

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO  
PARA EL DISEÑO DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO LEÓN

*Oscar Álvarez Silva<sup>1</sup>, Andrés Gómez-Giraldo<sup>2</sup> y Francisco Mauricio Toro<sup>3</sup>*

*Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEANICOS),  
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.  
<sup>1</sup>oaalvare@unal.edu.co; <sup>2</sup>eagomezgi@unal.edu.co; <sup>3</sup>fmtoro@unal.edu.co*

## RESUMEN

La desembocadura del río León en el Mar Caribe Colombiano es una importante vía fluvial por la cual se transporta gran cantidad de productos alimenticios e insumos industriales. En esta desembocadura se presentan altas tasas de sedimentación de material proveniente del río León lo cual dificulta la navegabilidad e implica una constante operación de dragado. En este estudio se implementó el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM para identificar los patrones de circulación alrededor de la desembocadura del río León con el objetivo de determinar las rutas que toman los sedimentos provenientes del río, lo cual es un importante insumo para estudios posteriores de la evolución morfológica de la desembocadura. Para ello, se utilizó información de la zona de estudio recopilada en dos campañas de campo. Los resultados muestran que el modelo ELCOM es capaz de capturar las características de estratificación del sistema en las dos épocas climáticas que se presentan en el año en la zona de estudio (época seca de diciembre a marzo y época húmeda de abril a noviembre). También se encontró que dependiendo de la época del año el forzador predominante del sistema cambia; en la época seca los patrones de circulación son dominados por la transferencia de momentum del viento a la superficie del océano, mientras que en la época húmeda los patrones de circulación están dominados por el flujo de agua dulce proveniente del río León.

## ABSTRACT:



PALABRAS CLAVES: Hidrodinámica de desembocaduras, simulación numérica.

## INTRODUCCIÓN

La desembocadura del río León se encuentra ubicada en el extremo sureste de la bahía Colombia en el Golfo de Urabá, en el litoral Caribe Colombiano cercana a la frontera con Panamá (Figura 1). Esta desembocadura es una importante vía de transporte fluvial y marítimo por la cual se exportan los productos de la región bananera de Urabá. Debido a la alta carga de sedimentos provenientes del río León, en esta desembocadura se presenta una fuerte sedimentación de tal forma que la profundidad disminuye rápidamente por debajo del calado necesario para el tránsito de los barcos. Para optimizar el desarrollo de las actividades de transporte de carga que se realizan en el área de influencia de la desembocadura, se debe diseñar adecuadamente la desembocadura del río León de tal forma que se reduzca la sedimentación. Este diseño de la desembocadura implica realizar un estudio de evolución morfodinámica de la zona de estudio, para el cual es fundamental entender la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en el sistema.

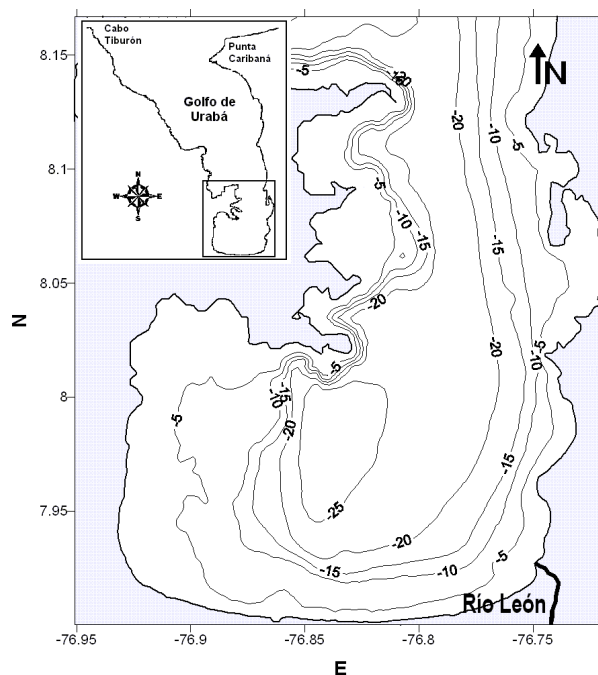


Figura 1.- Bahía Colombia. El río León desemboca a la Bahía por el extremo sureste. En el recuadro se muestra la localización de la Bahía en el Golfo de Urabá

De allí surge la necesidad de realizar un estudio hidrodinámico de las corrientes fluviales y marinas en la desembocadura del río León y su alrededores, y las variaciones de estas corrientes para las épocas climáticas que caracterizan la zona de estudio a escala intra-anual. Para este estudio se identificaron y caracterizaron los forzadores externos y los procesos físicos más relevantes en la desembocadura, considerando la variabilidad climática en el medio plazo (por épocas climáticas), utilizando datos de campo, simulación numérica y resultados de estudios anteriores de la zona.

