

Modelación de la intrusión salina en el delta del río Sinú, Córdoba*

Modeling of saltwater intrusion in the sinú river Delta, Córdoba.

Recibido: marzo 15 de 2021 - Evaluado: mayo 10 de 2021 - Aceptado: junio 10 de 2021

Franklin M. Torres-Bejarano **
Javier A. González-Martínez ***
Jolaine S. Rodríguez-Pérez ****

Para citar este artículo / To cite this Article

Franklin M. Torres-Bejarano, Javier A. González-Martínez, Jolaine S. Rodríguez-Pérez “Modelación de la intrusión salina en el delta del río Sinú, Córdoba” Revista de Ingenierías Interfaces, vol. 4, no. 2, pp.1-18, 2021.

Resumen

Este trabajo presenta la aplicación de un modelo numérico 3D para simular la intrusión de cuña salina en el delta del Río Sinú, Colombia. Se implementó el sistema de modelación EFDC Explorer, que resuelve las ecuaciones de movimiento y de transporte, específicamente para: determinar la dinámica y alcance de la cuña salina en el río Sinú, y a su vez simular escenarios de época seca y lluviosa. 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 una importante intrusión de la salinidad en época seca, así como la estratificación de la columna de agua; mientras que para época de lluvias no hubo penetración de la cuña salina.

Palabras clave: modelo hidrodinámico, intrusión salina, EFDC Explorer.

*Artículo inédito: “Desarrollo de un sistema de adquisición de parámetros ambientales en los estanques piscícolas basado en IoT”.

**Correo electrónico: franklintorres@correo.unicordoba.edu.co

Abstract

This work presents the application of a 3D numerical model to simulate the saltwater wedge intrusion in the Sinú River delta, Colombia. The EFDC Explorer modeling system was implemented, which solves the motion and transport equations, specifically to: determine the dynamics and scope of the saltwater wedge in the Sinú River, and in turn simulate dry and rainy season scenarios. The model was configured with field measured data and with secondary data from national environmental agencies. The calibration was verified using the Index of Agreement, achieving a good fit for the considered variables. The results showed an important salinity intrusion in dry season, as well as the stratification of the water column; while for wet season there was no saltwater wedge intrusion.

Keywords: hydrodynamic model, saltwater wedge, EFDC Explorer.

1. Introducción

Los ecosistemas estuarinos son sistemas muy dinámicos, que se encuentran localizados en zonas costeras; son descritos como cuerpos de agua semicerrados, ubicados en la interfaz entre la parte continental y el océano, en donde el agua de mar es diluida hasta cierto punto por el agua de río [1]. En su comportamiento y dinámica se involucran factores físicos y meteorológicos, y se caracterizan por la variabilidad espacial y temporal de las condiciones físicas (iluminación, temperatura, turbidez, pH, corriente), químicas (oxígeno disuelto, minerales, residuos industriales, etc.) y biológicas (densidad de las poblaciones, presencia de plancton y necton inconstantes, etc.) [2]-[4].

Los estuarios han sido clasificados con base en diferentes criterios; de acuerdo con la distribución horizontal y vertical de la salinidad, se encuentra la clasificación de estuarios altamente estratificados o de cuña salina, en donde la diferencia de densidades del agua dulce y agua salada generan estratificación, ubicándose en la parte inferior el agua marina que es más densa, y puede penetrar en dirección aguas arriba de un río [5], [6]. La dinámica de estos ecosistemas está controlada principalmente por las interacciones de las mareas, los caudales de los ríos y las corrientes costeras, que están sujetas a cambios climáticos y actividades antropogénicas [4], de modo que la posición y dinámica de la cuña salina es el resultado del equilibrio entre el caudal del río y las fuerzas marinas [7].

El área de estudio de la presente investigación es la zona deltaica del río Sinú, y está caracterizada por ser un sistema influenciado por el oleaje, con mareas diurnas que se encuentran en el rango de estuarios micromareales, siendo estas características propias de los estuarios nominados de cuña salina [6], [8], [9], [10].

Debido al crecimiento y desarrollo de las poblaciones en las zonas costeras se han presentado alteraciones en los ecosistemas estuarinos, que juntamente con la influencia del cambio climático, contribuyen a que se generen grandes impactos en el desarrollo y dinámica de la cuña salina [11].

Las variaciones que se presentan en la cuña salina se dan de acuerdo al comportamiento de las variables de la cual depende su dinámica, esto puede generar problemáticas de intrusión salina que se evidencian cuando la descarga del río es menor a la habitual o se aumente el nivel de mar, ocasionando impactos medioambientales y socioeconómicos en la zona de influencia, que amenazan la calidad del agua continental y ponen en riesgo el suministro de agua municipal, industrial y agrícola [12].

