

Campaña de medida de concentración de sólidos en suspensión en la desembocadura del río Llobregat

MANUEL SOTILLO MEMBIBRE (*)

RESUMEN La concentración de los sedimentos en suspensión fue medida con un ADCP en la desembocadura del río Llobregat cerca de Barcelona. La intensidad retrodifundida del ADCP se corrigió por la pérdida de sonido en el agua y calibrada con el análisis de muestras de agua en laboratorio, tomadas en distintos puntos de la columna de agua. Esto es válido en los casos donde el tamaño de las partículas es pequeño comparado con la longitud de onda así puede aplicarse la ley de dispersión de Rayleigh.

SUSPENDED SEDIMENT MEASUREMENTS IN THE LLOBREGAT RIVER MOUTH

ABSTRACT *Sediment concentrations were measured at the Llobregat river mouth near Barcelona, using an ADCP. The ADCP backscatter intensity was corrected for sound loss in the water column and was calibrated to sediment concentrations on the basis of water samples, that were taken in the water column. This holds for cases where particles are small compared to the acoustic wave length so that the Rayleigh scattering law applies, which is true for the ADCP.*

Palabras clave: Sedimentos en suspensión, Turbidez, ADCP.

Keywords: Solids in suspension, Turbidity, ADCP.

1. INTRODUCCIÓN

En Septiembre de 2009 se realizó una campaña en el área del puerto de Barcelona y la desembocadura del río Llobregat, para evaluar la técnica de las medidas de sólidos en suspensión a partir de la intensidad retrodifundida de un perfilador de corrientes de efecto doppler (ADCP) correlacionándolo con las medidas de un OBS y el análisis de muestras de agua tomadas al mismo tiempo.

1.1. PERFILADOR DE CORRIENTES DE EFECTO DOPPLER

El perfilador de corrientes transmite pulsos acústicos a la columna de agua. Las partículas en suspensión que arrastran las corrientes provocan ecos que los recibe ("escucha") el instrumento. Estos ecos permiten al ADCP formar perfiles verticales de velocidades en toda la columna de agua con gran precisión.

Aunque fue diseñado para medir perfiles de corrientes, se han desarrollado aplicaciones para medir la concentración de partículas en suspensión (SSC) en toda la columna de agua.

1.2. FUNCIONAMIENTO

Los equipos emiten una secuencia de pulsos (bins) en paquetes (ensambles) codificados de forma simultánea por cada uno de los haces (beams) de emisión, correspondiente a los emisores del equipo.

Los equipos suelen tener cuatro placas emisoras, en configuración "Beyere" o "Janus".

Las placas emisoras inmediatamente después de la emisión de un paquete de pulsos, pasan a ser receptoras de los haces retrodifundidos por las partículas que existen en el agua, que actúan a su vez como retrodifusoras.

Cada placa receptora "escucha" el eco o haz retrodifundido en la dirección del haz inicial (beam). Existe por lo tanto una capa "oscura" cercana a los emisores cuyos ecos se superponen con los pulsos emitidos, creándose un espacio temporal durante el que se evita la recepción.

2. BASE TEÓRICA PARA EL EMPLEO DE UN ADCP EN LAS MEDIDAS DE LA SSC

El método para estimar la concentración de sedimentos en suspensión medida con un sistema de ultrasonidos, que en nuestro caso es un ADCP, se basa en la ecuación del Sonar, derivada por Ulrick en 1975 y adaptada al caso de sistemas Doppler por Deines(Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, 1999).

(*) Ldo. C. Físicas, Ingeniero Obras Públicas. Técnico Facultativo G.Superior OO.AA: de Mº Medio Ambiente Rural y Marino. Centro de Estudios de Puertos y Costas.CEDEX. Email: Manuel.sotillo@cedex.es. c/ Antonio López 81. 28026 Madrid.

Parámetro símbolo	Referencia	Definición
Nivel de la Fuente SL	1 yd desde la fuente sobre su eje acústico	$10 \log \frac{\text{Intensidad de la fuente}}{\text{Intensidad de referencia}}$
Perdida por Transmisión TL	1 yd desde la fuente y en el receptor o objetivo	$10 \log \frac{\text{Intensidad señal a 1 yd.}}{\text{Intensidad en objetivo}}$
Nivel de energía retrodifundida por el Objetivo TS	1 yd desde el centro del objetivo	$10 \log \frac{\text{Intensidad eco a 1 yd del objetivo}}{\text{Intensidad incidente}}$

TABLA 1. Tomada del libro "Principles of underwater sound" Ulrik 1983.

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (1)$$

Donde: EL = Intensidad de eco, SL = Intensidad de la fuente, TL = Perdidas de transmisión y, TS = Nivel de la energía retrodifundida por las partículas.

La intensidad del eco es el sonido medido por el ADCP. Para obtenerlo en dB:

$$EL = K_c(E - E_r) \quad (2)$$

Donde K_c es el factor de escala (dB/cuentas), E es la intensidad del eco medida por el ADCP en cuentas y E_r la intensidad del receptor también en cuentas. El factor de escala lo proporciona el fabricante dando el número de serie.

La intensidad de la fuente SL es la cantidad de energía transmitida. Deines (1999). En su trabajo Deines la formuló como una versión de la ecuación del sonar para el ADCP en decibelios.

$$SL = C + 10 \log (T_T / LP_T) \quad (3)$$

C es una constante (dB), T_T es la temperatura del transductor del ADCP, L es la longitud del pulso transmitido y P_T es la potencia transmitida.

Perdida por transmisión:

$$TL = 10 \log (R^2) + 2R\alpha \quad (4)$$

R el camino recorrido por la onda a lo largo del haz en metros y α es el coeficiente de atenuación [dB/m]. El exponente "2" se debe a considerar los caminos de ida (fuente objetivo) y vuelta (objetivo-receptor).

El coeficiente de atenuación α es la suma de la absorción del agua (α_w) y la atenuación de las partículas (α_s). François & Garrison (1982a,b).

La absorción del agua es la suma de relación de las componentes del ácido bórico, las componentes del sulfato de magnesio y la componente de la viscosidad (véase apéndice).

TS : Nivel de energía retrodifundida por las partículas.

Mide la capacidad de las partículas para retrodifundir el sonido que reciben. La sección transversal acústica tiene unidades de área.

La aplicación de la ecuación de retrodifusión de ondas acústicas de alta frecuencia, como en el caso de los perfiladores de corrientes ADCP's, fue realizada por Deines (1999), y da la siguiente expresión final para el coeficiente de retrodifusión entre la intensidad emitida y la recibida en dBs por m^3 .

$$S_v = C + 10 \log_{10} [(T_T R^2) / (LP_T)] + 2\alpha R + K_c(E - E_r) \quad (5)$$

Donde:

C: es una constante dependiente del propio sistema emisor, función de la potencia P_T , longitud de onda λ , diámetro del emisor, factor de ruido (E_r), apertura direccional (θ), eficiencia

(%) y ancho de banda, (BW Hz). Por ello C es una constante propia del equipo y dada de fábrica.

T_T : es la temperatura del emisor, superior a la del agua T_w , por la radiación térmica que se produce.

R: la distancia recorrida por el haz al propagarse por el medio una distancia.

El coeficiente α contempla la atenuación global, que separamos en dos componentes:

α_w : adsorción debida a las sales disueltas, parámetroizada en función de los datos a recoger, (Francois y Garrison, 1982 a y b), a saber: salinidad S, temperatura del agua y profundidad. Estos datos han de ser tomados instrumental y simultáneamente a lo largo del trabajo de campo.

α_s : adsorción debida a las partículas de sedimento en el agua a lo largo del trayecto R, función de la longitud de onda de la señal, λ , de la densidad del agua ρ_w y de datos del propio sedimento: tamaño, forma, rigidez, densidad y concentración SSC.

