

MODELACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PUESTOS EN SUSPENSION POR ACTIVIDADES DE DRAGADO EN EL RIO DE LA PLATA, PARA LA GENERACION EN TIEMPO REAL DE PRONOSTICOS DE AFECTACION DE AREAS COSTERAS

Julio C. Cardini^{*}, Maribel Garea^{*}, and Mauro R. Campos^{*}

^{*} Serman & Asociados S.A.
Blanco Encalada 2387 Piso 17°E, 1428 Buenos Aires, Argentina
e-mail: hidro@serman.com.ar, web page: www.serman.com.ar

Key words: Dragado, Pluma de turbidez, Impacto áreas costeras, Modelación Matemática de Transporte, Pronósticos de Afectación.

Abstract. *El proyecto Gasoducto Cruz del Sur comprendió el tendido de un gasoducto troncal debajo del lecho del Río de la Plata desde Punta Lara (Argentina) hasta la costa del departamento de Colonia (Uruguay). La remoción y entrada en suspensión de sedimentos finos (arcillas y limos) contaminados, acompañada de un fuerte incremento de los niveles de turbidez, determinó que se diseñe el procedimiento de dragado de forma tal de minimizar la afectación de las tomas de agua de las plantas potabilizadoras. Se implementó un modelo matemático bidimensional, hidrodinámico y de transporte (convección - dispersión), cubriendo todo el Río de la Plata con una discretización especial en la zona de interés. El mismo permitió determinar a que distancia de la costa debía disponerse el material dragado, así como las condiciones meteorológicas críticas que pudieran provocar el acercamiento de la pluma de sedimentos a las tomas de agua. Durante las operaciones de zanjeado y tapada se generó diariamente un pronóstico a 60 hs. de la evolución de la pluma de sedimentos puestos en suspensión. El monitoreo de la misma permitió validar diariamente la modelación. Los coeficientes de dispersión y la velocidad de caída de las fracciones de sedimento modeladas fueron ajustados a medida que cambiaban las condiciones físicas del material del lecho así como las climáticas (vientos, olas). Durante las críticas operaciones de tapada en la inmediata adyacencia de la costa, el modelo permitió determinar los momentos más propicios para la descarga del material, en función de las condiciones mareológicas y meteorológicas pronosticadas, de manera tal de regular la producción y los períodos de operación de la draga evitándose que se produzca una afectación significativa de la potabilización del agua.*

1 INTRODUCCION

El proyecto Gasoducto Cruz del Sur, que llevará gas desde la República Argentina a la ciudad de Montevideo (Uruguay), comprende un tramo subfluvial que atraviesa el Río de la Plata desde Punta Lara (Argentina) hasta la costa del departamento de Colonia (Uruguay).

La ejecución de la zanja para dicho tendido, así como su posterior tapada en los tramos más cercanos a la costa argentina, implicó la remoción y resuspensión de sedimentos finos (arcillas y limos) altamente contaminados, con el consiguiente incremento de los niveles de turbidez y de concentración de contaminantes.

La presencia, en cercanías de la zona de operaciones, de las tomas de agua correspondientes a las dos plantas potabilizadoras que abastecen la ciudad de La Plata y alrededores, determinó que sea necesario diseñar un procedimiento de dragado que minimice el riesgo de afectación de las mismas.

Para evaluar el efecto de la resuspensión de sedimentos por efecto del dragado, resultó necesario contar en primer lugar con una representación matemática confiable del campo de velocidades del flujo y de los niveles de agua en todo el Río de la Plata. Ello se logró por medio de una simulación con el modelo hidrodinámico bidimensional RMA2¹, mediante el cual se representó la dinámica del río para distintas condiciones típicas de marea astronómica media y con gran influencia meteorológica (crecientes y bajantes pronunciadas).

Los estudios de dispersión y transporte de los materiales puestos en suspensión se realizaron con el modelo sedimentológico bidimensional SED2D-WES², que utiliza directamente los datos generados por el modelo RMA2.

El incremento de concentración de materiales en suspensión respecto de los niveles naturales debido a las “plumas” de material descargado fue valorado con anterioridad al inicio de las operaciones, definiéndose mediante el modelo matemático, la ubicación de la zona de refulado para el zanjeado en un sitio a unos 3 km de la costa argentina. De esta forma se evita la afectación de las tomas con niveles de turbidez excesivos, salvo bajo condiciones especiales de vientos (del cuadrante NE con velocidad mayor a 17 nudos), que de ser sostenidos generarían circulaciones de agua que llevarían el centro de la pluma hacia las tomas. Este tipo de condiciones no se verificó durante los periodos en que existía una pluma de material en suspensión, aunque se registraron en algunos periodos cortos situaciones que, excediendo el rango máximo prefijado, no alcanzaron a generar circulaciones adversas.

Asimismo, se estimaron los límites de producción admisible, con el objeto de mantener en valores aceptables la turbidez y la concentración de contaminantes en el agua frente a las tomas, que son función de las características del material a refular, tanto granulométricas (porcentajes de arena, limo y arcilla) como de contaminación asociada.

Durante la ejecución de los trabajos de zanjeado y tapada se realizaron informes en forma diaria, en cada uno de los cuales se presentaron los datos de turbidez registrados cruzando la pluma con una embarcación (normalmente, en dos operativos por día) y los resultados de las simulaciones matemáticas de pronóstico de evolución de la pluma en un período de 60 horas.

El objeto de dichos informes fue determinar si resultaba necesario reducir la producción del dragado o detenerlo para evitar la afectación de las tomas de agua de la ciudad de La Plata

(Azurix - Punto de Monitoreo EF1) y de la Escuela Naval Río Santiago (ESNM - Punto de Monitoreo EF6) con niveles altos de turbidez que pusieran en riesgo el proceso de potabilización de agua.

La campaña de monitoreo y simulación sistemáticos de la pluma de material refulado efectuados durante la ejecución del zanjeado, en un período de más de un mes de extensión, permitieron ajustar las herramientas de simulación demostrando que el sistema de modelación utilizado es apto para predecir la ubicación espacial de la pluma de sedimentos y su decaimiento temporal.