Los modelos hidrodinámicos han sido utilizados para el estudio de intrusión de la cuña salina, simulando la dinámica de la cuña salina para obtener información de su comportamiento; esta información se obtiene por medio de programas y software de modelación, como el MIKE 21, EFDC, POM y DELFT3D [13], [14], [15], [16], [17], [18], siendo el EFDC uno de los modelos más ampliamente utilizado en los últimos años para distintas aplicaciones, y especialmente para estudiar el transporte de agua salada en ríos y zonas estuarinas [17], [19], [20]; por tanto, en esta investigación se analizó la dinámica de la cuña salina en la zona deltaica del río Sinú utilizando el modelo tridimensional EFDC Explorer para la identificación de las variaciones de la dinámica de la cuña salina y sus posibles efectos en el aprovechamiento del recurso hídrico.

2. Materiales y Métodos

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; su cuenca aportante tiene un área alrededor de 13952 km². Este afluente importante del Caribe colombiano nace en el Nudo del Paramillo a una altura alrededor de 3700 msnm, 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 (Figura. 1) [21].

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 [22], desde el inicio del nuevo tramo, se han venido presentando problemas de erosión costera en la zona [23], y se ha evidenciado un considerable aumento de la población [24].

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 [25].

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.

Con el fin de contar con datos para calibración y validación 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 ECHOMAP 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 (Figura 1).

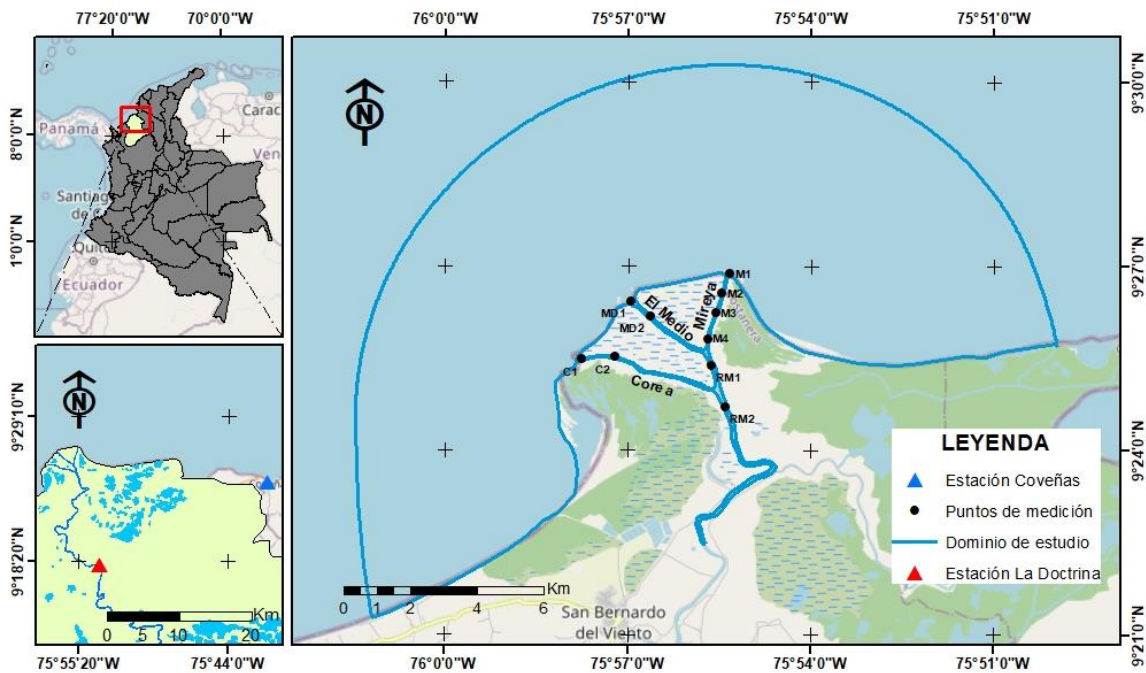


Figura 1. Localización de la zona de estudio y ubicación de puntos de medición.
Fuente: Autores.

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 [26]; posteriormente, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su sigla en inglés) continuó soportando el desarrollo y se convirtió de dominio público. La versión utilizada en este trabajo es EFDC Explorer 10.2, 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 [27].

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 [13],[28],[29]. 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 medio ambiente [30], [13], [31].

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 [26].

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 [26].