La utilización de la ecuación mencionada es válida si se puede considerar que la propagación de las ondas de sonido en el medio acuoso en el que están las partículas es un régimen laminar de Reynolds, ($R < 100$) lo cual se cumple si $k \cdot d \ll 1$. En nuestro caso la frecuencia del equipo es $f = 600$ kHz, $c \approx 1.500$ m/s, por lo que $\lambda \approx 0,0025$ m, $K = 2\pi/\lambda \approx 2.513$ m^{-1} , el diámetro $d < 400 \mu$.

S_v es el coeficiente de retrodifusión y depende, por medio del parámetro α_s , de la concentración SSC, pero también de los factores de forma de sedimento, tamaño medio, coeficiente de adsorción, etc. Por ello se precisa información simultánea que permita obtener, a partir de las intensidades absolutas registradas por vía de la intensidad retrodifundida, datos directos aunque puntuales de la SSC.

Para ello se emplea un OBS portátil y se realiza una toma de muestras simultánea mediante botellas toma-muestras. El OBS está previamente calibrado y la primera conversión se realiza mediante los datos de OBS, simultáneos con las medidas del ADCP al obtener simultáneamente datos:

$$SSC(\text{gr/l}) = a + b \cdot \text{OBS}(\text{NTU's}) \quad (6)$$

Al final de los trayectos se realiza un primer ajuste para los puntos marcados, obteniéndose los primeros valores de SSC por medio acústico a lo largo de las trayectorias seguidas y para todo el perfil.

Posteriormente y por medio de los datos de laboratorio obtenidos del análisis de las muestras recogidas, se realiza un segundo y más preciso ajuste. Para ello se tiene en cuenta que el coeficiente de retrodifusión S_v por unidad de volumen es proporcional a la concentración según una forma lineal del tipo:

$$SSC = A + B \cdot S_v \quad (7)$$

Estos coeficientes A y B son función del tipo, forma y características del sedimento, pero se puede suponer, si las medidas se realizan en una zona homogénea, que se mantienen a lo largo de los trayectos. En caso contrario deben realizarse calibraciones separadas por zonas.

El procedimiento de ajuste es iterativo de forma que los resultados relativos que se obtienen inicialmente para la distribución vertical de la concentración de sedimento en suspensión SSC(z), pasan a ser absolutos cuando se realiza el primer ajuste con los datos puntuales del OBS, contrastando los valores obtenidos de SSC por medio del ADCP (relativos) con los del OBS (absolutos y calibrados) en los puntos marcados en los que se han tomado medidas directas (con OBS y toma de muestras de agua).

Se insiste en que dicho ajuste es válido siempre y cuando el tipo de sedimentos sea similar ya que los coeficientes del ajuste son diferentes debido a la forma y naturaleza del sedimento.

La segunda iteración se realiza, finalizada la campaña, por medio de los resultados de pesada del laboratorio. Para optimizar este ajuste las muestras deben haberse obtenido exactamente en los mismos puntos (y calado) que los datos del OBS por lo que se emplea una botella toma de muestras solidaria al conjunto OBS+CTD.

Es importante realizar una medida de la granulometría del sedimento, al menos de la parte más gruesa, para asegurar que la condición de Reynolds se mantiene.

3. CAMPAÑA DE TOMA DE DATOS

La campaña se realizó entre los días 22 y 24 de Septiembre de 2009, utilizándose la embarcación del CEDEX habitualmente empleada en campañas.

3.1. DOTACIÓN BÁSICA

Sistema de posicionamiento DGPS con correcciones RTK de alta precisión. Para ello se precisa disponer de una estación de referencia contrastada, instalada previamente.

La altura de la antena respecto al plano de flotación fue de 2 metros. La sujeción de la barra soporte de la antena es en la amura de estribor, mientras que el sistema ADCP está colocado en la misma transversal a la embarcación con una separación de ambas verticales de 2 metros.

Sistema compensador de olas; situado en la mesa del timonel, entre los dos PC's de trabajo. Los valores del offset relativos al ADCP fueron $4,1^\circ$ para el pitch y de $-7,1^\circ$ para el roll.

Alimentación eléctrica de 220 v.a.c., mediante onduladores alimentados por las baterías de la embarcación.

3.2. SISTEMA ADCP

El equipo perfilador de corriente usado en la campaña es un modelo Workhorse Monitor de 600 kHz. Los parámetros de configuración del equipo son los siguientes:

Apertura de cada haz:	20°
Número de haces:	4
Configuración de Haces:	Janus
Orientación del eje central del equipo	vertical hacia el fondo
Esparcimiento de haces:	convexa
Anchura de capa	25 cm.
Distancia de blanqueo (desde cabeza de ADCP):	44 cm.
Número de capas posibles:	80
Número de impulsos para posicionar el fondo	4
Nº impulsos para posicionar la superficie de agua	4
Profundidad de instalación de la cabeza	-50 cm.

Los valores de los coeficientes del nivel de ruido de recepción E_r (dB/cuenta), para cada haz están dados por fábrica: E_r (dB/cuenta) = 40.

Los valores de los factores de conversión de recepción, K_r (dB), obtenidos como respuesta en agua limpia, son también dados por fábrica pero susceptibles de calibración en laboratorio.

El haz nº 1 ha sido utilizado para el análisis de la concentración de sedimento en suspensión.

3.3. EQUIPOS SUPLEMENTARIOS

Sonda medidora de conductividad, temperatura y profundidad, (CTD) de Cambell Scientific.

Sonda medidora de Turbidez: sensor de Campbell Scientific, tipo OBS-3

Botellas toma de muestras.

Las sondas OBS y CTD se sujetan a los costados de la botella toma muestras, suspendidos por medio de sus propios cables de conexión que, formando un conjunto hasta el Pc de control, permiten obtener el dato en momentos expresos, en los que se realiza la toma de agua. Estos puntos de muestreo



FIGURA 1. Preparación de la embarcación.



FIGURA 2. Instalación de la aplicación ViSea.

se marcan en la trayectoria que sigue la embarcación, siguiendo el programa previsto.

Posteriormente a la medida, se extrae la botella (con las sondas) y se deposita una muestra del agua en una botella pequeña y se mantiene en una nevera para enviarlo al Laboratorio de Medio Físico del Centro de Estudios de Puertos y Costas, para el posterior determinación de SSC.

Se ha utilizado el software de configuración y adquisición de datos desarrollado por Aqua Vision denominado ViSea Data Acquisition Software, DAS (versión 3.04), y el pluma Detection Toolbox, PDT versión 3.04 actualizada ene. 2009.

3.4. REALIZACIÓN DE LA CAMPAÑA

La campaña se realizó en la zona del Puerto de Barcelona y la desembocadura del río Llobregat. La embarcación se preparó en la dársena de los prácticos la tarde del 21. (Figura 1).

En la mañana del 22 se fueron incorporando los equipos necesarios a la embarcación, ADCP, OBS botella de toma de muestra a un PC con el software de toma de datos ViSea. Iniciación de programa y conexión del ADCP, OBS, GPS y sistema compensador de olas. (Figura 2).

Salimos de la dársena a las 11:30 rumbo a la desembocadura del Llobregat con la aplicación ViSea operativa comprobando su funcionamiento, (Figura 3).

