

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO DE LA
PLATA: PRIMEROS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA**

Fossati M.¹, Moreira D.², Simionato C.², Cayocca F.³, Tessier C.³, Sarubbi A.⁴ y Re M.⁴

(1) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA-Uruguay)

(2) Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA-CONICET-Argentina)

(3) Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER-Francia)

(4) Instituto Nacional del Agua (INA-Argentina)

mfossati@fing.edu.uy, moreira@cima.fcen.uba.ar, claudias@cima.fcen.uba.ar, Florence.Cayocca@ifremer.fr, ctessier2930@gmail.com, alejosarubbi@yahoo.com.ar, mre@fi.uba.ar

RESUMEN:

El modelo hidrodinámico y sedimentológico MARS, desarrollado en IFREMER, se implementó para estudiar la dinámica de los sedimentos finos en el Río de la Plata, en el marco del proyecto “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats” (PNUD/GEF/RLA/99/G31). Se procedió a la generación de grillas anidadas que conduzcan a un modelo de alta resolución para el estuario, así como condiciones de contorno apropiadas. Se generaron tres dominios anidados de resolución progresivamente mayor, con diez niveles verticales sigma, para permitir la libre propagación de la marea astronómica y meteorológica desde la Plataforma Patagónica hasta el estuario. Los dos dominios de mayor resolución se rotaron siguiendo la geometría del Río de la Plata para simplificar la aplicación de las condiciones de borde y mejorar la descripción de la zona de interés minimizando el costo computacional. Se validaron los primeros resultados de las amplitudes y fases de la marea con las observaciones disponibles para la región provenientes de las distintas estaciones mareográficas de Argentina y Uruguay. Los resultados obtenidos muestran una buena representación de las principales características hidrodinámicas de la zona. No obstante, se continúa trabajando en la calibración hidrodinámica y en el ajuste del modelo sedimentológico con la nueva información de campo obtenida en campañas de medición realizadas en el marco del proyecto.

ABSTRACT:

The numerical hydrodynamic and sedimentological model MARS developed by IFREMER was implemented to study the fine sediments dynamic in the Rio de la Plata within the international project: “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats” (PNUD/GEF/RLA/99/G31). A nested modeling strategy was used with a high resolution grid for the estuary zone of the Rio de la Plata with appropriate boundary conditions. Three nested grids was developed with ten sigma vertical layers. The implemented system permit the propagation of the astronomic and meteorological tide from oceanic platform to the inside of the river. The high resolution grids were rotated following Rio de la Plata geometry in order to simplify boundary conditions calculations and improve topography representation minimizing computational cost. The calibration and validation of the hydrodynamic is being developpe with the amplitud and phase tidal comparison between model and data. The obtained results show a correct representation of the main process. The sedimentological calibration will be doing in the next step with the incorporation of new measured data.

PALABRAS CLAVES:

Río de la Plata, modelación hidrodinámica, MARS

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats” (PNUD/GEF/RLA/99/G31) se está desarrollando un proyecto 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 la información necesaria para optimizar la gestión en la zona de estudio.

El grupo de trabajo está conformado por personal del Servicio de Hidrografía Naval – SHN (Argentina), Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera – CIMA (Argentina); Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero - INIDEP (Argentina), Instituto Nacional del Agua - INA (Argentina), el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – SOHMA (Uruguay) y el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Universidad de la República (Uruguay). Además, se cuenta con el apoyo del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar – IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer).

El proyecto comprende dos grandes componentes, la realización de campañas de campo para medir las principales variables vinculadas con la hidrosedimentología del Río de la Plata y el trabajo en el modelo numérico MARS. En la implementación y calibración del modelo están trabajando en forma conjunta y coordinada investigadores de Uruguay (IMFIA) y Argentina (CIMA, INA) especialistas en la dinámica del Río de la Plata y el Frente Marítimo, en conjunto con especialistas del IFREMER donde se ha generado el modelo numérico MARS. Actualmente el proyecto esta en plena etapa de desarrollo y finaliza a fines de 2010.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar los principales avances obtenidos en la implementación del modelo numérico MARS para representar la hidrosedimentología del Río de la Plata.

EL MODELO NUMERICO

MARS (Garnier et al, 2008; Lazure et al, 2008) es un modelo hidrodinámico costero desarrollado por IFREMER (French Research Institute for the Exploitation of the Sea) utilizado para resolver aplicaciones con distintas escalas temporales y espaciales. Es un modelo que utiliza el método en diferencias finitas para discretizar las ecuaciones y define una grilla escalonada tipo Arakawa C en las direcciones horizontal y vertical, con un esquema de resolución espacial centrado de segundo orden.

El modelo MARS resuelve las ecuaciones de movimiento de Navier Stokes considerando las aproximaciones de Bousinesq e hidrostática, junto con las ecuaciones termodinámicas para temperatura y salinidad, para resolver el flujo tridimensional a escalas regionales y locales en diversos cuerpos de agua. En la dirección vertical utiliza la coordenada tipo sigma para representar mejor las variaciones topográficas. Incluye la resolución de trazadores pasivos para estudiar distintos procesos de transporte. Tiene implementados varios modelos para resolver la turbulencia en la dirección vertical, modelos simples como la aproximación de Prandtl o modelos de una ecuación. En la dirección horizontal se utilizan aproximaciones del tipo constante o Smagorinsky.

Para la resolución de las ecuaciones se utiliza un algoritmo “splitting” para el modo rápido (externo) de movimiento y otro algoritmo para el modo lento (interno). La componente barotrópica (externa) del flujo no necesita ser descripta por las ecuaciones tridimensionales y se utiliza entonces

una aproximación integrada en vertical de las ecuaciones. En este modo se resuelven las ondas superficiales de mayor celeridad. El modo interno está representando por las ecuaciones tridimensionales. La solución numérica al aplicar este método debe resolverse en dos etapas. Primero se resuelve el problema bidimensional avanzando con pasos temporales cortos. El problema tridimensional se resuelve con pasos temporales más largos determinando la distribución vertical de velocidad.

El modelo permite trabajar con modelos encajados y puede trabajar con paralización mediante OpenMP. Actualmente se está desarrollando la paralelización MPI. Se utiliza una discretización temporal ADI para resolver el modo barotrópico (ecuaciones 2D con incógnitas la elevación de la superficie libre y las componentes integradas de la velocidad) alternando en la dirección de cálculo. De esta forma la elevación de la superficie libre se calcula cada medio paso de tiempo mientras que las componentes horizontales de la velocidad integradas se calculan alternadamente.

Se utiliza un esquema de segundo orden centrado espacialmente y una grilla escalonada tipo Arakawa C para discretizar el sistema, obteniéndose un sistema tridiagonal que se resuelve utilizando un sistema de factorización LU.

El paradigma de programación empleado en el modelo MARS es el estructurado mediante módulos implementados en Fortran 90. Utiliza una estrategia de repositorio para los códigos fuentes, los cuales no deben ser modificados, permitiendo a los distintos usuarios/modelos modificar copias de las rutinas. Además, emplean la inclusión condicional de archivos para brindar diferentes funcionalidades, simulando así la funcionalidad de módulos interfaz de Fortran 90. Esta implementado para correr en sistema operativo linux y posee dependencia de varias bibliotecas (blas, Lapack, entre otras).