2 ORGANIZACION DEL SISTEMA DE PRONOSTICO A 60 HS MEDIANTE MODELACION

El sistema de pronóstico de la posición de la "pluma" generada en el punto de descarga del material (extremo de la cañería de refulado) fue implementado mediante la aplicación del siguiente procedimiento:

- Corrida de calibración hidrodinámica: cada día se realiza una simulación con el modelo hidrodinámico del período de 24 hs precedente y se comparan los resultados obtenidos en una serie de estaciones mareológicas a los efectos de verificar que la especificación de las condiciones de borde (nivel de marea) y de vientos se ha efectuado correctamente.
- Corrida de calibración sedimentológica: luego se especifican las condiciones de producción de la draga para el mismo período de 24 hs, y se realiza la simulación sedimentológica para obtener las concentraciones de sedimento en suspensión del día precedente.
- Se compara la "mancha" de sedimentos resultante de la simulación con los valores de turbidez registrados el día anterior, a los efectos de interpretar si el modelo se encuentra representando adecuadamente la ubicación espacial del centro de la mancha (zona de mayores concentraciones) y la amplitud de la dispersión lateral.
- En caso de ser necesario para obtener un ajuste aceptable, se modifican los datos de tamaño de grano o coeficiente de dispersión especificados.
- Una vez aceptado el resultado sedimentológico del día anterior, se está en condiciones de proceder al pronóstico a 60 hs.
- La simulación hidrodinámica se efectúa utilizando los pronósticos de viento recibidos (generados por Meteomer de Francia) y corrigiendo los datos de niveles de marea astronómica en el borde de acuerdo a las condiciones meteorológicas pronosticadas. Se especifican las producciones probables de dragado para el período de pronóstico y se efectúa la correspondiente simulación sedimentológica.
- Se analiza la posición probable de la pluma en el período de pronóstico y se elabora el informe respectivo. En caso de presentarse situaciones de posible riesgo se trata de evaluar la incidencia de las hipótesis de pronóstico de vientos y mareas adoptadas para sopesar la magnitud del riesgo y se efectúan, si corresponde, las recomendaciones pertinentes respecto al dragado.

3 MODELACION MATEMATICA HIDRODINAMICA

La modelación hidrodinámica bidimensional se realizó con el programa RMA2, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, Wicksburg Experimental Station, para simular flujos naturales a superficie libre, donde el movimiento es esencialmente horizontal y puede ser descripto por una aproximación bidimensional debido a que la aceleración vertical es pequeña en comparación con la componente horizontal.

El programa RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de un área determinada definida a través de una malla de elementos finitos, obteniéndose como resultado las velocidades medias del flujo y los niveles de agua.

Las condiciones de borde especificadas aguas arriba son los caudales en los distintos brazos del delta del Río Paraná y en la desembocadura del Río Uruguay.

En el borde de aguas abajo se especificaron los niveles en el límite exterior del Río de la Plata, interpolados temporal y espacialmente en la línea imaginaria que une la localidad de San Clemente (Argentina) – y un punto intermedio entre Montevideo y Punta del Este.

Los datos de viento sobre el Río de la Plata se obtuvieron de las mediciones en la estación de monitoreo permanente EF1, efectuándose en ocasiones correcciones en función de la información sobre el campo de vientos sobre el Río de la Plata brindada, dos veces por día, por Meteomer a través del programa EOLIUS. Estas correcciones se efectúan con el objeto de mejorar la calibración de los niveles en La Plata y adyacencias, en los casos en que se observan condiciones marcadamente diferentes en la dirección o intensidad del viento en el Río de la Plata Exterior.

Los niveles de marea obtenidos en la simulación de calibración representaron en forma adecuada los niveles medidos, así como las velocidades calculadas reprodujeron correctamente las tendencias de las velocidades medidas, según los estándares esperables para una simulación en un área tan extensa con influencia del viento.

En la Figura 1 se muestra el área modelada y las estaciones mareológicas de control de niveles.

En la Figura 2 puede apreciarse la influencia de los vientos del WNW rotando al S/SW en el período comprendido entre el 6 y el 10/12/01. Las duraciones de las crecientes y bajantes, fuertemente alteradas por efecto del viento, así como las velocidades y direcciones de la corriente, han sido adecuadamente representadas por la modelación. (en la estación de registro continuo EF2 en inmediaciones de Quilmes).

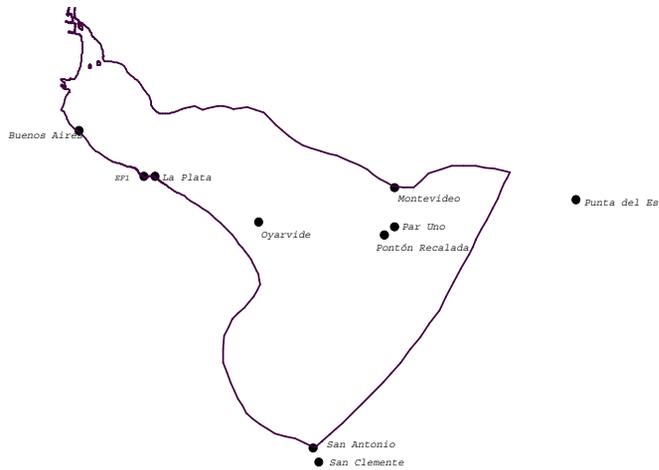


Figura 1: Área modelada y ubicación de las estaciones mareológicas de control de niveles.

