



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO



*Proyecto LHA 296
Informe LHA 06-296-10
Ezeiza, Noviembre de 2010*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Martín SABAROTS GERBEC

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mariano RE

Martín SABAROTS GERBEC

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO

Informe

Mariano Re y Martín Sabarots Gerbec

RESUMEN

Se presenta la implementación del modelo sedimentológico de la versión 6.25 de MARS-3D. Se realizaron ensayos variando algunos de los condicionantes principales para evaluar su sensibilidad respecto de observaciones históricas de sedimentos en suspensión en el Río de la Plata Interior.

Descriptores temáticos: Modelación Sedimentológica, MARS-3D.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Argentina, Uruguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	MODELO SEDIMENTOLÓGICO	3
2.1	Características generales	3
2.2	Transporte	3
2.3	Erosión / Deposición	3
2.4	Velocidad de caída de los sedimentos	4
2.5	Capa de fondo	5
3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO	6
3.1	Implementación	6
3.1.1	Tipos de sedimentos	6
3.1.2	Inicialización del fondo	6
3.1.3	Descargas sólidas	7
3.1.4	Parámetros sedimentológicos	8
3.2	Ensayos	9
4	CONCLUSIONES	20

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31: "Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats" ha encomendado al INA su participación en un grupo de trabajo binacional que tiene por finalidad la instrumentación de un modelo hidrodinámico y sedimentológico para el Río de la Plata, que permita mejorar los conocimientos sobre los aportes sedimentarios en su cauce y obtener la información necesaria para optimizar la gestión en la zona de estudio. El grupo está conformado por personal del Servicio de Hidrografía Naval – SHN (RA), del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera – CIMA (RA), del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero - INIDEP (RA), del Instituto Nacional del Agua - INA (RA), y del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – SOHMA (ROU), contando además con la colaboración del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar – IFREMER (*Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer*).

En el Primer Informe (LHA 01-296-08, junio de 2008) se presentó el Plan de Trabajo del INA. En el Segundo Informe (LHA 02-296-08, agosto de 2008) se describió la dinámica general de los sedimentos. En el Tercer Informe (LHA 03-296-09, agosto de 2009) se planteó un modelo conceptual de flujo de sedimentos en el Río de la Plata Interior, y se desarrolló la metodología para la determinación de las cargas sólidas de los tributarios. En el Cuarto Informe (LHA 04-296-10, septiembre de 2010) se presentó la implementación del modelo hidrodinámico y una validación realizada a partir de observaciones de velocidades de corriente y niveles. En el Quinto Informe (LHA 05-296-10, octubre de 2010) se mostraron los resultados de un análisis de sensibilidad de distintas variables respecto de la interacción del viento con la superficie. En este Sexto Informe se presenta la implementación del modelo sedimentológico en el Río de la Plata y su Frente Marítimo.

2 MODELO SEDIMENTOLÓGICO

2.1 Características generales

El modelo sedimentológico incluido en el Sistema de Modelación MARS-3D, cuyo antecedente es el modelo SiAM-3D (Le Hir, 2000; Brenon, 1997; Cugier y Le Hir (2000, 2002) y Waeles, 2005), se compone de un modelo de múltiples capas de sedimentos (erosión, deposición y consolidación) y un modelo de transporte tridimensional de material particulado.

A continuación se presentan las principales características del modelo sedimentológico en la versión 6.25 de MARS-3D, referidas al transporte de sedimentos finos.

2.2 Transporte

Los sedimentos en suspensión son advectados y dispersados según el siguiente modelo de transporte:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial h \left(uC - K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial h \left(vC - K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial h \left((w^* - W_s) C - \frac{K_z}{D^2} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} = ERO - DEP$$

donde C es la concentración de la variable estudiada, W_s la velocidad de caída para el caso de variables particuladas y ERO y DEP los términos correspondientes al flujo de erosión y deposición en la capa del fondo.

La formulación multivariable implementada, de la ecuación de advección-dispersión, permite tener en cuenta el transporte de distintas variables particuladas, diferenciadas por sus distintas velocidades de caída.

2.3 Erosión / Deposición

Los procesos de erosión y deposición son considerados mediante formulaciones comúnmente utilizadas en la dinámica de sedimentos finos (Metha y McAnally, 2008).

La tasa de sedimentación, $DEP [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$, se calcula a partir de la expresión generalizada de Krone (1962), en donde para partículas finas en un cuerpo de agua en movimiento se considera una función probabilidad de deposición ψ

$$DEP = C \cdot W_s \cdot \psi$$

con

$$\psi = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cr,d}}\right) & \text{si } \tau < \tau_{cr,d} \\ 0 & \text{si } \tau \geq \tau_{cr,d} \end{cases}$$

donde τ es la tensión de corte del escurrimiento y $\tau_{cr,d}$ la tensión de corte crítica de deposición.

Para el cálculo de la tasa de erosión, ERO [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], MARS-3D presenta dos formulaciones: la de Parthenaides (1962) y una ley lineal en función del exceso de tensión de corte. La primera considera una función de probabilidad de erosión:

$$ERO = E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_{cr,e}} - 1 \right) \quad \text{si } \tau \geq \tau_{cr,e}$$

$$ERO = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_{cr,e}$$

donde τ es la tensión de corte del escurrimiento, $\tau_{cr,e}$ la tensión de corte crítica de erosión, y E_0 una constante de erosión ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Estos últimos dos parámetros dependen del estado de consolidación del sedimento de fondo, pero en este trabajo son considerados constantes. La segunda opción es

$$E = E_1 (\tau - \tau_{cr,e}) \quad \text{si } \tau \geq \tau_{cr,e}$$

$$E = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_{cr,e}$$

donde E_1 es una constante de erosión (en m/s). Se considera que la capacidad de erosión es la misma para cada tipo de sedimento que componga el fondo.

2.4 Velocidad de caída de los sedimentos

La velocidad de caída (W_s) de los sedimentos es la que permite distinguir las distintas variables sedimentarias entre si. La formulación implementada en MARS-3D para el cálculo de la velocidad de caída de los sedimentos cohesivos es la planteada por Le Hir et al. (2001), y resulta función de la concentración de los mismos.

$$C \leq C_{w_{max}} \quad W_s = W_{min} (1 + \alpha_1 \cdot C + \alpha_2 \cdot C^2)$$

$$C_{w_{max}} < C \leq C_{cr} \quad W_s = (1 - \beta_1 \cdot C^{\beta_2})^{4.65R}$$

$$R = \frac{W_{min} (1 + \alpha_1 \cdot C_{w_{max}} + \alpha_2 \cdot C_{w_{max}}^2)}{(1 - \beta_1 \cdot C_{w_{max}}^{\beta_2})^{4.65}}$$

siendo $C_{w_{max}}$ la concentración para la cual la velocidad de caída es máxima, α_1 y α_2 parámetros que son función de $C_{w_{max}}$, y $C_{cr}=60$ g/l, $\beta_1=0.085$ y $\beta_2=0.5$. La Figura 2.1 presenta la relación utilizada con $W_{min}=0.05$ mm/s y $W_{max}=0.15$ mm/s.

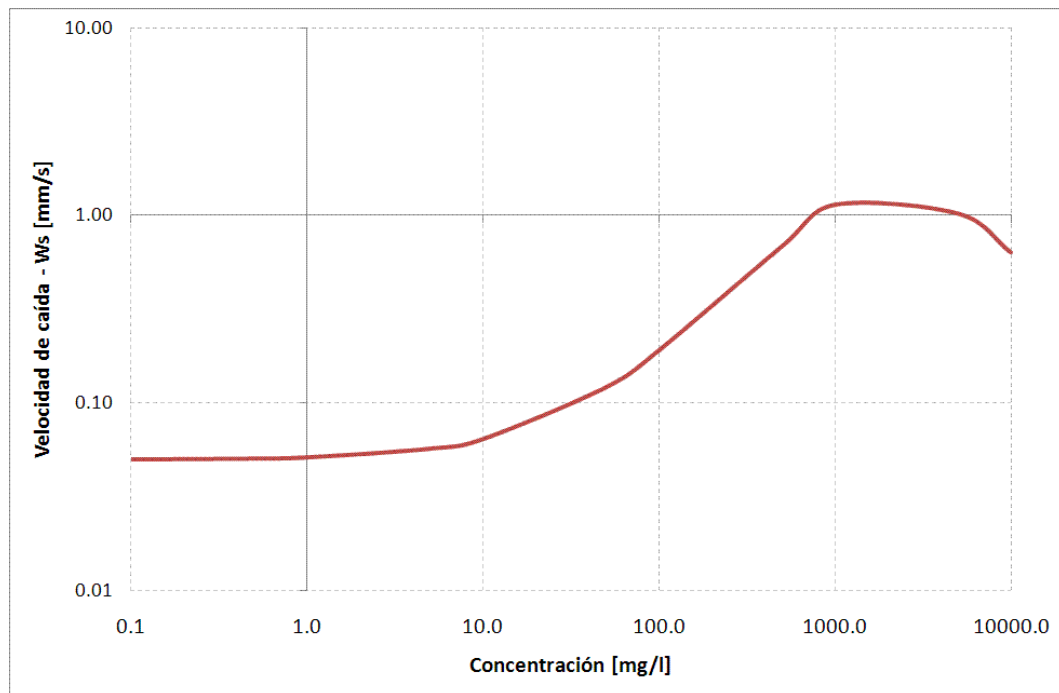


Figura 2.1 Velocidad de caída en función de la concentración.

