

DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO ACOPLADO HIDRODINÁMICO-SEDIMENTOLÓGICO BASADO EN OPENFOAM

Nicolás D. Badano^{a,b}, Martín Sabarots Gerbec^{a,b}, Mariano Re^{a,b} y Ángel N. Menéndez^{a,b}

^a Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, <http://www.ina.gob.ar>

^b Laboratorio de Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, <http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/>

nicolas.d.badano@gmail.com

Palabras Clave: *OpenFOAM*, modelo hidrodinámico-sedimentológico, Frente del Delta del Paraná.

Resumen. El sistema de modelación para problemas de mecánica de fluidos mediante volúmenes finitos que propone el paquete de software abierto *OpenFOAM* permite el desarrollo rápido de modelos adaptados a las particularidades de los problemas a resolver. *OpenFOAM* cuenta con un *solver* que resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas, asumiendo flujo invíscido. Se presenta en este trabajo una adaptación de este *solver* a la resolución de un problema particular de transporte de sedimentos finos en aguas estuarinas. Para este caso, se incorporaron términos de tensión de corte turbulenta y de fondo en las ecuaciones de cantidad de movimiento. También se implementó la ecuación de advección-difusión de sedimentos en suspensión, junto con los procesos de deposición y resuspensión. Este desarrollo representa la evolución batimétrica debida a la dinámica sedimentológica de manera acoplada, e incorpora una estrategia aproximada para lidiar con el problema de mojado-secado en el dominio. La aplicación del código se realiza para el estudio del avance del Frente del Delta del río Paraná en el Río de la Plata, comparando los resultados con el avance registrado en los últimos años.

1 INTRODUCCION

El Frente del Delta del Paraná ha venido avanzando continuamente. El ritmo de avance actual, determinado a partir de la comparación de cartografías a lo largo de un siglo, indica valores medios del orden de varias decenas de metros por año.

La modelación matemática de estos fenómenos, debidamente validada mediante la simulación de períodos históricos recientes, para los cuales existen imágenes satelitales y datos cartográficos que documentan el avance con considerable certidumbre, resulta una herramienta apropiada para predecir el avance futuro del frente. Para la misma se necesita un modelo hidrodinámico y un modelo sedimentológico, capaces de resolver los procesos relevantes que dan lugar al avance deltaico.

OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) es un conjunto de herramientas de código abierto para el desarrollo de *solvers* numéricos y utilidades personalizadas para la solución mediante el método de los volúmenes finitos de problemas relacionados con la mecánica del continuo, especialmente con la fluidodinámica. *OpenFOAM*® está escrito en C++, bajo el paradigma de la Programación Orientada a Objetos (POO). Las ecuaciones diferenciales del problema son representadas como objetos de tal manera que existe un correlato directo entre el código de alto nivel del programa y las ecuaciones escritas en notación tensorial. Los esquemas numéricos para la discretización de cada término son luego especificados en tiempo de ejecución, de entre una multitud de esquemas pre-programados (Weller *et al.*, 1998).

La particular forma de escribir programas en *OpenFOAM*® permite concentrarse en la formulación de las ecuaciones diferenciales relevantes para el problema en cuestión y en las particularidades de alto nivel necesarias para su solución, sin la necesidad de focalizarse inicialmente en el detalle de la discretización de cada término. Esto lo convierte en una herramienta muy útil para el prototipado de modelos con requerimientos particulares, como el del objeto de este trabajo.

2 ANTECEDENTES

En Sarubbi y Menéndez (2007) se mostró un modelo adecuado para representar las tendencias de avance del Frente del Delta a gran escala durante todo el siglo XX. A partir de la hipótesis de que el avance del Frente se debe a la deposición de las arenas finas, se calibró un modelo contrastando con cartografía histórica recopilada, infiriéndose la historia temporal de la tendencia del caudal sólido de arenas finas del río Paraná para todo el siglo XX y representando las tendencias de avance del Frente del Delta a gran escala durante ese período.

La estrategia de modelación adoptada consistió en trabajar con un módulo hidrodinámico y un modelo sedimentológico simplificado para calcular las tasas de deposición resultantes, sobre una condición de marea astronómica característica de una situación media, para luego considerar el efecto integrado como representativo de la escala decadal con la cual se calculó la evolución morfológica. El trabajo se concentró en evaluar las condiciones hidrodinámicas que permiten la deposición de arenas finas, sin modelar el transporte del sedimento. A partir de las tasas de deposición resultantes del modelo hidrodinámico, la distribución de las concentraciones de sedimentos necesarias en cada zona para explicar el avance registrado del Frente fue inferida indirectamente.

En el presente trabajo se propone un enfoque superador que apunta, entre otras cosas, a determinar cómo llegan y cómo se distribuyen las concentraciones de sedimentos en suspensión en la zona del Frente, modelando los procesos de advección y difusión de las

mismas. Con ese objetivo se propone la utilización de un modelo bidimensional hidrodinámico acoplado con un modelo de transporte de sedimentos en suspensión, incluyendo los procesos de deposición y resuspensión.