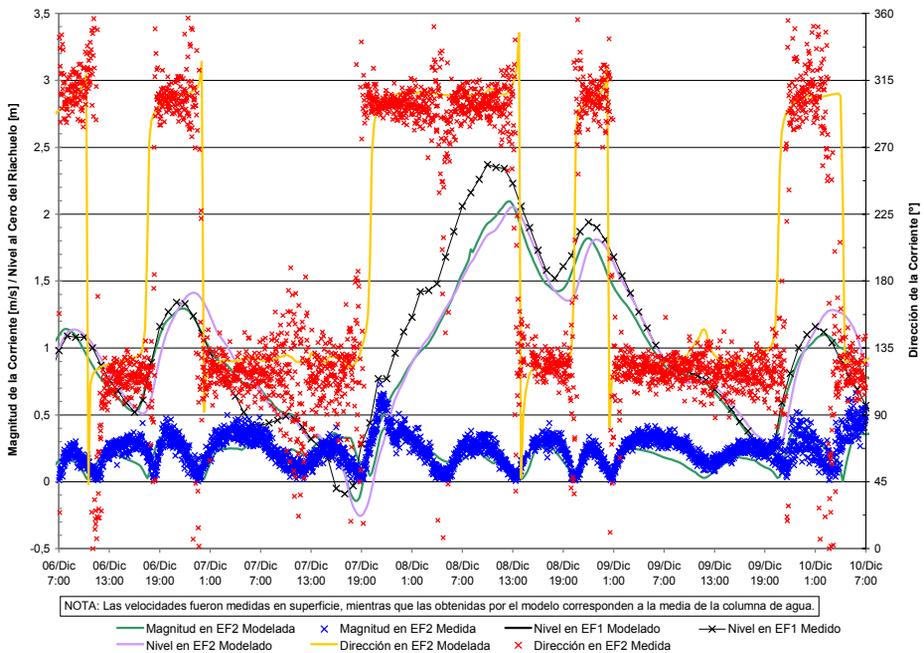


Figura 2: Modelo matemático hidrodinámico. Comparación de velocidades y niveles medidos y simulados.

4 MODELACION MATEMATICA SEDIMENTOLOGICA

4.1 Descripción de la modelación matemática

Los materiales a dragar para el zanjeado son de diferentes granulometrías según la progresiva "Kp", medida desde la costa argentina. Las siguientes composiciones se consideraron representativas para la profundidad del corte a ser efectuado por la draga:

- Para la zona ubicada en cercanías de la costa, hasta aproximadamente Kp 1,0-1,5:

Coloides:	15 %	($d \cong 0,1$ mm,	$Wc = 0$ mm/s)
Arcilla:	30 %	($d \cong 1,0$ mm,	$Wc = 0,0007$ mm/s)
Limo Mediano:	40 %	($d \cong 10$ mm,	$Wc = 0,06$ mm/s)
Arena Fina:	15 %	($d \cong 60$ mm,	$Wc = 2$ mm/s)
- Para la "loma" ubicada en Kp 2,0 y su entorno, aproximadamente desde Kp 1,5 en adelante:

Coloides:	5 %	($d < 0,2$ mm,	$Wc = 0$ mm/s)
Arcilla:	8 %	($d < 2$ mm,	$Wc = 0,001$ mm/s)
Limo Mediano:	44 %	($d \cong 10$ mm,	$Wc = 0,06$ mm/s)
Arena Fina:	43 %	($d \cong 60$ mm,	$Wc = 2$ mm/s)

El material arenoso y limo grueso ($D > 33$ micrones) y la mayor parte del material limoso mediano ($6 < D < 33$ micrones) sedimenta en el lecho de la zona próxima al lugar de descarga.

La fracción más fina del material ($D < 6$ micrones), constituida por limo fino y arcillas, permanece en suspensión y constituye lo que se denomina "pluma de turbidez", la que se difunde en la masa líquida.

Para la evaluación de la dispersión espacial de los materiales descargados se ha efectuado una simulación con modelo matemático de la evolución de las plumas de concentraciones de sedimentos en suspensión.

El modelo sedimentológico aplicado es el SED2D-WES, desarrollado por el US Army Engineering Waterways Experiment Station (WES) para simulación bidimensional del transporte de sedimento promedio en la vertical.

La información hidrodinámica es calculada por el modelo RMA2.

La condición de borde que debe ingresarse al modelo es la concentración de sedimentos en suspensión que ingresa en el extremo de aguas arriba, que se ha adoptado como nula. De esta forma, los resultados obtenidos representan únicamente la contribución del refulado por encima de los niveles naturales, que por otro lado son variables en el tiempo en función del aporte fluvial (por influencia del aporte del Río Bermejo) y del estado de oleaje.

La esquematización del modelo sedimentológico surge directamente de la adoptada para el hidrodinámico, dado que se utiliza la misma malla de elementos finitos y profundidades del lecho.

4.2 Parámetros de simulación adoptados para el zanjeado

La carga de sedimentos considerada parte de estimar el refulado de arcilla mediana como

fracción representativa de una mezcla del 15% de arena (que decanta casi inmediatamente), 35% de limo y 45% de arcilla, densidad in-situ $1,6 \text{ t/m}^3$ (densidad seca $0,96 \text{ t/m}^3$). El tamaño de grano típico se adoptó en 3 micrones de diámetro (arcilla mediana con velocidad de caída asociada $W_c=0,01 \text{ mm/s}$) para el tramo más cercano a la costa, incrementándose a 6 micrones (arcilla gruesa/limo fino con $W_c=0,03 \text{ mm/s}$) al pasar al tramo del K_p 1,5 en adelante, aunque luego se redujo la velocidad de caída a $0,02 \text{ mm/s}$ aún en este tramo, para reproducir más adecuadamente la persistencia de las fracciones más finas de la pluma.

Al realizar la simulación sistemática durante el zanjeado el coeficiente de dispersión fue variado en el rango de 5 a $12 \text{ m}^2/\text{s}$, utilizándose en la mayor parte del proceso un valor máximo de $10 \text{ m}^2/\text{s}$, que se evidenció más representativo de la dispersión de la pluma medida. Este valor relativamente alto puede deberse a la agitación adicional producida por los vientos que tuvieron una magnitud predominante regular en gran parte del período de dragado.

4.3 Parámetros de simulación adoptados para la tapada

Se adoptó un coeficiente de dispersión $E = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ y se efectuaron análisis de sensibilidad en el rango de 3 a $10 \text{ m}^2/\text{s}$ (valor máximo utilizado en la simulación del zanjeado).

En cuanto a la granulometría del material, un muestreo del material depositado en la zona de refulado arrojó características similares a las del lecho del entorno de K_p 2,0. La Tabla 1 presenta sus fracciones granulométricas representativas.

Puede apreciarse que el 78% del material a ser refulado sobre la zanja es arena fina y limo grueso, cuya dispersión espacial será relativamente baja.

Tipo de Material	Rango de granulometría (micrones)	% en peso	Velocidad de caída típica (mm/s)	Diámetro equivalente (micrones)	Código en modelación
Arena muy fina	125-62	56	5,0	71	AF
Limo grueso	31-62	22	1,0	32	LG
Limo fino	8-31	12	0,25	16	LF
Limo muy fino/arcilla media	8-1	4	0,025	5	AM
Arcilla fina-coloides	< 1	6	0,001	1	AC
		100			

Tabla 1: Fracciones granulométricas representativas del material para tapada.