El MARS resuelve el sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento de Navier Stokes en las tres direcciones incluyendo las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática (ecuaciones 1, 2, 3), la ecuación de balance de masa (4), las ecuaciones termodinámicas de conservación de temperatura y salinidad (5 y 6) y la ecuación de estado que vincula la densidad con la temperatura y salinidad del agua.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\partial(nz \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + F_x \quad [1]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\partial(nz \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + F_y \quad [2]$$

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = \rho_0 b \quad \text{con} \quad b = -g(\rho - \rho_0) / \rho_0 \quad [3]$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [4]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \left(uT - k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(vT - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(wT - k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} = \text{fuentes} - \text{salidas} \quad [5]$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \left(uS - k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(vS - k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(wS - k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)}{\partial z} = \text{fuentes} - \text{salidas} \quad [6]$$

Siendo:

x, y, z el sistema de coordenadas,
 u, v, w las componentes del campo de velocidad,
 ζ la elevación de la superficie libre,
 P_a es la presión atmosférica en la superficie,
 f parámetro Coriolis,
 g gravedad,
 ρ densidad del agua,
 p' presión,
 ρ_o densidad de referencia,
 n_z viscosidad turbulenta vertical,
 F_x y F_y fricción,
 T temperatura,
 S salinidad,
 k_z difusividad vertical,
 k_x y k_y coeficientes de difusividad horizontal.

Utilizando la coordenada sigma ($\sigma = [z+H]/[\zeta+H]$) se transforman las ecuaciones gobernantes a un conjunto de ecuaciones en el sistema de coordenadas (x, y, σ) . En la superficie libre se incluyen el efecto de la tensión del viento y el intercambio de calor con la atmósfera. En el fondo se incluye la fricción de corte generada por el fondo.

METODOLOGÍA

Los principales forzantes que dominan el flujo en el Río de la Plata y el Frente Marítimo, y que en consecuencia tienen una gran incidencia sobre la dinámica de sedimentos finos, son el ingreso de caudal fluvial continental por los principales afluentes los ríos Uruguay y Paraná, y el ingreso de las ondas de marea astronómica y meteorológica desde el Océano Atlántico. Además, la fuerza de Coriolis, y la circulación gravitacional generada por la mezcla de las aguas dulces y saladas en la zona estuarina, y el campo de vientos que actúa sobre la superficie del Río de la Plata y del Frente Marítimo incidiendo en los procesos de transporte y mezcla, que agregan una complejidad al campo de flujo deben considerarse.

Todos estos procesos determinan la dinámica de flujo en la zona de estudio pero en función del objetivo planteado en cada caso pueden incluirse o no en un trabajo de modelación. En este caso el objetivo es representar la dinámica de sedimentos finos que ocurre en el Río de la Plata y en el frente de turbiedad, buscando identificar distintas estructuras o comportamientos, apoyándose en la modelación numérica así como también en campañas de medición y herramientas indirectas como la teledetección.

El campo hidrodinámico y el campo de salinidad tienen una incidencia directa sobre la dinámica de sedimentos. El campo de corrientes, su estructura vertical y la turbulencia influyen sobre la interacción del fondo y la columna de agua (dinámica de deposición- erosión), mientras que la salinidad y la estratificación por densidad consecuente influyen sobre la floculación de partículas y sobre la velocidad de caída de las partículas en suspensión. Debido a esto se deben representar

correctamente estos procesos en el modelo hidrodinámico implementado. Esto implica por lo menos considerar todos los forzantes externos que determinan el movimiento del sistema y representar correctamente la topografía de fondo. Además, la discretización utilizada debe representar con suficiente resolución las distintas escalas de movimiento y la herramienta numérica utilizada resolver correctamente el sistema de ecuaciones que gobierna el movimiento.

Implementación

En la implementación realizada se propone un sistema de modelos anidados de resolución progresivamente mayor que representan las zonas del sistema de estudio, y por lo tanto distintas dinámicas. Hasta el momento se han definido dos niveles, previéndose la implementación de un tercer nivel específico para el estudio de la dinámica de sedimentos finos. Los dos dominios de mayor resolución se rotan siguiendo la geometría del Río de la Plata para simplificar la aplicación de las condiciones de borde y mejorar la descripción de la zona de interés minimizando el costo computacional.

El primer nivel, denominado rank0 (Figura 1), es un modelo a escala oceánica que simula la propagación de las ondas astronómicas por la región Sur del Océano Atlántico. Este es un modelo bidimensional y los principales forzantes considerados son la marea astronómica que ingresa por las fronteras abiertas, la fuerza de Coriolis y la interacción con la atmósfera a través principalmente del efecto del campo de vientos y presiones sobre la superficie libre. La salinidad y la temperatura del agua se consideran constantes en el tiempo y uniformes en el espacio. La grilla definida para representar el dominio de cálculo es regular de 0.10° en latitud y 0.15° en longitud, lo que aproximadamente forma una grilla de 10 km por 12 km de resolución, respectivamente. Esta resolución es suficiente para representar los procesos de propagación de las ondas en el Atlántico Sur y la interacción y transformación de las mismas en la zona costera argentina. Se define un intervalo temporal variable entre 100 y 600 seg que el modelo determina en función de la estabilidad del sistema.