3 DESARROLLO DEL MODELO HIDRODINÁMICO

3.1 Ecuaciones para aguas poco profundas

Las ecuaciones para Aguas Poco Profundas (SWEs, por su nombre en inglés *Shallow Water Equations*) describen el movimiento de un fluido incompresible dentro de un dominio en el cual la profundidad es considerada baja respecto de las dimensiones horizontales del problema. Asumiendo que la velocidad y aceleración verticales son despreciables, las ecuaciones pueden derivarse de la integración en vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Las SWEs consisten en una ecuación escalar de conservación de la masa y dos ecuaciones escalares de conservación de cantidad de movimiento. Las mismas han sido publicadas muchas veces en la bibliografía (Anastasiou y Chan, 1997; Fe *et al.*, 2008). A fin de resolverlas en *OpenFOAM*®, las mismas deben ser escritas en forma vectorial. Las mismas resultan:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h\mathbf{U}) + \nabla \cdot (h\mathbf{U}\mathbf{U}^T) - \frac{\boldsymbol{\tau}^w}{\rho} + \frac{\boldsymbol{\tau}^b}{\rho} - \nu_t \nabla \cdot (h\nabla\mathbf{U}) = -|\mathbf{g}|h\nabla(h+h_0) - \mathbf{f} \times h\mathbf{U} \quad (2)$$

donde h es el tirante de agua, \mathbf{U} es la velocidad, $\boldsymbol{\tau}^w$ y $\boldsymbol{\tau}^b$ son las tensiones de corte debidas al viento y al fondo respectivamente, ν_t es la viscosidad de torbellino, $\mathbf{f} = (2\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{g})\mathbf{g}$ es el coeficiente de Coriolis (dependiente de la rotación angular de la tierra, $\boldsymbol{\Omega}$, y donde \mathbf{g} representa al vector aceleración de la gravedad), ρ es la densidad del agua y h_0 es la cota de fondo, medida desde un plano de referencia arbitrario.

3.2 Implementación en *OpenFOAM*®

Dentro del paquete de *solvers* distribuidos con *OpenFOAM*®, existe un *solver* para resolver las SWEs para flujo invíscido (llamado *shallowWaterFoam*). Esto significa que, de la ecuación (2) están ausentes los términos correspondientes a las tensiones de corte de fondo y debida al viento así como el término que incluye la viscosidad de torbellino. El modelo está implementado en función en función de las variables h y \mathbf{U} . Esto hace más dificultoso el planteo de condiciones de borde de caudal entrante, que son típicamente usadas en este tipo de modelos.

A pesar de las deficiencias mencionadas, el código *shallowWaterFoam* contiene los elementos clave para la resolución de las SWEs, incluyendo el procedimiento de iteración. Este se basa en el método PISO (*Pressure Implicit Splitting Operator*) (Issa, 1986; Rusche, 2002), y es análogo al utilizado por los *solvers* transitorios incompresibles en *OpenFOAM*®. En primer lugar, como etapa predictora, las ecuaciones de cantidad de movimiento son resueltas para obtener el campo de velocidades, utilizando los tirantes del paso de tiempo anterior en los términos en que hace falta. Luego las ecuaciones de cantidad de movimiento semi-discretizadas son reemplazadas en la ecuación de continuidad y esta ecuación es resuelta de modo de hallar el tirante que satisface continuidad. Finalmente los valores finales de \mathbf{U}

son corregidos con el nuevo tirante calculado. Este procedimiento puede repetirse iterativamente cada paso de tiempo hasta hallar la convergencia.

Para el desarrollo del modelo hidrodinámico, se adaptó el *shallowWaterFoam*. En primer lugar las ecuaciones fueron reescritas en función de $h\mathbf{U}$ y h para facilitar el manejo de las condiciones de borde. Luego se agregaron los términos faltantes a la ecuación: tensión de corte de fondo y tensión de corte turbulenta. La tensión de corte debida a la acción del campo de vientos no fue tenida en cuenta en este trabajo, ya que el objetivo es simularon condiciones medias, en las que el viento no es un factor determinante.

La tensión de corte de fondo fue evaluada mediante la expresión de Chezy-Manning. La misma resulta:

$$c = \frac{h^{1/6}}{n} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}^b = -\rho \cdot |\mathbf{g}| \cdot \frac{h\mathbf{U}}{h} \cdot \left| \frac{h\mathbf{U}}{h} \right| / c^2 \quad (4)$$

siendo c el coeficiente de Chezy y n el coeficiente de rugosidad de Manning. La tensión de corte de fondo fue evaluada en *OpenFOAM*® de manera explícita, utilizando los campos de $h\mathbf{U}$ y h del paso de tiempo anterior.

El término debido a las tensiones de corte turbulentas internas, al usar $h\mathbf{U}$ como variable resulta:

$$\nu_t \nabla \cdot \left(h \nabla \frac{h\mathbf{U}}{h} \right) \quad (5)$$

En este término $h\mathbf{U}$ fue evaluado de manera implícita, mientras que para el tirante se utilizaron los valores correspondientes a la iteración anterior del ciclo PISO. Para la viscosidad de torbellino se adoptó un valor constante.

