

MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DELTA DEL RÍO SINÚ, COLOMBIA

Sediment transport modeling in the Sinú river Delta, Colombia

Franklin TORRES-BEJARANO¹, Javier GONZÁLEZ-MARTÍNEZ¹,
María NARANJO-SALEME¹ y José MARTÍNEZ-CANTERO¹

¹Universidad de Córdoba, carrera 6 # 77 – 305, Montería, C.P. 230002, Córdoba, Colombia.

*Autor para correspondencia: franklintorres@correo.unicordoba.edu.co

(Recibido: marzo 2021; aceptado marzo 2022)

Palabras clave: modelo hidrodinámico, EFDC Explorer, sedimentación costera, procesos sedimentarios

RESUMEN

Las variaciones en las tasas de transporte de sedimento en suspensión pueden causar impactos significativos en deltas y estuarios, pues los sedimentos fluviales desempeñan un papel fundamental en la estabilidad de estos ecosistemas costeros. Este trabajo presenta la aplicación de un modelo numérico 3D para simular el transporte de sedimentos en el delta del Río Sinú, Colombia y su impacto en la zona costera adyacente, donde se transporta una cantidad importante de sedimento suspendido al mar Caribe. Se implementó el sistema de modelación EFDC Explorer, que resuelve las ecuaciones de movimiento y de transporte, específicamente para: determinar la dinámica y distribución espaciotemporal de los sedimentos suspendidos, y evaluar la vulnerabilidad de la zona estuarina ante variaciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos. El modelo fue configurado con datos obtenidos en campo y con información secundaria de agencias ambientales nacionales. La calibración fue verificada mediante el Índice de Concordancia, logrando un buen ajuste para las variables consideradas. Los resultados mostraron particularidades en la distribución y difusión de los sedimentos, como presencia de áreas preferenciales de acumulación y dispersión, demostrando que la zona costera es vulnerable a la sedimentación.

Key words: hydrodynamic model, EFDC explorer, coastal sedimentation, sedimentary processes

ABSTRACT

Variations in suspended sediment transport rates can cause significant impacts in deltas and estuaries, as river sediments play a fundamental role in the stability of these coastal ecosystems. This work presents the application of a 3D numerical model to simulate sediment transport in the Sinú River Delta, Colombia, and its impact on the adjacent coastal zone, where a significant amount of suspended sediment is transported to the Caribbean Sea. The EFDC Explorer modeling system was implemented, which solves the equations of movement and transport, specifically to determine the dynamics and spatiotemporal distribution of suspended sediments and evaluate the vulnerability of the estuarine zone to hydrodynamic variations and sediment transport. The model was configured with field obtained data and with secondary information from national environmental agencies.

The calibration was verified using the index of Agreement, achieving a good fit for the variables considered. The results showed particularities in the distribution and diffusion of sediments, such as the presence of preferential areas of accumulation and dispersion, demonstrating that the coastal zone is vulnerable to sedimentation.

INTRODUCCIÓN

Los deltas de los ríos se encuentran entre los entornos más valiosos económica y ecológicamente de la Tierra, debido a que son ambientes altamente productivos (Espinosa 2008, Nienhuis et al. 2020). Estos depósitos costeros, subaéreos y subacuáticos, se originan a partir del suministro de sedimentos fluviales y de su interacción con la dinámica de los procesos marinos que inciden en la plataforma costera como el oleaje, las corrientes litorales y las mareas (Coleman 1981, López y Restrepo 2007, Hoitink et al. 2017). No obstante, las fuerzas fluviales y marinas son los primeros agentes de transporte y depósito del material particulado (Galloway 1975, Amoudry y Liu 2010, Zhang et al. 2011, Xu y You 2017), ya que actúan como un factor importante en el control tanto de la hidrodinámica de la desembocadura del río como de los depósitos estuarinos (Leonardi et al. 2013, Leonardi et al. 2015).

Los ríos juegan un papel importante en el transporte de sedimentos de los continentes a los océanos costeros. Se estima que la entrada de sedimentos fluviales constituye el 95 % de la transferencia de sedimentos tierra-océano (Walling y Fang 2003). Los sedimentos fluviales son un componente esencial en estos ecosistemas, pues desempeñan un papel fundamental en la evolución morfológica (Brand et al. 2010) y los procesos ecológicos en áreas costeras (Clark et al. 2017). Por consiguiente, variaciones en las tasas de transporte de sedimento en suspensión pueden causar impactos significativos en estos sistemas (Restrepo-López et al. 2015). Asimismo, se ha demostrado que estos cambios incluso podrían tener efectos de mayor alcance en la geomorfología del delta del estuario, en la topografía de la plataforma continental (Gensac et al. 2016, Maloney et al. 2018) y la disminución de las poblaciones de peces (Wang et al. 2010, Gao et al. 2011).

Los modelos de flujo-sedimento son una herramienta eficiente para investigar la evolución de sedimentos en el lecho de los ríos. Por esa razón, es preciso implementar herramientas computacionales como los modelos numéricos que, desde los últimos años, han contribuido a la definición de la

hidrodinámica de masas de agua y al entendimiento de la dinámica de los sedimentos (Fossati et al. 2014, Torres-Bejarano et al. 2016, Peruzzo et al. 2017, Li et al. 2021).

Existen diversos programas y software de modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos, como el MIKE 21, EFDC, POM y DELFT3D, que son modelos de flujo-sedimento que se han utilizado habitualmente (Ji et al. 2001, Ji et al. 2002, Bai y Lung 2005, Lumborg y Pejrup 2005, Le et al. 2006, Ji et al. 2007, van Maren 2007). El EFDC es uno de los modelos más ampliamente utilizado en los últimos años para distintas aplicaciones, y especialmente para estudiar el transporte de sedimentos en ríos y zonas estuarinas. Por ejemplo, Xu y You (2017), implementaron un modelo de transporte de sedimentos 3D basado en el EFDC y SWAN para estudiar el cambio de la concentración de sedimentos en suspensión y el esfuerzo cortante del fondo bajo las acciones de la corriente pura y la corriente de las olas; Zhu et al. (2020) utilizaron el EFDC para investigar las escalas de tiempo de transporte de sedimentos en Modaomen Waterway en China; Qi et al. (2012), emplearon el EFDC en un modelo 3D para estudiar la influencia del flujo y los sedimentos en el lecho cambiante del río Yangtze.

En Colombia la estimación del transporte de sedimentos, así como el estudio de los procesos que lo controlan, es incipiente, aunque se destaca la cuantificación del transporte de sedimentos en los principales sistemas fluviales del país (Restrepo y Kjerfve 2000, Oliveros-Acosta et al. 2015, Abella-Castaño y Vergara-Barrero 2018, Torregroza-Espinosa et al. 2020).

Por tales motivos, en este trabajo se implementó el modelo numérico 3D EFDC Explorer V10.3, para conocer la hidrodinámica de la desembocadura y frente deltaico del río Sinú, así como el transporte y destino de los sedimentos para identificar áreas susceptibles de erosión o acumulación de sedimentos. Se utilizaron registros históricos de viento, de caudales y concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) para determinar las condiciones representativas para la predicción de las zonas de deposición de sedimentos transportados por el flujo que ingresa desde aguas arriba del río Sinú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción área de estudio

El río Sinú se encuentra ubicado, en la costa atlántica del noreste colombiano entre los 8 y 9 grados de latitud norte y los 75 grados de longitud oeste. El río Sinú es el afluente principal del departamento de Córdoba, Colombia. Tiene una longitud de 415 km y un caudal medio de 450 m³/s, la cuenca tiene un área alrededor de 13952 km²; su extensión cubre 3 departamentos y varios municipios. Es un cauce con alta dinámica fluvial evidenciada por su sistema sinuoso o meándrico en el cual se presentan varios procesos dinámicos como la sedimentación y erosión (CVS 2014), por ende, debido a su tamaño y comportamiento, recoge y transporta gran cantidad de sedimentos en toda su trayectoria.

Este afluente importante del caribe colombiano nace en el Nudo del Paramillo a una altura sobre el nivel del mar de alrededor de 3700 metros, y desemboca en el mar Caribe, en la zona del delta de Tinajones, donde el cauce principal se divide en tres bocas que reciben los nombres de Mireya, Medio y Corea (Fig. 1) (CVS 2014).

El delta del Sinú en el año 1938 sufrió un cambio de curso importante en su tramo inferior, el cual

originó la formación del nuevo Delta de Tinajones, con el consecuente abandono del antiguo delta en la Bahía de Cispatá (Robertson y Chaparro 1998), desde el inicio del nuevo tramo, se han venido presentando problemas de erosión costera en la zona (Ruiz-Ochoa et al. 2016), y se ha evidenciado un considerable aumento de la población (Barragán y de Andrés 2016).