Ecuaciones de movimiento

$$\frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v u)}{\partial y} + \frac{\partial(m w u)}{\partial z} - \left(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial x} - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial \pi} + \frac{\partial}{\partial \pi} \left(m \frac{1}{H} A_V \frac{\partial u}{\partial \pi} \right) + Q_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvv)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial y} - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \quad (2)$$

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 representan 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

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

Ecuación de transporte para salinidad y temperatura

$$\frac{\partial(mHS)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuS)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvS)}{\partial y} + \frac{\partial(mwS)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_S \quad (5)$$

$$\frac{\partial(mHT)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuT)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvT)}{\partial y} + \frac{\partial(mwT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad (6)$$

Dónde:

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^2T^{-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^2T^{-1}
Q	Difusión con la intensidad turbulenta	L^2T^{-1}
l	Escala longitudinal turbulenta	L
A_u	Difusión vertical	L^2T^{-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	

Configuración del modelo y de la malla numérica

El modelo EFDC Explorer se aplicó en un dominio de estudio que incluye un tramo del río Sinú desde 11 km aguas arriba de la desembocadura hasta 6 km mar a dentro; la zona marina modelada cubre un área de 165 km² aproximadamente. La malla numérica utilizada para el delta y la zona costera 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 (Figura 2).

La malla se ajustó adecuadamente a las sinuosidades del río, además, se mantuvo lo más uniforme y ortogonal posible para minimizar problemas numéricos [32]. La malla fue construida utilizando el software CVLGrid 1.1, desarrollado por DSI International.

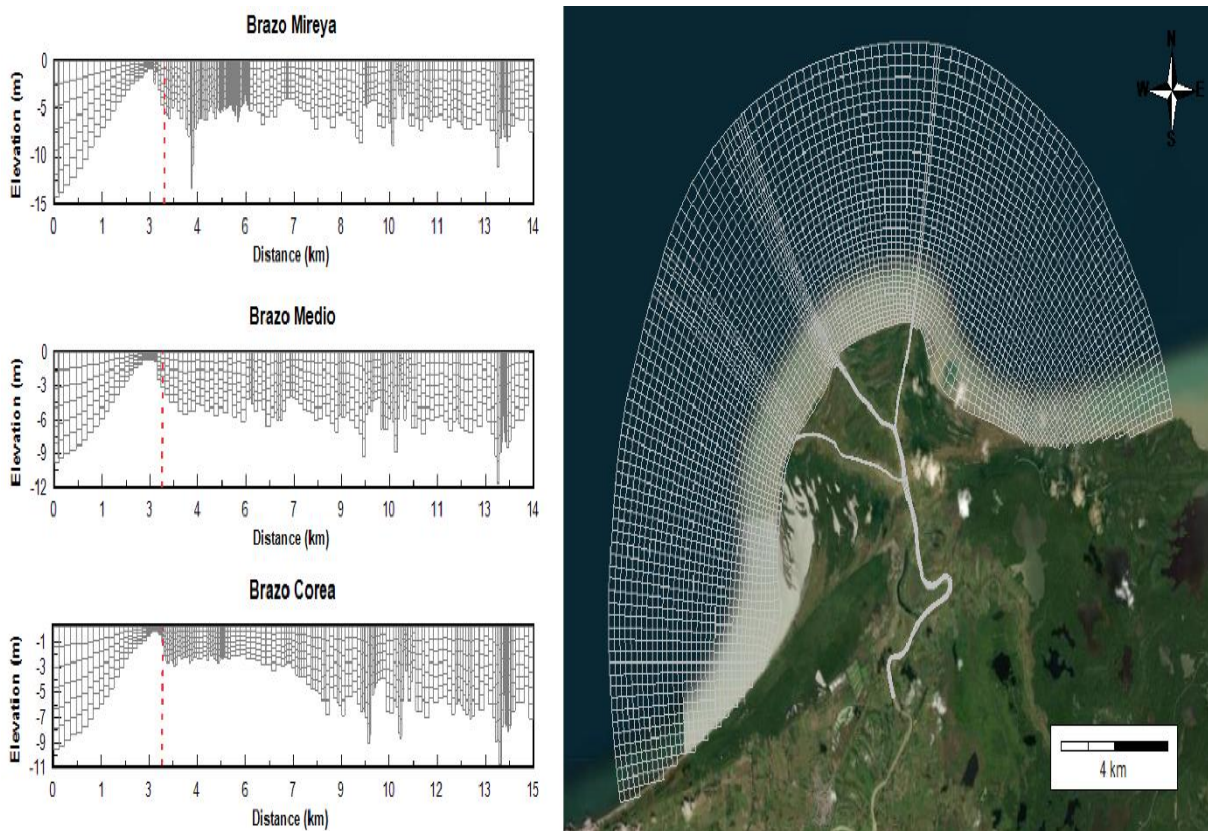


Figura 2. Dominio computacional con malla 2D horizontal (derecha) y malla vertical (izquierda); la línea roja punteada indica la desembocadura de cada brazo.