Para el problema estudiado es frecuente encontrar, como resultado de la sedimentación, pequeñas fracciones del dominio, sobre todo cercanas a la costa, que podrían secarse durante la marea baja. Por lo tanto, debió adoptarse una estrategia básica que permita al modelo contemplar este fenómeno. El enfoque utilizado consiste en modificar la batimetría instantánea a instante para las celdas con bajas profundidades de agua, de manera de mantener la celda siempre con un tirante de agua no menor a un determinado tirante mínimo (se adoptó un valor de 0,10 m). Cuando la marea vuelve a subir, el modelo restituye la batimetría a la cota original. Bajo este tratamiento, todas las celdas con tirantes iguales al mínimo son consideradas secas desde el punto de vista del avance del delta.

Si bien este enfoque no conserva rigurosamente el volumen de agua en el dominio, el porcentaje de celdas secas es muy bajo respecto del dominio modelado, por lo que el error de continuidad no es de consideración. Este enfoque simple ha mostrado ser suficiente dado los objetivos perseguidos en este trabajo. Para simular grandes avances del delta se propone reconstruir la malla periódicamente, excluyendo del cálculo las celdas que se han sedimentado de modo que permanecen secas permanentemente.

3.3 Validación del código hidrodinámico

A fin de verificar el correcto funcionamiento del modelo con los cambios introducidos, se

realizó una comparación con el software *HIDROBID II* (Menéndez, 1990), un código bien establecido capaz de resolver las SWEs. Este se basa en el método de las diferencias finitas, planteadas de manera alternada sobre una malla ortogonal de paso constante.

El caso utilizado para la comparación consistió en una expansión lateral brusca sobre fondo plano, de escala geofísica. Las dimensiones del dominio se presentan en la Figura 1a, junto con la malla de cálculo utilizada en ambos modelos, con un paso espacial de 100m. Como condición de borde izquierda se introdujo un caudal constante de $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en el borde derecho se colocó una condición de borde de nivel correspondiente a un tirante de 5m. Para ambos modelos, se utilizó un coeficiente de Manning de 0,015 para la rugosidad de fondo y una viscosidad de torbellino constante de $100 \text{ m}^2/\text{s}$.

Se compararon los campos de módulo del caudal específico para la condición estabilizada resultantes de ambos modelos, *OpenFOAM*® (Figura 1d) e *HIDROBID II* (Figura 1e). Se observa un muy buen grado de acuerdo entre ambas soluciones, teniendo en cuenta las diferencias entre ambos modelos. A fin de observar el impacto relativo de cada uno de los términos introducidos sobre los resultados, se presentan los campos resultantes al activar solo uno de los dos términos: solo la tensión de corte de fondo (Figura 1b) y solo el efecto de la viscosidad de torbellino respectivamente (Figura 1c). De la comparación de estas con la Figura 1d puede concluirse que la introducción de ambos términos es fundamental para reproducir los resultados calculados con el *HIDROBID II*.

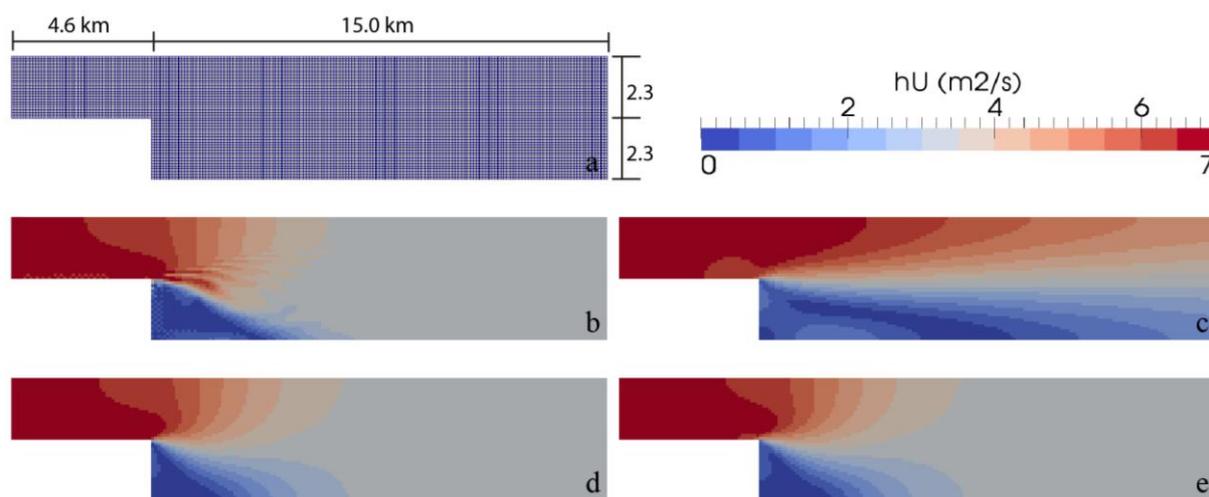


Figura 1: Comparación de los campos del módulo del caudal específico: a) Dimensiones del dominio; b) *OpenFOAM*® con tensión de corte de fondo pero sin tensiones viscosas; c) *OpenFOAM*® con tensiones viscosas pero sin tensión de corte de fondo; d) *OpenFOAM*® con tensiones viscosas y tensión de corte de fondo; e) *HIDROBID II*