2.5 Capa de fondo

En MARS-3D las capas sedimentarias formadas por la deposición son administradas por un modelo multicapa unidimensional en la vertical, que resuelve una ecuación de conservación de masa para cada variable sedimentaria y en cada celda del modelo 3D. Al considerarse consolidación se tienen en cuenta los movimientos verticales del sedimento, simulando una sedimentación lenta de las partículas compensada por un movimiento ascendente de la fase líquida (expulsión del agua intersticial).

En este trabajo, los procesos de consolidación (*tassement*) no son tomados en cuenta: el material particulado se deposita en una o más capas de sedimentos cuya concentración se mantiene constante. La composición de los sedimentos del fondo puede ser modificada en sus porcentajes de acuerdo a la sucesión de erosiones o deposiciones de cada una de las componentes.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO

3.1 Implementación

3.1.1 Tipos de sedimentos

En esta primera implementación de la versión 6.25 del modelo sedimentológico de MARS3D se tuvieron en cuenta, como primera aproximación, solo dos tipos de variables sedimentarias: 1) Arenas Finas (*Sables Fins* – Sedimentos Gruesos) y 2) Limos (*Vases* – Sedimentos Finos).

3.1.2 Inicialización del fondo

Para comenzar con las simulaciones del modelo sedimentológico se requiere dar condiciones iniciales en la composición del material de fondo. Para esto, a celda agua del modelo se debe asignar una proporción por cada una de las variables sedimentarias. Esta asignación se realiza a partir de una codificación preestablecida en el código de la versión 6.25 de MARS-3D según se muestra en la Figura 3.1.

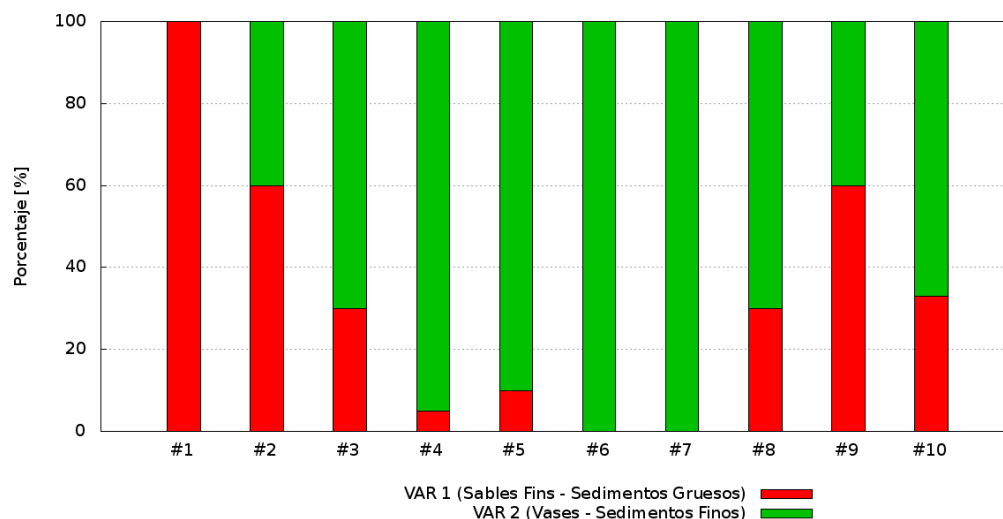


Figura 3.1 Codificación de las variables sedimentarias en el sedimento de fondo.

La inicialización 'base' que aquí se considera tiene que ver con la distribución de sedimentos de fondo presentada por López Laborde y Nagy (1999), siguiendo el Triángulo Textural

(Shepard, 1954). En la Figura 3.2 se presenta esta codificación y en la 3.3 se muestran las proporciones entre variables sedimentarias elegidas para la simulación.

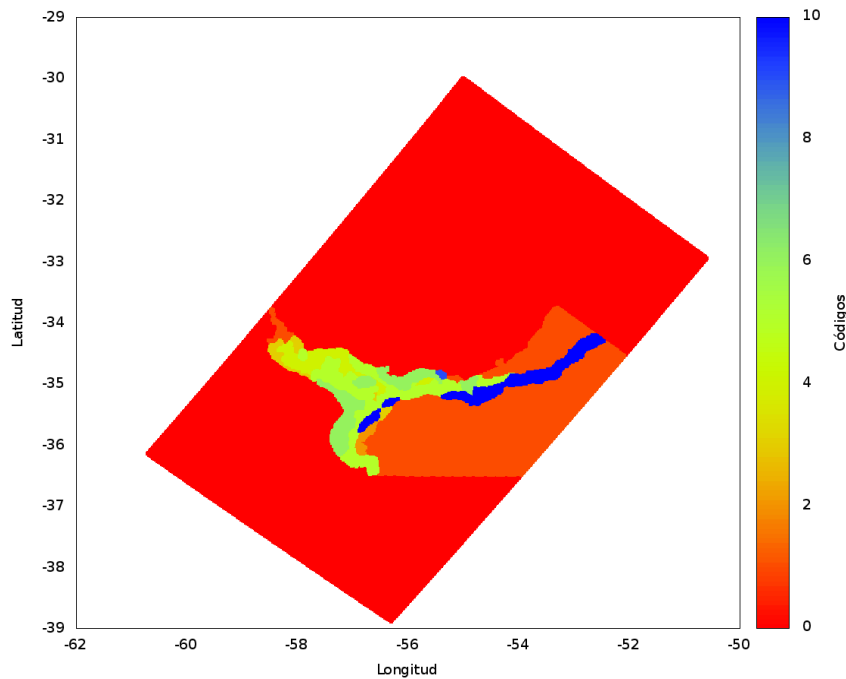


Figura 3.2 Inicialización base del fondo según López Laborde y Nagy (1999). Codificación.

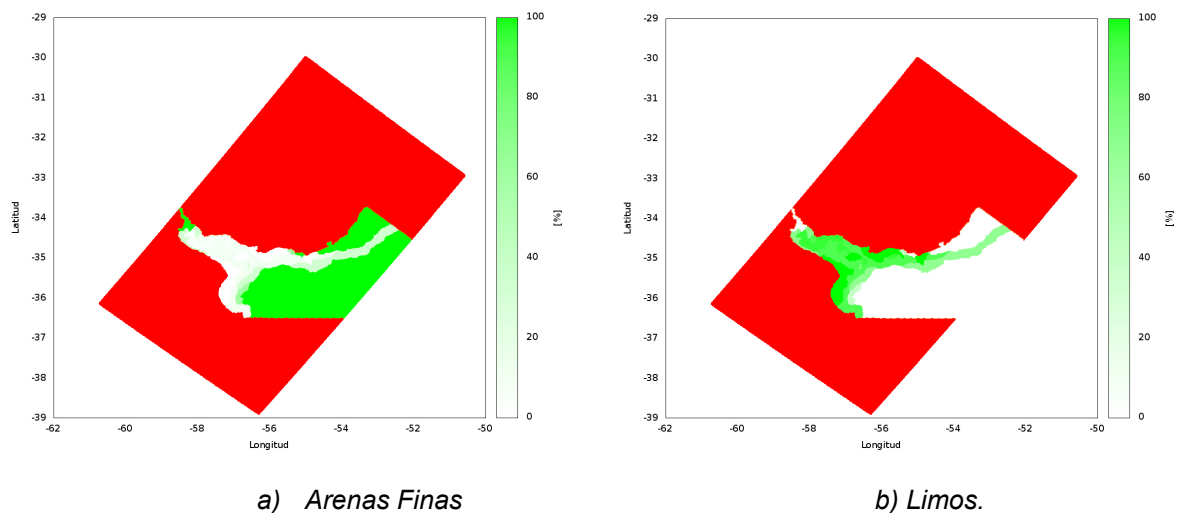


Figura 3.3 Proporciones en la inicialización del fondo.