Fuente: Autores.

Para modelos 3D, hay dos tipos de capas de cuadrícula vertical disponibles en EFDC Explorer: Capas Sigma Zed (SGZ) y malla estándar Sigma [33], [34]. 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

La malla vertical consta de 6 capas equidistantes. 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, definido 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 (Tabla I) [35]; las condiciones meteorológicas dependiendo el periodo climático, e.g. los vientos, se incluyen en la simulación con una serie temporal de velocidades y direcciones del viento a intervalos de 1 hora, registrados en la estación Coveñas (Figura1); y los aportes de aguas continentales representados por el caudal del río Sinú en la frontera aguas arriba (Figura 3).

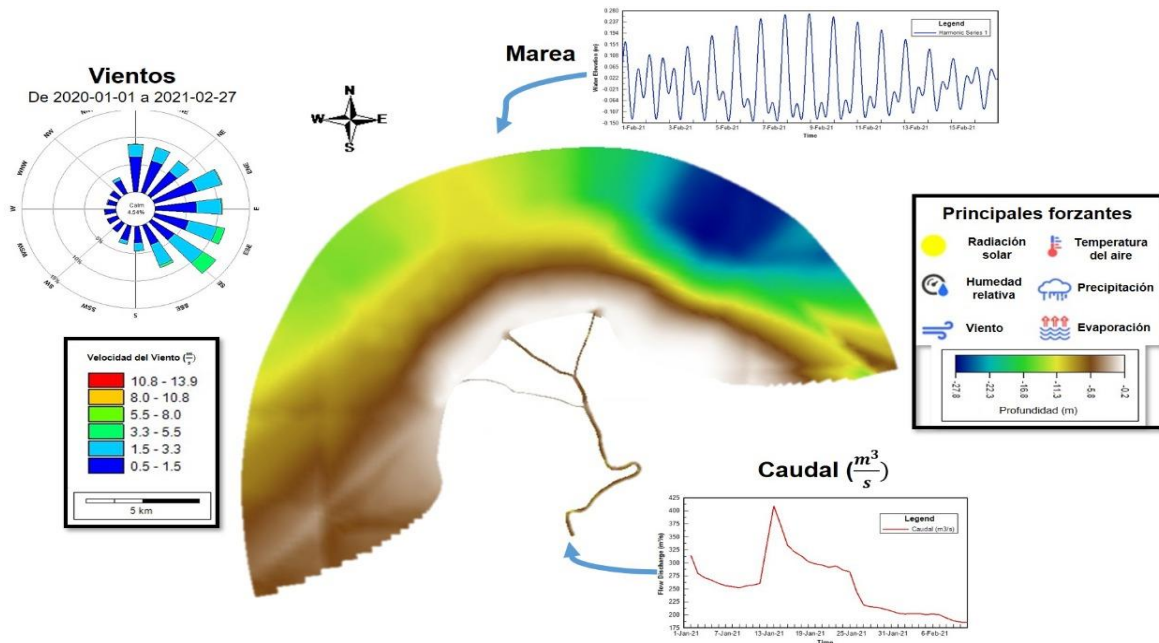


Figura 3. Forzantes y condiciones de frontera

Tabla 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

Batimetría

La batimetría del área de estudio es una combinación de un levantamiento batimétrico de los últimos 11 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 (Figura 3).

Condiciones de flujo

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

Parámetros del modelo

Para el transporte de sedimentos se utiliza la relación de van Rijn [36]; una densidad específica de $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ y un D_{50} de $200 \mu\text{m}$. Otros parámetros físicos empleados para la simulación hidrodinámica y el transporte de sedimentos se especifican en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Datos de entrada y parámetros clave para el módulo hidrodinámico

Parámetro	Valor
Periodos de simulación	Feb 2021 (secas)- Jul. 2017 (lluvias)
Paso del tiempo (Timestep), Δt (s)	1.0
Rugosidad del fondo, coeficiente de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)	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}

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 (Ecuación 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 [37].

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

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

3. Resultados

Calibración de la salinidad

Entendiendo que la hidrodinámica en este tipo de sistemas estuarinos está influenciada fuertemente por la salinidad, para validar 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 4.2 aguas arriba (Figura 4), se comparó la variación vertical de la salinidad en diferentes puntos de las tres bocas del delta (Figura 5). La salinidad modelada concuerda bien con los datos observados en términos de magnitud y tendencia.

En la comparación longitudinal se obtuvieron valores de $d > 0.85$, 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 $d = 0.775$ y 0.675 en los puntos de control M2 y M3; $d = 0.715$ en el punto MD2 y $d = 0.674$ en el punto C1.