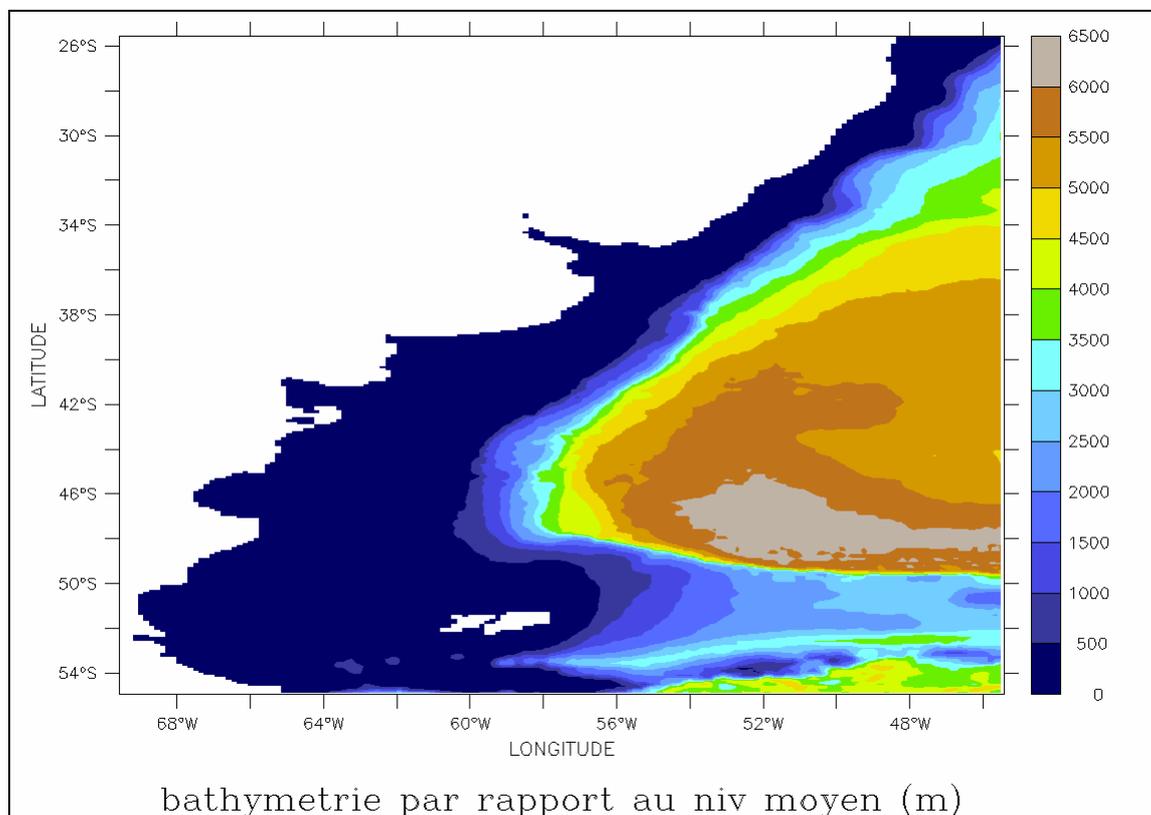


Figura 1.- Dominio de cálculo definido en el Rank0 y batimetría (m).

Los principales forzantes que actúan sobre el dominio representado en el rank0 se introducen a través de las condiciones de borde. En la frontera abierta del dominio, en el borde oceánico, se imponen las características de la marea astronómica del área obtenidas a partir de un atlas global de marea denominado FES 2004. En este trabajo se incluyen las 14 componentes principales de marea disponibles: M2, K1, K2, 2N2, M4, MF, MM, MSQM, MTM, N2, O1, P1, Q1, S2. Por otro lado se impone en la superficie la acción del campo de vientos y el campo de presiones obtenido del NCEP (National Center for Environmental Prediction) cada 6 horas, es decir, cuatro valores diarios, con una resolución espacial de 2,5°.

La salinidad y la temperatura del agua se consideran constantes en el tiempo y uniformes en el espacio. Se definieron valores de temperatura del agua igual a 15°C y salinidad de 33 psu.

El segundo nivel definido hasta el momento, denominado rank1 es un modelo que simula el flujo tridimensional y la dinámica de sedimentos en todo el Río de la Plata y en el Frente Marítimo. El dominio representado por el rank1 incluye el aporte de los ríos Uruguay y Paraná (en sus dos brazos Paraná Guazú y Paraná Las Palmas), el Río de la Plata en su totalidad y la zona del Frente Marítimo hasta los 200 m de profundidad de la plataforma continental. El área comprendida se presenta en la Figura 2. Los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa. De esta forma la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la línea Punta Rasa – Punta del Este y la frontera Sur se posiciona de tal manera que la principal componente de marea M2 ingresa al dominio de cálculo prácticamente con su frente de onda paralelo a la frontera. Esta condición de ingreso de la onda es favorable para la modelación según estudios anteriores realizados en el IMFIA (Fossati 2006; Piedra-Cueva et al 2006).

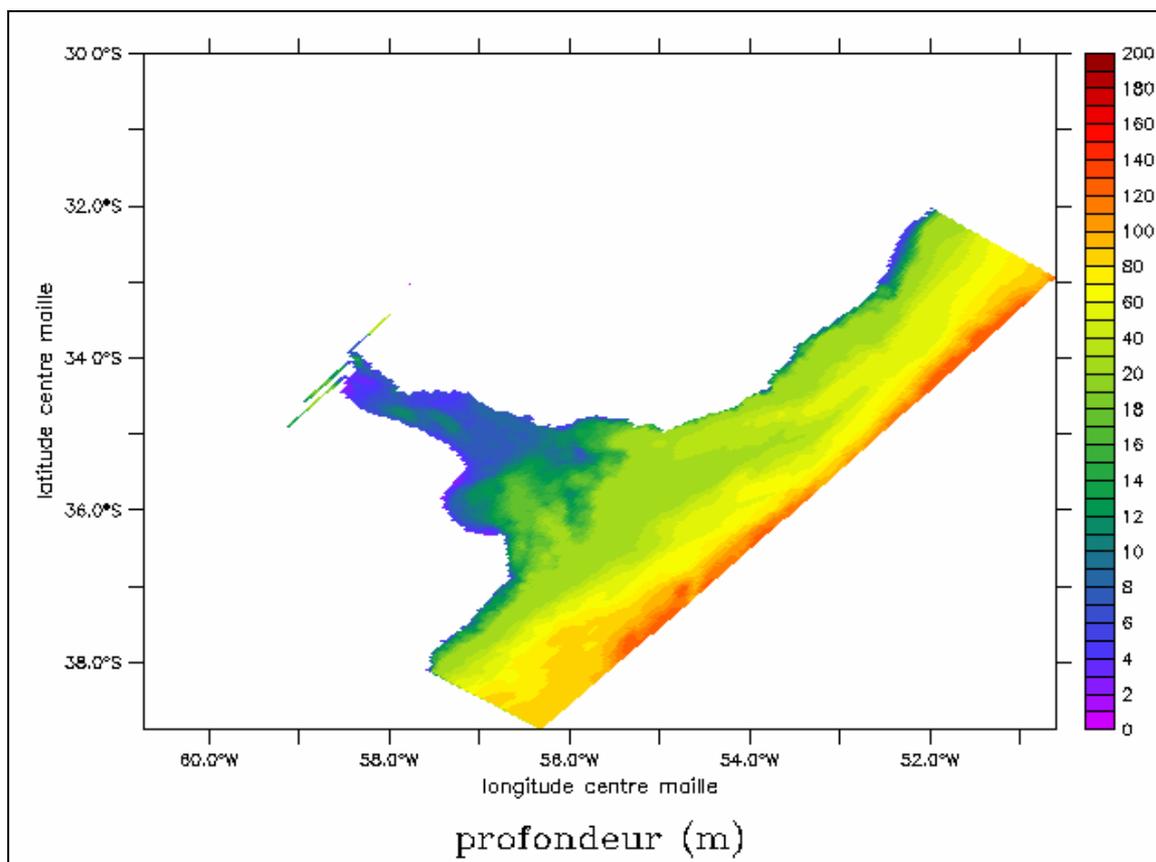


Figura 2.- Dominio de cálculo definido en el Rank1 y batimetría (m).

Los forzantes considerados son las ondas astronómicas y meteorológicas provenientes del Atlántico Sur (calculadas en el rank0), los caudales fluviales continentales de los Ríos Paraná y Uruguay, y el campo de vientos que actúa sobre la superficie libre. La grilla definida para representar el dominio

de cálculo es regular de 0.027° en latitud y longitud, lo que aproximadamente forma una grilla de 3.000 m de resolución. Con este detalle se representan las principales variaciones topográficas de la zona del Río de la Plata que determinan el movimiento a gran escala.