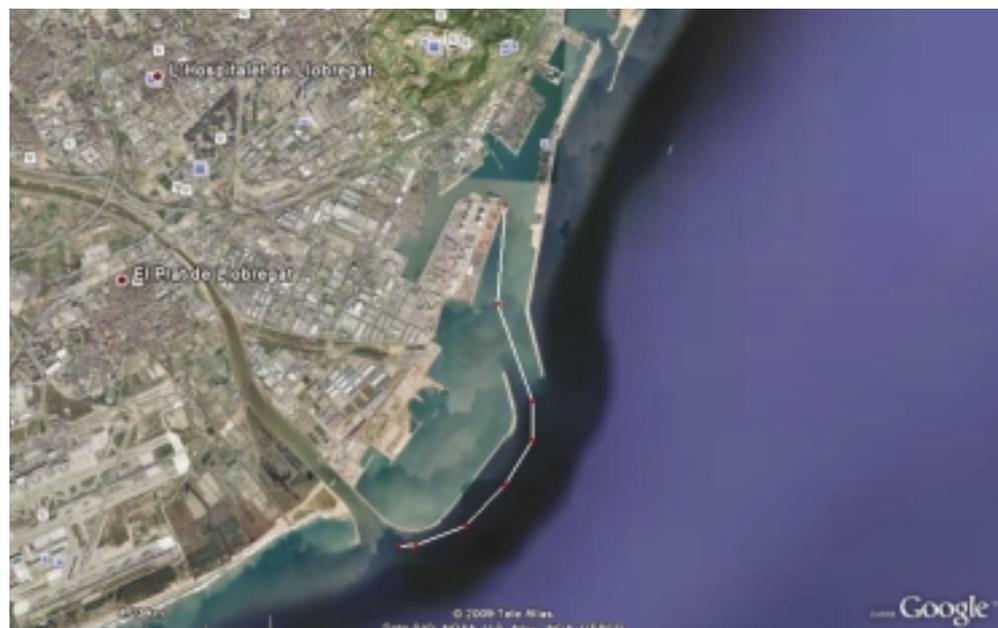


FIGURA 3. Trayecto hasta el área de medida.



FIGURA 4. Recorrido del barco en la zona de estudio.

En la desembocadura se realizó un recorrido en zigzag (Figura 4). Durante el recorrido se tomaron medidas de CTD y OBS (puntos azules) y se recogieron muestras de agua (puntos rojos) para analizar en el Laboratorio del CEPYC. Con los datos del OBS y la concentración de sólidos en suspensión obtenidas de las muestras de agua se calibran los datos del ADCP.

4. PROCESO DE DATOS

4.1. VALIDACIÓN

Obtenidos los datos se procede a validarlos, en primer lugar se eliminan los datos visiblemente erróneos, principalmente debido a burbujas de aire o falsos ecos. En segundo lugar se corrigen los movimientos descompensados de la embarcación.

Dicho pre-proceso se realiza mediante el paquete PDT (Pluma Detection Toolbox). Su objetivo es analizar la calidad de los resultados en el itinerario analizado, por si hubiera que repetirlo.

Los resultados obtenidos son reajustados mediante valores del OBS obtenidos in situ dado que se conoce el ajuste SSC vs OBS. Estos primeros valores tienen carácter relativo mientras no se disponga del ajuste proveniente de los valores de concentración de sedimentos obtenidos en el laboratorio.

4.2. CONVERSIÓN DE LOS DATOS DE RETRODIFUSIÓN DEL ADCP A SSC

El valor absoluto de SSC se obtiene tras el ajuste de los datos de los puntos en los que se han obtenido muestras de agua y los valores de la intensidad retrodifundida en esos puntos. Con ello se ajustan los coeficientes A y B de la ecuación número 7.

El ajuste obtenido para los puntos de referencia puede así ser extendido a todas las medidas de la intensidad retrodifundida registrada a lo largo del itinerario para todo el perfil, siempre y cuando no haya cambiado la naturaleza del sedimento.



FIGURA 5. Detalle de las medidas del OBS (azul) y muestras de agua (rojo).

Archivo	Perfiles nº
20090922_006r	25 26 27 28 29
20090922_024r	3 4 5 6 7 16 17 18

TABLA 2.

5. RESULTADOS

5.1. VALIDACIÓN

Tras la toma de datos se realiza la validación, comprobando que hay algunos datos erróneos que han de eliminarse. Dichos datos corresponden a los perfiles de la Tabla 2.

Corrección de la posición dada por DGPS y por el seguimiento *bottom tracking*.

De forma similar se reprocesó la información añadiendo el dato de la cota de la antena del GPS respecto al nivel medio

del agua y el retardo entre dicho dato y el obtenido directamente por el ADCP respecto a la navegación, estableciéndose que dicho retardo es de 2 s.

5.2. INCORPORACIÓN DE LOS PUNTOS DE TOMA DE DATOS DE MUESTRAS DE AGUA

Durante el itinerario se realizaron 10 extracciones de muestras de agua para el posterior análisis de SSC en laboratorio. (Tabla 3).

5.3. CONVERSIÓN DE LOS DATOS DE TURBIDEZ Y INTENSIDAD RETRODIFUNDIDA, S_v , A SSC

Los valores simultáneos obtenidos para los 10 puntos de muestreo de la turbidez (NTU) registrada por el OBS empleado en la campaña como la intensidad retrodifundida, S_v , registrada por el ADCP, permitieron obtener el ajuste. (Figura 6).

Ajuste obtenido: $SSC = 1,2438 * \text{Turbidez (NTU)} + 0,7324$
 Coeficiente de correlación $R = 0,95$

Muestra	Archivo Bruto	Perfil	hh:mm:ss	Profundidad	SSC
S1	20090922_016r	75	12:11:25	3,33	3,67
S2	20090922_017r	20	12:19:14	4,75	6,26
S3	20090922_018r	47	12:24:38	3,68	2,08
S4	20090922_020r	21	12:28:51	6,43	3,94
S5	20090922_020r	48	12:32:42	4,72	2,13
S6	20090922_025r	95	12:34:15	7,98	2,67
S7	20090922_025r	47	12:55:07	3,57	4,21
S8	20090922_025r	85	12:56:22	6,07	5,44
S9	20090922_025r	202	13:00:13	2,45	4,59
S10	20090922_025r	267	13:02:21	8,19	7,21

TABLA 3.

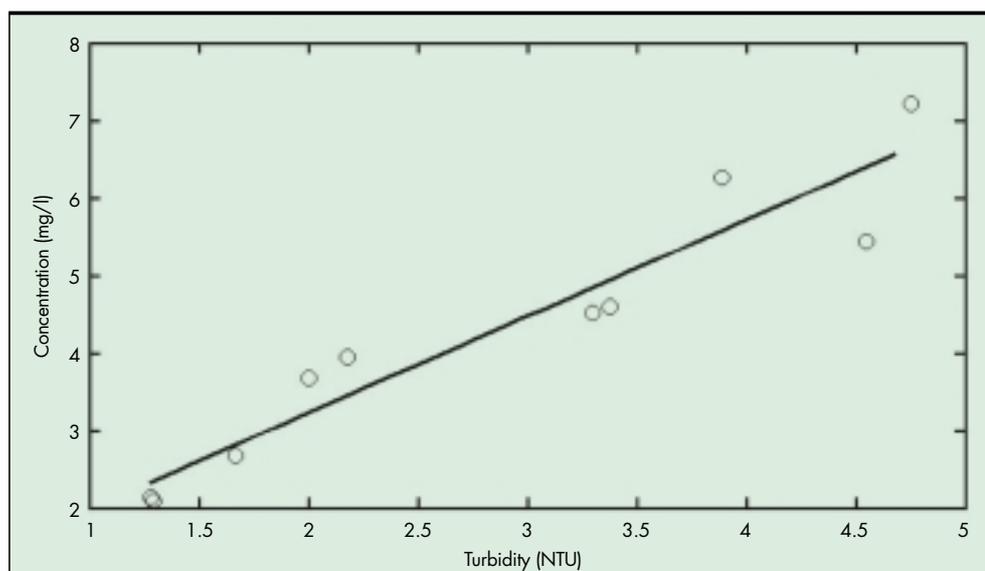


FIGURA 6. Ajuste SSC (S_v) vs OBS (NTU), ambos datos de campaña.

