Los deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, pp. 208-217.

- Monroy, C., J.D. Restrepo & S. López. 2008. Morfodinámica del delta del río Mira. En: J.D. Restrepo (ed.). Los deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, pp. 145-179.
- Montgomery, D. & G. Runger. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill, México D.F., 456 pp.
- Nichols, M. & R. Biggs. 1985. Estuaries. In: R. Davis (ed.). Coastal sedimentary environments. Springer-Verlag, New York, pp. 77-186.
- Nortek, A.S. 2004. User guide AWAC acoustic wave and current meter. Nortek, Noruega, pp. 43.
- Otero, L. & J.C. Restrepo. 2008. Modelamiento numérico y dinámico en deltas: aplicación de modelos hidrodinámicos para el análisis oceánico del delta del río Mira. In: J.D. Restrepo (ed.). Los deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, pp. 112-130.
- Reichel, G. 1998. Suspended sediment monitoring: use of Acoustic Doppler Current Profiler. In: R.W. Herschy & R.W. Fairbridge (eds.). Encyclopedia of hydrology and water resources. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 620-650.
- Restrepo, J.C. & L. Otero. 2007. Aplicación de modelos hidrodinámicos para evaluar la dinámica del oleaje y el nivel del mar en el sistema deltaico del río Mira. Bases para la gestión costera. Bol. Cient. CCCP, 14: 31-48.
- Restrepo, J.C., L. Otero, S. López & C. Monroy. 2008. Los deltas y el oleaje, caso delta del río Mira: estadísticas, clima, corrientes, energía y procesos de asomeramiento. In: J.D. Restrepo (ed.). Los deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, pp. 70-95.
- Restrepo, J.D. & S.A. López. 2008. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia. J. South Am. Earth Sci., 25: 1-21.
- Shen, H.T., H.F. Zhu & Z.C. Mao. 1982. Circulation of the changjiang estuary and its effect on the transport of suspended sediment. In: H.T. Shen (ed.). Estuaries comparissons. Academic Press, London, pp. 677-691.
- Tattersall, G.R., A.J. Elliot & N.M. Lynn. 2003. Suspended sediment concentrations in the Tamar estuary. Estuar. Coast. Shelf Sci., 57: 679-688.
- Thorne, D. & M. Hanes. 2002. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. Cont. Shelf Res., 22: 603-632.
- United States Geological Survey (USGS). 1999. Field methods for measurements of fluvial sediments. Techniques of Water-Resources Investigation of the U.S. Geological Survey. Application of Hydraulics, U.S.A., pp. 75.
- United States Geological Survey (USGS). 2006. Use an ADCP to Compute Suspended-Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York. Scientific Investigations Report 2006-5055. [pubs.usgs.gov/sir/2006/5055/pdf/SIR2006-5055.pdf.]. Revisado: 30 enero 2010.
- William, J., P. Bell, J. Humphrey, P. Hardcastle & P. Thorne. 2003. New approach to measurement of sediment processes in a tidal inlet. Cont. Shelf Res., 27: 1239-1254.

Received: 27 March 2011; 14 January 2012