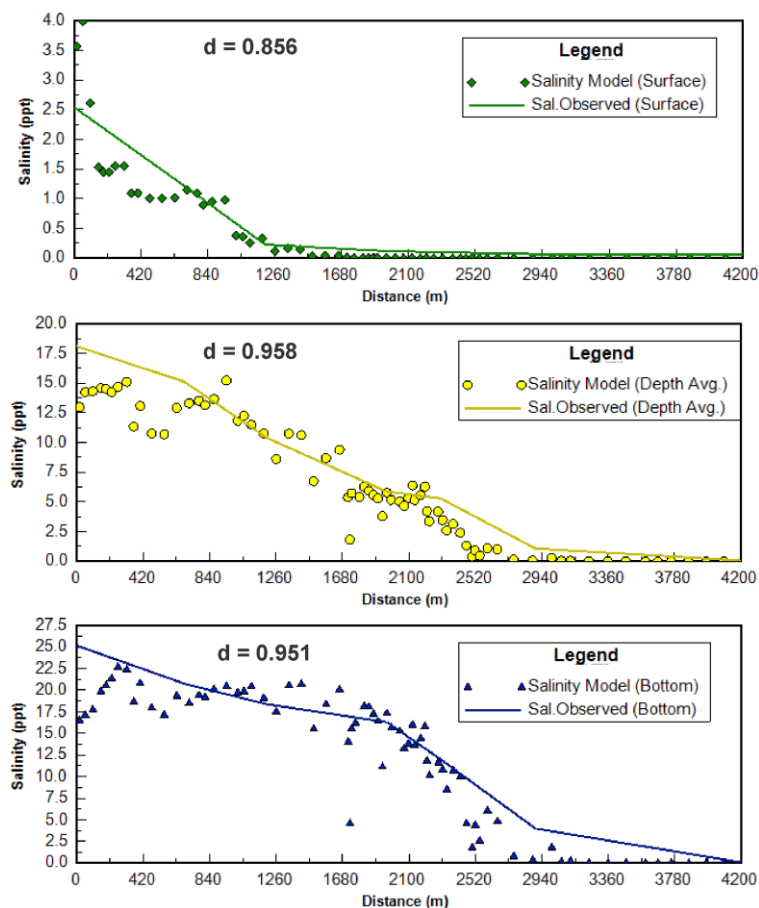


Figura 4. Comparación de perfiles longitudinales de salinidad del agua a nivel de superficie (arriba), promediada en la vertical (centro) y nivel de fondo (abajo)