En este trabajo se modelaron los últimos 11 km del río y una zona del frente deltaico que alcanza hasta 6 km mar adentro desde la línea de costa. La zona del delta tiene una cobertura vegetal predominante de bosque seco con temperaturas que oscilan entre los 27 y los 29 °C (Valbuena 2017).

Recopilación de información

Para la realización de este estudio se hizo una revisión, clasificación, depuración y compilación de la información requerida por los parámetros de entrada necesarios para la simulación hidrodinámica del transporte de sedimentos. Esta información fue obtenida de las estaciones de medición y control hidrometeorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) a través de la estación La Doctrina y la estación Coveñas, ubicadas en la parte baja de la cuenca del río Sinú.

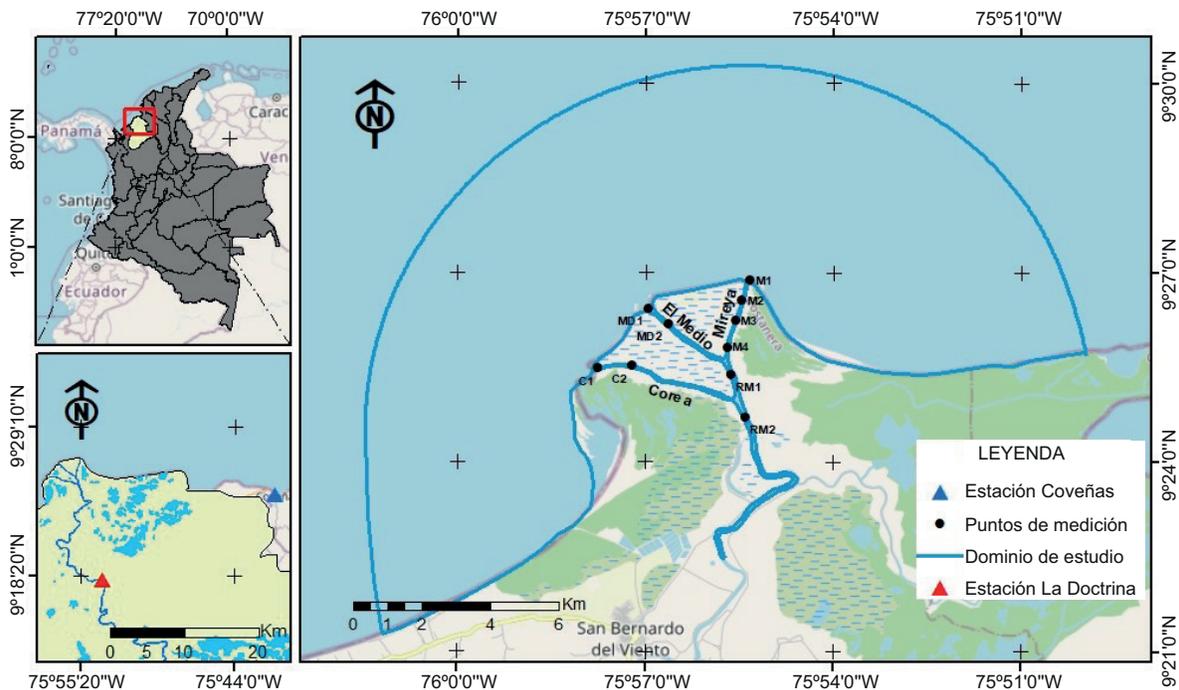


Fig. 1. Localización de la zona de estudio y ubicación de puntos de medición.

Mediciones en campo

Con el fin de recopilar datos para calibración del modelo, se realizó una campaña de medición en la desembocadura del río el mes de febrero de 2021, correspondiente a la época seca. Se hizo un recorrido en lancha con el objetivo de obtener las profundidades del tramo de estudio a través de una ecosonda batimétrica EchomapP 73sv, marca Garmin. Simultáneamente, a lo largo del tramo y en cada uno de los tres brazos del delta (Mireya, el Centro y Corea), se tomaron mediciones de salinidad a diferentes profundidades, utilizando una sonda multiparamétrica HI9829 marca Hanna instruments y una botella de Van Dorn para tomar el agua a diferentes profundidades en los puntos indicados a lo largo del tramo final de la zona de desembocadura del río (**Fig. 1**).

Descripción del modelo numérico

Para la simulación en el tramo de estudio se utilizó el modelo Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC). El programa fue originalmente desarrollado en el Instituto de Virginia de Ciencias Marinas (VIMS, por sus siglas en inglés) y en la Escuela de Ciencias Marinas del Colegio de William y Mary (SMSCWM, por sus siglas en inglés) en el año de 1988 (Hamrick 1992); posteriormente, la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (EPA, por sus siglas en inglés) continuó soportando el desarrollo y se convirtió de dominio público. La versión utilizada en este trabajo es EFDC Explorer 10.3, la cual es de uso comercial, desarrollada por la empresa Soluciones Dinámicas Internacionales (DSI, por sus siglas en inglés). Las ecuaciones son resueltas usando una combinación de volumen finito y técnicas de diferencias finitas sobre una malla tipo *staggered grid* (Arakawa y Lamb 1977). El modelo EFDC hidrodinámico se utiliza en este estudio para simular los niveles de agua, las corrientes y calidad del agua (transporte de sedimentos); es un modelo acoplado que resuelve tanto la hidrodinámica, el transporte de contaminantes y la cinética en un código fuente integrado escrito en Fortran, eliminando así la necesidad de un acoplamiento externo entre módulos de hidrodinámica y transporte.

El modelo se ha aplicado y documentado ampliamente para la modelación de circulación, estratificación térmica, transporte de sedimentos, la calidad del agua y eutrofización en numerosos lagos, ríos y estuarios (Ji et al. 2001, Zou et al. 2006, Lv et al. 2013). En las últimas dos décadas, se ha convertido en uno de los más utilizados y técnicamente defendibles modelos hidrodinámicos en el mundo. Se ha aplicado a más de 100 cuerpos de agua, así como para la gestión del ambiente (Moustafa y Hamrick 2000,

Ji et al. 2001, Jeong et al 2010, Wang et al. 2013).

El EFDC resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes adaptadas para aguas someras para el estudio de hidrodinámica y resuelve la ecuación de advección-difusión-reacción para el transporte de contaminantes o estudios de calidad del agua (Hamrick 1992).

Módulo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico simula la pluma de campo cercano, los modelos de oleaje vinculados externamente y generados por el viento. Incorpora en la hidrodinámica la temperatura y la salinidad para abordar los efectos de la densidad.

El modelo desarrolla las ecuaciones de movimiento (1) y (2), la ecuación de continuidad (3), la ecuación de estado (4) y las ecuaciones de transporte para la salinidad y la temperatura (5) y (6), y las resuelve integradas en la vertical. El modelo utiliza coordenadas cartesianas o curvilíneas ortogonales en el plano horizontal y un sistema de coordenadas sigma en el plano vertical (Hamrick 1992).

Ecuaciones de movimiento

$$\underbrace{\frac{\partial(mHu)}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial(m_y H u u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v u)}{\partial y} + \frac{\partial(m w u)}{\partial z}}_2 = \underbrace{\left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}\right) H v}_3 = -m_y H \underbrace{\frac{\partial(g\xi + \rho)}{\partial x}}_4 \quad (1)$$

$$m_y \underbrace{\left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x}\right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z}\right)}_5 + Q_u$$

$$\underbrace{\frac{\partial(mHv)}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial(m_y H u v)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w v)}{\partial z}}_2 = \underbrace{\left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}\right) H u}_3 = -m_x H \underbrace{\frac{\partial(g\xi + \rho)}{\partial y}}_4 \quad (2)$$

$$m_x \underbrace{\left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y}\right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z}\right)}_5 + Q_v$$