3.1.3 Descargas sólidas

Solo las descargas de sedimentos finos en el Río de la Plata fueron tenidas en cuenta en este trabajo. Las series de descargas sólidas fueron generadas a partir de la metodología desarrollada en Menéndez y Re (2009) y Re *et al.* (2009). Para cada una de las descargas que componen al forzante Parana (Parana de las Palmas y Parana Guazu), se consideró la misma serie de concentraciones. En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestran las series utilizadas para la simulación del año 2002. Se destaca la diferencia en un orden de magnitud entre

ambas descargas. Las dos series que se presentan para el río Parana corresponden a distintos abordajes metodológicos (Menéndez y Re (2009) y Re et al. (2009)).

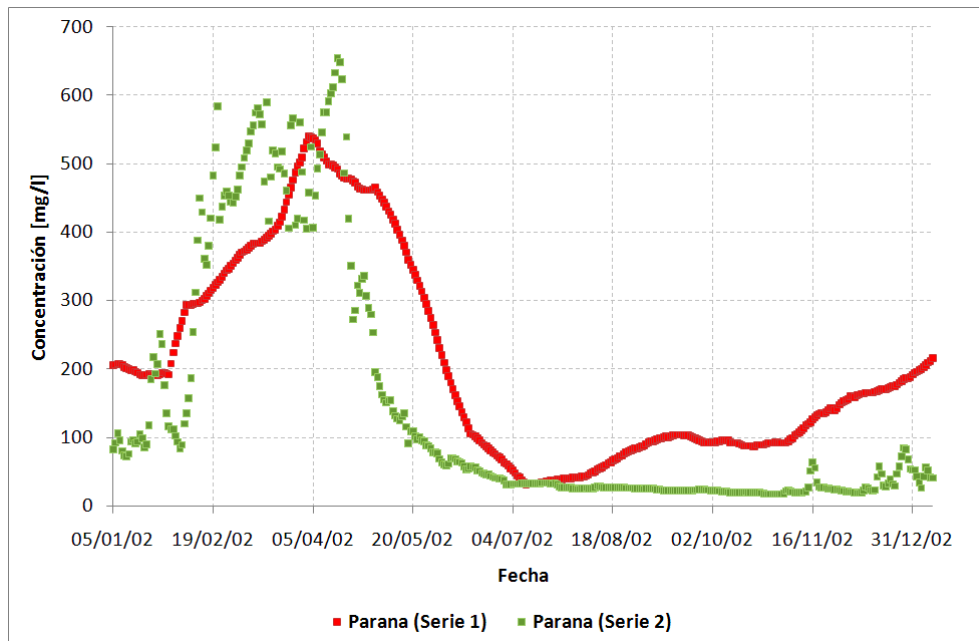


Figura 3.4 Series de concentración de sedimentos finos del río Parana.

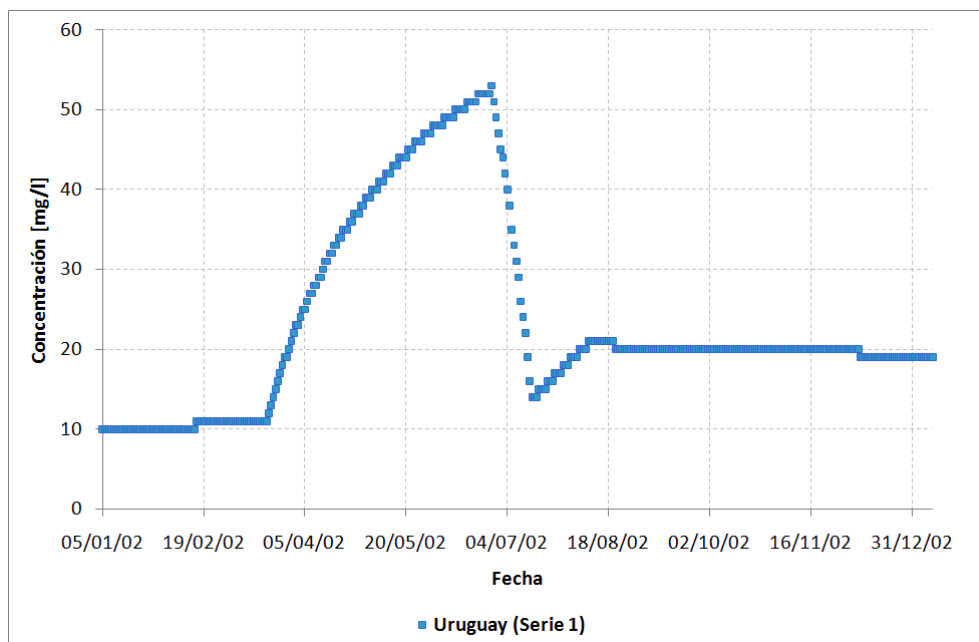


Figura 3.5 Serie de concentración de sedimentos finos del río Uruguay.

3.1.4 Parámetros sedimentológicos

Los parámetros sedimentológicos que debieron ser especificados para las simulaciones son los siguientes:

- *Velocidad de caída del sedimento en suspensión:* Se utilizaron dos opciones: la formulación en función de la concentración (anteriormente detallada) y un valor constante (0.075 mm/s)
- *Constante de erosión:* Se utilizó el valor medio de 0.00002 [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]. Para la simulación sin erosión este parámetro resultó valer 0.
- *Tensiones críticas de deposición y erosión:* Para ambos casos se propuso el mismo valor (0.1 N/m²).
- *Capa inicial de sedimentos:* La discretización de la capa de sedimentos de fondo, debido a que no se considera consolidación, consta de una sola capa de 0.15 m de espesor.

La justificación de los valores elegidos para cada uno de estos parámetros debería ser motivo de un análisis más detallado.

3.2 Ensayos

Se realizaron cinco ensayos (LC_1, LC_2, LC_3, LC_noERO y LC_WS) cuyas características se describen en la Tabla 3.1. Se modificaron de a una tres de las variables del problema, respecto del ensayo LC_1, con el objetivo de estudiar la sensibilidad en los resultados. El período de tiempo de simulación correspondió al año 2002, comenzando de una situación sin sedimentos en suspensión en el dominio. La simulación hidrodinámica no incluye el accionar del viento.

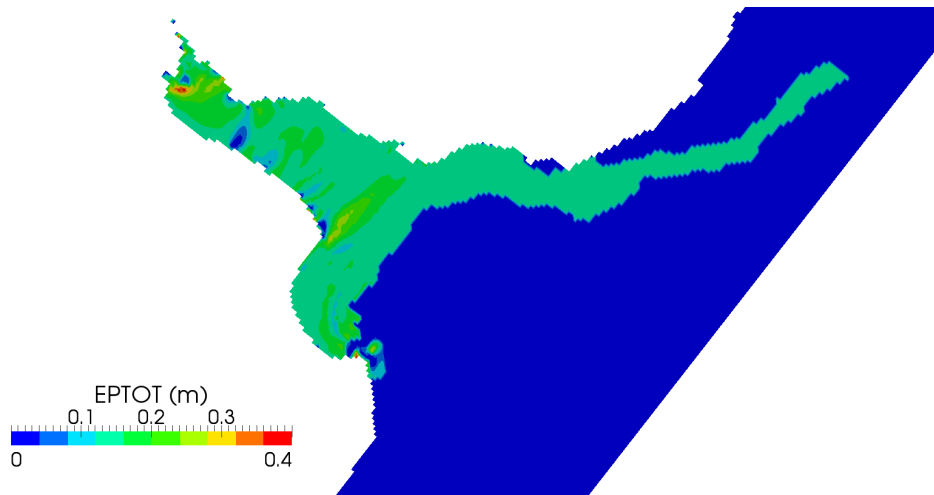
Como herramienta de validación se utilizaron datos históricos de observación de sedimentos en suspensión en el Río de la Plata y una curva de interpretación del decaimiento de las concentraciones de sedimento en suspensión en el Río de la Plata Interior (Menéndez *et al.*, 2009).

Tabla 3.1 Ensayos realizados.