Para representar correctamente los procesos estuarinos que ocurren en la zona de interés se utiliza un modelo tridimensional con 10 capas en la dirección vertical. Las capas no están equiespaciadas siendo la posición de las 10 capas verticales sigmas: 0.05, 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.75, 0.85, 0.90, 0.95 y 0.97. Se definió un intervalo temporal variable entre 50 y 300 seg que el modelo determina en función de la estabilidad del sistema.

Las variables calculadas en la modelación son la elevación de la superficie libre, las componentes horizontales de la velocidad en cada capa vertical y las propiedades del agua, salinidad y temperatura. Además, por la forma de resolución del sistema de ecuaciones el modelo calcula las componentes horizontales de la velocidad barotrópica.

En el rank1 se incluye el ingreso del caudal fluvial de los tres afluentes principales del Río de la Plata considerados, es decir, el Río Uruguay, el Río Paraná Guazú y el Río Paraná Las Palmas. La dinámica fluvial se representa ingresando secciones equivalentes calculadas a partir de la información topográfica de diversas secciones de los tributarios. Las secciones transversales de los ríos ingresadas al modelo han sido suministradas por la Dirección de vías navegables de Argentina y se realizó un trabajo de georeferenciación por parte del INA utilizando un SIG (Figura 3).

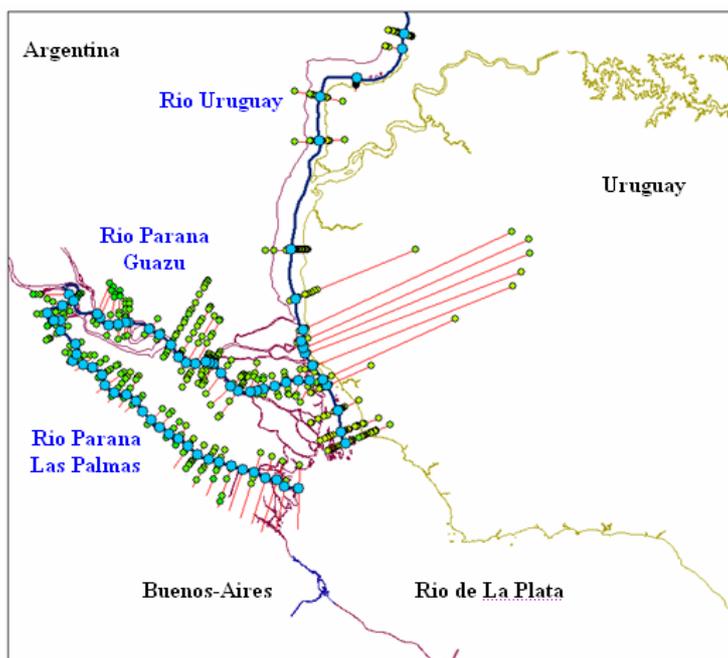


Figura 3.- Posición y extensión de las secciones transversales de los ríos Uruguay y Paraná.

Calibración Hidrodinámica

Hasta el momento se ha ajustado el modelo hidrodinámico para representar las amplitudes y fases de las principales componentes de marea del Atlántico Sur. El forzante astronómico se ingresa al modelo por la frontera oceánica a partir de los valores extraídos del modelo FES 2004. El ajuste se realizó comparando los resultados del modelo con las observaciones disponibles para la región provenientes de las distintas estaciones mareográficas de Argentina y Uruguay.

En el sistema de modelos se ha incluido el forzante meteorológico utilizando los vientos provenientes de los reanálisis del NCEP/NCAR. Además, se incluye la descarga de los tributarios más importantes (Uruguay, Paraná de las Palmas y Paraná Guazú-Bravo). Se realizaron simulaciones para el año 2003, en los que se dispone de la mayor cantidad de observaciones directas en la región para su validación. Los resultados obtenidos en ambos dominios muestran una buena representación de las principales características hidrodinámicas de la zona.

Dinámica de Sedimentos

Para representar la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata se debe incluir en el modelo la modelación de la dinámica de sedimentos en la columna de agua y su interacción con el fondo. Los principales procesos representados son: los aportes a través de los ríos, la resuspensión de sedimentos de fondo por la tensión de corte generada por las corrientes; el proceso de deposición sobre el fondo; el transporte del material en suspensión por las corrientes astronómicas y meteorológicas; la variación de la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión en función de la concentración; la mezcla en la columna de agua por turbulencia y gradientes de densidad.

Se han definido dos variables de diferentes características según la velocidad de caída para representar el sedimento en la zona de estudio, arenas finas y arcilla. Para inicializar el fondo se considera en cada celda un porcentaje de cada una de las componentes, determinado a partir de mediciones de campo de la composición del fondo en el Río de la Plata interior y medio (Re et al, 2009). El aporte de caudal sólido por los principales tributarios (ríos Paraná y Uruguay) se define en función de mediciones. Estos datos muestran que el principal aporte sólido que ingresa al Río de la Plata por el Paraná Guazú-Bravo, seguido del aporte del Paraná de las Palmas, siendo el aporte del río Uruguay sustancialmente menor.

Para la etapa de calibración del modelo sedimentológico se utilizarán los datos obtenidos en las campañas de medición planificadas en el proyecto, que incluyen análisis granulométrico de muestras de fondo, series temporales de concentración de sedimento en tres puntos del Río de la Plata interior y mediciones puntuales de perfiles de concentración de sedimento en suspensión en más de 20 estaciones distribuidas en la zona de interés. Además, serán utilizadas imágenes satelitales MODIS que serán calibradas para la zona de interés.

RESULTADOS

Modelación hidrodinámica – Rank0

La representación de la rugosidad de fondo es en el caso del rank0 la principal variable de ajuste. El objetivo fue representar correctamente la propagación de las ondas astronómicas en todo el dominio de cálculo a partir del ingreso de las mismas por la frontera oceánica obtenidas por el modelo FES 2004.

En su versión bidimensional el MARS utiliza la formulación de Strickler para determinar la rugosidad fondo. Específicamente entonces en este caso el parámetro que se ajustó fue el coeficiente de strickler. Además, luego de fijar este valor, se modificó y ajustó el coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal.

El objetivo de la simulación del rank0 es generar las condiciones de flujo en los bordes del rank1 para incluir en el dominio de interés (Río de la Plata) el efecto del movimiento de las aguas en la

plataforma. Esto incluye dos componentes diferentes, el efecto astronómico y el efecto meteorológico.

La propagación de las ondas largas de marea en el Atlántico Sur y su ingreso al Río de la Plata fue representado en el rank0 introduciendo las principales ondas de marea por el borde oceánico del dominio. Específicamente en la zona de interés, las componentes astronómicas más importantes (de mayor energía) ingresan por la zona Sur provenientes de la plataforma continental argentina. Se definieron dos puntos de control ubicados sobre la zona externa del Río de la Plata (Mar del Plata y La Paloma) para controlar la representación de las ondas astronómicas del rank0. Los valores obtenidos con el modelo (un año) fueron comparados con las componentes armónicas teóricas obtenidas del análisis armónico de series anuales de niveles registrados en ambas estaciones con frecuencia horaria. La propagación de las ondas en el interior del Río de la Plata se controla en el rank1.