En las ecuaciones (1) y (2), el término 1 representa la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo, los términos 2 son los advectivos y repre-

sentan el movimiento del fluido debido a las fuerzas inerciales, el término 3 es el parámetro de Coriolis, el término 4 es la fuerza de presión, representada a través de la variación de la superficie libre y el término 5, son los esfuerzos viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Ecuación de estado

$$\begin{aligned} \rho = & 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2} T - \\ & 9.095290 \times 10^{-3} T^2 + 1.001685 \times 10^{-4} T^3 - \\ & 1.120083 \times 10^{-6} T^4 + 6.536332 \times 10^{-9} T^5 + \\ & (0.824493 - 4.0899 \times 10^{-3} T + 7.6438 \times 10^{-5} T^2 - \\ & 8.2467 \times 10^{-7} T^3 + 5.3875 \times 10^{-9} T^4) \cdot S + \\ & (-5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4} T - \\ & 1.6546 \times 10^{-6} T^2) \cdot S^{1.5} + 4.8314 \times 10^{-4} S^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Ecuación de transporte para salinidad y temperatura

$$\frac{\partial(mHS)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuS)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvS)}{\partial y} + \quad (5)$$

$$\frac{\partial(mwS)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_s$$

$$\frac{\partial(mHT)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuT)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvT)}{\partial y} \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial(mwT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T$$

Donde:

u, v, w	Componentes de velocidad horizontal y vertical	LT ¹
x, y	Coordenadas ortogonales	L
m_x, m_y	Raíces cuadradas de los componentes diagonales	Adimensional
$H = h + \zeta$	profundidad total, es la suma de la profundidad y la superficie libre	L
P	es la presión física en exceso de la densidad referencial	LT ²
f	es el parámetro de Coriolis	Adimensional
A_v	Turbulencia vertical o viscosidad de Eddy	L ² T ⁻²

Q_u, Q_v	Términos de movimiento afluente – efluentes	ML ⁻³
ρ	Densidades	ML ⁻³
T	Temperatura	°C
S	Salinidad	PPT
A_b	Turbulencia vertical difusiva o viscosidad de Eddy	L ² T ⁻¹
Q	Difusión con la intensidad turbulenta	L ² T ⁻¹
l	Escala longitudinal turbulenta	L
A_u	Difusión vertical	L ² T ⁻¹
Q_b, Q_q	Condiciones de entrada-salida para la salinidad y la temperatura	ML ⁻³
C_{TSS}	Es el factor de corrección que considera la influencia del sedimento en la densidad del agua	Adimensional
$\rho_{s,j}$	Es la densidad de sedimentos de la clase de sedimentos j	ML ⁻³
C_j	Es la concentración de sedimentos clase j	ML ⁻³
s_j	Es la gravedad específica de la clase de sedimentos j	Adimensional
N	Es el número de clases de sedimentos	

Módulo de transporte de sedimentos

EFDC Explorer 10.3 tiene dos opciones de transporte de sedimentos disponibles. La ecuación de la columna de agua para el transporte de sedimentos en suspensión (Ec. 8) se deriva de la ecuación de transporte genérica (advección-difusión-reacción) para un material disuelto o suspendido y el procedimiento general de solución sigue el de la ecuación de transporte de salinidad (Ec. 5).

Ecuación de transporte de sedimentos suspendidos

$$\frac{\partial}{\partial t} (mHC_j) + \frac{\partial}{\partial x} (PC_j) + \frac{\partial}{\partial y} (QC_j) + \frac{\partial}{\partial z} (mwC_j) \quad (8)$$

$$- \frac{\partial}{\partial z} (mw_{s,j}C_j) = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{A_b}{H} \frac{\partial C_j}{\partial z} \right) + S_{s,j}^E + S_{s,j}^I$$

Donde, C_j representa la concentración de la j -ésima clase de sedimentos, es el término fuente-sumidero externo, y es el término fuente-sumidero interno.

Las condiciones de frontera para la ecuación (8) en la dirección vertical son las siguientes:

En la superficie del agua

$$-\frac{A_b}{H} \frac{\partial}{\partial z} C_j - w_{s,j} C_j = 0 \quad (9)$$

En el lecho del agua

$$-\frac{A_b}{H} \frac{\partial}{\partial z} C_j - w_{s,j} C_j = J_{j0} \quad (10)$$

donde, J_{j0} es el flujo neto de intercambio columna-lecho de agua definido como positivo en la columna de agua.

Configuración del modelo y de la malla numérica

La malla numérica utilizada para el delta y la zona costera del río Sinú es una malla curvilínea ortogonal estructurada con 146 elementos en la dirección X y 171 elementos en la dirección Y, con ΔX que varía de 10.6 a 291.5 m y ΔY varía de 7.3 a 339.9 m, y un total de 5234 celdas activas (**Fig. 2**). La malla se ajustó adecuadamente a las sinuosidades del río, además, se mantuvo lo más uniforme y ortogonal posible para minimizar problemas numéricos (Ji 2017). La malla fue construida utilizando el software CVLGrid 1.1, desarrollado por DSI International.

Para modelos 3D, hay dos tipos de capas de cuadrícula vertical disponibles en EFDC Explorer: Capas Sigma Zed (SGZ) y malla estándar Sigma (Jeong et al. 2010, Craig et al. 2014). En este trabajo, se utilizó la malla estándar Sigma, para la cual el número de capas es constante en todo el dominio horizontal y cada capa cubre un porcentaje fijo de la profundidad del agua. La malla vertical consta de 6 capas equi-

distantes. La **figura 2** muestra un perfil vertical de la malla Sigma utilizada para las tres desembocaduras del delta.

Condiciones de frontera, forzantes y batimetría

Las forzantes principales que generan la circulación del agua en la desembocadura y zona costera del río Sinú están sujetas a las condiciones meteorológicas y del entorno del delta, siendo los siguientes: la marea, definida como una frontera de tipo libre en la configuración del modelo y generada utilizando los principales componentes armónicos de marea identificados para esta zona del Caribe Colombiano (**Cuadro I**) (Torres-Parra et al. 2008); las condiciones meteorológicas dependiendo el periodo climático,

CUADRO I. COMPONENTES DE MAREA, AMPLITUD Y FASE EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO SINÚ.

Nombre	Velocidad (deg/hr)	Amplitud (m)	Fase (deg)
SA	0.041069	0.053	253.71
SSA	0.082137	0.025	55.6
MM	0.544375	0.008	347.53
MF	1.098033	0.016	357.19
Q1	13.398661	0.01	236.54
O1	13.943036	0.059	240.61
P1	14.958931	0.031	241.38
K1	15.041069	0.098	240.19
N2	28.43973	0.026	109.81
M2	28.984104	0.075	134.97
S2	30	0.017	44.83

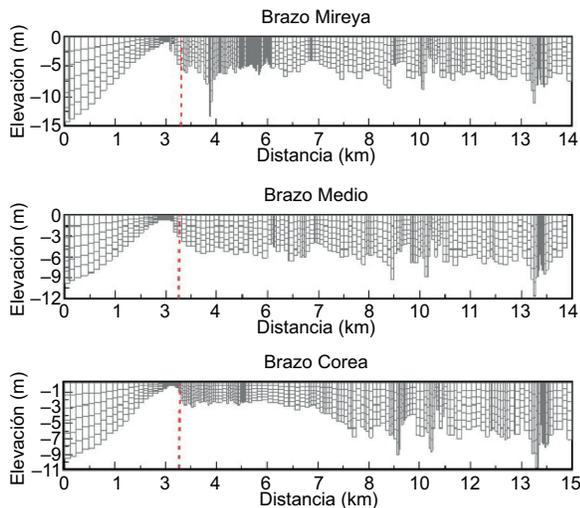


Fig. 2. Dominio computacional con malla 2D horizontal (derecha) y malla vertical (izquierda); la línea roja punteada indica la desembocadura de cada brazo.

por ejemplo, los vientos se incluyen en la simulación con una serie temporal de velocidades y direcciones del viento a intervalos de una hora, registrados en la estación Coveñas (**Fig. 1**); y los aportes de aguas continentales representados por el caudal del río Sinú en la frontera aguas arriba (**Fig. 3**).

Batimetría

La batimetría del área de estudio es una combinación de un levantamiento batimétrico de los últimos 10 km del río realizado en febrero de 2021 y la batimetría marina basada en el conjunto de datos GEBCO 2020, obtenida de <https://download.gebco.net/>. La zona de estudio presenta profundidades comprendidas entre 0.19 y 22.97 m. Siendo la profundidad media ~8.35 m. Las zonas de mayor profundidad están en la zona marina al noreste del área de estudio y las de menor profundidad a lo largo de la línea de costa (**Fig. 3**).

Condiciones de flujo

Para la condición de frontera aguas arriba en el río Sinú se utilizaron los datos de caudal medio diario

(**Fig. 4**). El caudal más alto en el periodo de simulación fue de 409.3 m³/s registrado el 14 de enero de 2021. El día en que se realizaron las mediciones (9 de febrero de 2021), el caudal fue de 188.9 m³/s. Los niveles de agua se establecieron en relación con el nivel medio del mar (m snm).