4 DESARROLLO DEL MODELO SEDIMENTOLÓGICO

4.1 Procesos simulados

Distintos estudios sedimentológicos confirman que el Frente de avance del Delta del Paraná está formado principalmente por arenas finas (Silva Busso et al., 2004; Rinaldi et al., 2006). Se considera que las mismas, dado su tamaño, se comportan aproximadamente como un sedimento en suspensión (Sarubbi y Menéndez, 2007). El modelo sedimentológico planteado en este estudio responde a estas características, incorporando los procesos de

advección y difusión de los sedimentos, así como su deposición y resuspensión. En forma vectorial, la ecuación de conservación de la masa de sedimentos en suspensión resulta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{h\mathbf{U}}{h} \cdot C \right) - \nabla \cdot (K\nabla C) = \frac{R}{h} - \frac{D}{h} \quad (6)$$

donde C es la concentración de sedimentos, K es el coeficiente de dispersión, D y R son las tasas de deposición y resuspensión respectivamente. En tanto, la ecuación de conservación de los sedimentos de fondo resulta:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = D - R \quad (7)$$

donde F es la masa de sedimento de fondo por unidad de superficie.

Para los procesos de deposición y resuspensión se seleccionaron formulaciones comúnmente utilizadas para modelar la dinámica de sedimentos finos (Mehta y McAnally, 2008). El modelo de Krone (1962) fue adoptado para representar la tasa de deposición:

$$D = \begin{cases} C \cdot W_s \cdot \left(1 - \frac{|\boldsymbol{\tau}^b|}{\tau_{cr,d}^b} \right) & \text{si } |\boldsymbol{\tau}^b| < \tau_{cr,d}^b \\ 0 & \text{si } |\boldsymbol{\tau}^b| \geq \tau_{cr,d}^b \end{cases} \quad (8)$$

donde W_s es la velocidad de caída del sedimento, que es función de su diámetro característico, y $\tau_{cr,d}^b$ es la tensión de corte crítica de deposición, función del tipo de sedimento

Para calcular la tasa de resuspensión se adoptó el modelo de Parthenaides (1962), cuya expresión es:

$$E = \begin{cases} E_0 \cdot \left(\frac{|\boldsymbol{\tau}^b|}{\tau_{cr,e}^b} - 1 \right) & \text{si } |\boldsymbol{\tau}^b| > \tau_{cr,e}^b \\ 0 & \text{si } |\boldsymbol{\tau}^b| \leq \tau_{cr,e}^b \end{cases} \quad (9)$$

donde $\tau_{cr,e}^b$ es la tensión de corte crítica de erosión y E_0 una constante de erosibilidad. Estos últimos dos parámetros dependen del estado de consolidación del sedimento de fondo, pero en esta implementación son considerados constantes.

Por último, se implementó una ecuación para representar la continua variación de las cotas de fondo a medida que se desarrolla el proceso de deposición y resuspensión. Esta permite que la hidrodinámica responda a las variaciones del fondo de manera acoplada. La misma es:

$$h_0 = h_0^0 + \frac{F}{\rho_s \cdot p} \quad (10)$$

donde h_0^0 es la cota de fondo inicial, ρ_s es la densidad del sedimento y p es la porosidad del fondo.

5 APLICACIÓN

El modelo hidro-sedimentológico se aplicó al estudio del avance del Frente del Delta del Río Paraná en el Río de la Plata. El dominio de la modelación ([Figura 2a](#)) se enmarca dentro de la zona denominada Río de la Plata Superior.

Los forzantes que determinan la dinámica del sistema, a la escala de análisis, son los caudales líquidos y sólidos de los tributarios que desembocan al Río de la Plata y la onda de marea astronómica que se propaga desde el océano (anulando el efecto de los campos de vientos debido a la representación de condiciones medias anuales).

Los caudales tributarios corresponden al río Uruguay y a los siguientes brazos del río Paraná: Sauce, Paraná Bravo, Paraná Guazú, Barca Grande, Paraná Miní y Paraná de las Palmas ([Figura 2a](#)). Para el río Paraná se adoptó un valor de caudal total de $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$, constante durante toda la simulación. La repartición del caudal entre los brazos se realizó de acuerdo a lo propuesto por [Bombardelli et al. \(1995\)](#). Para el río Uruguay se fijó un caudal constante de $4600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para los caudales sólidos aportados por el Paraná se basaron en los datos de [Sarubbi y Menéndez \(2007\)](#), adoptándose una carga de arenas finas total de 255 kg/s repartida como una concentración constante entre los distintos brazos del río.

La onda de marea astronómica se especificó como condición de borde de nivel en la línea imaginaria La Plata-Colonia (borde Este del dominio de cálculo), considerándose como representativa la onda astronómica semidiurna media en cada uno de los extremos (datos de las predicciones de marea astronómica del Servicio de Hidrografía Naval de Argentina, SHN, en Colonia y La Plata). Se construyó la serie de niveles a lo largo de dicho interpolando linealmente entre ambos extremos.

La simulación se comenzó en el año 1994 y se extendió hasta el año 2007. Para ambos años existen cartas náuticas que documentan la posición de la línea de costa en el Frente del Delta. La batimetría inicial fue construida a partir de la interpolación de datos digitalizados de la carta náutica 'H130 - Río de la Plata Superior' del año 1994, del SHN.