Tal como se analiza en detalle en el Punto 6, los sedimentos que efectivamente están en condiciones de alcanzar la zona de las tomas de agua, son los más finos. Por lo tanto, las simulaciones se realizaron considerando las fracciones presentadas en la Tabla 2.

Tipo de Material	Rango de granulometría (micrones)	% en peso	Velocidad de caída típica (mm/s)	Diámetro equivalente (micrones)	Código en modelación
Limo fino/arcilla media	1-31	16	0,05	7	LA
Arcilla fina-coloides	< 1	6	0,001	1	AC
		22			

Tabla 2: Fracciones granulométricas incluidas en la modelación de la tapada.

5 PRONOSTICOS DE EVOLUCION DE LA PLUMA DE TURBIDEZ PARA EL ZANJEADO

La evolución de la pluma de turbidez fue reproducida y pronosticada según el procedimiento previamente descrito. Diariamente se verificó la validez del pronóstico para el día anterior, teniendo en cuenta los datos del monitoreo con la embarcación. En función de los resultados se fue modificando el tamaño de grano representativo y su velocidad de caída, así como el coeficiente de dispersión del material, para lograr un mejor acuerdo entre las posiciones de las plumas medida y simulada.

Se presenta, en las Figuras 3 y 4, un ejemplo de los resultados de la modelación para el día 18/12/01 a la mañana, comparando los registros de turbidez con los resultados de la modelación, comprobando que la zona de dispersión y el gradiente transversal están correctamente simulados.

Si bien no existe una relación directa entre la concentración que computa el modelo y la turbidez medida, dado que ésta última depende de la composición del material, de acuerdo a la información disponible para contraste puede estimarse que dentro de los rangos de interés ambos parámetros tienen un orden de magnitud similar. Cabe destacar, también, que la turbidez es registrada en superficie mientras que la concentración modelada es el valor promedio en la vertical.

Dada una cierta cantidad de material puesta en suspensión, la "forma" de la campana de concentraciones que resulta de la modelación puede ser más o menos amplia, lo cual se regula a través del coeficiente de dispersión. Un valor excesivamente alto de este coeficiente producirá una zona de afectación muy amplia (perpendicularmente a la costa) y un valor pico de concentración relativamente bajo, dado que el volumen total de sedimentos en suspensión está determinado por la producción de la draga y por los procesos de sedimentación y transporte convectivo, que son independientes de la dispersión. Al contrario, un valor muy bajo de dicho coeficiente produce una "mancha" de sedimentos más concentrada a lo largo de la línea de corriente que pasa por el punto de 'descarga del material, o sea, más restringida espacialmente pero de mayor intensidad máxima que la obtenida con un coeficiente de dispersión más elevado.

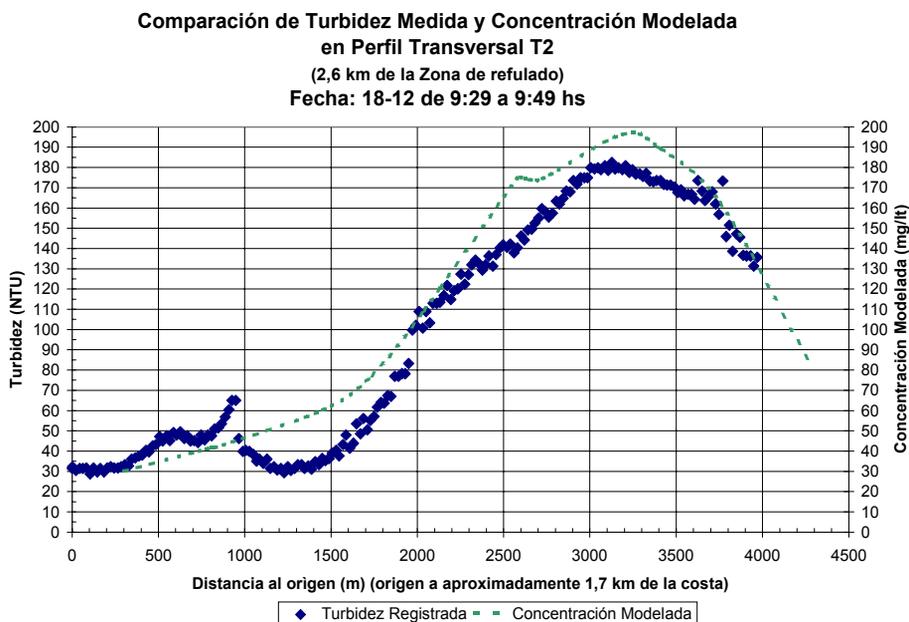


Figura 3: Modelo matemático sedimentológico. Comparación de turbidez medida y concentración simulada en un perfil transversal a la costa que cruza la pluma de turbidez.

El buen acuerdo general obtenido permite inferir que los procesos de sedimentación, transporte convectivo por las corrientes y dispersión han sido adecuadamente representados en la simulación matemática.

La Figura 4 permite además apreciar el área principal de estudio, la cual comprende la franja costera ubicada al Noroeste de la ciudad de La Plata hasta el Canal de Navegación, indicándose en la misma la traza de cruce del gasoducto (en la prolongación de la Diagonal 74), la zona de disposición del material refulado por la draga durante la operación de zanjeado (origen del material puesto en suspensión) y la ubicación de las tomas de agua para la Planta de Azurix (canal adyacente a la costa) y para la Planta de la Escuela Naval (torre de captación ubicada en cercanías de la escollera del Canal de Acceso al Puerto de La Plata).