Condiciones de transporte

En la frontera aguas arriba, se establece una salinidad de 0 ppt (partes por mil), ya que hay afluencia de agua dulce y la concentración de sólidos suspendidos registrados en la estación La Doctrina fue de 150.7 mg/L para el 9 de febrero de 2021. La salinidad en la frontera abierta en el mar se estableció en 35 ppt y la concentración de sedimentos en 0 mg/L.

Parámetros del modelo

Para el transporte de sedimentos se utiliza la relación de van Rijn (van Rijn 1984); una densidad específica de $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ y un D₅₀ de 200 μm . Otros parámetros físicos empleados para la simulación hidrodinámica y el transporte de sedimentos se especifican en el **cuadro II**.

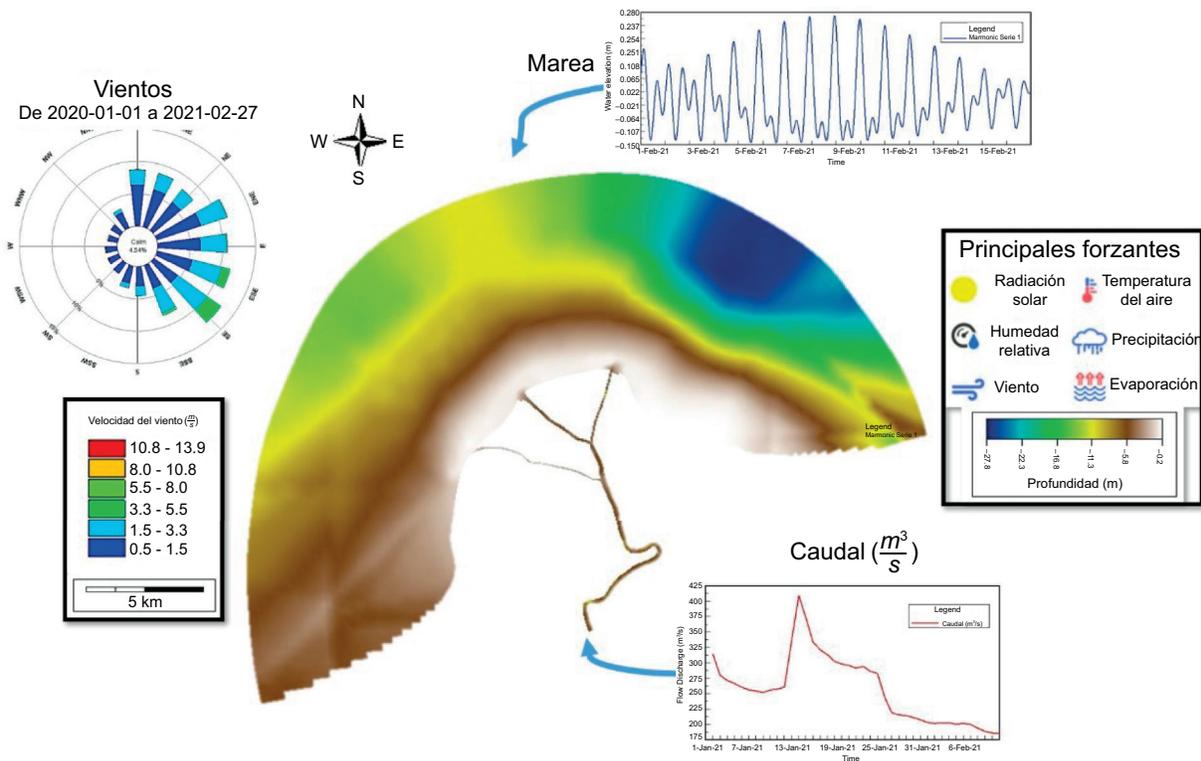


Fig. 3. Forzantes y condiciones de frontera.

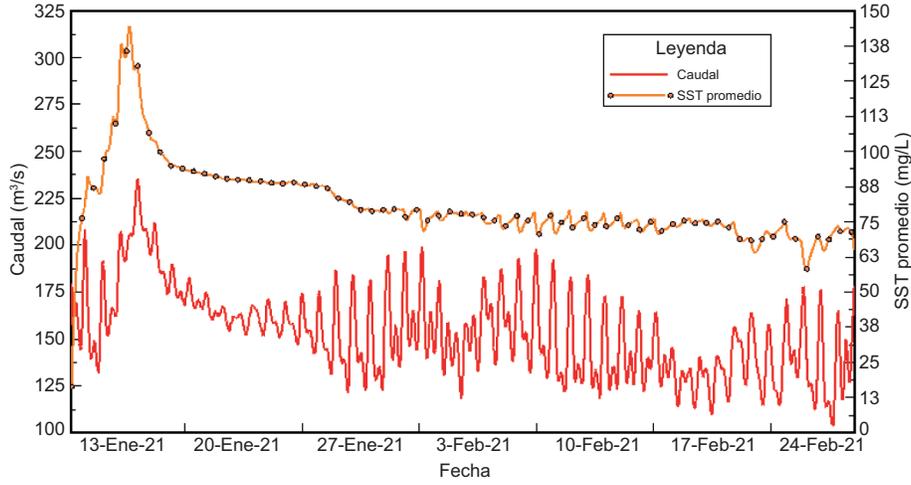


Fig. 4. Caudales y concentración de SST en la estación La Doctrina.

CUADRO II. DATOS DE ENTRADA Y PARÁMETROS CLAVE PARA EL MÓDULO HIDRODINÁMICO Y EL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Parámetro	Valor
Periodo de simulación	Ene-10 a Feb-26 de 2021
Paso del tiempo (Timestep), Δt (s)	1.0
Rugosidad del fondo, coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	0.015
Viscosidad de remolino horizontal (m^2/s)	0.15
Difusividad de momento horizontal (adimensional)	0.0025
Viscosidad de remolino vertical (m^2/s)	1×10^{-5}
Difusividad molecular vertical (m^2/s)	1×10^{-6}
Sedimentos y morfología	
Velocidad de sedimentación (m/s)	2×10^{-5}
Esfuerzo cortante crítico de erosión (m^2/s^2)	1×10^{-8}
Esfuerzo cortante crítico de asentamiento (m^2/s^2)	10
Tasa de erosión superficial de referencia ($g/m^2/s$)	0.0005

Validación del modelo

Para verificar la calidad de la solución numérica con respecto a los datos observados, los resultados del modelo EFDC Explorer se evaluaron utilizando el Índice de Concordancia (d), que es una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo que varía entre 0 y 1. El índice de concordancia (Ec. 11) representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial. Un valor de 1 indica una coincidencia perfecta y 0 indica que no hay concordancia en absoluto (Willmott 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}; \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (11)$$

Donde O_i son los datos observados, P_i los datos predichos o modelados, y \bar{O} es la media de los datos observados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración de la salinidad

Entendiendo que la hidrodinámica en este tipo de sistemas estuarinos está influenciada fuertemente por la salinidad, para verificar la hidrodinámica se compararon los resultados modelados de salinidad con lo observado en campo. Las mediciones de salinidad se tomaron en los puntos mostrados en la **figura 1**.

Además de comparar la variación longitudinal de la salinidad desde la desembocadura hasta el km

6.2 aguas arriba (Fig. 5), se comparó la variación vertical de la salinidad en diferentes puntos de las tres bocas del delta (Fig. 6). La salinidad modelada concuerda bien con los datos observados en términos de magnitud y tendencia.

En la comparación longitudinal se obtuvieron valores de $d > 0.89$, que muestran un muy buen ajuste del modelo y reproduce muy bien la dinámica de la salinidad durante esta temporada. En las comparaciones de variación vertical de la salinidad, se obtuvieron valores de índice de concordancia muy cercanos a la unidad, tal es el caso de los puntos Md1 y Md2 donde sus valores fueron de $d = 0.89$ y 0.93 , en los puntos de control C1 y C2; $d = 0.83$ y 0.84 ; en los puntos M1 y M2 valores de $d = 0.71$ y 0.84 , siendo el punto M1 donde se obtuvo el menor ajuste, pese a esto, de acuerdo con la clasificación del índice se considera un ajuste bueno.

Distribución espacial de sedimentos

Debido a la falta de observaciones en campo de SST en el área de estudio, para validar los resultados del módulo de transporte de sedimentos, los SST calculados por el modelo se compararon con imágenes de satélite Sentinel 2 de diferentes fechas dentro del periodo simulado. Se seleccionaron imágenes con poca nubosidad para observar claramente la dispersión de sedimentos cerca de las desembocaduras del río.