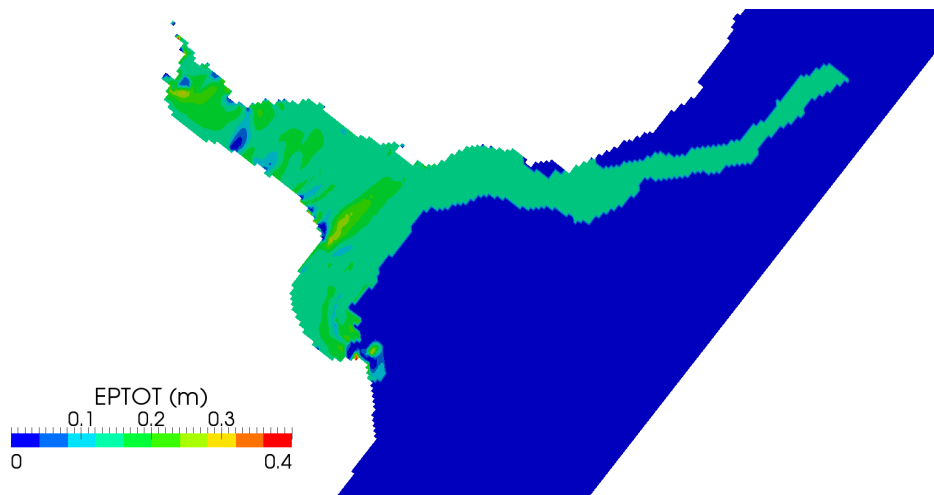
Ensayo	Descarga Sólida	Velocidad de Caída	Constante de erosión [$kg/m^2/s$]
LC_1	Serie 1 (PAR)	Variable	0.00002
LC_2	Constante	Variable	0.00002
LC_3	Series 2 (PAR)	Variable	0.00002
LC_noERO	Series 1 (PAR)	Variable	0.00000
LC_WS	Series 1 (PAR)	Constante	0.00002

La Figura 3.6 presenta el estado final del espesor de la capa de fondo de sedimentos (31/Dic/2002). Para el caso de los ensayos LC_1, LC_2 y LC_3 se observan las mismas características de erosión/deposición en el Río de la Plata Intermedio y Exterior (lo que significa que es material resuspendido el que se deposita en esa región, afirmación que se refuerza con los resultados del ensayo LC_noERO) y una mayor cantidad de sedimentos depositados en el Río de la Plata Superior, consistente con el mayor volumen descargado (forzante río Parana: $LC_1 > LC_3 > LC_2$). Una menor y constante velocidad de caída

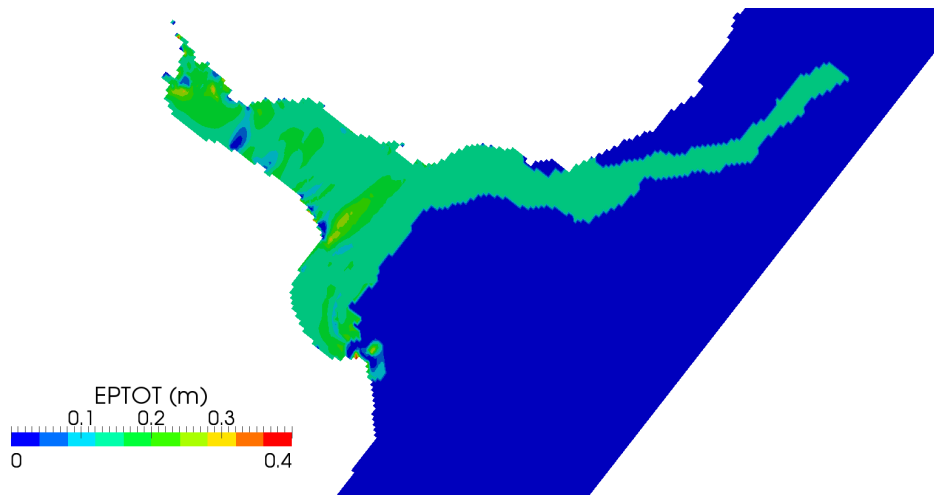
provoca una mayor permanencia en suspensión del sedimento, pero no lo suficientemente significativa.



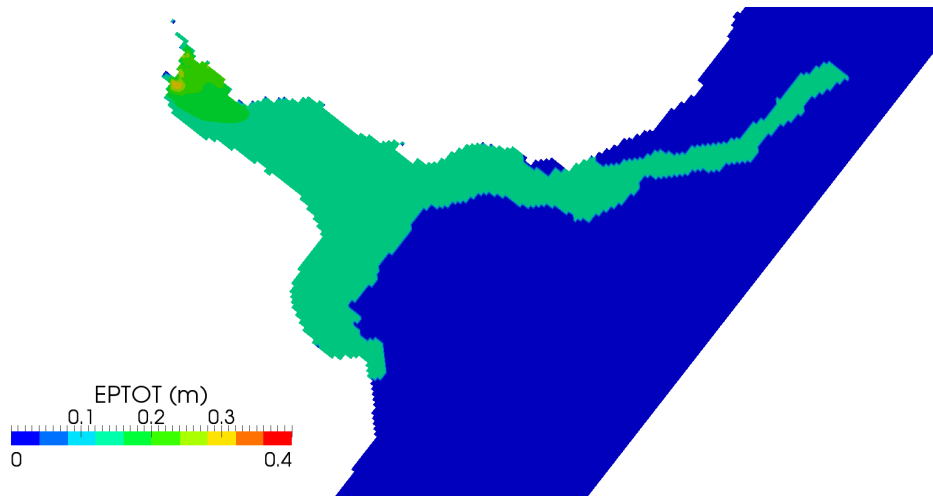
a) Ensayo LC_1



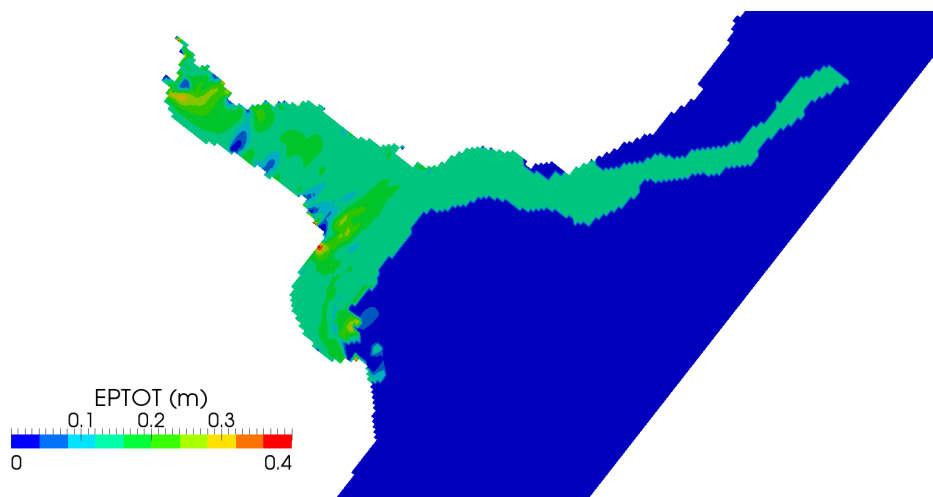
b) Ensayo LC_2



c) *Ensayo LC_3*



d) *Ensayo LC_noERO*



e) *Ensayo LC_WS*

Figura 3.6. *Espesor de la capa de sedimentos de fondo (LC).*

El patrón de transporte de sedimentos en suspensión se presenta en las Figuras 3.7 a 3.11, a partir de un corte horizontal en la capa media de la discretización vertical del modelo. Aquí se muestra un instante significativo por cada mes en la simulación de la totalidad del año 2002. En todos los casos se observa que el transporte de limos en suspensión en el Río de la Plata Superior se da entre los meses de febrero y junio (como respuesta del forzante Parana). Salvo en el ensayo sin erosión (LC_noERO), se distingue que el transporte por resuspensión sedimentos finos permanece prácticamente durante todo el año.