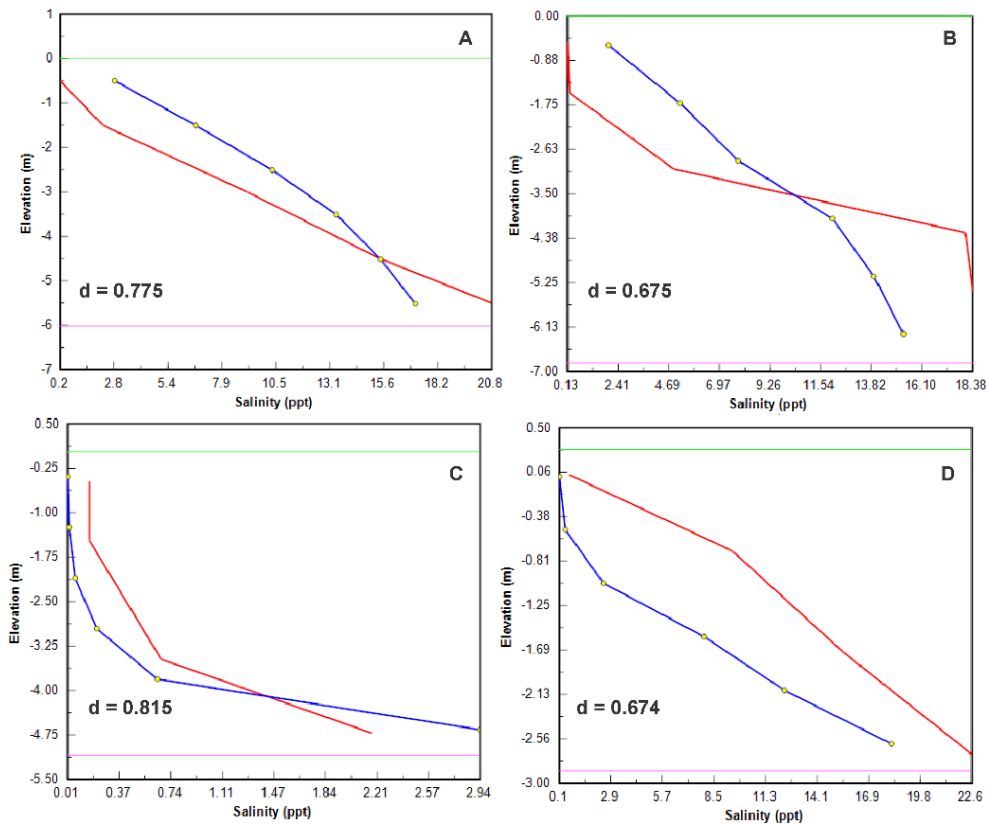


Figura 5. Comparación de perfiles verticales de salinidad. La línea azul con puntos es la salinidad modelada y la línea roja la observada en los tres brazos del delta: A, B) brazo Mireya, puntos M2 y M3; C) brazo Medio, punto MD 2, y D) brazo Corea, punto C1

Modelación de la intrusión salina para diferentes escenarios

El modelo EFDC se utilizó para analizar las características de la intrusión salina en el delta del río Sinú bajo dos condiciones climáticas distintas; los dos escenarios simulados corresponden a época seca, para el cual se utilizaron como forzantes y condiciones de frontera los datos hidrometeorológicos de febrero de 2021, y para la época de lluvias, se utilizaron datos del mes de julio de 2017, durante el cual se registraron los mayores caudales en el periodo de 2010 y 2020. Durante ese mes se presentaron caudales mayores a $800 \text{ m}^3/\text{s}$ durante varios días, alcanzando un caudal máximo de $807 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 6 muestra los resultados de las simulaciones para ambos escenarios, presentando la distribución horizontal y vertical de la salinidad en el área modelada. Los resultados del modelo muestran que bajo condiciones de época seca ocurre la penetración de la cuña salina, principalmente a través de los brazos del Medio y Mireya; estas condiciones de bajos caudales permiten además la estratificación de la columna de agua. El rango de intrusión salina en los brazos Mireya y del Medio es de aproximadamente 3 y 2.5 km respectivamente, donde la concentración máxima de salinidad se puede observar en el brazo de Mireya dado que en aproximadamente 2 km aguas arriba los valores de salinidad

varían entre 28 y 35 ppt. En el brazo de Corea la intrusión de cuña salina es mucho menor en comparación con las otras desembocaduras, quizás debido a la morfología del lecho del río dado que en la zona de confluencia con el mar se presenta una barrera formada por la depositación de sedimentos que se logra observar en época seca o de bajos caudales.

Durante la época lluviosa o de caudales altos no se presentó intrusión salina en ninguno de los tres brazos (Figura 6B), esto debido a que, en estas condiciones, los altos caudales de agua dulce desplazaron el agua de mar, con lo cual se puede evidenciar que el principal factor que regula la intrusión salina en el delta del río Sinú es el caudal del mismo.