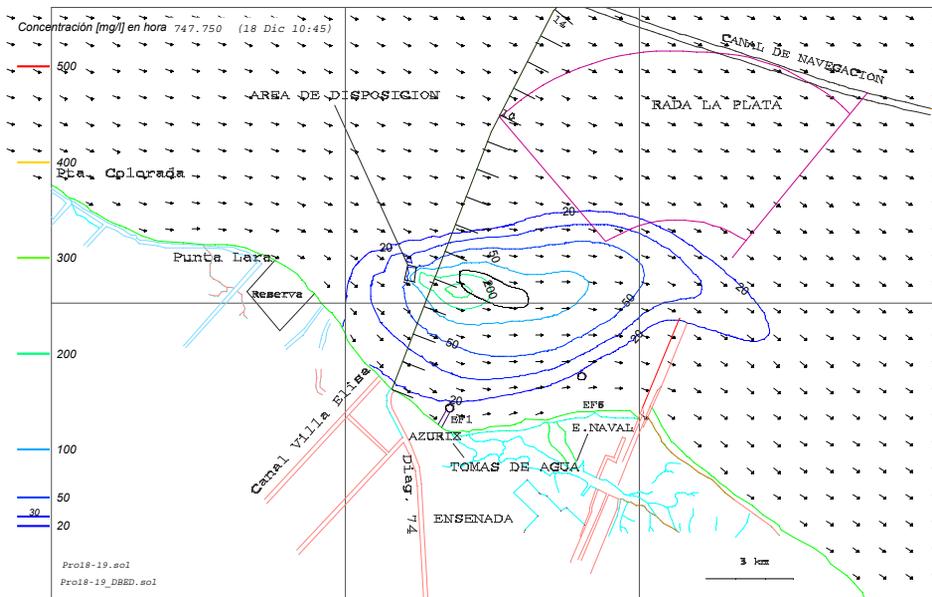


Figura 4: Modelos matemático y sedimentológico. Comparación de turbidez medida y concentración simulada al pasar la pluma frente a EF1. La línea negra encierra los máximos valores de turbidez registrados.

6 IMPACTO DEL REFULADO PARA TAPADA EN LA TURBIDEZ DEL AGUA

Previamente a los trabajos de tapada, y para evaluar el impacto del refulado en el área de las tomas de agua se realizaron simulaciones de descarga en dos tramos de la zanja a tapar, uno entre Kp 0,3 y 0,8 y otro entre Kp 0,8 y 1,4. El período de modelación incluyó 5 días con grandes fluctuaciones de marea (condiciones medias y bajantes y crecientes pronunciadas) debidas a distintas condiciones meteorológicas.

La descarga simulada fue de 1 kg/s de material para cada fracción granulométrica, de forma tal que la descarga total se compone de la suma de las producciones de cada fracción. En consecuencia, de acuerdo a las proporciones de cada componente y utilizando la nomenclatura adoptada en la Tabla 1, la concentración total de sedimentos en suspensión debida a la tapada, para una producción P dada (en kg/s), se expresa de la siguiente forma (concentraciones en mg/lt):

$$CT=[C(AF)*0,56 + C(LG)*0,22 + C(LF)*0,12 + C(AM)*0,04 + C(AC)*0,06]*P \quad (1)$$

Para estimar el volumen dragado correspondiente a un dado peso de material, se consideró un sedimento con densidad específica $\rho_s = 2,6 \text{ t/m}^3$, aplicando la fórmula de Allersma³ para un grado de consolidación media ($\alpha = 1,2$ a 1,6) y adoptando una fracción de arena del 56%:

$$pseca = 480 * \alpha + (1300 - 280 \alpha) * \%arena^{0,8} = 1,2 \text{ t/m}^3 \text{ a } 1,3 \text{ t/m}^3 \quad (2)$$

Lo cual equivale a una densidad in-situ del orden de 1,75 a 1,8 t/m³ y a una porosidad entre 0,55 y 0,50. Por seguridad se adoptó el valor más elevado de 1,3 t/m³.

En consecuencia, 1 kg/s de producción equivale a 3,6 t/hora o bien 2,77 m³/hora.

En la Figura 5 se presenta, para el refulando en Kp 0,3-0,8 la variación temporal de la concentración de cada fracción granulométrica en un punto ubicado frente a la toma de agua de Azurix (EF1), el cual muestra las fluctuaciones de la concentración en función de las condiciones de marea para los 5 días elegidos. Además se presenta un ejemplo con las líneas de iso-concentración en planta (Figura 6).

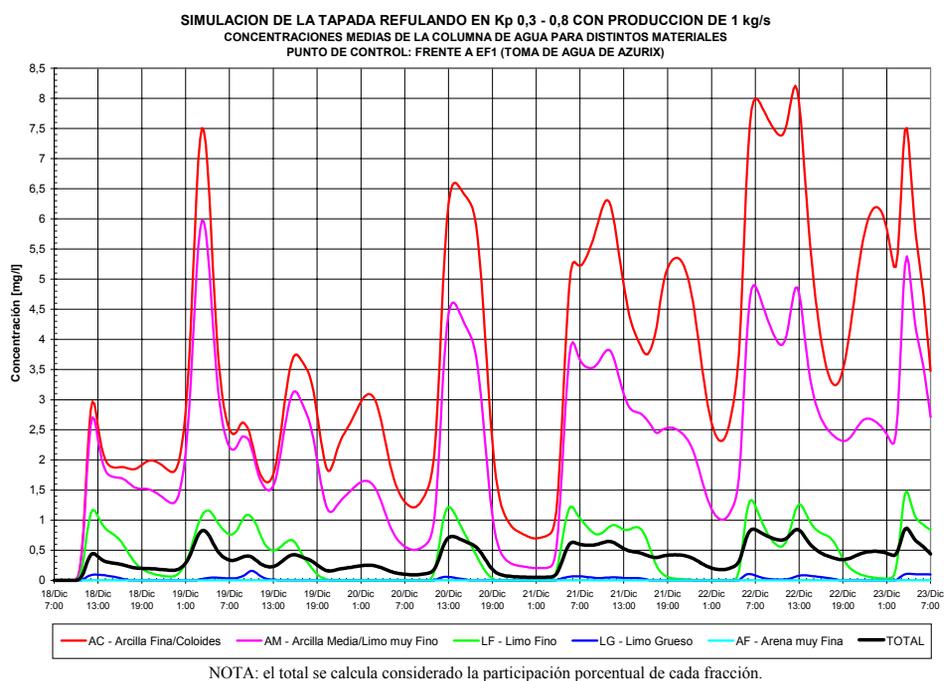


Figura 5: Variación temporal de la concentración de cada fracción granulométrica frente a EF1 para la tapada entre Kp 0,3-0,8.