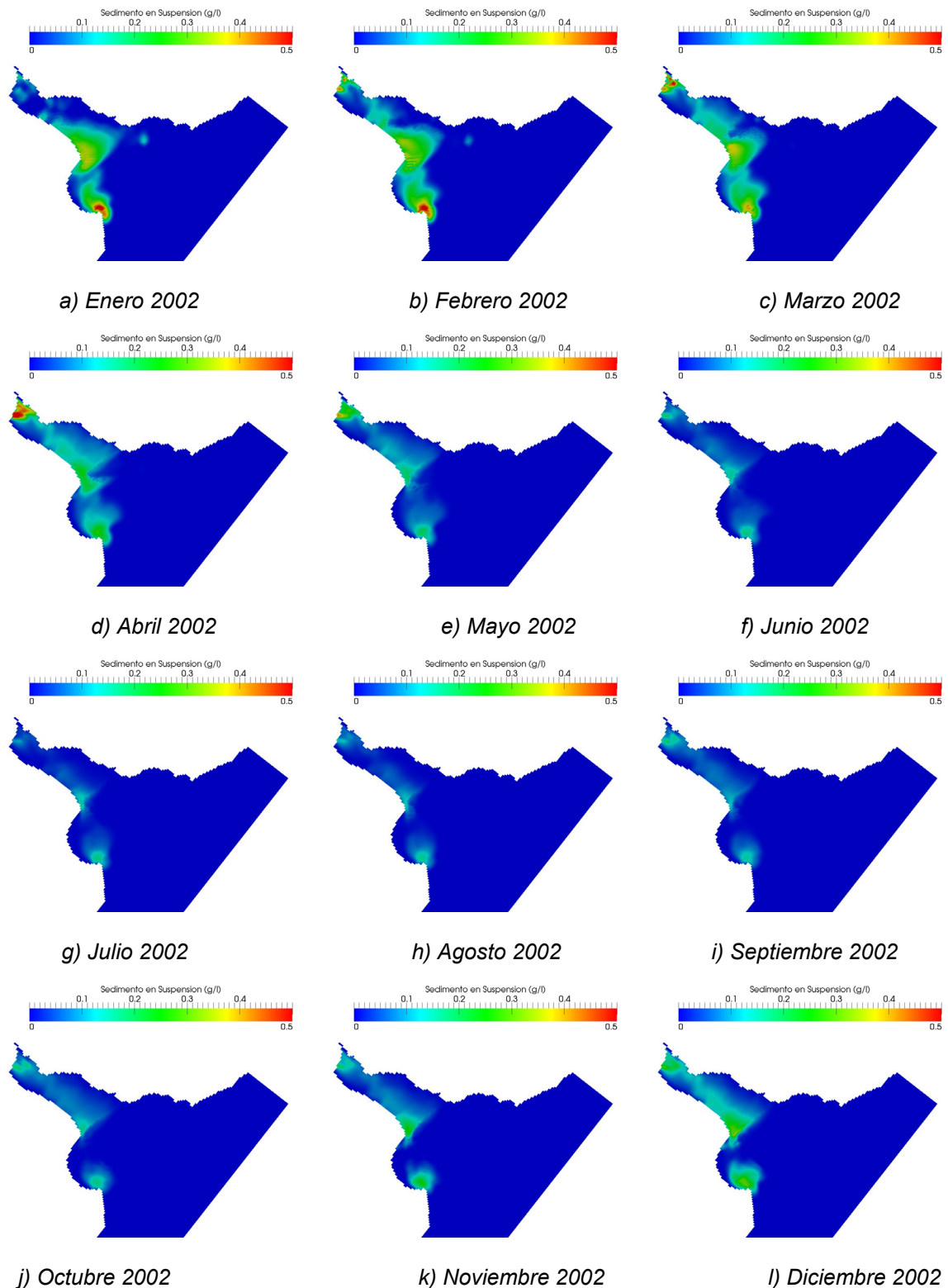


Figura 3.7 Concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_1)

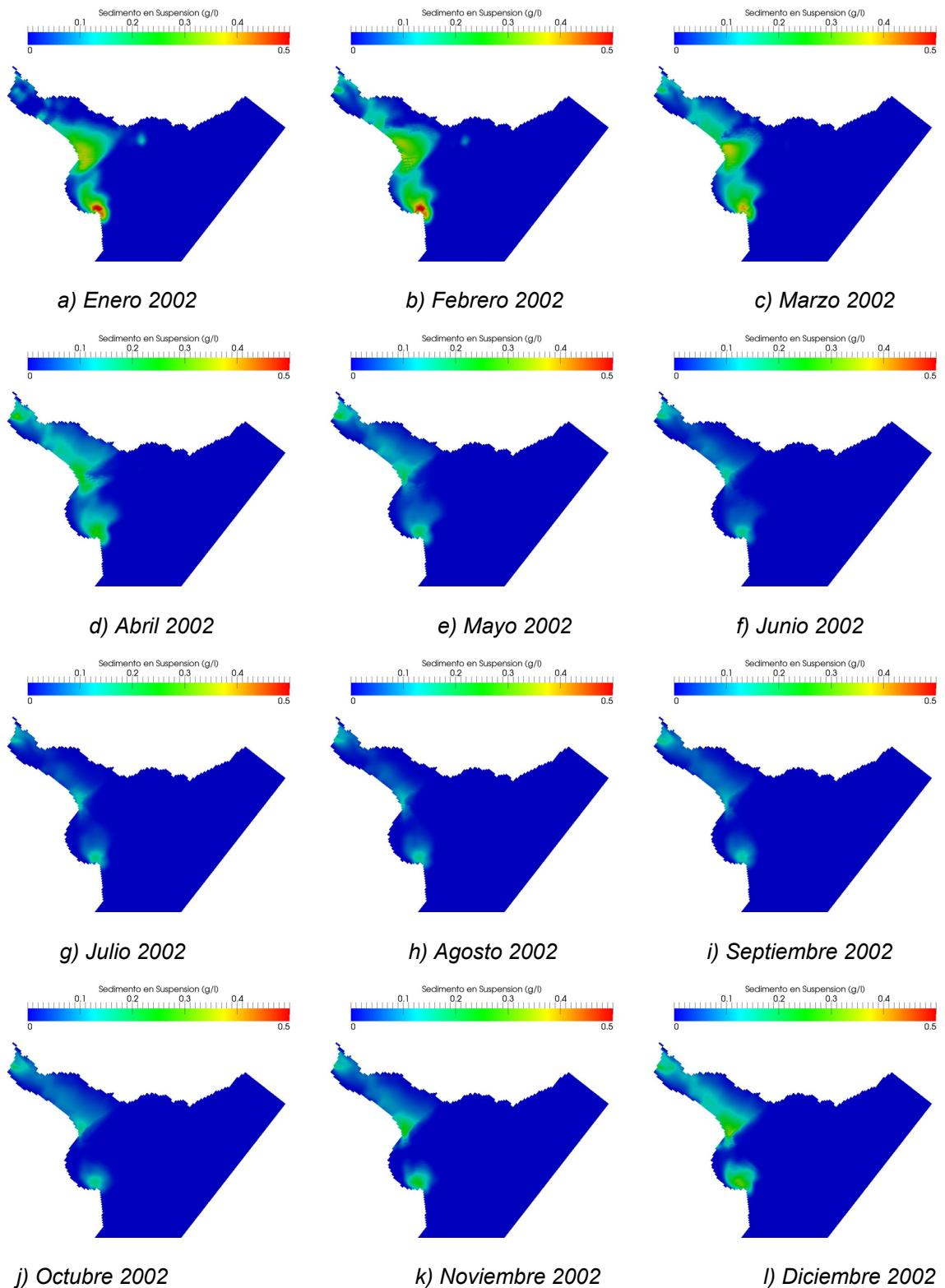


Figura 3.8 Concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_2)

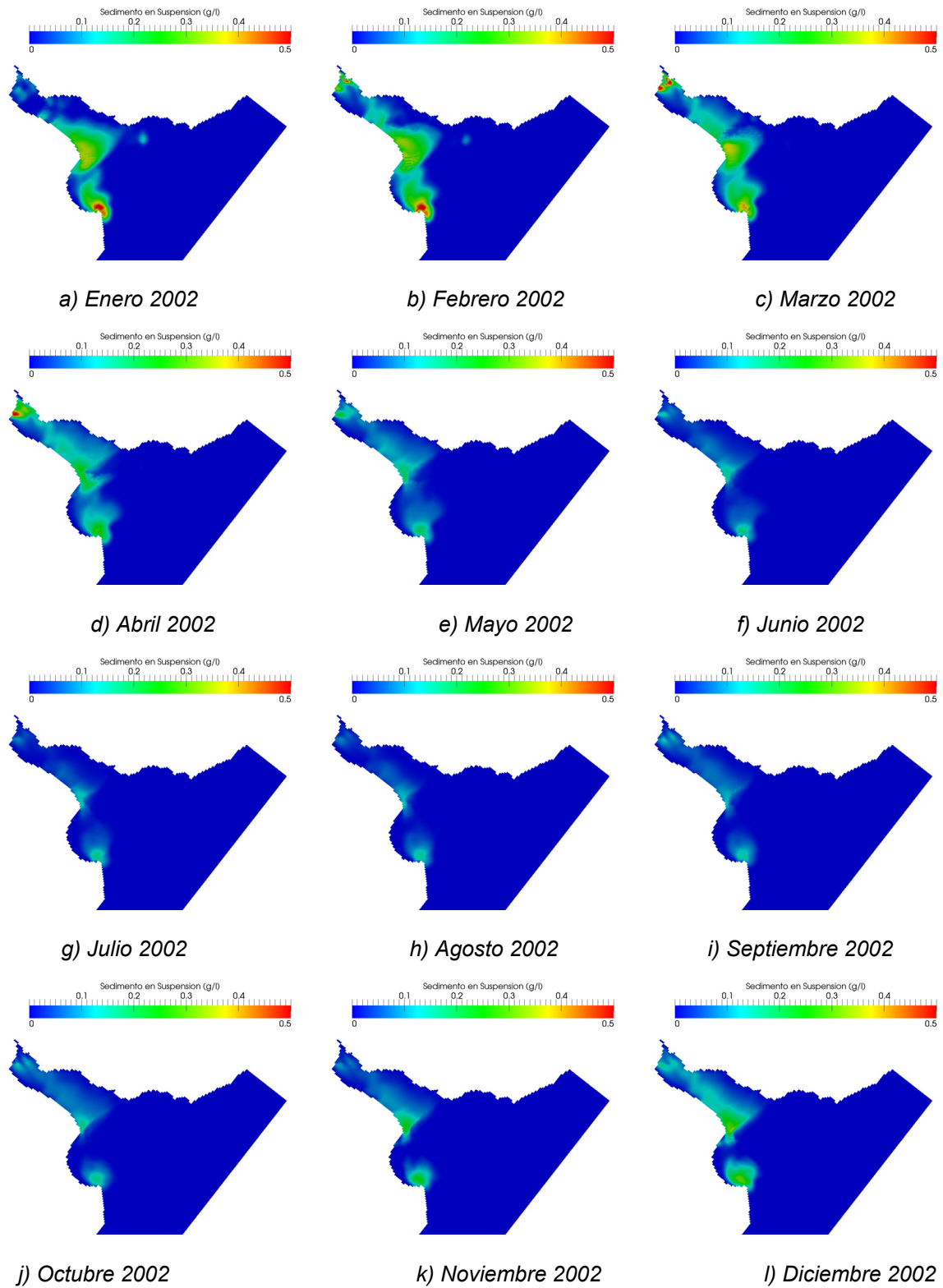


Figura 3.9 Concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_1)