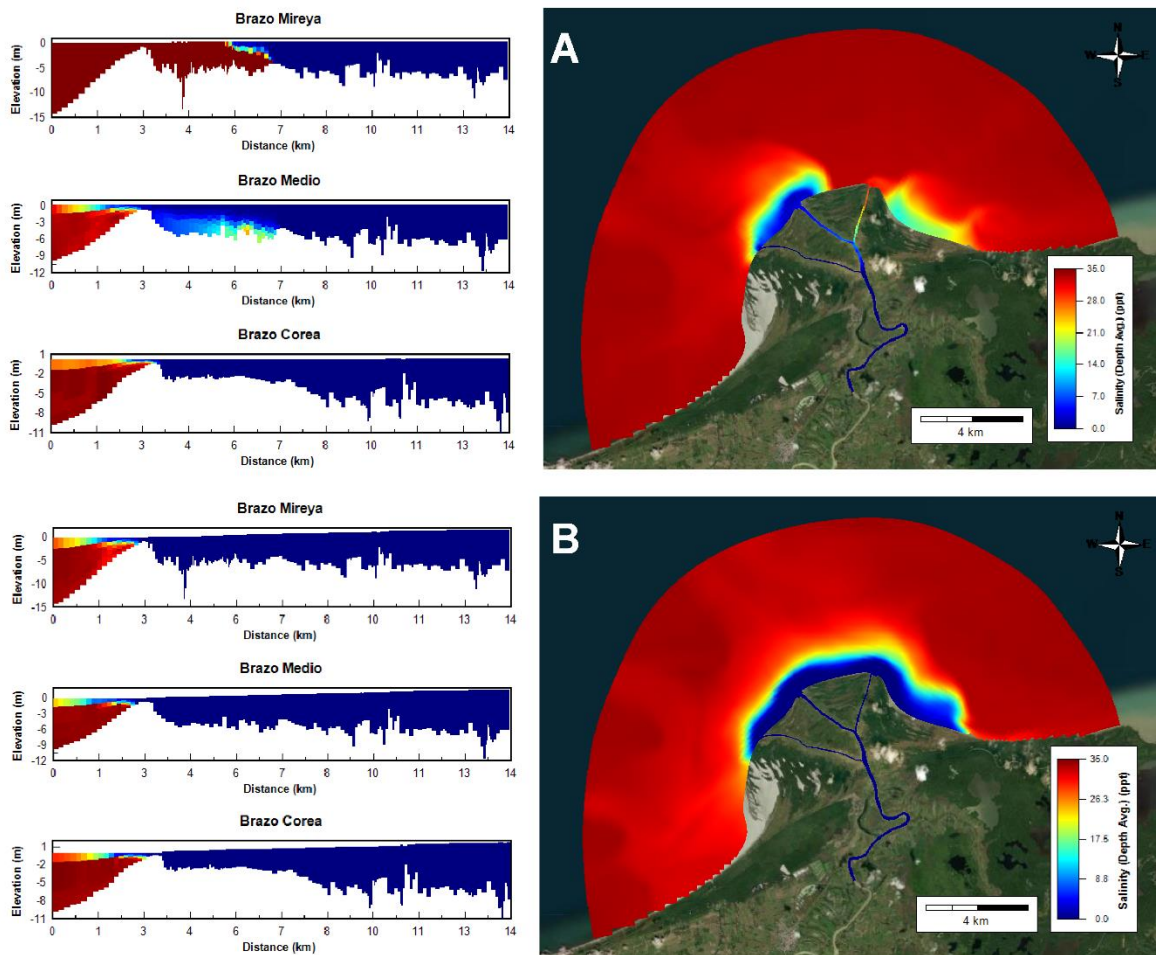


Figura 6. Distribución vertical y horizontal de la salinidad. A) época seca (febrero 2021); B) época de lluvias (julio 2017)

Conclusiones

Se construyó un completo modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos del delta del río Sinú para investigar los procesos de flujo y sedimentarios en un sistema estuarino micromareal geográficamente 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 horizontal y vertical de la salinidad en este tipo de sistemas costeros. Varios parámetros físicos como la viscosidad de remolino horizontal y el coeficiente de difusión vertical fueron fundamentales durante la calibración para ajustar el modelo a los datos observados en campo.

Los resultados de la aplicación del modelo numérico muestran una alta concentración de salinidad en los brazos del Medio y Mireya, pero que disminuye fuertemente después o aguas arriba de la confluencia de estos dos brazos. Es evidente que el rango de influencia máximo de intrusión de salinidad se puede alcanzar durante la temporada de flujo de sequía.

El estudio demuestra que la modelación numérica es una herramienta apropiada para evaluar los procesos costeros y la dinámica de la cuña salina, que en conjunto con datos de campo contribuye de manera relevante en la gestión integrada 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 los diferentes épocas climáticas y condiciones ambientales en la zona de estudio.

Referencias

- [1] J. Hobbie, *Estuarine Science: A Synthetic Approach to Research and Practice*. Island Press, Washington. D. C., p539, 2000.
- [2] D. Wolfe, *Estuarine Variability*. Ocean Assessments Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville-Maryland, p503-509, 1986.
- [3] J. C. Acosta, I. Baldiris, y H. Pacheco, Análisis de la variación en la calidad del agua en la Bahía de Barbacoas-Cartagena durante el periodo 2001-2014. *Ingeniería e Innovación* - Vol. 3:(1) enero – junio, 2015 (7 - 17).
- [4] Wang, J., Li, L., He, Z., Ahmed Kalhor, N., y Xu, D. 2019. Numerical modelling study of seawater intrusion in Indus River Estuary, Pakistan. *Ocean Engineering* 184: 74-84, 2019.
- [5] G. Marin, Estado de los estuarios y lagunas costeras en Colombia año 2000. En *Invemar, Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia, 2000*. [en línea]. Invemar: <https://www.invemar.org.co> > invemar > docs > EAMC_2000 [5 Mayo de 2021].
- [6] E. Movellán. Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del Río Ebro. Tesis Doctor en Biología, Universidad de Barcelona, Barcelona, 2003.

[7] J. Sierra, J. González del Río, J. Flos, A. Sánchez, E. Movellán, M. Rodilla, C. Mösso, R. Martínez, S. Falco, I. Romero, y M. Velasco, Medición de parámetro físico biológicos y químicos en el tramo estuarino Río Ebro. *Ingeniería del agua* 8: 459-468, 2001.