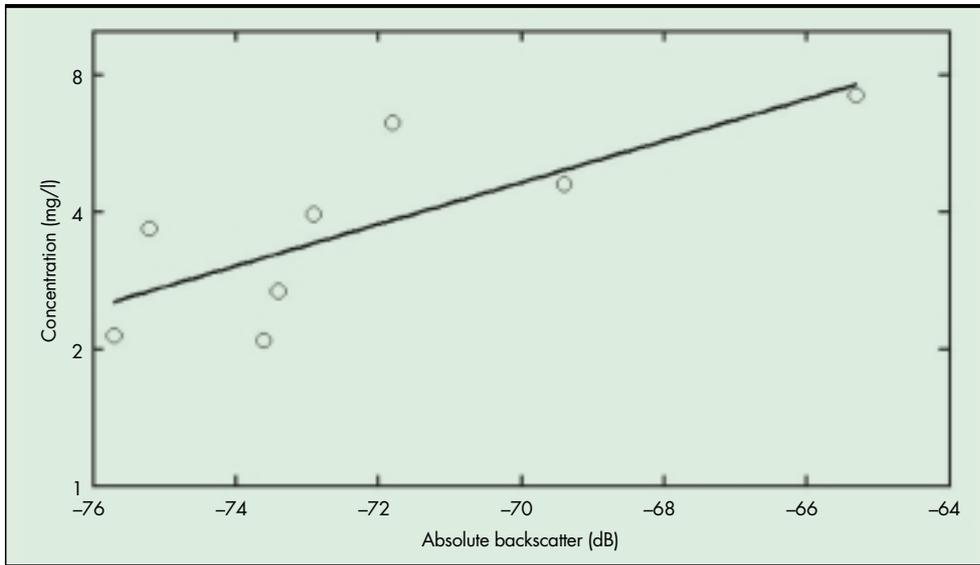


FIGURA 7. Relación final entre la intensidad de retrodifusión absoluta y la concentración de las muestras de agua.

5.4. RETRODIFUSIÓN ABSOLUTA

La Figura 7 muestra el ajuste de los valores de la intensidad de retrodifusión S_v (dBs) y la concentración SSC obtenida por el método de pesada.

La relación puede formularse:

$$\text{Log}_{10}(\text{SSC}) = 0,0458 * S_v(\text{dbs}) + 3,8855$$

Esta ecuación permite dar valor absoluto a todos los resultados obtenidos del ADCP en la campaña. Hay que tener en cuenta que la correlación obtenida entre la intensidad del haz retrodifundido, S_v , y la concentración SSC es en logaritmos. El ajuste se puede mejorar al tomar más muestras del agua distribuidas en toda la columna.

Con la correlación obtenida se puede generalizar el resultado a todos los datos de intensidad retrodifundida, por lo que se puede obtener el perfil de concentración para todo el itinerario seguido.

Como ejemplo los perfiles en las Figuras 8 a la 12. Como ejemplo de corrientes en las capas superior y en el fondo las Figuras 13 y 14.

6. CONCLUSIONES

La campaña de toma de datos de SSC (concentración de sedimentos en suspensión) en la desembocadura del río Llobregat nos ha permitido comprobar en, que a partir de las medidas de perfiladores de corriente de efecto Doppler (ADCP) mediante la aplicación "ViSea" permite obtener en todo el perfil la concentración de los sedimentos en suspensión. La intensidad retrodifundida fue corregida teniendo en cuenta la atenuación del sonido en la columna de agua y fue calibrada con el análisis de botellas de agua que se recogieron en varios perfiles a diferentes profundidades.

La concentración de sedimentos fue alrededor de 2 mg/l de media y la mayor concentración registrada fue de 15 mg/l. En la Figuras 8 a la 12 se muestran los perfiles, y puede verse las concentraciones de sólidos en suspensión en la columna de agua.

7. AGRADECIMIENTOS

José Carlos Santas, jefe del Área de Medidas en la Naturaleza por la revisión del texto.

Han colaborado en la campaña de toma de datos: D. José Losada, D. Manuel Garrido y D. Angel Cuesta del Centro de Estudios de Puertos y Costas..

Jeroen Aardoom de ViSea Vision asesor de la aplicación ViSea, Aquavision.

8. APÉNDICE

La absorción del agua es la suma de relación de las componentes del ácido bórico, las componentes del sulfato de magnesio y la componente de la viscosidad.

$$\alpha_w = \frac{A_1 P_1 f_1^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2$$

Las componentes del ácido bórico:

$$A_1 = \frac{8.68}{c} 10^{0.78pH-5}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 \sqrt{S/35} \cdot 10^{4-1245/(273+T)}$$

Para el sulfuro de magnesio las componentes:

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025T)$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \cdot 10^{-4} z + 6.2 \cdot 10^{-9} z^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \cdot 10^{[8-1990/(273+T)]}}{1 + 0.0018(S - 35)}$$

Y las componentes de la viscosidad:

$$A_3 = 4.937 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5} T + 9.11 \cdot 10^{-7} T^2 - 1.5 \cdot 10^{-8} T^3 \quad \text{if } T \leq 20^\circ \text{C}$$

$$A_3 = 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5} T + 1.45 \cdot 10^{-7} T^2 - 6.5 \cdot 10^{-8} T^3 \quad \text{if } T > 20^\circ \text{C}$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \cdot 10^{-5} z + 4.9 \cdot 10^{-10} z^2$$

Aquí S es la salinidad (psu), z el la profundidad (m) y c es la velocidad del sonido (m/s) dado por (Urlick, 1983).

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (0.0134T)(S - 35) + 0.016z$$