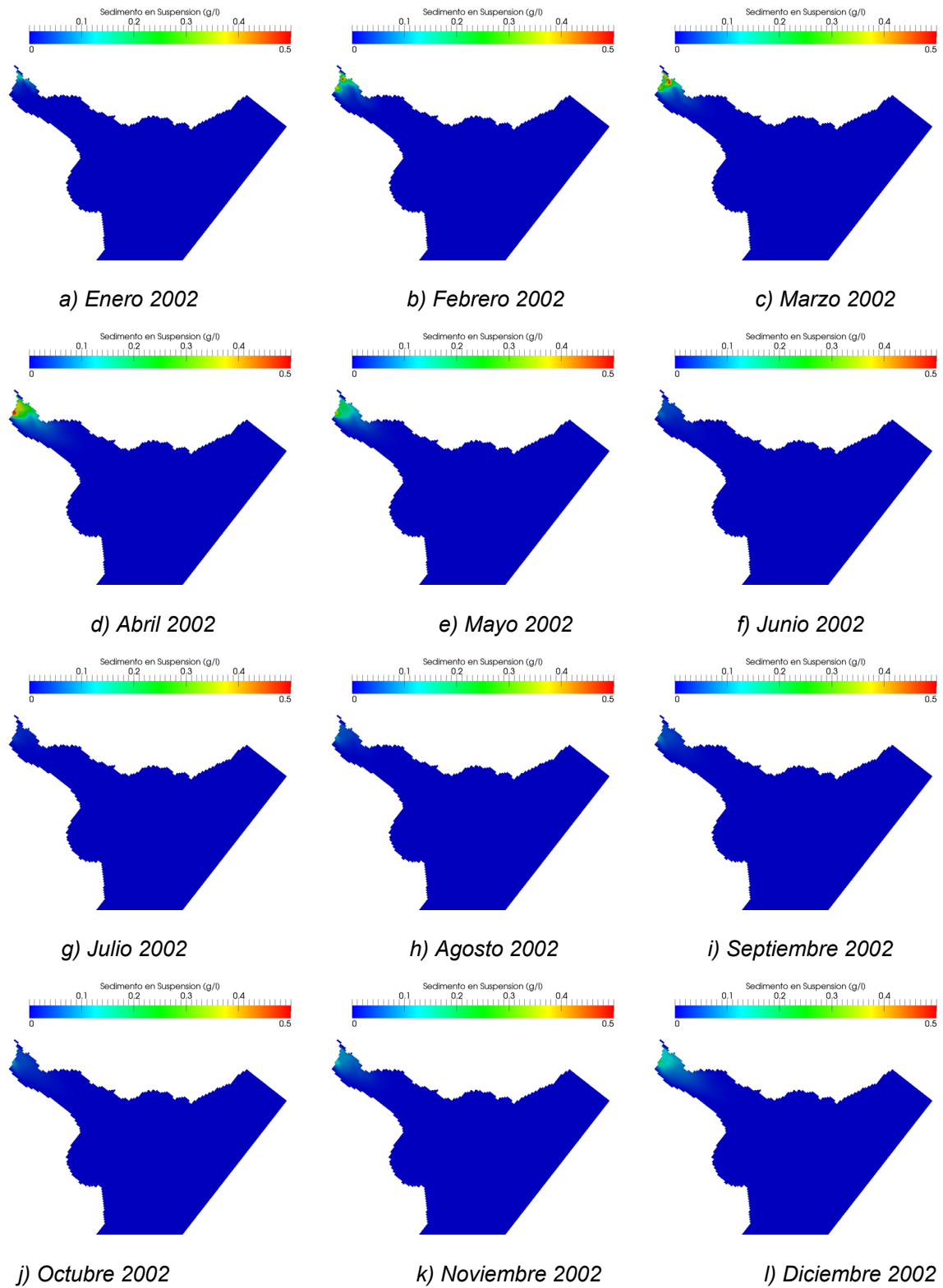


Figura 3.10 Concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_noERO)

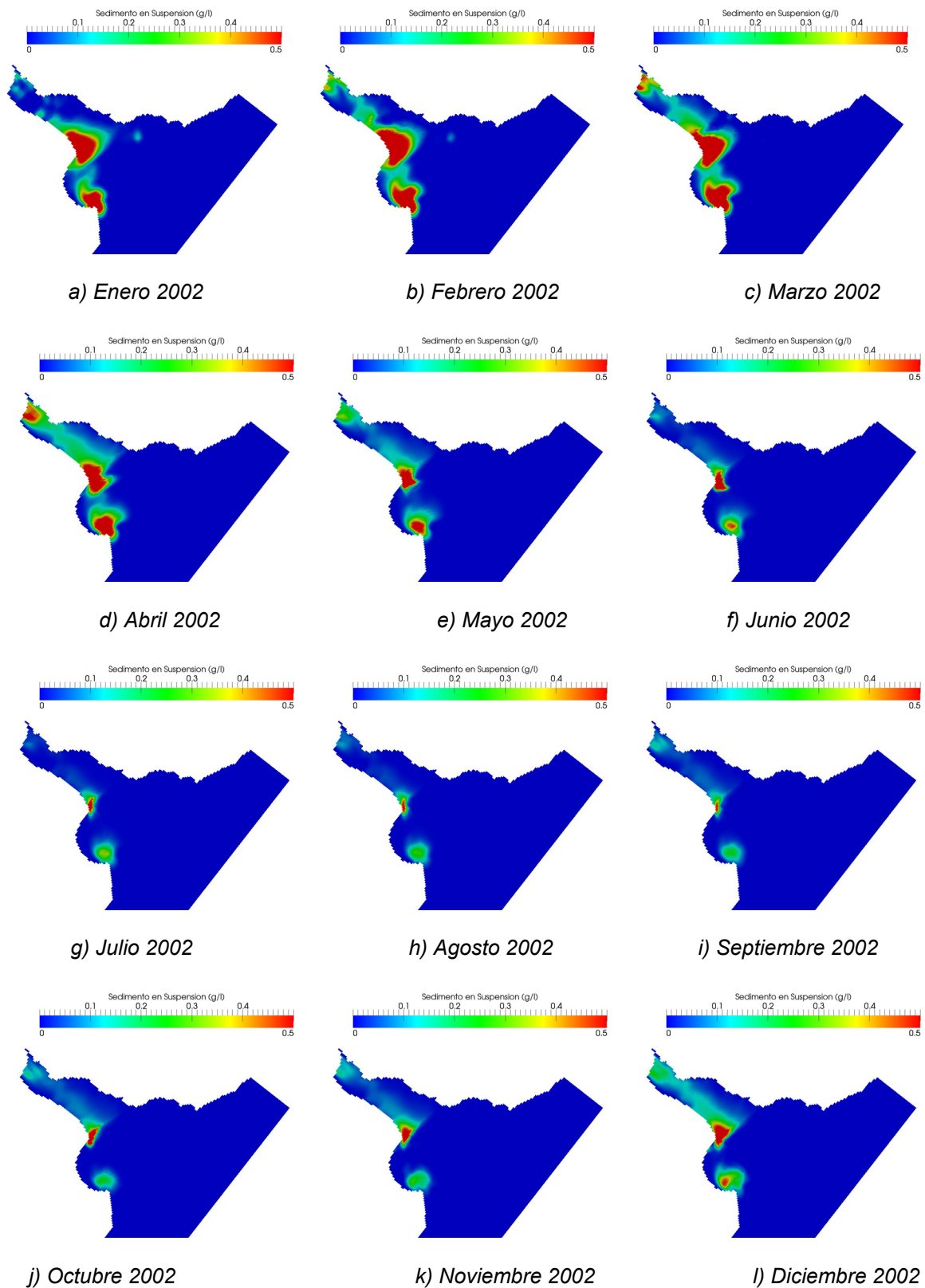


Figura 3.11 Concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_WS)

Una primera aproximación a una validación se muestra en las Figuras 3.12 a 3.16. En ellas se presenta la envolvente de concentraciones simuladas en el eje del Río de la Plata versus datos observados y la curva de interpretación anteriormente mencionada. Se destaca el buen acuerdo, sobre todo en el ensayo LC_1, en la simulación de esta variable mostrando consistencia en la hipótesis de los dos patrones del transporte de limos. Se observa que en el ensayo de menor velocidad de caída (LC_WS), la mayor permanencia de los sedimentos en suspensión explica una amplitud mayor en la envolvente de concentración así como mayores concentraciones en la zona de erosión.