En la figura 7 se muestra esta comparación para las fechas 21 y 25 de enero, y 26 de febrero de 2021. Se puede observar que los resultados del modelo reflejan adecuadamente el comportamiento y dispersión superficial de los sedimentos en el mar, con grandes similitudes a la dispersión observada en las imágenes satelitales. La distribución espacial de los SST es en gran medida consistente con la mostrada en las

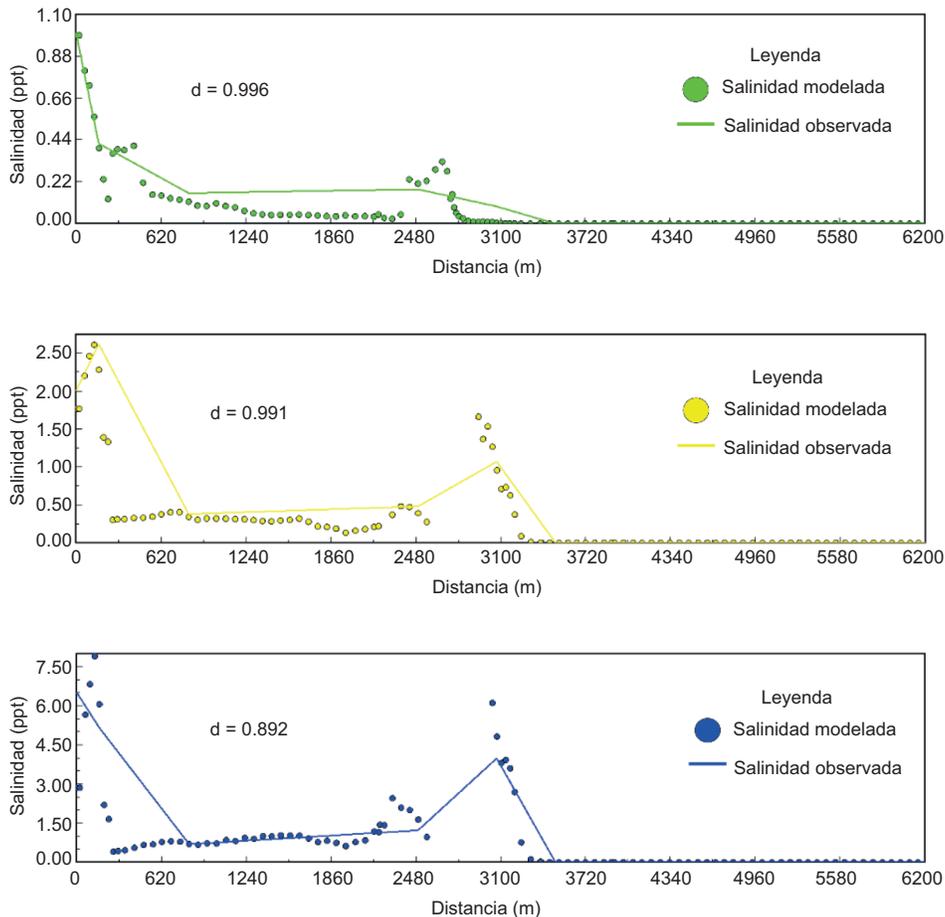


Fig. 5. Comparación de perfiles longitudinales de salinidad del agua a nivel de superficie (arriba), promediada en la vertical (centro) y nivel de fondo (abajo) en el brazo del medio.

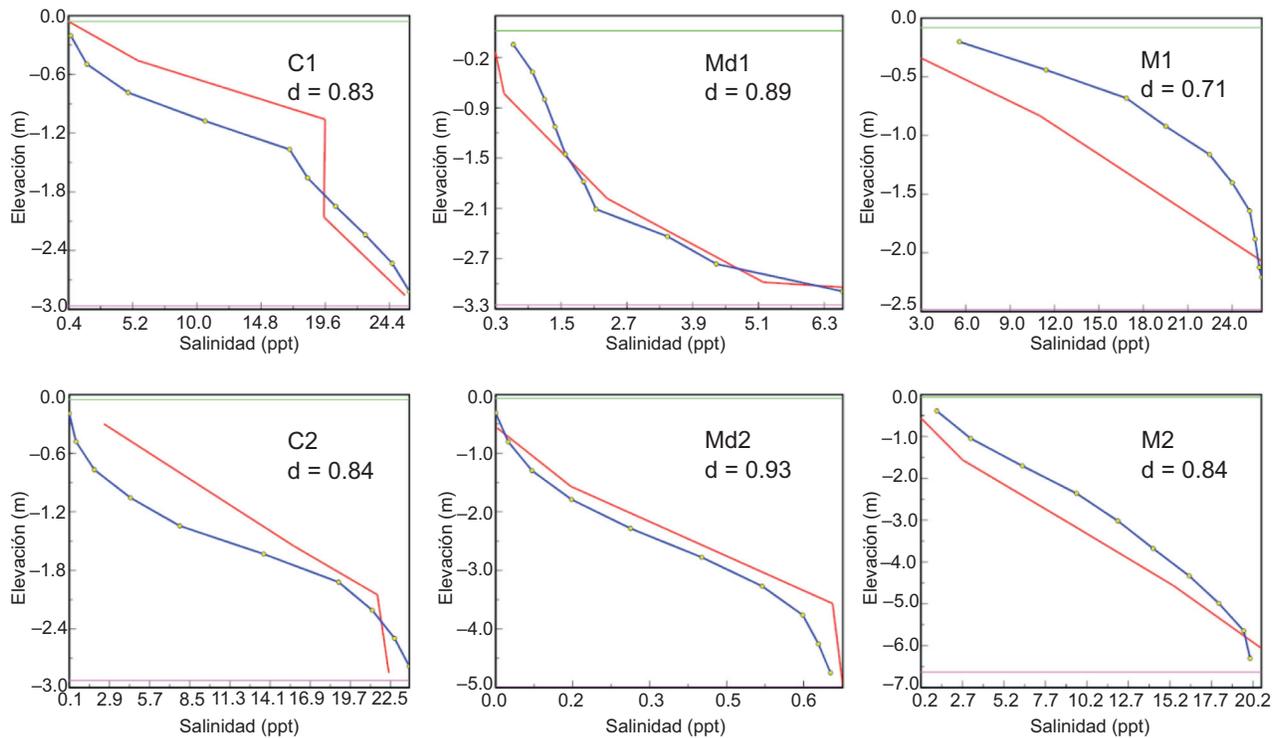


Fig. 6. Comparación de perfiles verticales de salinidad. La línea azul con puntos es la salinidad modelada y la línea roja la observada en los tres brazos del delta: M1, M2) brazo Mireya; Md1, Md2) brazo Medio, y C1, C2) brazo Corea.

imágenes Sentinel 2 (**Fig. 7**), lo que demuestra que el módulo de sedimentos puede reflejar debidamente la dinámica de los sedimentos en el delta del Sinú.

Las áreas con mayor turbidez ubicadas cerca de las desembocaduras, así como las plumas de sedimentos transportadas hacia mar adentro (dirección norte y noroeste), y el transporte debido a la deriva litoral son satisfactoriamente reproducidos por el modelo.

Cambios morfológicos para diferentes escenarios de descarga

Luego de que el modelo fue calibrado y de haber demostrado un desempeño entre muy bueno y satisfactorio en la representación de variables físicas como la salinidad y en la distribución espacial de sedimentos en el frente deltaico del río Sinú, éste se implementó para representar los patrones de dispersión de sedimentos en un evento de alta descarga de sedimentos al mar y observar los cambios morfológicos en el lecho del río y del mar.

Para este caso, se simuló el mes durante el cual se registraron los mayores caudales y concentraciones de sedimentos en los últimos 10 años, que correspondió a julio de 2017. En este mes se presentaron

caudales mayores a $800 \text{ m}^3/\text{s}$ durante varios días, alcanzando un caudal máximo de $807 \text{ m}^3/\text{s}$ con una concentración media de 250 mg/L de SST.

Para comprobar los resultados de la distribución horizontal de los sedimentos superficiales en épocas de lluvia, se realizó la comparación con una imagen Landsat 8 del mismo periodo simulado (**Fig. 8**), observándose también que el modelo reproduce correctamente el comportamiento y dispersión de los sedimentos superficiales bajo condiciones de altos caudales y transporte de sedimentos.

Con el aumento de las descargas (caudal y concentración de sedimentos), la zona frontal activa cerca del delta del río Sinú se ve forzada a moverse hacia mar adentro, formando zonas de depósito más alejadas de la línea de costa, lo cual es más evidente en la desembocadura del Medio y en menor grado en la desembocadura Mireya.