Filename: 20090922_015r.asc

Start time: Sep. 22, 2009 12:05:04

End time: Sep. 22, 2009 12:08:53

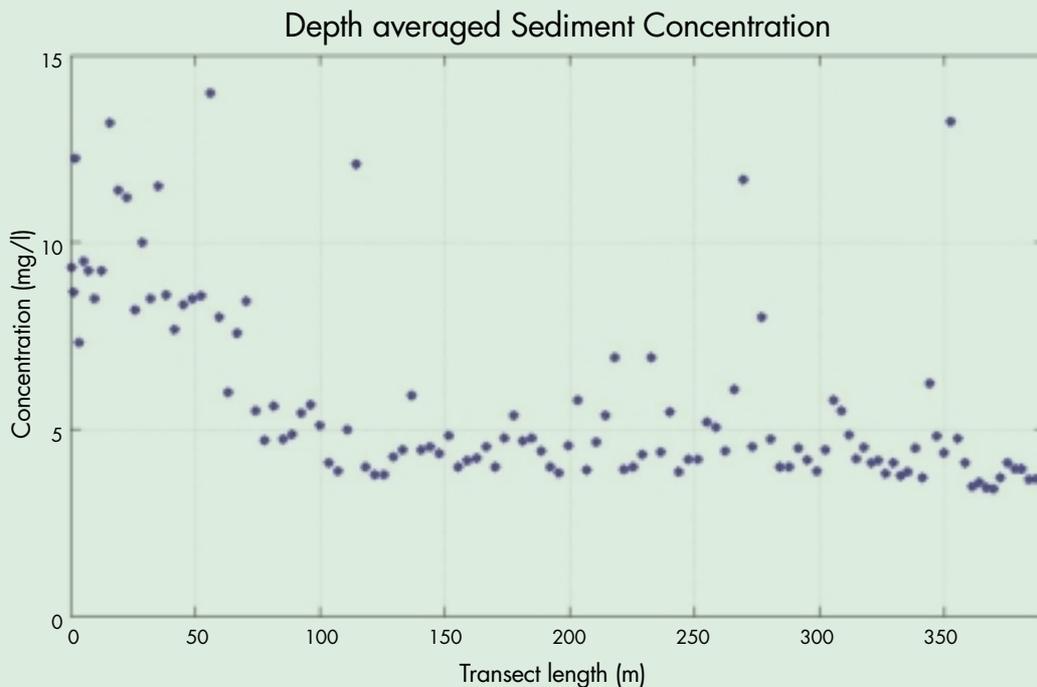
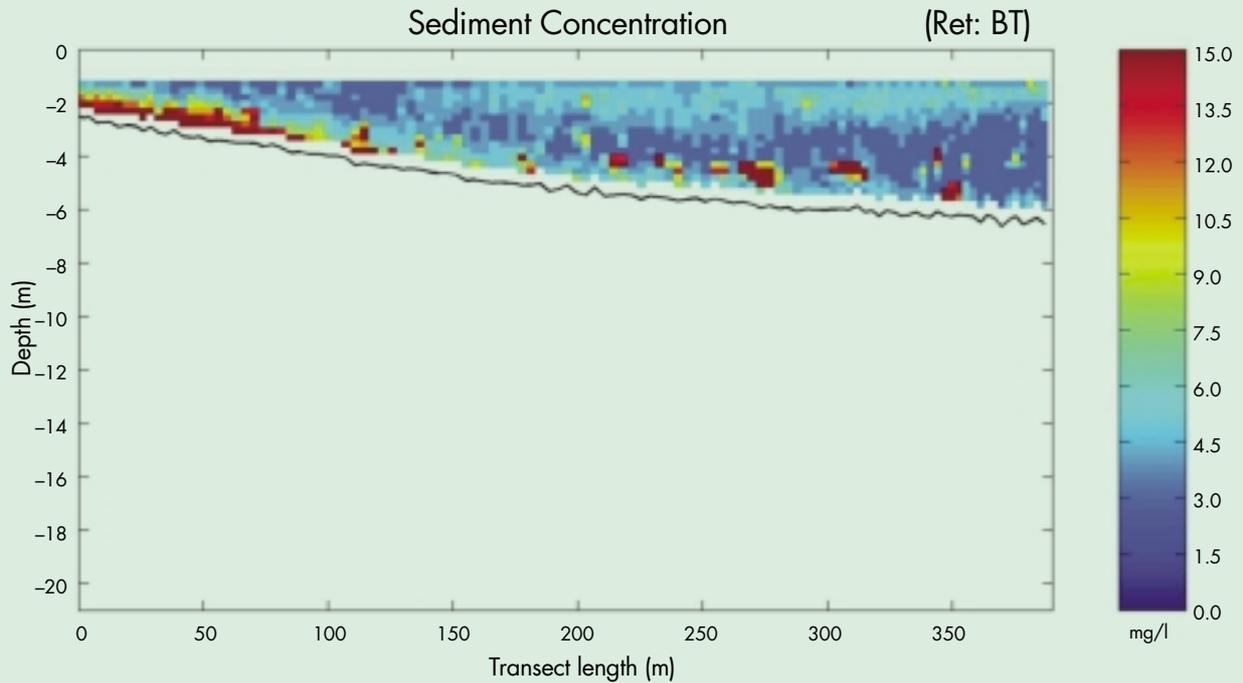


FIGURA 8. Perfil nº 15.

Filename: 20090922_022r.asc

Start time: Sep. 22, 2009 12:40:16

End time: Sep. 22, 2009 12:44:33

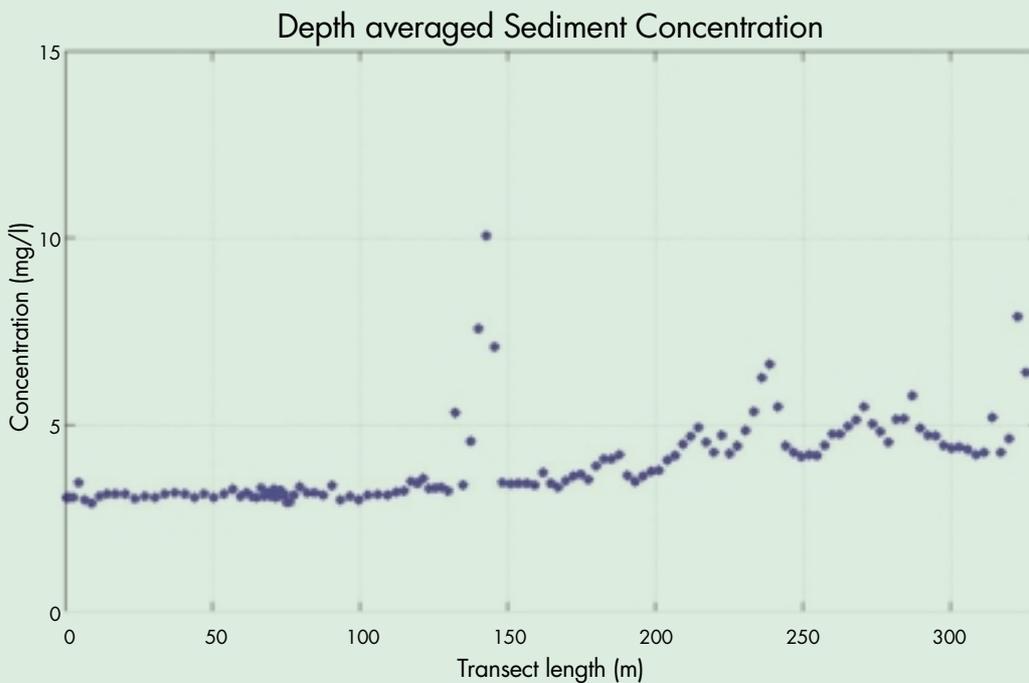
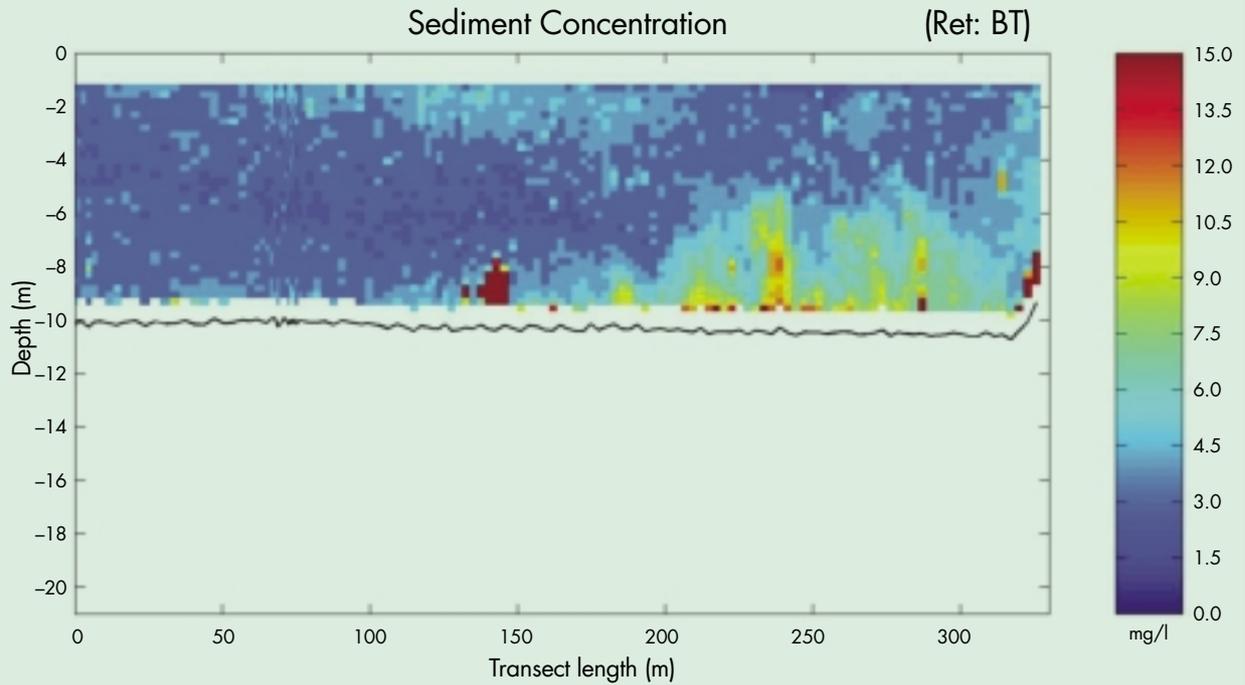


FIGURA 9. Perfil nº 22.