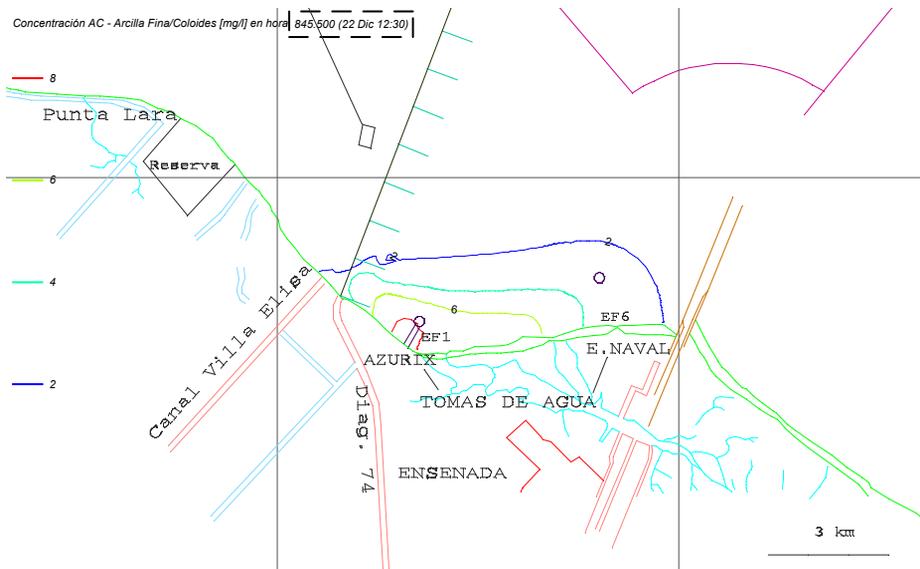


Figura 6: Máxima concentración de Arcilla Fina/Coloides frente a EF1. Descarga entre Kp 0,3 y 0,8.

Puede apreciarse que las contribuciones debido a las arenas finas y limo grueso son inexistentes (el material decanta antes de alcanzar las tomas) por lo cual es el material más fino, 22% del total y constituido por las fracciones LF, AM y AC, el que aporta al incremento de turbidez en las tomas, especialmente la fracción arcilla tal como era previsible que ocurriera.

Por lo tanto, es únicamente este material fino el que entran en la modelación, agrupado en dos fracciones representativas (ver Tabla 2).

Las concentraciones totales máximas obtenidas mediante la combinación de las distintas fracciones, para una descarga de 1 kg/s de material y considerando el coeficiente de dispersión medio adoptado ($E=5 \text{ m}^2/\text{s}$) se presentan en la Tabla 3.

Zona de tapada	Punto de Control	Toma	Concentración total máxima (mg/l)
Kp 0,3 a 0,8	EF1	Azurix	0,87
Kp 0,3 a 0,8	EF6	ESNM	0,56
Kp 0,8 a 1,4	EF1	Azurix	0,59
Kp 0,8 a 1,4	EF6	ESNM	0,33

Tabla 3: Concentraciones totales máximas esperables frente a EF1 y EF6.

La concentración total que se alcanzará frente a las tomas depende de la concentración de

fondo (background) que suele oscilar entre 50 y 100 mg/lit en ausencia de vientos fuertes.

Conforme al Plan de Monitoreo de la pluma, los valores de turbidez adoptados en EF1 son los siguientes:

- Nivel Alerta: 140 NTU (percentil 95 % del registro histórico)
- Nivel Crítico: 185 NTU (percentil 98 % del registro histórico)

El criterio básico para limitar la producción es mantener la turbidez por debajo del nivel Crítico, aunque transitoriamente pueda superarse el nivel de Alerta, dado que los procesos de potabilización admiten valores de turbidez en el rango de Alerta a Crítico durante algunas horas.

Considerando condiciones de turbidez natural moderadas (valor promedio del orden de 75 NTU más un margen por desvío estándar de 25 NTU = 100 NTU), queda un margen de 85 NTU como incremento máximo por dragado.

Teniendo en cuenta que el orden de magnitud de la concentración admisible es similar (dentro de los rangos de interés la turbidez medida y la concentración simulada son del mismo orden de magnitud), se adopta un valor máximo de 75 mg/lit.

Considerando un factor de seguridad del 10% en la toma de Azurix se deriva cual es la producción máxima admisible en principio para cada zona de tapada, en base a los 75 mg/lit de incremento de concentración adoptados y considerando un ciclo operativo máximo de 20 horas de producción sobre 24, resultando las producciones límite presentadas en la Tabla 4.

Zona de tapada	Máxima producción básica (m ³ /hora)	Máxima producción corregida por período operativo (m ³ /hora)	Máxima producción diaria aproximada (m ³ /día)
Kp 0,3 a 0,8	220	260	5000
Kp 0,8 a 1,4	320	380	7500

Tabla 4: Condiciones límite de producción para la tapada.

Estos valores de producción fueron revisados durante la operación de tapada en función del ajuste de la modelación matemática con los valores de turbidez efectivamente registrados por la embarcación de monitoreo y en las estaciones EF1 y EF6.

Para estimar la dispersión de los contaminantes que se encuentran junto a los sedimentos descargados se ha tomado como indicador la concentración total de sedimentos en suspensión obtenida en la simulación matemática de la dispersión de limos, arcillas y coloides. La dispersión de estos materiales finos es similar a la que podría tener un contaminante conservador presente en el lecho (el cual puede estar adsorbido en los sedimentos, en especial en la fracción arcilla).

A los efectos de realizar un cálculo conservador, se tomó la mayor concentración de contaminante en el lecho registrada en el muestreo efectuado en el área de refulado de donde luego se extrajo el material para tapada.

Aplicando relaciones de proporcionalidad entre la concentración de sedimentos y de

contaminantes en suspensión asumidas se puede calcular las concentraciones C_c de los distintos elementos contaminantes debidas al efecto de resuspensión por el dragado, en relación con la concentración de sedimento en suspensión frente a las tomas de agua C_s (mg/l).

Comparando las concentraciones máximas obtenidas con los Valores Límite⁴ especificados por la Comisión Administradora del Río de la Plata (C.A.R.P.) para diferentes usos en la Cuenca del Plata se puede apreciar que dadas las bajas concentraciones de contaminantes en el lecho se requerirían concentraciones superiores a varios miles de mg/l para alcanzar los niveles correspondientes al Uso I (agua para consumo humano con tratamiento convencional).

Se concluye que en la práctica no es necesario establecer una limitación a la producción que se derive del contenido de contaminantes en el material dragado en la zona de refulado, sino que la limitación se deriva de la necesidad de mantener la concentración de sedimentos en valores admisibles para las plantas potabilizadoras (criterio de turbidez límite).