En las Figuras 4 y 5 se presentan los resultados del modelo astronómico obtenidos en Mar del Plata. En la primera figura se presenta el nivel calculado por el modelo obtenido como la superposición de las componentes principales de marea representadas con el modelo (componentes del modelo FES2004) comparado con el nivel astronómico medido calculado como la superposición de las mismas componentes armónicas en el lugar. En la Figura 5 se presenta la comparación de los armónicos principales calculados por el modelo con los obtenidos a partir de las mediciones de niveles en Mar del Plata.

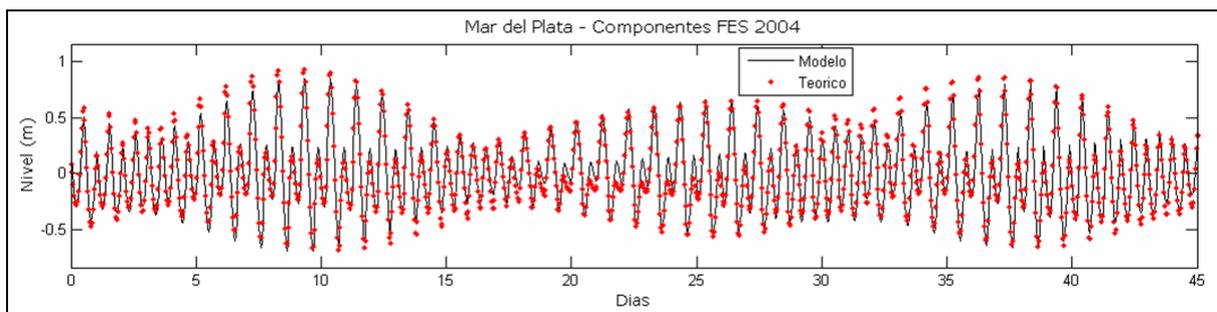


Figura 4.- Comparación serie astronómica de niveles medida y obtenida con el modelo rank0 del MARS en Mar del Plata.

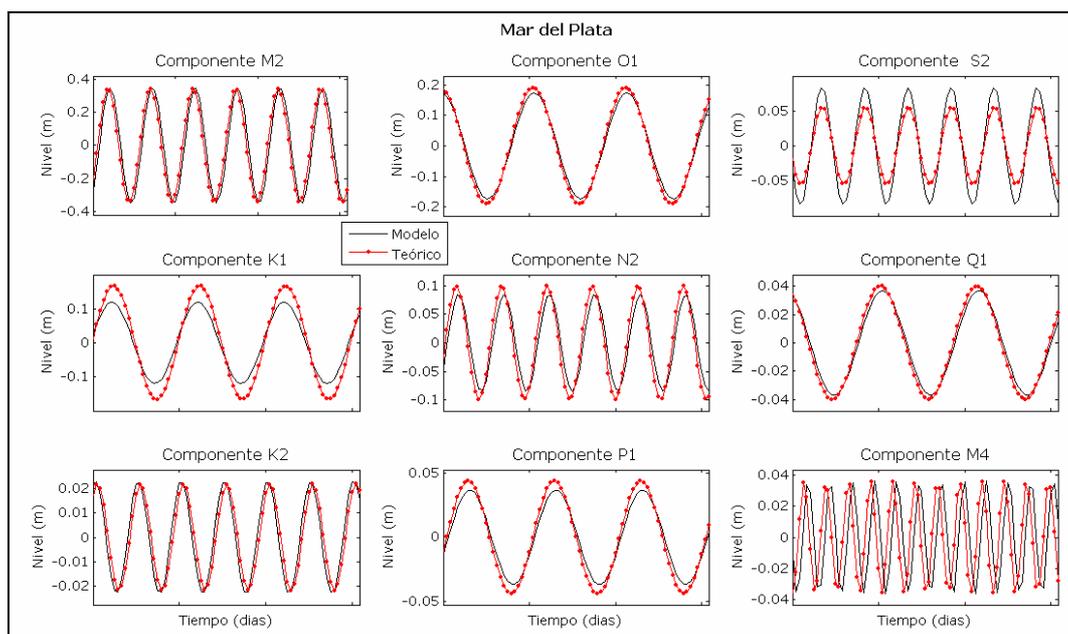


Figura 5.- Comparación serie astronómica de niveles medidos y obtenidos con el modelo rank0 del MARS en Mar del Plata.

Los resultados muestran que básicamente el modelo representa correctamente las características astronómicas de la elevación de la superficie libre en la zona de Mar del Plata. En el detalle por componente se observa que la mayoría de las componentes se representan correctamente, tanto en fase como en amplitud, como ser la M2, la O1, la N2, la Q1 y la K2. La componente S2 es la más sobreestimada y la componente K1 subestimada. El mayor desfase se observa en la componente de alta frecuencia M4 generada en el dominio de cálculo por la combinación de las ondas astronómicas largas.

En la Tabla 1 se muestran las amplitudes y fases de las componentes armónicas de marea obtenidas de las medidas y con el modelo en Mar del Plata. También se muestran el error medio cuadrático (rmse) correspondiente a la comparación de ambas series y la relación (%) de ese error según la amplitud teórica de cada componente en Mar del Plata. Debido a diferencias en la fase en algunas componentes el error es significativo aunque la amplitud se represente correctamente (por ejemplo para M4), mientras que en otros casos el error es más importante por diferencias en la amplitud (K1 y S2 por ejemplo). El rmse obtenido al comparar la superposición de las componentes armónicas principales es 0.095 m, y el porcentaje relativo obtenido al considerar la máxima amplitud (0.85 m) es 11%.

Tabla 1.- Amplitudes y fases de las componentes armónicas principales (teóricas y calculadas por el modelo) y errores asociados en Mar del Plata.

Componente	Frecuencia	Amplitud Medida (m)	Fase Medida (°)	Amplitud Modelo (m)	Fase Modelo (°)	Rmse (m)	rmse/ampl (%)
M2	0.0805114	0.3466	212.7	0.3533	228.0	0.066	19.0
K1	0.0417807	0.1615	124.1	0.1163	116.2	0.036	22.1
S2	0.0833333	0.0553	281.8	0.0836	276.5	0.021	37.1
O1	0.0387307	0.1812	33.7	0.1647	37.4	0.015	8.2
M4	0.1610228	0.036	358.5	0.0365	63.9	0.027	75.8
N2	0.0789992	0.1004	174.5	0.0860	190.6	0.021	20.8
Q1	0.0372185	0.0388	357.1	0.0358	3.3	0.004	9.5
P1	0.0415526	0.0442	105.5	0.0372	112.2	0.006	13.6
K2	0.0835615	0.0206	293.7	0.0218	274.5	0.005	26.2

Como se mencionó anteriormente, las ondas astronómicas ingresan principalmente por la costa argentina del Río de la Plata. La oscilación astronómica en La Paloma es mucho más chica que la oscilación en Mar del Plata. No obstante se controló cómo representa el modelo la componente astronómica en la zona norte (La Paloma). Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5 y en la Tabla 2. La elevación de la superficie libre generada por las componentes astronómicas principales en el lugar no supera los 0.3 m. El nivel del mar obtenido de la superposición de componentes armónicas principales representadas en el modelo sobrepasa los niveles astronómicos calculados a través de los armónicos obtenidos con las medidas.