Filename: 20090922_023r.asc

Start time: Sep. 22, 2009 12:44:37

End time: Sep. 22, 2009 12:49:17

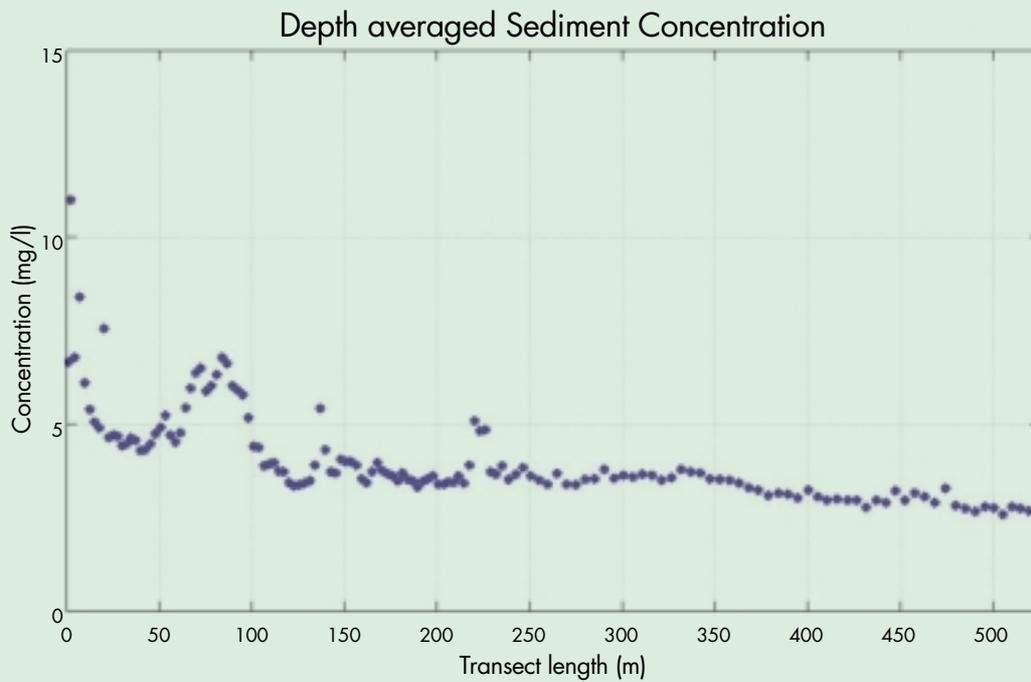
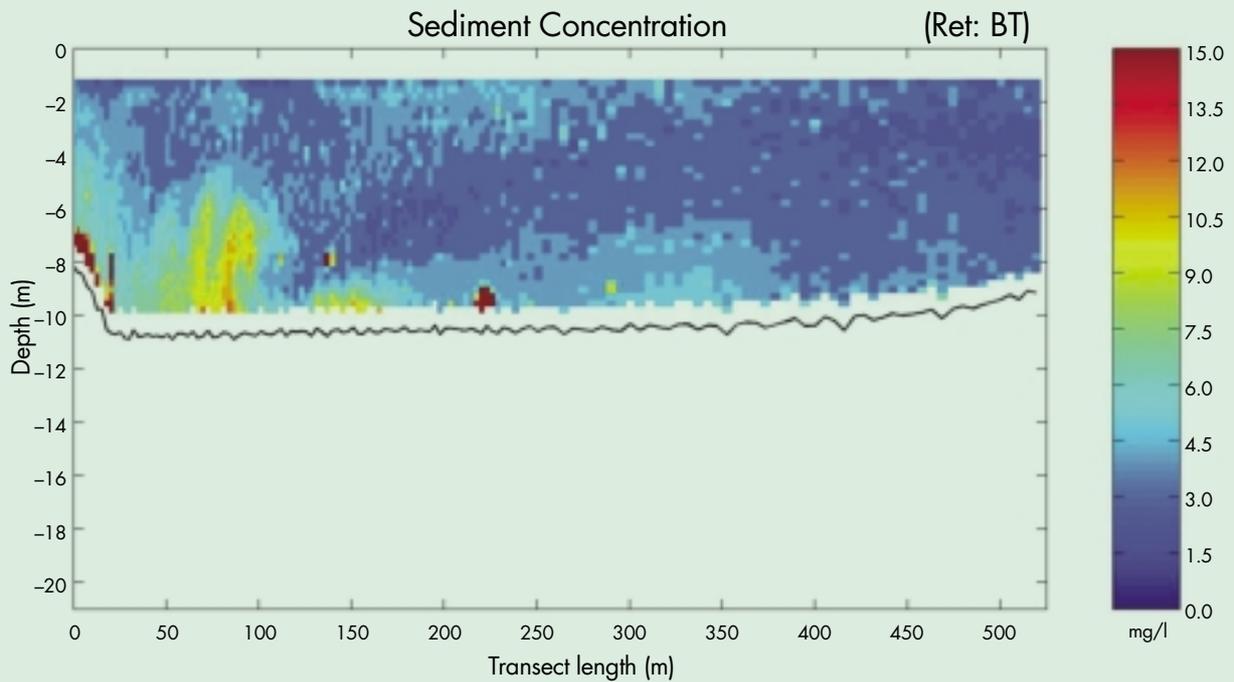


FIGURA 10. Perfil nº 23.