La malla de cálculo se construyó mediante elementos triangulares, con tamaños de lado de entre 100m y 200m en la costa del delta, que se incrementan al alejarse de la zona de interés ([Figura 2b](#)). El paso de tiempo de la simulación, adoptado de modo que de mantener el número de Courant por debajo de la unidad, fue de 5 s.

Tanto para la viscosidad de torbellino como para el coeficiente de difusión del sedimento se utilizó un valor constante y uniforme de $40 \text{ m}^2/\text{s}$.

En la obtención de la tasa de sedimentación, D , la velocidad de caída se calculó según la formulación de [van Rijn \(1984\)](#) en función del tamaño de grano medio de los sedimento (d_{50}). Dado que en este problema el sedimento consiste en arenas finas (0,15 mm), se adoptó un valor de 0,02 m/s.

En los trabajos antecedentes sobre modelación sedimentológica en el Río de la Plata Interior ([FIUBA, 1999](#); [Menéndez y Castellano, 2000a, 2000b](#); [Menéndez, 2001](#); [Sarubbi y Menéndez, 2007](#)) los valores de tensiones críticas de erosión y deposición utilizados se basaron en el trabajo de [Harrison y Owen \(1971\)](#), en el que se estudió la dinámica de los limos del río Támesis (Inglaterra) mediante ensayos de laboratorio, estimándose tensiones críticas de deposición y resuspensión de $0,06 \text{ N/m}^2$ y $0,32 \text{ N/m}^2$ respectivamente. Estos valores fueron ligeramente ajustados por calibración, debido a que se trata de otro tipo de sedimentos, utilizándose finalmente sendos valores de $0,1 \text{ N/m}^2$ y $0,15 \text{ N/m}^2$.

La definición del coeficiente de erosibilidad E_0 presenta cierta incertidumbre ([Krestenitis](#)

et al., 2006), en este problema fue definido con el valor de $2 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

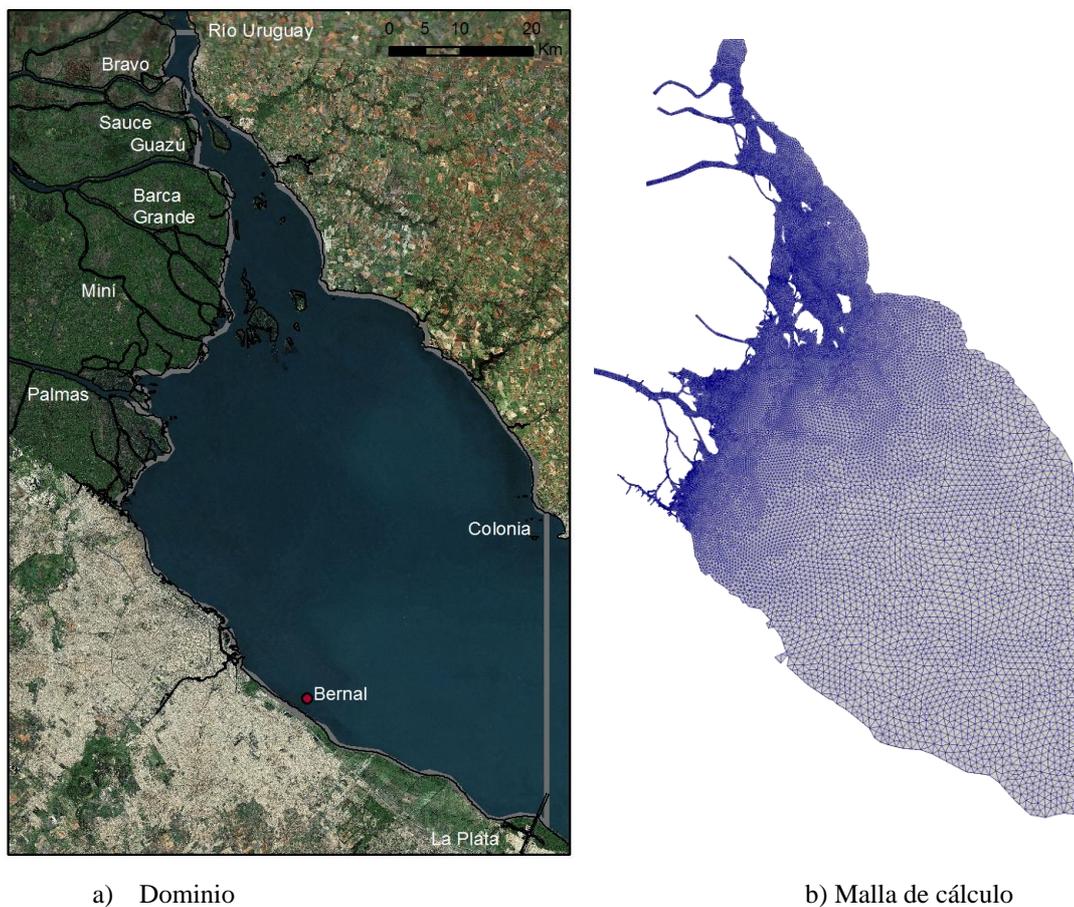


Figura 2: Dominio y malla de cálculo

Se dispuso de mediciones de velocidad de corriente, realizadas por AySA (Agua y Saneamientos Argentinos S.A.) en las ubicaciones de sus tomas de agua, Palermo y de Bernal, para el período 10/Mar a 20/Abr de 2004. Para la validación se utilizó la ventana temporal 19/Mar/04 – 24/Mar/04, que es un período durante el cual se observó una situación de vientos suaves. En la [Figura 3](#) se presenta una comparación de las rosa de corriente registrada en Bernal con los resultados del modelo. Se observa que las direcciones e intensidades de las corrientes son compatibles, si bien se observa mayor dispersión en los valores registrados que en los simulados, ya que la simulación se realizó con mareas y caudales medios, y no cuenta con la influencia del viento.