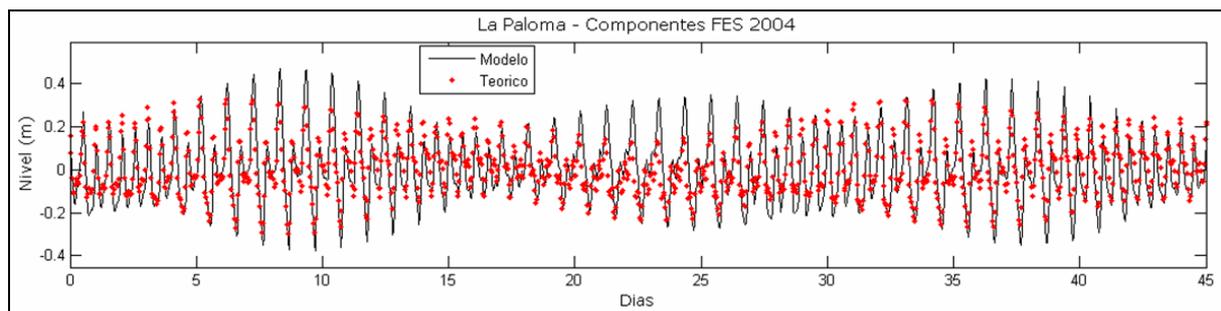


Figura 6.- Comparación serie astronómica de niveles medida y obtenida con el modelo rank0 del MARS en La Paloma.

Tabla 2.- Amplitudes y fases de las componentes armónicas principales (teóricas y calculadas por el modelo) y errores asociados en La Paloma.

Componente	Frecuencia	Amplitud Medida (m)	Fase Medida (°)	Amplitud Modelo (m)	Fase Modelo (°)	Rmse (m)	rmse/ampl (%)
M2	0.0805114	0.1168	213.13	0.1488	236.9	0.044	37.8
K1	0.0417807	0.05	68.56	0.0823	109.8	0.041	81.0
S2	0.0833333	0.0209	328.43	0.0393	308.2	0.015	70.8
O1	0.0387307	0.0458	33.67	0.0901	40.9	0.034	73.6
M4	0.1610228	0.0721	22.22	0.0591	90.5	0.052	72.0
N2	0.0789992	0.059	183.86	0.0535	204.3	0.015	24.6
Q1	0.0372185	0.0147	40.83	0.0205	27.6	0.005	34.7
P1	0.0415526	0.011	83.12	0.0286	110.6	0.014	125.5
K2	0.0835615	0.0104	336.24	0.0103	306.9	0.004	37.5

El detalle de las características de cada armónico (medidos y modelados en La Paloma) se presenta en la Tabla 2. Salvo las componentes M4, N2 y K2 el modelo sobrestima la amplitud del resto de las ondas principales. Se observan también un leve desfase en varias componentes. En consecuencia los errores medios cuadráticos obtenidos son más importantes proporcionalmente a cada componente que los obtenidos en Mar del Plata. El rmse correspondiente a la serie global de las componentes ingresadas a partir del modelo FES2004 es igual a 0.09 m. La amplitud máxima de la envolvente teórica es 0.33 m por lo que la relación del error respecto a la amplitud de la onda resultantes es 27%.

Una vez ajustada la propagación de las ondas astronómicas se agregó en la modelación el efecto atmosférico sobre el Atlántico Sur. Específicamente en este trabajo se agregó el efecto del campo de vientos y del campo de presiones sobre la superficie libre del océano. No se simulan en este caso los intercambios de calor entre el agua y la atmósfera.

Las características de los dos campos atmosféricos utilizados en la zona de interés se obtienen de la base de datos proveniente de los Reanálisis de NCEP/NCAR frecuentemente utilizada para estudios de diagnóstico de eventos pasados. El dominio definido se extiende entre los 70°W y 42°W de longitud, y entre los 65°S y 20°S de latitud, y la información contenida tiene una resolución espacial de 2.5° tanto en latitud como en longitud. La resolución temporal de los datos atmosféricos es 4 valores por día, es decir, cada 6 horas. El archivo de datos utilizado incluye los campos de temperatura del aire (°K), humedad relativa (%), las componente del viento (m/s) y la presión a nivel del mar (pascales). En esta simulación el flujo de calor entre el mar y la atmósfera se mantiene constante igual a cero, por lo que no se está simulando la influencia térmica de la atmósfera sobre el océano. En consecuencia, y según se mencionó anteriormente, la temperatura y salinidad del agua en el rank0 permanecen constantes.

El objetivo de incluir el efecto atmosférico además del astronómico en el dominio del Atlántico Sur es representar las oscilaciones reales de la superficie libre en la zona exterior del Río de la Plata. Para evaluar la calidad del modelo se controla nuevamente el nivel modelado en las estaciones de control de Mar del Plata y La Paloma, comparando los resultados del modelo con medidas reales. Dos períodos de tiempo fueron utilizados para analizar el ajuste del modelo. Por un lado el comprendido entre el 1° de enero y el 18 de marzo del 2003, y el segundo desde diciembre 2003 a noviembre 2004 inclusive.

En la Figura 7 se muestra la comparación de niveles medidos y obtenidos con el rank0 del modelo en Mar del Plata para el período de ajuste del año 2003. El ajuste obtenido es muy bueno, se observa que el modelo en general reproduce correctamente las fluctuaciones reales de la superficie

libre. Los resultados obtenidos en La Paloma para este período muestran también un buen ajuste, ya que las fluctuaciones de los niveles son en general representados por el modelo, ya sea períodos de niveles altos o períodos de niveles bajos. Sin embargo en algunos períodos hay diferencias importantes entre ambas series, pero principalmente generadas por diferencias en el nivel medio.