## ZONA DE ESTUDIO

La desembocadura del río León es un sistema morfodinámico de tipo delta que se caracteriza por la acumulación del sedimento proveniente del río en la zona de intersección entre el río y el mar. En el caso del río León, gran parte del delta permanece sumergido y se extiende más de 1.5km desde la línea de costa hacia interior de la Bahía Colombia, en una configuración alargada influenciada por la constante operación de dragado de un canal navegable central que allí se desarrolla (Figura 2).

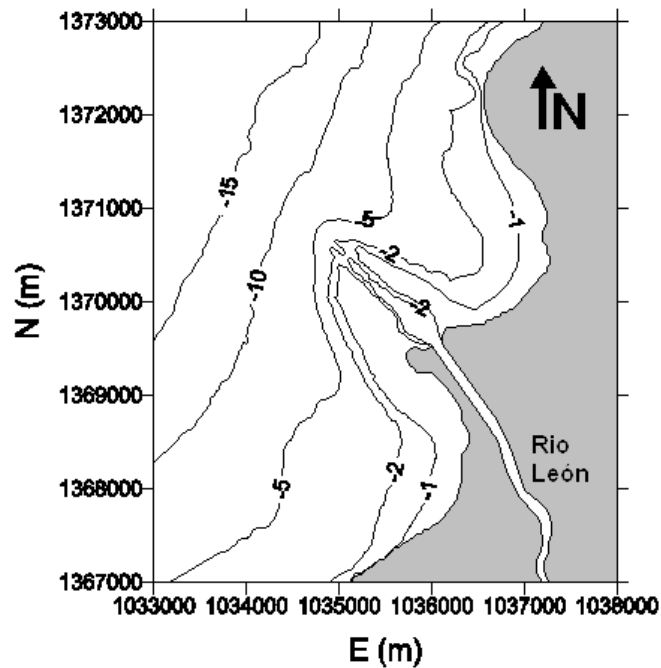


Figura 2.- Modelo digital de la desembocadura del río León. Sistema de coordenadas Colombia Zona Occidental.

El fenómeno físico que más influencia la climatología intra-anual de esta zona de Colombia es la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), (Poveda, 2004). La migración de la ZCIT determina la existencia de dos épocas climáticas muy marcadas a lo largo del año en el litoral Caribe Colombiano: la época húmeda entre abril y noviembre y la época seca entre diciembre y marzo (Andrade, 1993).

El río León presenta un ciclo anual unimodal de variación de sus caudales medios con una época húmeda de altos caudales entre abril y noviembre y una época seca de bajos caudales entre diciembre y marzo (Figura 3), los máximos caudales se presentan en el mes de octubre y los mínimos en el mes de marzo. Este ciclo anual de caudales coincide con el paso de la ZCIT sobre la Bahía Colombia.

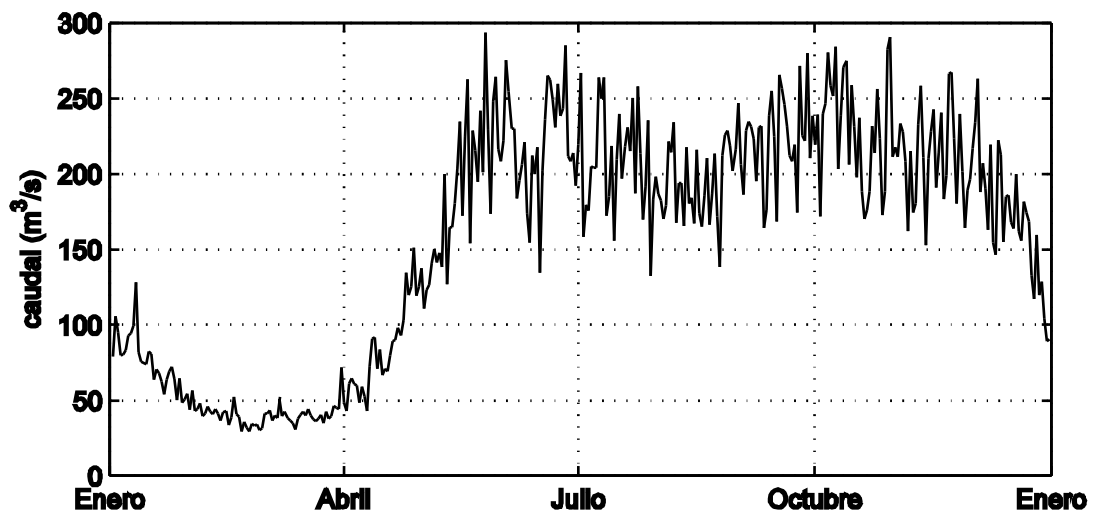


Figura 3.- Ciclo anual de caudales promedios diarios del río León. Tomado de Roldán (2008).