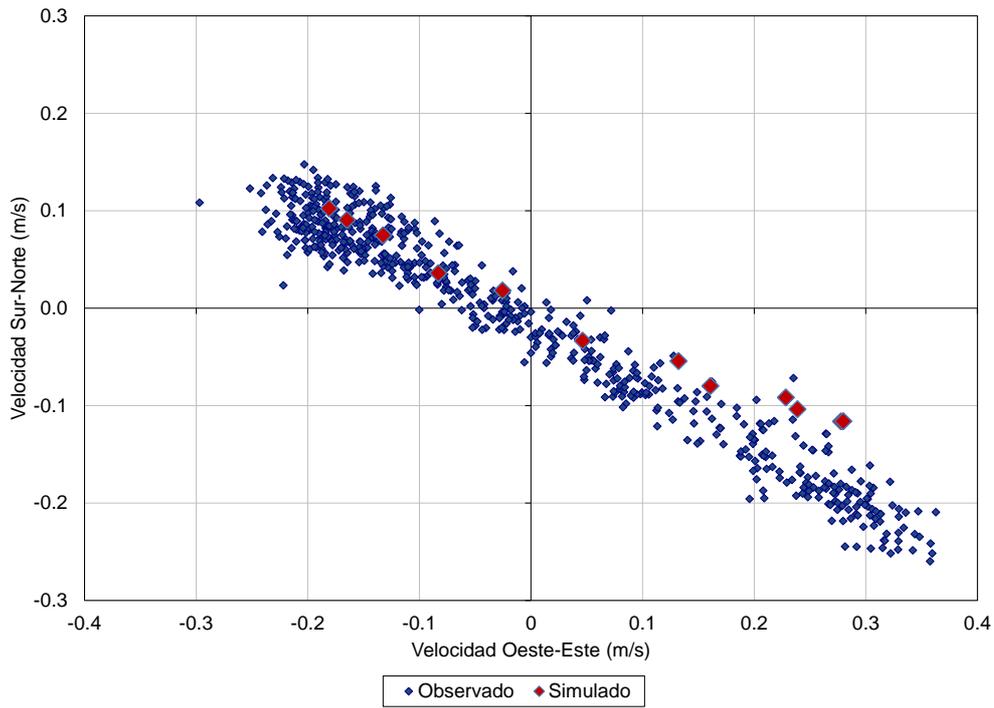
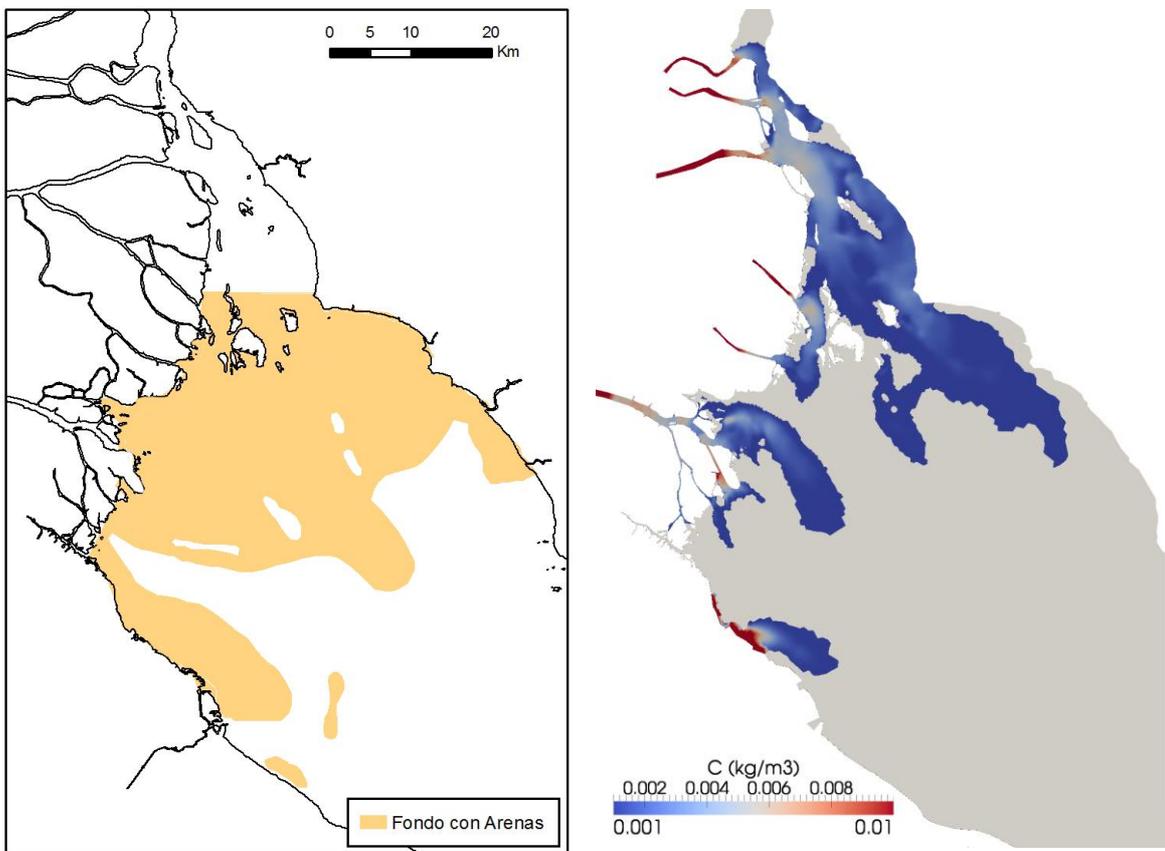