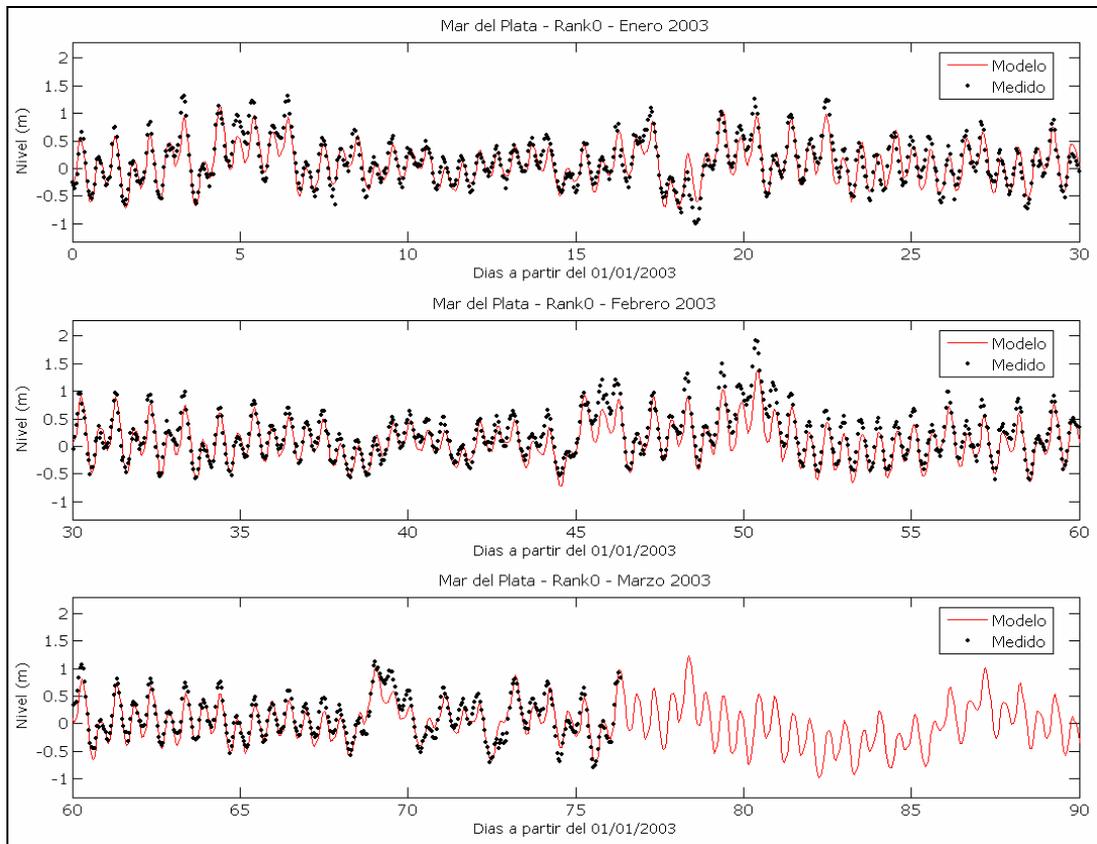


Figura 7.- Comparación de la serie de niveles medido y obtenido con el modelo en Mar del Plata durante los primeros meses del año 2003.

En la Tabla 3 se presentan algunos parámetros estadísticos calculados para las series de niveles medidos y calculados por el modelo en Mar del Plata y La Paloma para el período considerado. Se observa que hay una diferencia en ambas estaciones de nivel medio entre los datos y el modelo (casi 8 cm en Mar del Plata y 12 cm en La Paloma), siendo el nivel medio del modelo mayor. El error medio cuadrático obtenido utilizando estas series es de 0.19 m para Mar del Plata y 0.23 m para La Paloma. El error en relación a la amplitud de variación de la elevación de superficie libre es mayor en La Paloma. No obstante, se calculó también el error medio cuadrático a partir de las series ajustadas para tener nivel medio cero (RMS_2), obteniéndose 0.17 m en Mar del Plata y 0.20 m en La Paloma. Por último, se calcularon las desviaciones estándar de las series medidas y modeladas con el objetivo de comparar la magnitud de las oscilaciones. Los resultados muestran que en ambas estaciones el modelo reproduce mayores amplitudes en las oscilaciones aunque las diferencias en la desviación son pequeños respecto a las desviaciones.

El buen nivel del ajuste obtenido para el período 2003 se mantiene en el ajuste del nivel real durante el período del 2004 (enero a noviembre exceptuando setiembre por falta de datos). El error medio cuadrático del modelo para todo el período en Mar del Plata es de 0.18 m. En La Paloma el período comparado y también el error obtenido (0.18 m) son menores. En la Figura 8 se muestra a modo de ejemplo la comparación de los niveles reales medidos y obtenidos con el modelo en La Paloma.

Tabla 3.- Amplitudes y fases de las componentes armónicas principales (teóricas y calculadas por el modelo) y errores asociados en La Paloma.

	Mar del Plata	La Paloma
Nivel Medio		
Datos	0.0776	0.0520
Modelo	0.1546	0.1745
Desviación Estándar		
Datos	0.3594	0.2221
Modelo	0.4201	0.2871
RMS	0.1887	0.2342
RMS_2	0.1722	0.1996

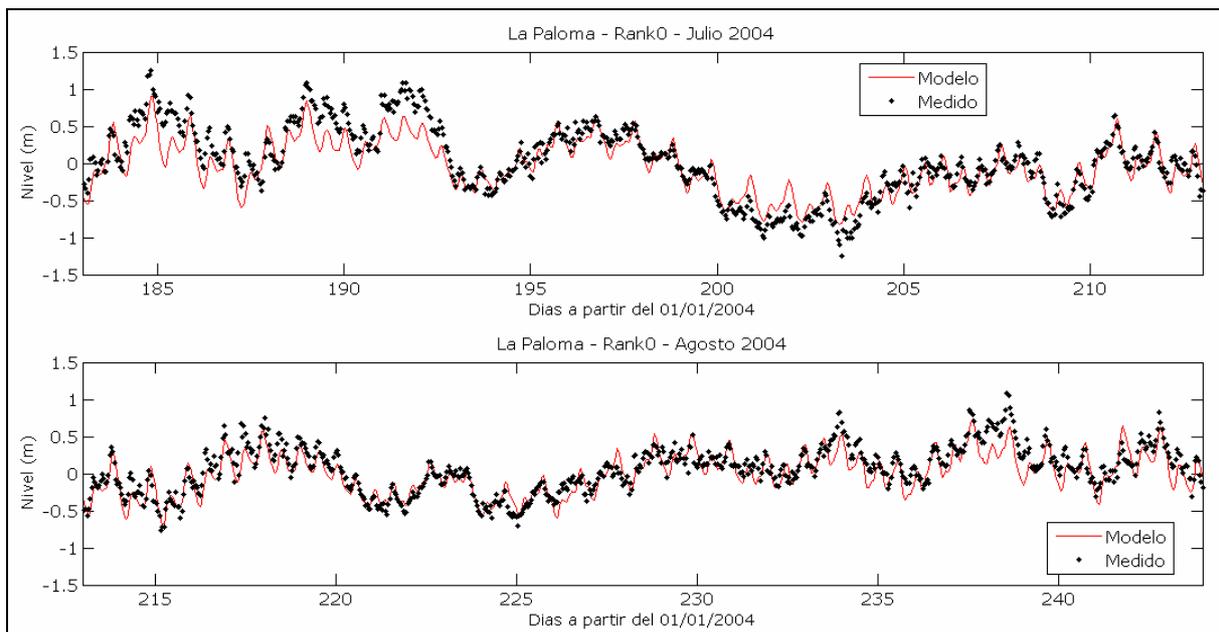


Figura 8.- Niveles medidos y obtenidos con el modelo en La Paloma para el período julio a setiembre 2004.