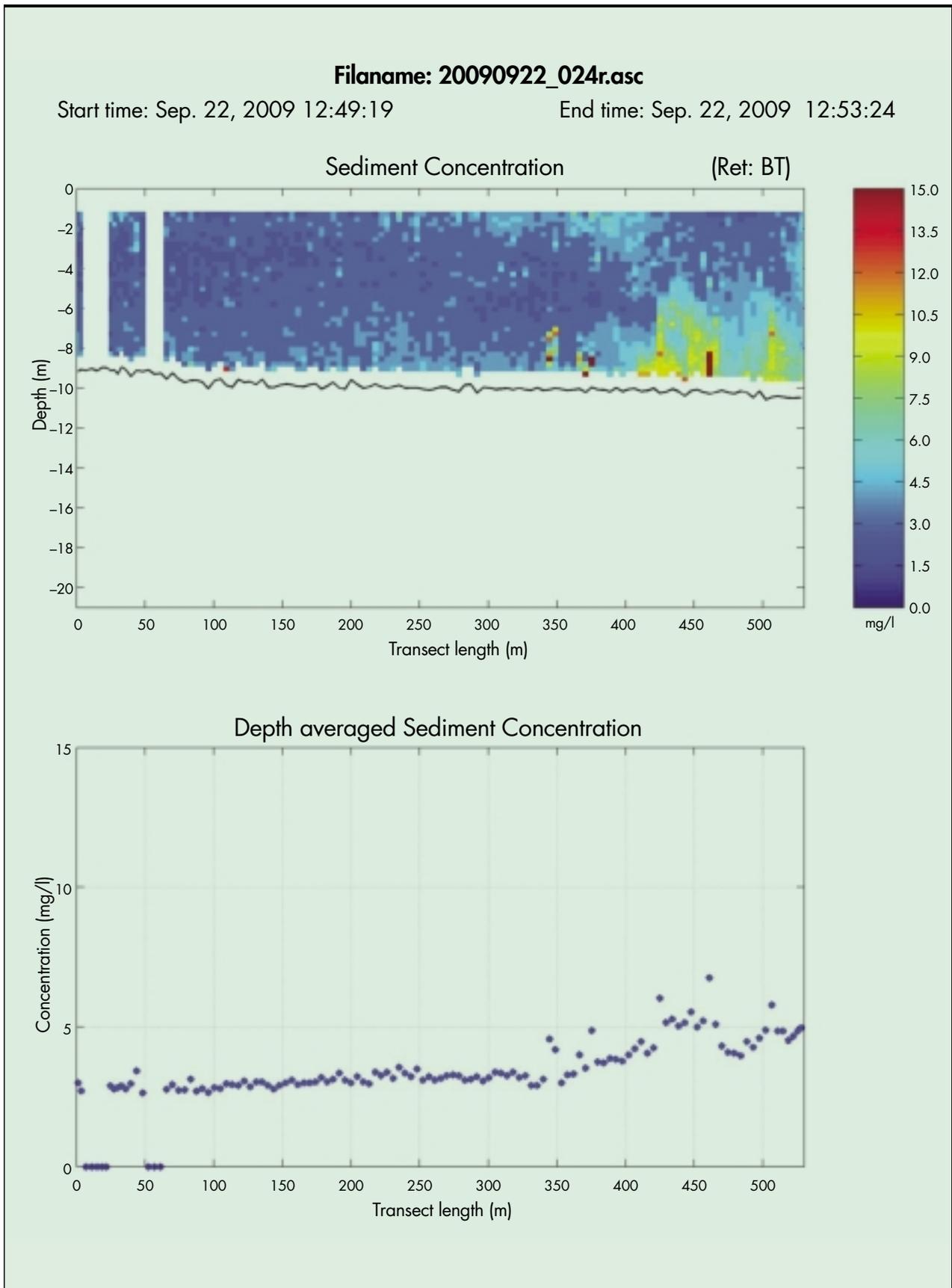


FIGURA 11. Perfil nº 24.

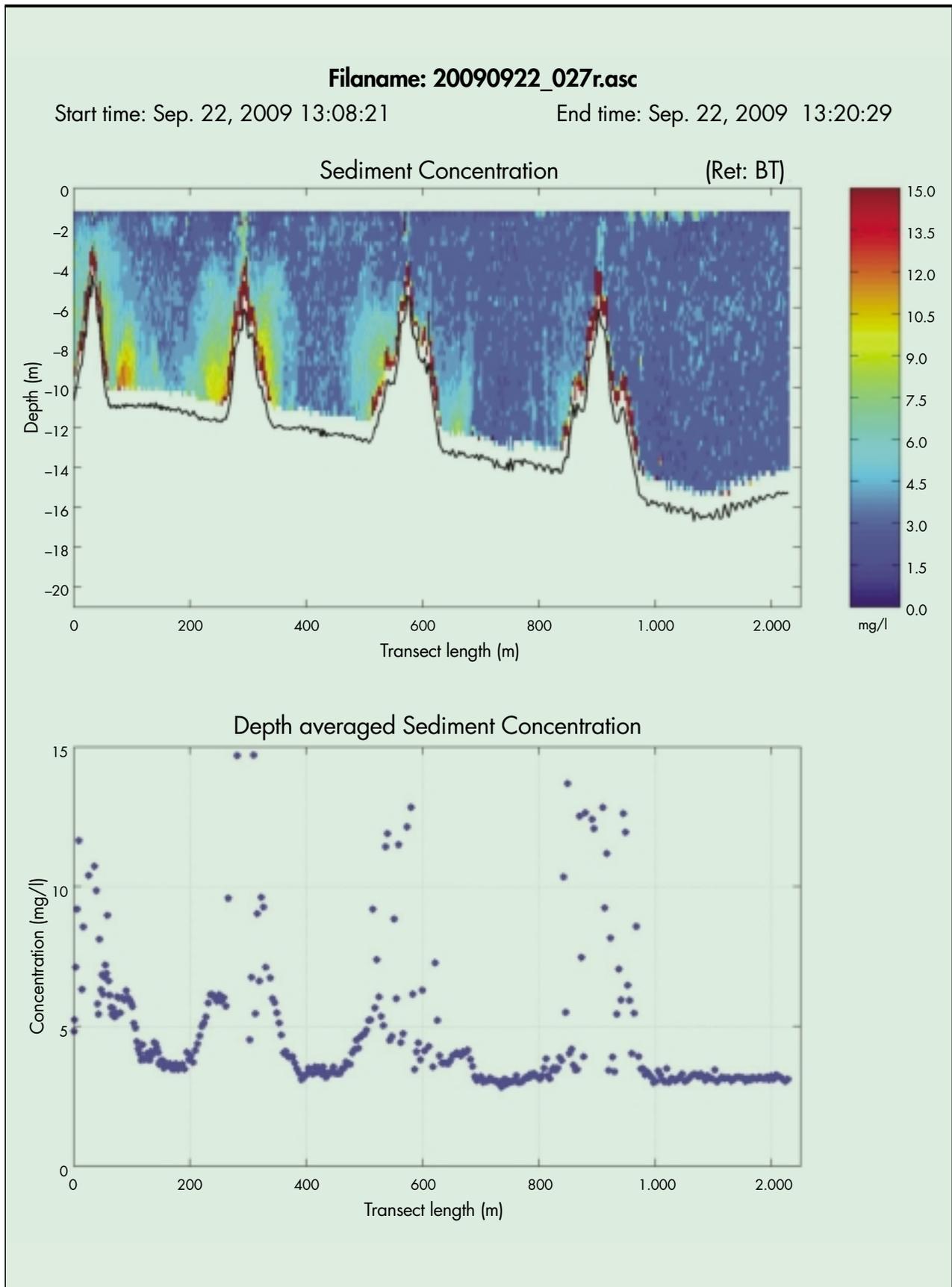


FIGURA 12. Perfil nº 27.

Urlick demostro que la atenuación de los sedimentos en suspensión:

$$\alpha_s = \left[\frac{k^4 d^3}{96 \rho_s} + \frac{k(\sigma - 1)^2}{2 \rho_s} \frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right] \frac{20}{\ln(10)} SSC$$

Donde:

$$s = \frac{9}{2\beta d} \left[1 + \frac{2}{\beta d} \right]$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{\beta d} \right]$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi f}{\nu}}$$

$$\nu = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20 + T}$$

Aquí F es la frecuencia acústica (Hz), ρ_s es la densidad del sedimento (kg/m), ρ_w es la densidad del agua (kg/m), d es el diámetro de la partícula (m) y ν es la viscosidad cinemática del agua (m²/s) de acuerdo Van Rijn (1993). ρ_w se calcula en función de la salinidad, temperatura y profundidad de acuerdo con la bien conocida ecuación de estado del agua del mar (UNESCO, 1981).

R es la distancia recorrida por la onda, α el coeficiente de atenuación (dB/m).