Figura 3: Comparación de la rosa de corrientes en la estación Bernal



a) Zona con fondo arenoso (Urien, 1966)

b) Concentración media de arenas finas en suspensión.

Figura 4: Zonas con fondo arenoso registrado y concentraciones de arena fina simuladas

Según Urien (1966), existen en el fondo del Río de la Plata Superior tres áreas destacables sobre la base de sedimentos que la caracterizan: arenas, limos y fangos. En cuanto a las arenas, se distribuyen en la zona de descarga de los ríos (el material de fondo es casi exclusivamente arena con 95% a 60% de fracción gruesa, con diámetros medios de 0.4 a 0.1 mm). También, la deposición de las arenas en Río de la Plata Superior se condice con la evolución de las islas Oyarvide (aparición de las islas Lucía y Martín García (isla Timoteo Domínguez incorporada a la misma) en el último siglo. En la Figura 4a se presenta la zona con contenido de arenas en el fondo según Urien (1966). Por otro lado, en la Figura 4b se presentan las concentraciones medias de arenas finas en suspensión simuladas por el modelo. Se observa que las mismas, hasta un valor umbral de 1g/m^3 , caen dentro de las zonas con fondo arenoso, lo que resulta compatible.

En la Figura 5 se presentan los resultados de la simulación 1994-2007 en términos del avance del Frente del Delta durante ese período. Se observa que el modelo reproduce razonablemente las zonas y magnitudes del avance en toda la zona sur del frente hasta el brazo Barca Grande. Los avances en la zona norte del frente no son capturados utilizando los parámetros actuales del modelo sedimentológico.