[8] O. Javelaud, Sedimentología de la plataforma continental del Caribe Colombiano. Cartagena: Boletín científico CIOH 6: 17-39, 1986.

[9] INVEMAR. Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costera colombiana. Santa Marta, 2003.

[10] S. López, y J. Restrepo, Modelos morfodinámicos de los deltas fluviales colombianos. *Boletín de geología* 29(1): 103-113, 2007.

[11] J. Sierra, A. Sánchez, P. Figueras, J. González Del Río, E. Rassmussen, y C. Mösso, Effects of discharge reductions on salt wedge dynamics of the Ebro River. *River Research and Applications* 20(1): 61-77, 2003.

[12] M. Perera, T. Ranasinghe, R. Piyadasa, y G. Jayasinghe, Risk of seawater intrusion on coastal community of Bentota river basin Sri Lanka. *Procedia Engineering* 212: 699-706, 2018.

[13] Z. Ji, J. Hamrick, y J. Pagenkopf, Sediment and metal modeling in shallow river. *Journal of environmental engineering* 128: 105-119, 2002.

[14] S. Bai, y W. Lung, Modeling sediment impact on the transport of fecal bacteria. *Water Research* (39)20: 5232-40, 2005.

[15] U. Lumborg, y M. Pejrup, Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon an annual budget. *Marine Geology* 218: 1-16, 2005.

[16] V. Le, T. Yamashita, T. Okunishi, R. Shinohara, y M. Miyatake. Characteristics of suspended sediment material transport in the Ishikari Bay in snowmelt season. *Applied Ocean Research* 28: 275-89, 2006.

[17] Z. Ji, G. Hu, J. Shen, y Y. Wan. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73: 188-200, 2007.

[18] D. Maren, Grain size and sediment concentration effects on channel patterns of silt-laden rivers. *Sedimentary Geology* 202: 297-316, 2007.

[19] S. Jeong, K. Yeon, Y. Hur, y K. Oh., Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River. *Journal of Environmental Sciences* 22 (6): 934-939, 2010.

[20] J. Min Ahna, K. Leeb, y S. Lyub, Effect of Changes in Watershed Runoff Characteristics on Salinity Intrusion in Estuary Using EFDC. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24: 87-98, 2019.

[21] CVS. 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, 2014.

- [22] K. Robertson, y J. Chaparro. Evolución histórica del delta del río Sinú. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 7(1-2): 70-86, 1998.
- [23] M. Ruiz, G. Bernal, y J. Polanía. Influencia del río Sinú y el mar Caribe en el sistema lagunar de Cispatá. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras 31 (1), 29-49, 2008.
- [24] J. Barragan, y M. de Andres. Expansión urbana en las áreas litorales de América latina y Caribe. Revista de geografía 64: 129-149, 2016.
- [25] D. Valbuena. Geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del río Sinú. Integración multiescalar 1945 – 1999 – 2016. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2017.
- [26] J. Hamrick, A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and computational aspects. Special report in applied marine science and ocean engineering (317), 1992.
- [27] A. Arakawa, y V. Lamb, 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, 1977.
- [28] R. Zou, S. Carter, L. Shoemaker, A. Parker, y T. Henry, 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, 2006.
- [29] C. Lv, F. Zhang, Z. Liu, S. Hao, y Z. Wu, Three-dimensional numerical simulation of sediment transport in Lake Tai based on EFDC model. Journal of Food Agriculture and Environment, 11(2), 1343–1348, 2013.
- [30] M. Moustafa, y J. Hamrick, Calibration of the Wetland Hydrodynamic Model to the Everglades Nutrient Removal Project. Water Quality and Ecosystem Modeling, 1: 141-167, 2000.
- [31] C. Wang, C. Shen, P. Wang, J. Qian, J. Hou y J. Liu, Modeling of sediment and heavy metal transport in Taihu Lake, China. Journal of Hydrodynamics 25(3): 379-387, 2013.
- [32] J. Zhen, Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Transactions American Geophysical Union, p366, 2008.
- [33] Tetra Tech. EFDC Technical Memorandum, Theoretical and Computational Aspects of the Generalized Vertical Coordinate Option in the EFDC Model, Tetra Tech, Inc, Fairfax, VA, 2007.
- [34] P. Craig, D. Chung, N. Lam, P. Son, y N. Tinh, 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 (ICHHD, Singapore, October 2014).
- [35] R. Torres, L. Otero, F. Franco, y L. Rocha, Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH (26): 8-21, 2008.

[36] L. Van Rijn, Sediment transport: Part I: bed load transport; part II: suspended load transport; part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Division. ASCE* 110 (10-11-12): 1613-1641, 1984.

[37] C. Willmott, On the validation of models. *Physical Geography* 2(2): 184-194, 1981.