7 PRONOSTICOS DE EVOLUCION DE LA PLUMA DE TURBIDEZ PARA LA TAPADA

Para el seguimiento de la pluma de turbidez durante la operación de tapada se utilizó el mismo procedimiento que en la operación de zanjeado. Diariamente se fue corroborando la validez del pronóstico para el día anterior, teniendo en cuenta los datos del monitoreo con la embarcación. En función de los resultados se fue modificando el tamaño de grano representativo de cada una de las dos fracciones modeladas (AC y LA) y su velocidad de caída, así como el coeficiente de dispersión del material, para lograr un mejor acuerdo entre las posiciones de las plumas medida y simulada. Es decir, se tuvo en cuenta que la zona de toma de sedimentos no presentaba un material de granulometría uniforme, sino que al extraerse este material se podían encontrar áreas o capas con sedimentos de características diferentes a las que poseía el sedimento con que se estaba modelando hasta el momento.

Tal como para los trabajos de zanjeado, se obtuvo un acuerdo aceptable dentro de los objetivos del procedimiento, presentándose en ocasiones algún defasaje en los momentos de pasaje del centro de la pluma por los perfiles de medición (que se deriva de defasajes en las velocidades de la corriente de marea debido a corrimientos en los momentos de pleamar y bajamar).

Del análisis de los registros de turbidez, marea y viento (dirección e intensidad), así como también de los resultados de modelación para distintas condiciones meteorológicas, se desprende que existe un comportamiento particular de la turbidez en la zona de la toma de agua (EF1).

Por un lado, podemos decir que la pluma de sedimentos generada por la tapada es arrastrada durante las bajantes hacia aguas abajo de la traza del gasoducto, pasando frente a la toma EF1 sin que se acuse un aumento significativo de los niveles de turbidez en inmediaciones de la misma. Sin embargo, durante los períodos posteriores de crecientes, dicha pluma es arrastrada hacia aguas arriba permitiendo su ingreso al canal de toma de EF1 lo cual produce un aumento de los niveles de turbidez en la misma. Por lo tanto, la elevación de

turbidez en la creciente dependerá del grado de dispersión y decantación del sedimento en la bajante.

Por otro lado, la turbidez natural o de base del río es susceptible de aumentar significativamente por efecto de fuertes vientos que, por agitación, puedan resuspender el material del lecho. En la zona de interés, se ha verificado la ocurrencia de estos eventos, particularmente importantes para vientos provenientes de los sectores N a NE.

Para el caso de EF1, la presencia del canal de toma de Azurix favorece, por su baja circulación, la permanencia de los materiales finos una vez que estos entraron en el mismo.

En las Figuras 7 y 8 se presenta una ampliación de la zona modelada en inmediaciones de la toma de agua, ilustrándose la malla de elementos finitos utilizada y un resultado típico de la modelación en un momento de pasaje de la pluma frente a la toma de agua.

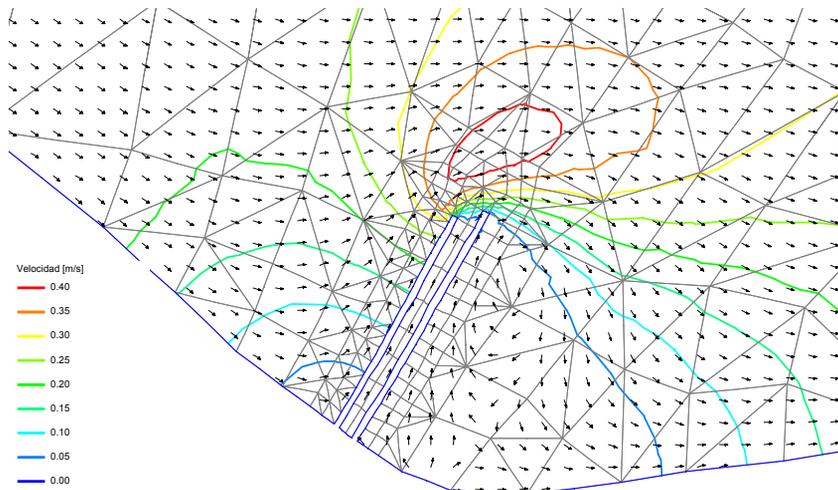


Figura 7: Detalle de la malla de elementos finitos en inmediaciones del canal de toma de Azurix (EF1) y circulación del flujo en marea bajante.

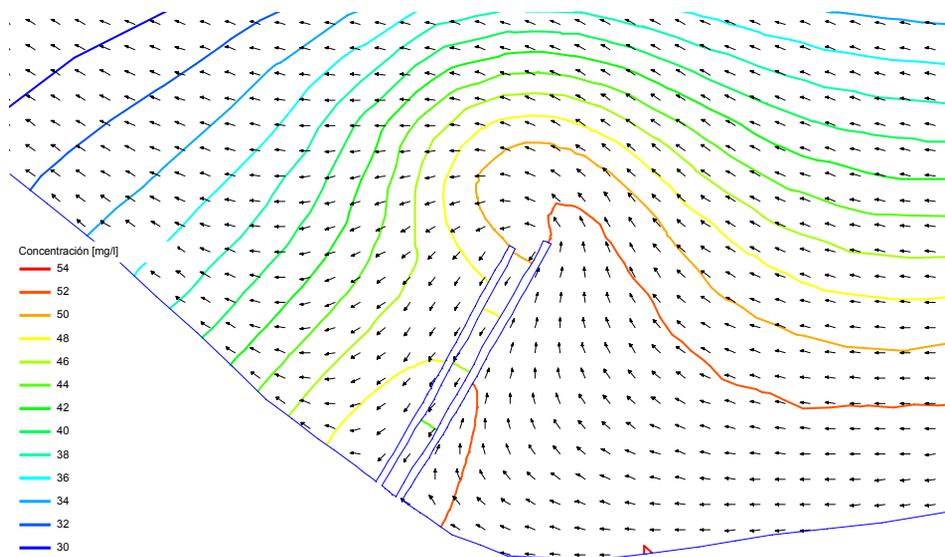


Figura 8: Ejemplo de ingreso a la toma de Azuriz de agua con alta concentración de sedimentos en suspensión durante un período de creciente.