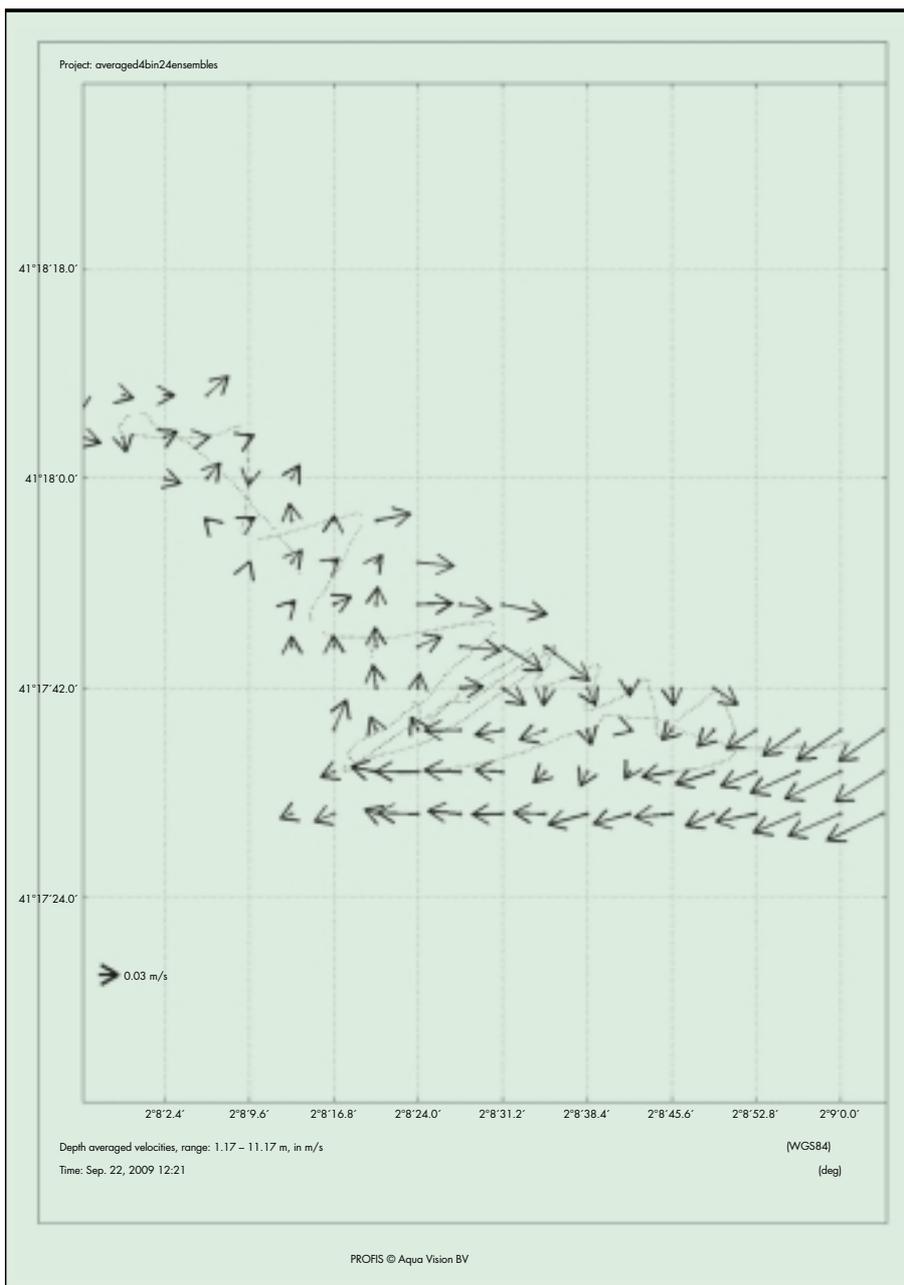


FIGURA 13. Corrientes en la capa superior.

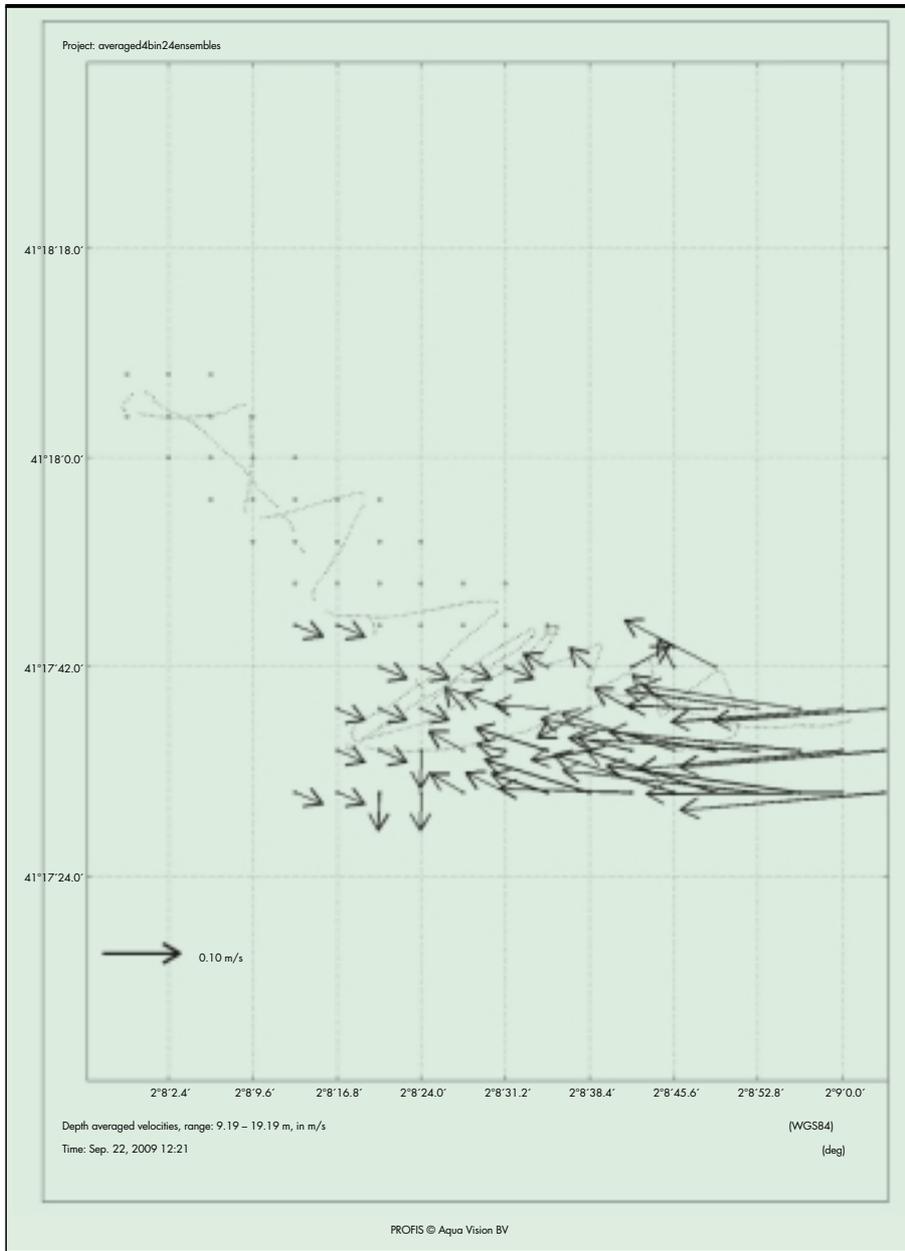


FIGURA 14. Corrientes en el fondo.

La intensidad retrodifundida para un sedimento homogéneo procedente de un ADCP es proporcional al producto $SSC \cdot a^3$, donde SSC es la concentración de los sedimentos en suspensión y a el radio de las partículas. Para los casos que el radio de las partículas es pequeño comparado con la longitud de onda y puede aplicarse la distribución de Rayleigh; que es verdad para el ADCP.

9. BIBLIOGRAFÍA

Deines, K. L. (1999) <Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers> Oceans 99 MTS/IEEE Conference Proceedings. San Diego.

François, R.E. and Garrison, G.R. (1982a). <Sound absorption based ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulphate contributions.> Journal of the Acoustic Society of America, 72: 1879-1890.

François, R.E. and Garrison, G.R. (1982b). <Sound absorption based ocean measurements. Part II Boric acid contribution and equation for total absorption.> Journal of the Acoustic Society of America, 72: 1879-1890.

Rayleigh, L.J.W.S. (1945). <The Theory of Sound>. Volume 1 and 2. New York Dover Publication.

Santás José Carlos.(2009).< Actuacion 04.4: Estudio de campos de sedimentos en suspensión y corrientes en puntos de especial complejidad. Informe Cedex>.

Unesco (1981). Technical Paper in Marine Science, n° 36.

Urick, R.J. (1983). <Principles of Underwater Sound>. Third Edition, McGraw-Hill, New York.

Van Rijn. (1983). <Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas>.Aqua Publications. Amsterdam.