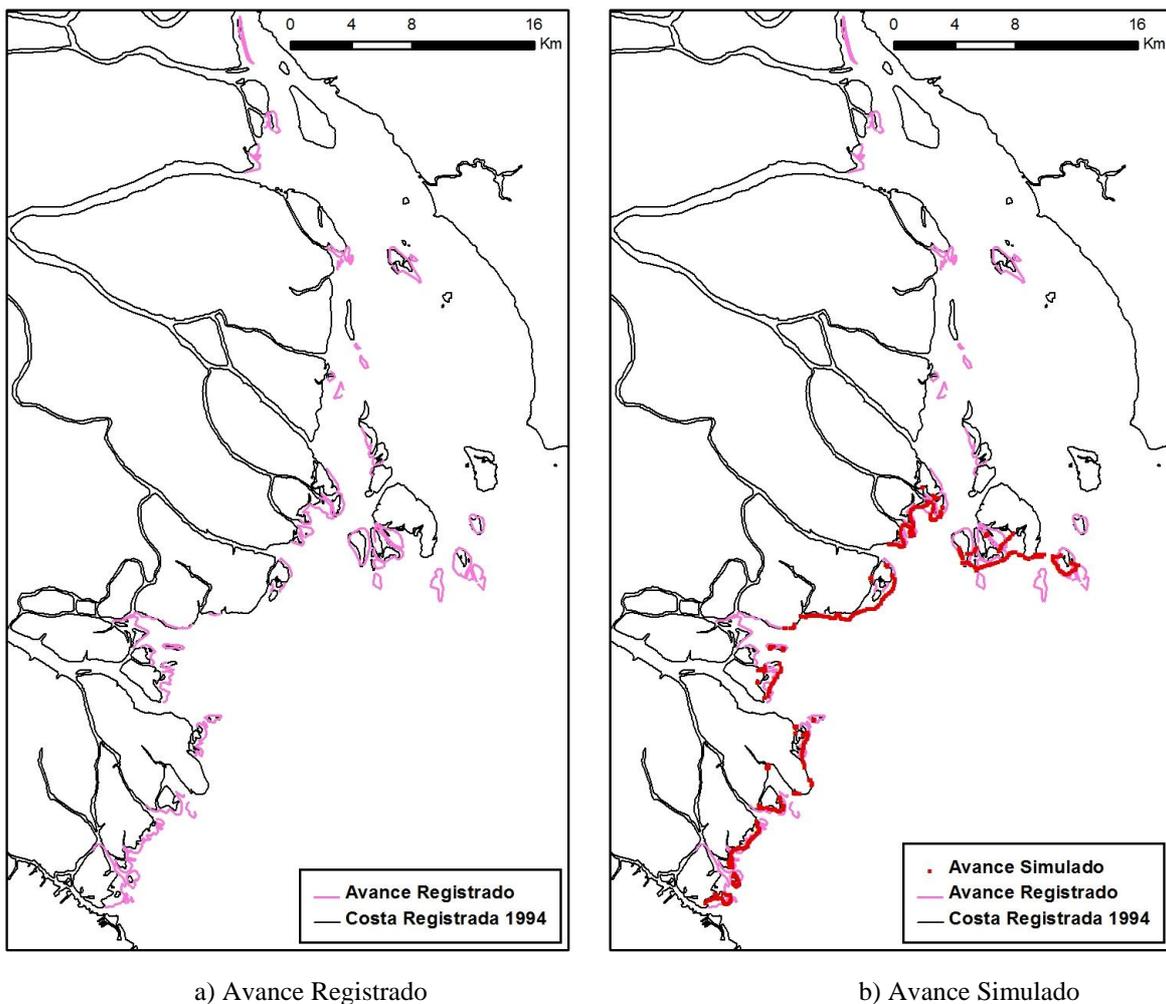


Figura 5: Comparación del avance del Frente del Delta registrado y simulado en el período 1994-2007

6 CONCLUSIONES

Aprovechando la versatilidad brindada por *OpenFOAM*® se desarrolló un modelo hidrosedimentológico apropiado para estudiar el avance del Frente del Delta del Paraná. Los resultados iniciales para el período 1994-2007 son compatibles en líneas generales con los avances registrados. No obstante se considera que aún es posible mejorar los resultados mediante el ajuste de los parámetros del modelo sedimentológico. Los procesos modelados han demostrado ser relevantes para explicar el avance del Frente. Utilizando la misma metodología, la simulación para períodos de tiempos más largos permitirá la predicción del avance futuro del delta.

AGRADECIMIENTO

La investigación que condujo a estos resultados fue financiada por el Programa Marco N° 7 de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) bajo el proyecto N° 212492 (*CLARIS LPB: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin*).

REFERENCES

- Anastasiou, K., Chan, C.T., *Solution of the 2D shallow water equations using finite volume method on unstructured triangular meshes*. Int. Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 24, 1225-1245, 1997.
- Bombardelli, F.A., Menéndez, A.N., Brea, J.D., Lapetina, M.R., y Uriburu Quirno, M., *Estudio hidrodinámico del Delta del río Paraná mediante modelación matemática*. Informe LHA-INCyTH 137-03-95, 1995.
- Fe, J., Navarrina, F., Puertas, J., Vellando, P., Ruiz, D., *Experimental validation of two depth-averaged turbulence models*. Int. Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 60, 177-202, 2008.
- FIUBA, *Estudio del impacto ambiental sedimentológico de las pilas del puente principal de la conexión Buenos Aires - Colonia*. Informe Ejecutivo. Agosto 1998.
- Harrison, A.J.M., Owen, M.W., *Siltation of fine sediments in estuaries*. IAHR XIV Congress, 1971.
- Issa, R.I., *Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting*. Journal of Computational Physics, 62(1):40-65, January 1986.
- Krestenitis, Y.N., Kombiadou, K.D., y Savvidis, Y.G., *Modelling cohesive sediment transport in the marine environment: The case of Thermaikos Gulf*. J. Ocean Sci. Disc., 3, 701-733, 2006.
- Krone, R.B., *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*. Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, 1962.
- Mehta, A.J., McAnally, W. H., *Fine-Grained Sediment Transport*. Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineers: American Society of Civil Engineers Manual 110, Chapter 4. 2008.
- Menéndez, A.N., *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 6, 1, 25-36, 1990.
- Menéndez, A.N., Castellano, R., *Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial*

- island*. 4th International Conference HydroInformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July, 2000a.
- Menéndez, A. N., Castellano, R., *Simulación numérica de problemas con escalas temporales disímiles: crecimiento de una barra de sedimentación*. XI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. ENIEF'2000, Bariloche, Noviembre, 2000b.
- Menéndez, A.N., *Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Rio de la Plata River*. VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, 2001.
- Partheniades, E., *A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water*. Ph.D. Thesis. University of California, Berkeley, 1962.
- Rinaldi, V., Abril, E., y Clariá, J., *Aspectos Geotécnicos Fundamentales de las Formaciones del Delta del Río Paraná y del Estuario del Río de la Plata*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2), 2006.
- Rusche, H., *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions*. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, 2002.
- Sarubbi, A., y Menéndez, A.N., *Un modelo numérico para representar el avance del Frente del Delta del río Paraná a escala secular*. Mecánica Computacional Vol XXVI, pp. 2203-2216, S.A. Elaskar, E.A. Pilotta, G.A. Torres (Eds.), Córdoba, Argentina, 2007.
- Silva Busso, A., Amato, S., Seoane N., Pittau, M. G., *Aportes al conocimiento de la geología del Delta del Río Paraná*. Informe INA 03-235-04, Septiembre, 2004.
- Urien, C.M., *Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior*, Tirada Aparte del Boletín del Servicio de Hidrografía Naval, Volumen III (3), 197-203, 1966.
- van Rijn, L.C., *Sediment Transport, Part II: Suspended load transport*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, no 11, 1984.
- Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object orientated techniques*. Computers in Physics, 12(6):620 - 631, 1998.