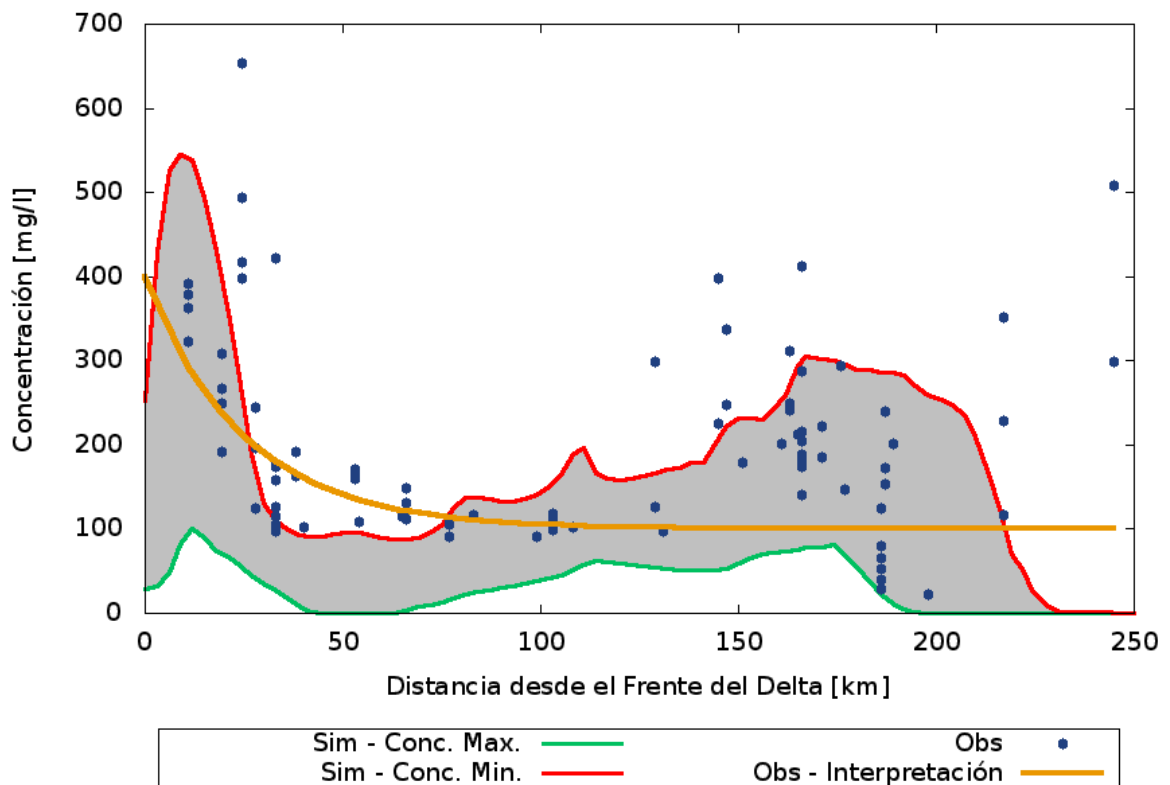


Figura 3.12 Corte longitudinal en el eje del Río de la Plata de la concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_1)

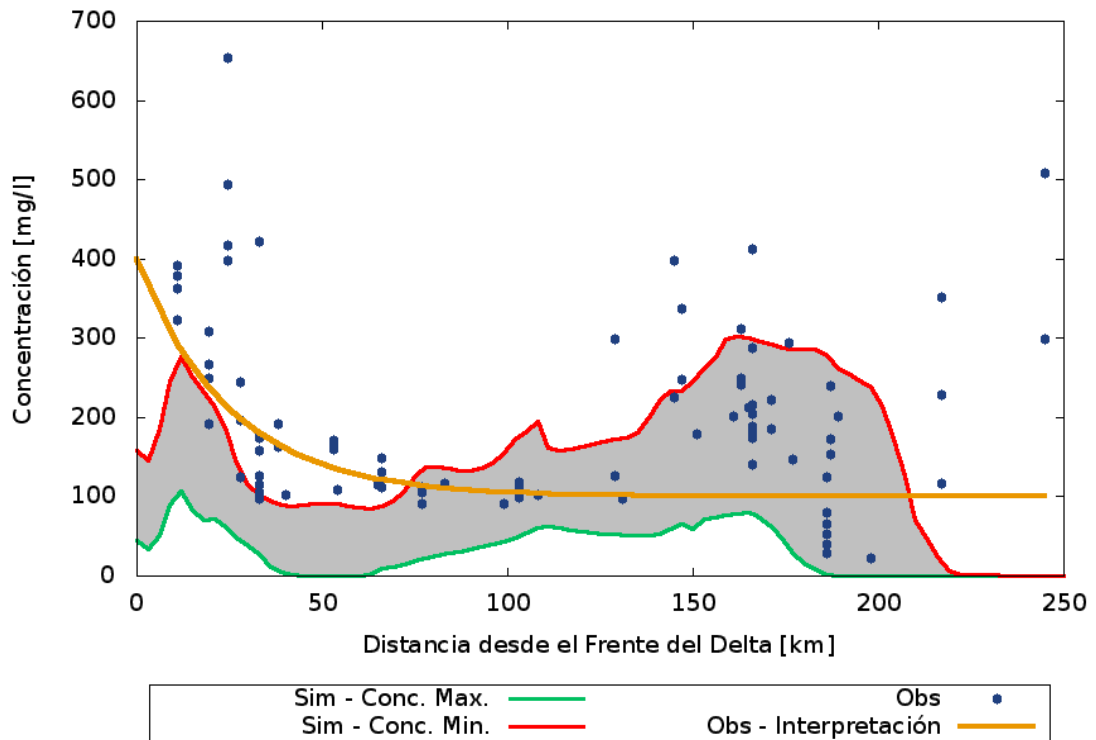


Figura 3.13 Corte longitudinal en el eje del Río de la Plata de la concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_2)

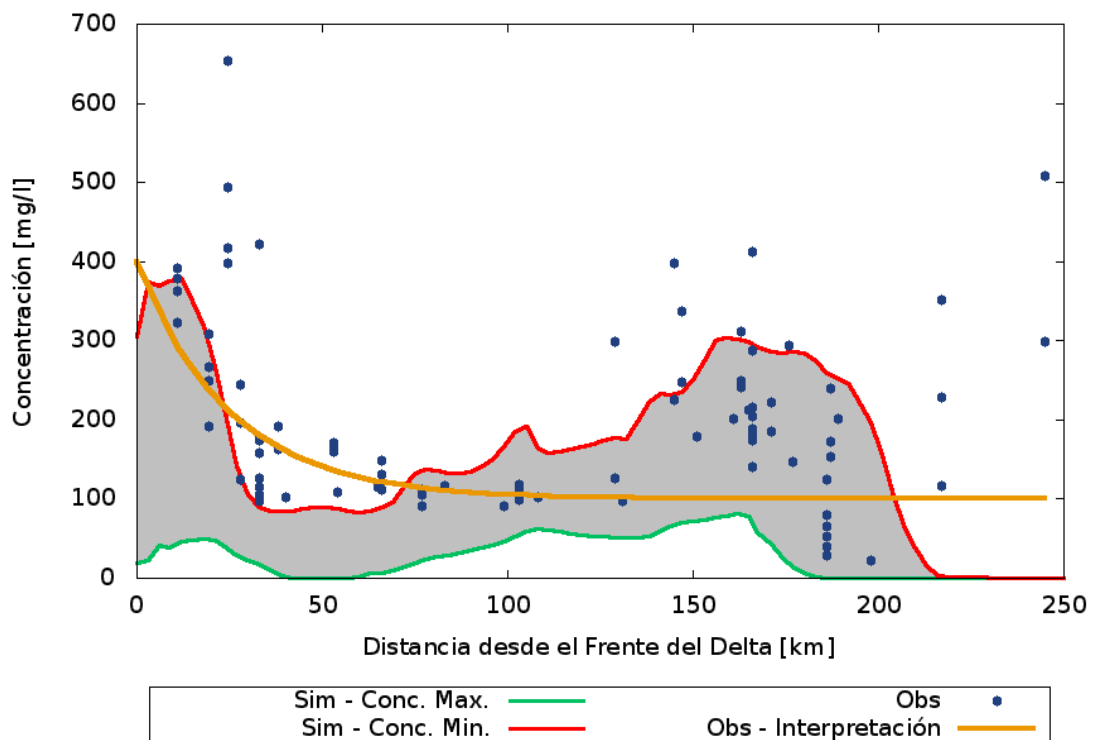


Figura 3.14 Corte longitudinal en el eje del Río de la Plata de la concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_3)