Debido al efecto barrera del frente cortante del mar y a las corrientes costeras de la deriva litoral, la carga pesada de sedimentos solo puede transportarse por el fondo unos pocos metros de distancia, formando zonas de depósito frente a las desembocaduras del río; por otro lado, el transporte superficial ocurre

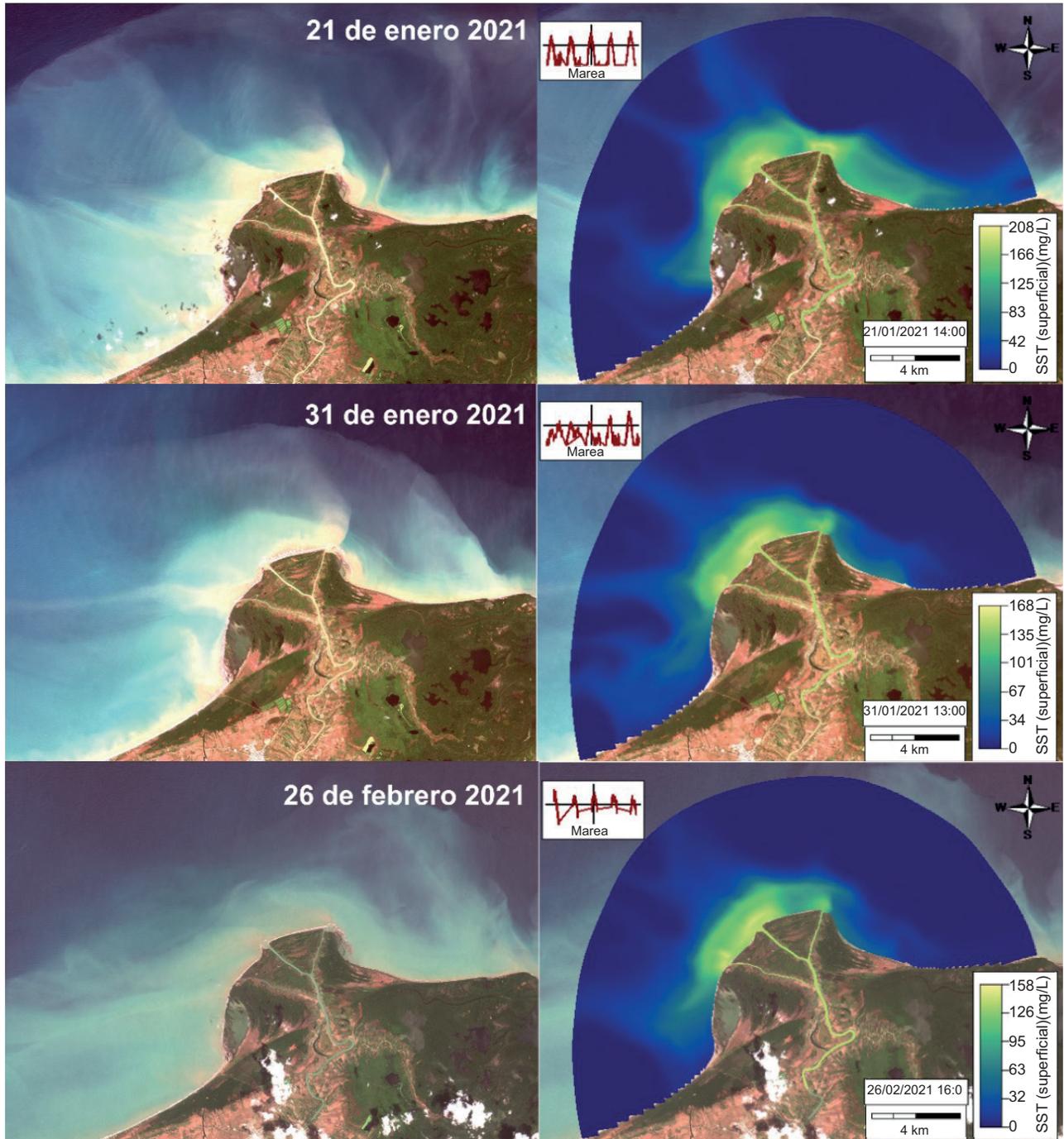


Fig. 7. Distribución espacial de SST en la desembocadura del río Sinú.

con menores concentraciones, pero se transporta hasta largas distancias mar adentro, con dirección predominantes al noroeste (Fig. 9).

Los resultados obtenidos para estas condiciones (época de lluvias), fueron comparados con los obtenidos para febrero de 2021 que representa con-

diciones de época seca con bajos caudales. En estas simulaciones se puede observar que, con descargas superiores a $600 \text{ m}^3/\text{s}$, la erosión y la sedimentación ocurre de manera significativa, principalmente a lo largo del cauce del río y localmente frente a las tres desembocaduras del río.

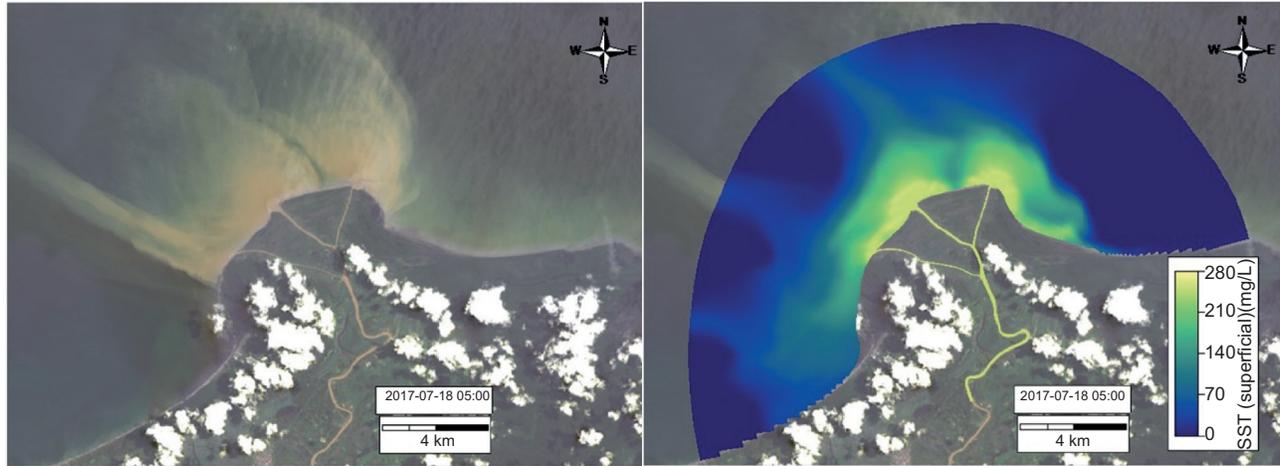


Fig. 8. Distribución espacial de SST en la desembocadura del río Sinú para época de lluvias.

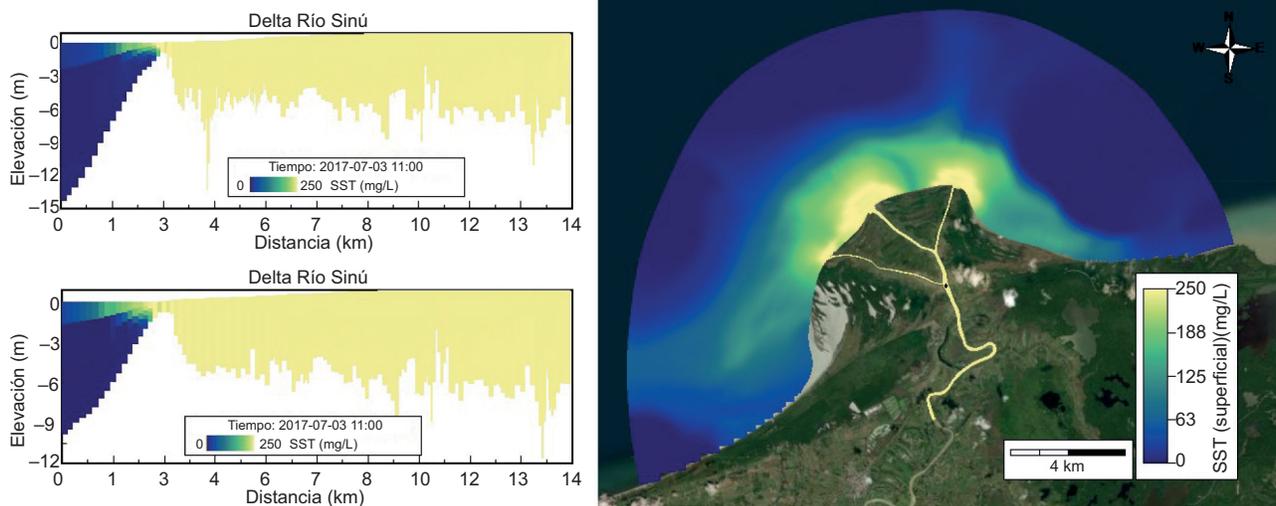


Fig. 9. Distribución horizontal y vertical de SST en las desembocaduras Mireya (izquierda arriba) y del Medio (izquierda abajo) para época de lluvias (julio de 2017).