Modelación hidrodinámica – Rank1

Actualmente se está llevando a cabo la calibración del modelo hidrodinámico tridimensional rank1. Las variables de ajuste en esta caso son la rugosidad de fondo, los parámetros de turbulencia y la tensión de corte del viento. Para la calibración se realizan comparaciones de los niveles medidos y obtenidos con el modelo, y por otro lado de perfiles de corriente medidos y obtenidos con el modelo. Aunque el proceso está en desarrollo los resultados preliminares indican que en general la implementación realizada representa correctamente los principales procesos dinámicos del Río de la Plata. En la Figura 9 se presenta la comparación de los niveles medidos y obtenidos con el modelo en varias estaciones mareográficas del Río de la Plata: Mar del Plata, La Paloma, Montevideo, Torre Oyarvide, Colonia y Buenos Aires. Se observa que el modelo representa las principales oscilaciones en general en todo el dominio de cálculo pero con algunas diferencias en las amplitudes de la oscilación, principalmente en la zona interior del Río de la Plata, en Colonia y en Buenos Aires.

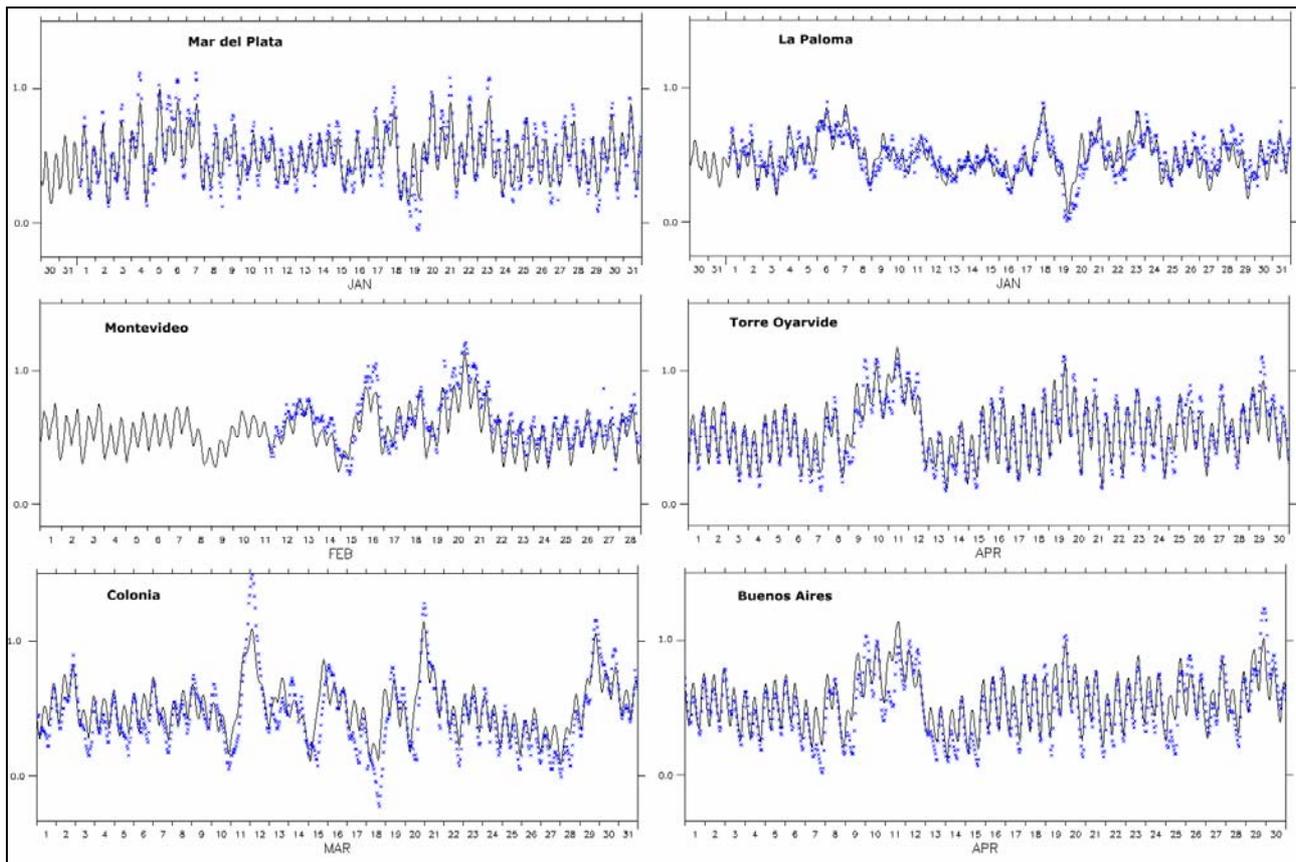


Figura 9.- Niveles medidos y obtenidos con el modelo en varias estaciones del Río de la Plata durante diversos períodos del año 2002 simulado con el MARS. Sobreelevaciones en m.

DISCUSION

Actualmente se está comenzando a trabajar en la calibración del modelo sedimentológico por lo que no se presentan resultados del mismo en este artículo. No obstante, es importante mencionar que resultados preliminares indican que es posible obtener una buena representación de la dinámica de sedimentos de gran escala considerando las dos variables mencionadas anteriormente, arena fina y arcillas. Estos resultados incluso podrían mejorarse con la inclusión de una componente que represente los limos, ya que según los primeros resultados de las campañas de medición la fracción limo de los sedimentos en suspensión que se encuentran en el río también sería relevante.

En el ajuste del modelo sedimentológico se considerarán especialmente los nuevos resultados de campo que se están midiendo, en relación a turbidez, composición granulométrica del sedimento de fondo y de suspensión, entre otros (Moreira et al 2010). Además, es importante mencionar que será incorporado al sistema de modelación el campo de corrientes y de tensiones generadas por el oleaje, que genera una componente importante de resuspensión de sedimentos que debe considerarse en la modelación para lograr representar las condiciones reales.

CONCLUSIONES

Actualmente se está trabajando a nivel binacional en el desarrollo de un modelo hidrosedimentológico del Río de la Plata que tenga utilidad para la gestión ambiental de dicho cuerpo de agua compartido entre Argentina y Uruguay. Los resultados obtenidos muestran una buena representación de la hidrodinámica general del sistema. El enorme esfuerzo realizado en obtener nueva información de campo de variables sedimentológicas permitirá avanzar en la modelación de la dinámica de sedimentos implementada en el modelo MARS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fossati, M. y Piedra-Cueva, I. (2006). “Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata”. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela.

Mars_Agrif2_V6.22. (2008). “MARS Manual”. Valerie Garnier, Caroline Tessier.

Menéndez A., Re M., Sarubbi A. & García P. (2009). A conceptual model for sediment transport in the Inner Plata River. Proceedings of the *6th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics* (RCEM 2009). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Moreira, D., De los Campos, T., Capeluto Ware, A., Guerrero, R., Repecaud, M., Le Bihan, C., Balestrini, C., Firpo, A. y Fossati, M. (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: campañas oceanográficas. Resumen aceptado para publicación en el *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay.

Pascal Lazure, Franck Dumas (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31 (2008) 233–250.

Piedra-Cueva, I; Terra, R.; Cazes, G.; Fossati, M.; Fernández, M.; Santoro, P. (2008). Modelo Pre-operacional del Río de la Plata Río Uruguay . Informe final del proyecto PDT S/C/OP/70/01.