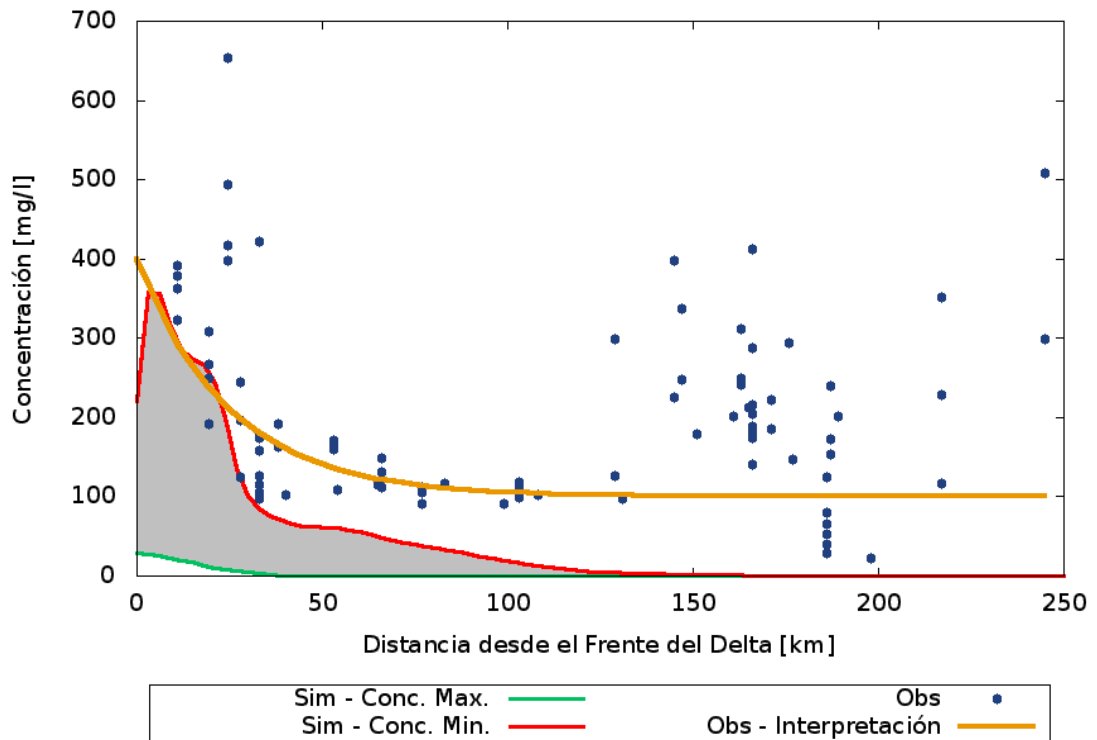


Figura 3.15 Corte longitudinal en el eje del Río de la Plata de la concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_noERO)

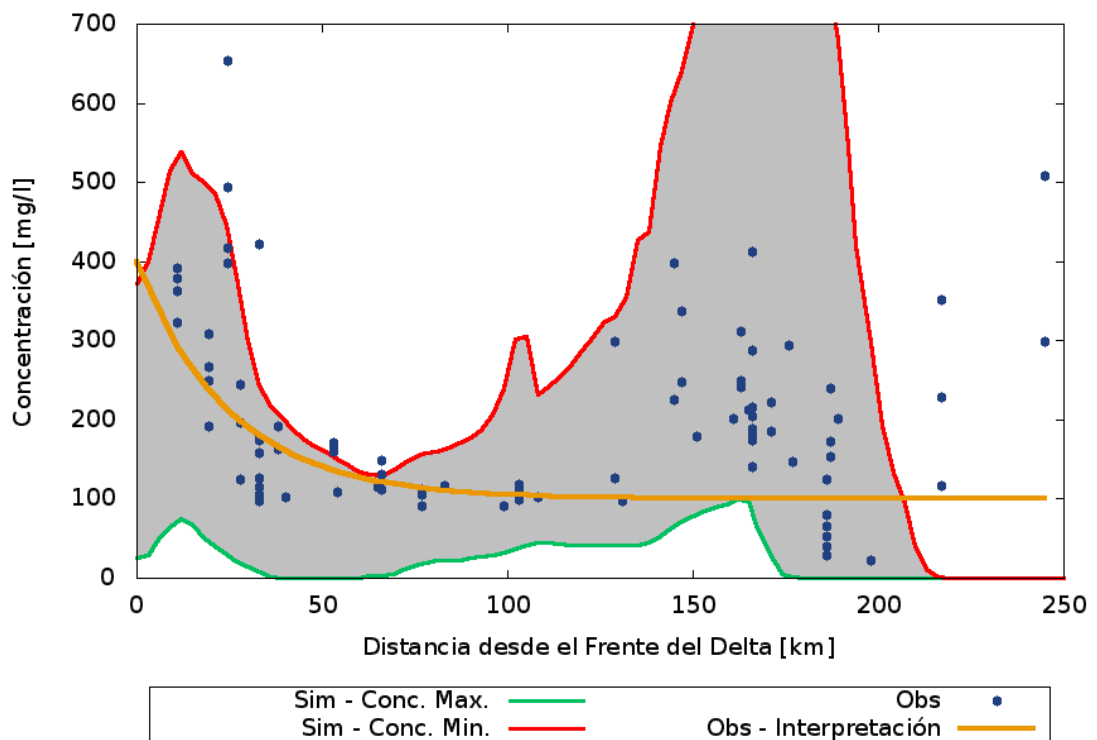


Figura 3.16 Corte longitudinal en el eje del Río de la Plata de la concentración de sedimentos en suspensión (Ensayo LC_WS)

4 CONCLUSIONES

Se distinguen dos patrones de transporte de sedimentos finos en suspensión en el Río de la Plata: la respuesta a las descargas en el Río de la Plata Superior y el provocado por la resuspensión en el Río de la Plata Intermedio y Exterior.

Se observa un buen acuerdo entre las concentraciones simuladas versus las observadas para el escenario básico (ensayo LC_1), aunque aún debe realizarse una elección más justificada de los valores de los parámetros sedimentológicos.

Resta aún migrar hacia la nueva versión de MARS-3D, que permitirá lograr una mejor representación de la inicialización de la capa de fondo de sedimentos e incorporar una nueva variable sedimentaria.

REFERENCIAS

- Brenon, I., 1997, Modelisation de la dynamique des sediments fins dans estuaire de la Seine. These de doctorat, Universite de Bretagne Occidentale
- Cugier, P. y Le Hir, P., 2000, Modelisation 3D des matieres en suspension en Baie de Seine orientale (Manche, France). C. R. Acad. Sci. Paris, 331, 287-294.
- Cugier, P. y Le Hir, P., 2002, Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling, application to the plume of the Seine river (France), Estuar. Coast. Shelf Sci., 55, 673-695.
- Krone, R.B. (1962), Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California.
- Le Hir, P., Bassoullet, P., Jestin, H., 2001, Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macrotidal estuary, Coastal and estuarine fine sediment transport processes, W.H. McAnally and Metha A.J. Eds., Elsevier, Amsterdam, 229-247.
- López Laborde, J. y Nagy, G.J., 1999, Hydrography and sediment transport characteristics of the Río de la Plata: a review. En: Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C. & Pino, M. (Eds.), Estuaries of South America: Their geomorphology and dynamics, Springer, 133 – 160.
- Menéndez, A.N. y Re, M., 2009, Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata: Modelo Conceptual y Forzantes, Informe LHA 03-296-09, Agosto.
- Metha, A.J., McAnally, W.H., 2008, Fine-Grained Sediment Transport, in *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, Garcia, M.H. Ed., Chapter 4, pp. 253-306.
- Parthenaides, E., 1962, A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water, PhD thesis, University of California.
- Re, M., Menéndez, A.N., Amsler, M.L., 2009, Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2009, Salta, Argentina, Noviembre.
- Waeles, B., 2005, Modelisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. These de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie.
- Tessier C., 2006, *Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: L'exemple de la région marine Bretagne Sud*, PhD Thesis, Université de Bordeaux.
<http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2325/>