A diferencia con el zanjeado, donde la pluma de sedimentos no alcanzaba las tomas de agua o sólo se acercaba marginalmente (en especial a la toma de la Escuela Naval, punto EF6), durante las operaciones de tapada la pluma pasa frente a la toma de Azurix (EF1), especialmente para los trabajos entre K_p 0,3 y 0,6 donde se arroja el material muy cerca de la costa. Por este motivo, y con el objeto de optimizar la tapada y no afectar significativamente las tareas de potabilización del agua, se focalizaron los esfuerzos durante la modelación sobre dos puntos que se consideraron muy importantes, a saber:

- Producción horaria de la draga: se decidió limitar la producción de la draga en base a los resultados de los estudios preliminares ajustando su valor máximo de acuerdo a lo observado en la modelación de pronóstico diario.
- Paradas estratégicas: se recomendaron cortes de operación de la draga, con el objeto de aumentar la eficiencia del proceso de tapada, fundamentándolos tal como se explica a continuación.

La acumulación de sedimentos finos en suspensión durante las estoas (momento de velocidad nula) correspondientes a las pleamares derivan, durante la bajante inmediata posterior, en el pasaje frente a EF1 de una pluma de alta concentración que luego, durante la creciente posterior, ingresa en el canal de toma en mayor o menor magnitud de acuerdo al grado de dispersión que haya sufrido el sedimento durante la bajante mencionada.

Entonces, en base a la modelación, donde se puede observar el comportamiento de la

pluma de sedimentos, es posible pronosticar los momentos críticos (pleamares) para los cuales se recomiendan detenciones transitorias en el trabajo de tapada.

En los casos en que las desigualdades diurnas de las mareas son pronunciadas, la baja amplitud de una de las crecientes determina que el alejamiento hacia aguas arriba de los sedimentos puestos en suspensión durante las bajamares previas no sea suficiente como para que se hayan dispersado y decantado significativamente al alcanzar la toma de agua durante las bajantes posteriores. Por lo tanto, es conveniente que la operación de tapada a partir de momentos antes de estas crecientes cortas sea restringida.

Por otro lado, ante la previsión de bajantes pronunciadas, la operación de tapada durante las pleamares previas a dichas corrientes no necesariamente debe restringirse pues el material descargado es arrastrado y diluido por la bajante aguas abajo de la toma de agua de AZURIX (EF1) y aún puede pasar la toma de la ESNM (EF6) y el canal de Acceso a La Plata.

De la misma manera, ante la previsión de corrientes de creciente prolongadas, la operación de tapada se ve favorecida pues los sedimentos puestos en suspensión son arrastrados una considerable distancia hacia aguas arriba, en donde se dispersan y decantan en gran medida antes de ser llevados hacia aguas abajo durante las bajantes posteriores.

8 CONCLUSIONES

La modelación matemática de pronóstico de la pluma de turbidez generada por operaciones de zanjeado y tapada ha presentado un buen acuerdo con las mediciones de campo, resultando una herramienta muy efectiva para la predicción de la posición de la pluma de sedimentos y de su concentración (asimilable a turbidez).

Los registros de turbidez permitieron ajustar y/o validar día a día parámetros tales como el coeficiente de dispersión del material y la velocidad de caída del mismo, relacionada con el diámetro típico de cada fracción granulométrica simulada.

Debe tenerse en cuenta que se modeló la pluma de sedimentos generada por los trabajos de zanjeado y tapada del gasoducto, por lo cual parte de las diferencias que surgen de las comparaciones entre el modelo y los relevamientos de campo son atribuibles a las variaciones de la turbidez de base (natural) del río, la cual es fuertemente afectada por condiciones de vientos intensos.

El ingreso de ondas de tormenta en la boca del Río de la Plata junto con el campo de vientos actuante en dicha zona es un factor preponderante que modifica sustancialmente las alturas de marea en el límite exterior, condición de borde impuesta para la modelación. La influencia de los vientos sobre el Río de La Plata es muy importante y es un factor que restringe las posibilidades de obtener un ajuste muy preciso de los niveles en su interior, ya que el área sobre la que actúa el viento es muy extensa y en ella las direcciones pueden variar considerablemente y más aún las intensidades del mismo.

Durante las operaciones de zanjeado, el nivel de producción se reguló en función de los pronósticos de afectación de las tomas de agua realizados mediante la modelación matemática, en especial en el tramo más cercano a la costa donde los contenidos de arcilla en el lecho son muy elevados.

Las producciones de trabajo adoptadas en forma preliminar antes del comienzo de las tareas de tapada en general fueron acertadas, si bien por momentos se modificaron para obtener una mayor eficiencia en las operaciones. En efecto, se evaluó la posibilidad de aumentar la producción y realizar paradas estratégicas, efectuándose recomendaciones para lograr la mayor producción diaria posible repartida en los momentos más favorables para el trabajo. Por lo tanto constituyó un factor relevante a la hora de tomar decisiones sobre los horarios y modalidades de operación durante la tapada, con lo cual se pudo prever y minimizar el grado de afectación de la toma de agua por la pluma de sedimentos.

Los resultados finales de la modelación han sido por demás satisfactorios en cuanto a al seguimiento de la evolución de la pluma y en lo que respecta a los pronósticos de modelación para las siguientes 60 hs a partir del día en que se modela. Los resultados obtenidos indican una clara colaboración de dichos pronósticos para el cumplimiento de las restricciones existentes en relación con los niveles de turbidez aceptables en las tomas de agua.

En efecto, contadas fueron las excepciones en que los niveles de turbidez superaron los límites acordados y coincidieron en general con una agitación general del río debida a la ocurrencia de vientos fuertes y sostenidos. Por otro lado, los objetivos fundamentales del sistema de pronóstico han sido alcanzados ya que la potabilización del agua no debió interrumpirse en ningún momento.

9 REFERENCIAS

- [1] U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, *Users Guide to RMA2 Version 4.3*, (1996).
- [2] L. C. Roig, B. P. Donnell, W. A. Thomas, W. H. McAnally and S.A. Adamec (Jr), *A user's manual for SED2D-WES, a generalized computer program for two-dimensional, vertically averaged sediment transport*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station (1996).
- [3] E. Allersma, "Composition and Density of Sediments (in Dutch)", *Report Z71.03, Delft Hydraulics*, Delft, The Netherlands (1988).
- [4] Comisión Administradora del Río de la Plata, *Estudio para la evaluación de la contaminación en el Río de la Plata – Informe de Avance* (1989).