La figura 10 muestra los cambios finales de nivel del lecho de las simulaciones realizadas (caudales bajos y altos). En la simulación del escenario con caudales bajos (febrero 2021), casi no hay sedimentación ni erosión en todo el tramo de río, pero se observa una importante zona de depósito y aumento del espesor del lecho en las desembocaduras de los brazos Mireya y Medio. Para época húmeda, con caudales que superan los $800 \text{ m}^3/\text{s}$, las tasas de sedimentación y erosión son más altas.

Lo anterior se refleja en los cambios de nivel del lecho del río, que presenta zonas de erosión y sedimentación a lo largo del tramo y zonas de importante

erosión frente a las desembocaduras y en general a lo largo de la línea costera. Sin embargo, los sedimentos tendieron a depositarse en los taludes y las zonas adyacentes de las desembocaduras, independientemente de la época y descarga de flujo y SST.

CONCLUSIONES

Se construyó un modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos completo del delta del río Sinú para investigar los procesos de flujo y sedimentarios en un sistema estuarino micromareal geográficamente

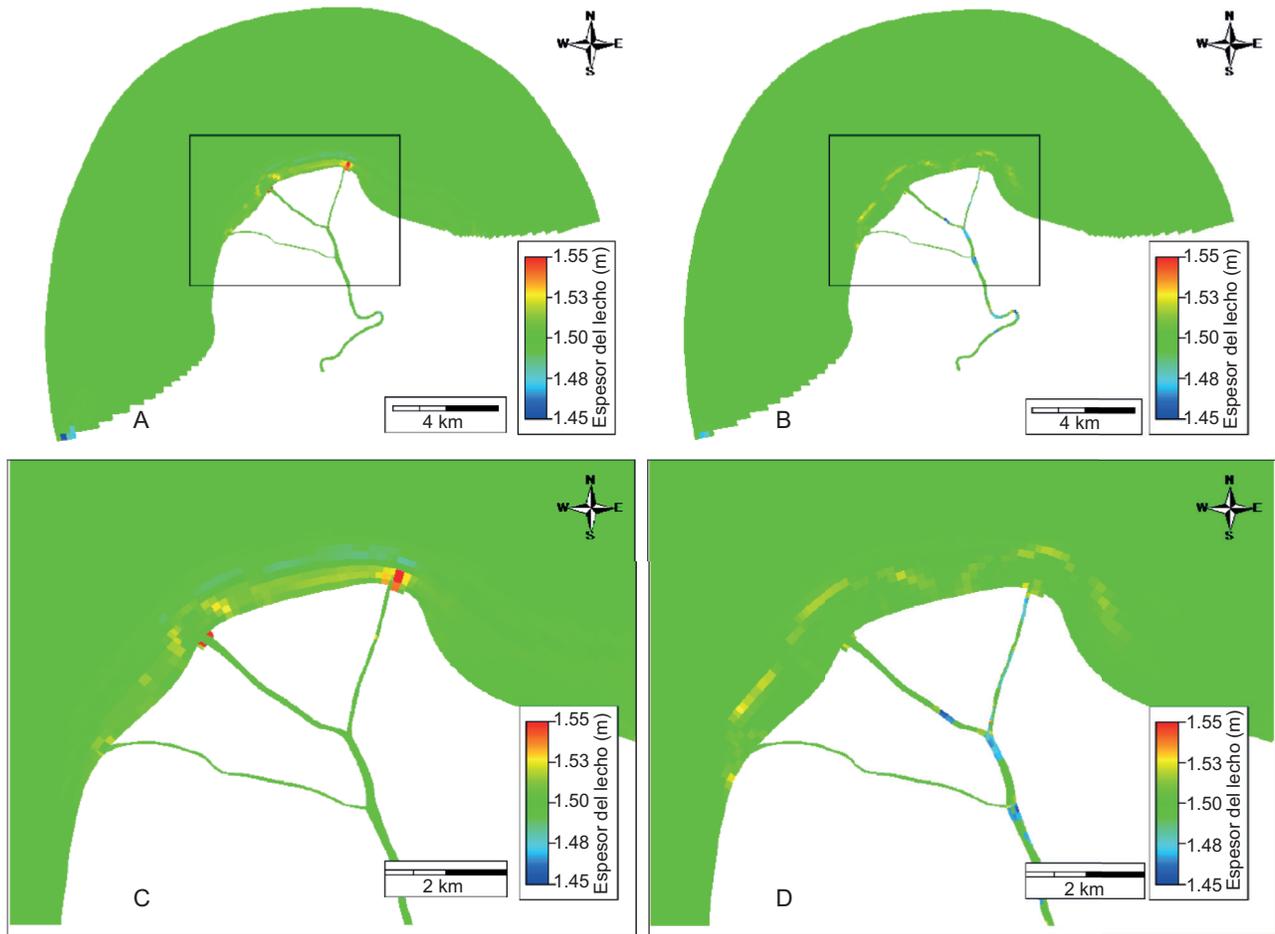


Fig. 10. Cambio del nivel del lecho modelados con diferentes escenarios de descarga: época seca (a y c) y época húmeda (b y d).

complejo. Se obtuvieron buenos resultados en la calibración y validación, por consiguiente, es una herramienta confiable para evaluar cambios en los patrones de circulación y distribución de sedimentos en este tipo de sistemas costeros bajo diferentes escenarios. Varios parámetros físicos como la velocidad de sedimentación, el cortante crítico de erosión y la viscosidad de remolino horizontal y vertical, fueron fundamentales durante la calibración para ajustar el modelo a los datos observados en campo.

Aunque los resultados que se presentan son principalmente cualitativos, permitieron dar una idea general del comportamiento del modelo, además de representar la distribución de sedimentos superficiales y cambios en el lecho ocasionados por procesos de erosión y sedimentación o acreción.

El estudio demuestra que la modelación numérica es una herramienta apropiada para evaluar los procesos costeros y la dinámica de transporte de sedimentos, que

en conjunto con datos de campo contribuye de manera relevante al manejo integrado de zonas costeras.

Finalmente, se recomienda realizar estudios que involucren un mayor número de parámetros, así como monitoreos más extensos para mejorar la sensibilidad del modelo y abarcar las diferentes épocas climáticas y condiciones ambientales en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Abella-Castaño L. y Vergara-Barrero G. (2018). Modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio el Banco, Magdalena (Colombia). Tesis de pregrado de Ingeniería. Facultad de ingeniería ambiental. Universidad Santo Tomas. Bogotá, Colombia, 113 pp.
- Amoudry L. y Liu P.L.F. (2010). Parameterization of near-bed processes under collinear wave and current flows from a two-phase sheet flow model. *Continen-*

- tal Shelf Research 30 (13), 1403–1416. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.04.009>
- Arakawa A. y Lamb V. (1977). Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Model. *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications* 17, 173-265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4>
- Bai S. y Lung WS. (2005). Modeling sediment impact on the transport of fecal bacteria. *Water Research* 39 (20), 5232–5240. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.013>
- Barragan J. y de Andres M. (2016). Expansión urbana en las áreas litorales de América latina y Caribe. *Revista de geografía Norte Grande* (64), 129-149. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200009>
- Brand A., Lacy J.R., Hsu K., Hoover D., Gladding S. y Stacey M.T. (2010). Wind-enhanced resuspension in the shallow waters of south San Francisco Bay: Mechanisms and potential implications for cohesive sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115. <https://doi.org/10.1029/2010JC006172>
- Clark J.B., Wen L. y Hood, R.R. (2017). Estuarine sediment dissolved organic matter dynamics in an enhanced sediment flux model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122 (10), 2669-2682. <https://doi.org/10.1002/2017JG003800>
- Coleman J.M. (1981). *Deltas: Processes of deposition and models for exploration*. 2da ed, Burgess Publishing Company, California, EUA. 124 pp.
- Craig P.M., Chung N.T., Lam P.H. y Tinh N.X. (2014). Sigma-Zed: A computationally efficient approach to reduce the horizontal gradient error in the EFDC's vertical sigma grid. *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics*. Singapur, 19 - 24 octubre, 2014.
- CVS (2014). Plan de acción para la temporada invernal en el departamento de Córdoba - Pati. Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge. Montería, Colombia, 180 pp.
- Espinosa G. (2008). Estudio teórico y práctico de la cuña salina: régimen estacionario y transitorio. Tesis de Doctorado. Universidad de Cantabria. Cantabria, España, 219 pp.
- Fossati M., Santoroa P., Mosqueraa R., Martíneza C., Ghiardoa F., Ezzattib P., Pedocchia F. y Piedra-Cuevai I. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. *Revista Iberoamericana del Agua* 1 (1), 148-63. [https://doi.org/10.1016/S2386-3781\(15\)30007-4](https://doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30007-4)
- Galloway W. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogist (SEPM)* 31, 127-156.
- Gao S., Wang Y. y Gao J. (2011). Sediment retention at the Changjiang sub-aqueous delta over a 57-year period, in response to catchment changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 95 (1), 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.07.015>
- Gensac E., Martínez J.M., Vantrepotte V. y Anthony E.J. (2016). Seasonal and interannual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon River: the role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Continental Shelf Research* 118, 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.009>
- Hamrick J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. *Special report in applied marine science and ocean engineering* (317). <https://doi.org/10.21220/V5TT6C>
- Hoitink A.J.F., Wang Z.B., Vermeulen B., Huismans Y. y Kästner K. (2017). Tidal controls on river delta morphology. *Nature Geoscience* 10, 637–645. <https://doi.org/10.1038/ngeo3000>
- Jeong S.; Yeon K.; Hur Y. y Oh K. (2010). Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River. *Journal of Environmental Science* 22 (6), 934-939. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60201-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60201-1)
- Ji Z.G. (2017). *Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries*. 2da ed, Wiley-Interscience, EUA. 581 pp.
- Ji Z.G., Hamrick J.H. y Pagenkopf J. (2002). Sediment and metal modeling in shallow river. *Journal of Environmental Engineering* 128 (2), 105-119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:2(105))
- Ji Z.G., Hu G., Shen J. y Wan Y. (2007). Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73 (1-2), 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.12.016>
- Ji Z.G., Morton M.R. y Hamrick J.M. (2001). Wetting and drying simulation of estuarine processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 53 (5), 683-700. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0818>
- Le V.S., Yamashita T., Okunishi T., Shinohara R. y Miyatake M. (2006). Characteristics of suspended sediment material transport in the Ishikari Bay in snowmelt season. *Applied Ocean Research* 28 (4), 275-89. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2006.11.001>
- Leonardi N., Canestrelli A., Sun T. y Fagherazzi, S. (2013). Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Ocean* 118 (9), 4169-4183. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20302>
- Leonardi N., Kolker A.S. y Fagherazzi S. (2015). Interplay between river discharge and tides in a delta distributary.

- Advances in Water Resources 80, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.03.005>
- Li G., Xu K., Xue Z.G., Liu H. y Bentley S.J. (2021). Hydrodynamics and sediment dynamics in Barataria Bay, Louisiana, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 249. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107090>
- López S.A. y Restrepo J.D. (2007). Modelos morfodinámicos de los deltas fluviales colombianos. *Boletín de Geología* 29 (1), 1-11.
- Lumborg U. y Pejrup M. (2005). Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon an annual budget. *Marine Geology* 218 (1-4), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.03.015>
- Lv C., Zhang F.J., Liu Z. Y., Hao S. L. y Wu, Z.B. (2013). Three-dimensional numerical simulation of sediment transport in Lake Tai based on EFDC model. *Journal of Food Agriculture and Environment* 11 (2), 1343–1348.
- Maloney J.M., Bentley S.J., Xu. K, Obelcz J., Georgiou I. y Miner D.M. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology* 400, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001>
- Moustafa M.Z. y Hamrick J.M. (2000). Calibration of the Wetland Hydrodynamic Model to the Everglades Nutrient Removal Project. *Water Quality and Ecosystem Modeling* 1, 141-167. <http://doi.org/10.1023/A:1013938700446>
- Nienhuis J.H., Ashton A.D., Edmonds D.A., Hoitink A.J.F., Kettne A.J., Rowland J.C., y Törnqvist T.E. (2020). Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. *Nature* 557, 514–518. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1905-9>
- Oliveros-Acosta J., Escobar-Vargas J., Yossef M., Sanchez J., Cardona C. y Garay C. (2015). Numerical simulation of flow and sediment transport dynamics on the Magdalena River section of Barrancabermeja-la Coquera (Colombia). *Memorias. XXXVI IAHR World Congress. La Haya, Países Bajos. 28 de junio al 3 de julio, 2015.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2673.3925>
- Peruzzo F., Riccardi G. y Basile P. (2017). Análisis de las modificaciones en la hidrodinámica en un tramo del río Paraná inferior mediante la aplicación del modelo matemático telemac-2D. *Cuadernos del CURIHAM* 23, 35-49. <https://doi.org/10.35305/curiham.v23i0.29>
- Qi J., Yang Z. y Shen Z. (2012). Three-dimensional modeling of sediment transport in the Wuhan catchments of the Yangtze River. *Procedia Environmental Sciences* 13, 2437–2444. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.232>
- Restrepo J.D. y Kjerfve B. (2000). Magdalena river: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology* 235 (1-2), 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)
- Restrepo-López J.C., Ortiz-Royero J.C., Otero-Díaz L. y Ospino-Ortiz S.R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 39 (153), 527-546. <https://doi.org/10.18257/raccefy.209>
- Robertson K. y Chaparro J. (1998). Evolución histórica del delta del río Sinú. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 7 (1-2), 70-86.
- Ruiz-Ochoa M., Bernal G. y Polanía J. (2016). Influencia del río Sinú y el mar Caribe en el sistema lagunar de Cispatá. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras* 31 (1), 31-51. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2008.37.1.180>
- Torregroza-Espinosa A.C., Restrepo-López J.C., Correa-Metrio A., Hoyos N., Escobar J., Pierini J. y Martínez J.-M. (2020). Fluvial and oceanographic influences on suspended sediment dispersal in the Magdalena River Estuary. *Journal of Marine Systems* 204 (0924-7963). <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103282>
- Torres-Bejarano F., Padilla-Coba J., Rodríguez-Cuevas C., Ramírez-León H. y Cantero R. (2016). The hydrodynamic modelling for the water management of the Reservoir Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 32 (3), 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Torres-Parra R.R., Otero-Díaz L.J., Franco F.A. y Rocha, L.M. (2008). Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH* (26), 8-21. <https://doi.org/10.26640/22159045.172>
- Valbuena D. (2017). Geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del río Sinú. Integración multiescalar 1945 – 1999 – 2016. Tesis de Maestría. Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. 194 pp.
- van Maren D.S. (2007). Grain size and sediment concentration effects on channel patterns of silt-laden rivers. *Sedimentary Geology* 202 (1-2), 297-316. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.04.001>
- van Rijn L.C. (1984). Sediment transport: Part I: bed load transport; part II: suspended load transport; part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (10,11,12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733))
- Walling D.E. y Fang D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39, 111-126. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00020-1)

- Wang C., Shen C., Wang P.-F., Qian J., Hou J. y Liu, J.-J. (2013). Modeling of sediment and heavy metal transport in Taihu Lake, China. *Journal of Hydrodynamics* 25 (3), 379-387. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(11\)60376-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(11)60376-5)
- Wang H., Bi N., Saito Y., Wang Y., Sun X. y Zhang J. (2010). Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary. *Journal of Hydrology* 391 (3-4), 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.030>
- Willmott C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography* 2 (2), 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Xu T. y You X.-Y. (2017). Numerical simulation of suspended sediment concentration by 3D coupled wave-current model in the Oujiang River Estuary, China. *Continental Shelf Research* 137, 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.021>
- Zhang C., Zheng J.-H., Wang Y.-G., Zhang, M.-T., Jeng, D.-S. y Zhang J.-S. (2011). A process-based model for sediment transport under various wave and current conditions. *International Journal of Sediment Research* 26 (4), 498-512. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(12\)60008-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60008-0)
- Zhu L., Gong W., Zhang H., Huang W. y Zhang R. (2020). Numerical study of sediment transport time scales in an ebb-dominated waterway. *Journal of Hydrology* 591. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125299>
- Zou R, Carter S, Shoemaker L, Parker A, y Henry T. (2006). Integrated Hydrodynamic and Water Quality Modeling System to support nutrient total maximum daily load development for Wissahickon Creek. Pennsylvania. *Journal of Environmental Engineering*. 132 (4), 555-566. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:4\(555\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:4(555))