Aparte del caudal del río, el viento es otro de los principales factores que afecta la circulación, estratificación y mezcla en desembocaduras. La mejor información disponible del viento de la zona de estudio es la registrada por la estación Turbo, propiedad del International Station Meteorological Climate Summary (ISMCS), la cual tiene registros entre enero de 1949 y mayo de 1984. Según esta información, en la época seca el viento es fuerte y constante proveniente principalmente del norte, del nornoroeste y del noroeste con probabilidades de ocurrencia del 43.3%, 17.1% y 10.1% sucesivamente y con un 16.6% de probabilidad de calma (no viento). Por otra parte, en la época húmeda los vientos son débiles y de direcciones variables con un 21.7% de probabilidad de ocurrencia de vientos del sur, seguido por un 13.6% de probabilidad de viento del norte y un periodo de calma del 32.0%.

La temperatura del aire es otra variable meteorológica importante en la hidrodinámica de los cuerpos de agua por su influencia sobre la estratificación. Según las estaciones de medición Turbo y Uniban del IDEAM (Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), la temperatura media multianual en la zona de estudio es de 27.2°C con máximos de 40°C y mínimos de 21°C (Roldán 2008). Por su parte la humedad relativa presenta promedios regionales de alrededor de 85% (UNAL, 2006) y la carrera de marea, según el mareógrafo de Cristóbal (Panamá), presenta amplitudes máximas de 0.8m con promedios entre 0.5m y 0.6m.

## METODOLOGÍA

Para estudiar la hidrodinámica de la desembocadura se realizaron dos campañas de campo para entender los procesos dominantes y se utilizó simulación matemática con el modelo tridimensional ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), (Hodges y Dallimore, 2006) para conocer los patrones de circulación del sistema. ELCOM es una herramienta de simulación de lagos y estuarios desarrollada por el Centro de Estudios del Agua (CWR) de la Universidad de Australia Occidental y modela los procesos hidrodinámicos y termodinámicos en cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales externos para estimar el comportamiento espacial y temporal de variables como velocidad, temperatura y salinidad del agua usando un esquema semi-implícito en diferencias finitas. El modelo ha sido ampliamente validado en aplicaciones en desembocaduras (ej. Montoya y Toro, 2006; Gómez-Giraldo et al., 2009).

Antes de ser utilizados para estimar las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio, el modelo ELCOM se sometió a varios análisis de sensibilidad físicos y numéricos para definir el dominio de cálculo, el tamaño de celdas de la malla de cálculo y el intervalo de simulación mas adecuados.

Posteriormente el modelo fue calibrado y validado con información de campo para confirmar que reproduce adecuadamente las características reales del sistema. Para ello, se utilizó la información de las dos campañas de campo realizadas (la primera en época seca y la segunda en época húmeda), en donde se hicieron mediciones de los forzadores externos sobre cuerpo de agua de los cuales depende la circulación del agua como la magnitud y dirección del viento, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y nivel de marea; y de las variables que caracterizan la estratificación, mezcla y demás dinámicas al interior del cuerpo de agua como la salinidad, temperatura y turbidez. El primer grupo de variables, se utilizó para definir las condiciones iniciales y de frontera del modelo hidrodinámico y el segundo grupo de variables, se utilizó como patrón de referencia para juzgar la calidad de los resultados del modelo.

Las campañas de campo fueron programas para realizarse en las dos épocas climáticas de la zona ya que para poder comprender la variabilidad estacional de los procesos de la desembocadura, es necesario que la información de campo capte esta variabilidad. Las modelaciones hidrodinámicas de la desembocadura están enfocadas en identificar los patrones de circulación en la zona de interacción entre el río León y el océano y por tanto se realizaron para las condiciones medias que caracterizan las dos épocas climáticas del año.

## CAMPAÑAS DE CAMPO

La primera campaña de campo se llevó a cabo del 2 al 6 de marzo de 2009, durante la época seca, y la segunda campaña de campo se llevó a cabo entre el 21 y el 26 de septiembre de 2009, durante la época húmeda.

Las variables meteorológicas como magnitud y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar, que actúan como forzadores y condiciones de frontera del modelo, se midieron con una estación meteorológica Davis Vantage Pro. Estas variables se midieron desde unas semanas antes de cada campaña para tener información real con la cual alimentar el modelo durante todo el periodo de simulación. En las Figuras 4 y 5 se muestran los registros medidos por la estación en ambas campañas de campo.

Durante las campañas también se midieron perfiles verticales de temperatura, salinidad y turbidez con una sonda multiparamétrica Hydrolab MS5, en una amplia zona alrededor de la desembocadura del río León (Figura 4) para caracterizar el movimiento de las masas de agua del río y del mar. No se midió directamente la velocidad del agua pero la distribución temporal y espacial de las variables medidas permite inferir las características de los procesos de transporte como circulación y mezcla. La información medida con esta sonda se utilizó para verificar los resultados del modelo en las etapas de calibración y validación. En la Figuras 5 se muestran cortinas obtenidas interpolando los perfiles de salinidad agua, temperatura y turbidez medidos a lo largo del canal navegable y mar adentro en la misma dirección en la primera y segunda campaña. Los lugares donde se tomaron las mediciones se identifican con puntos color magenta.

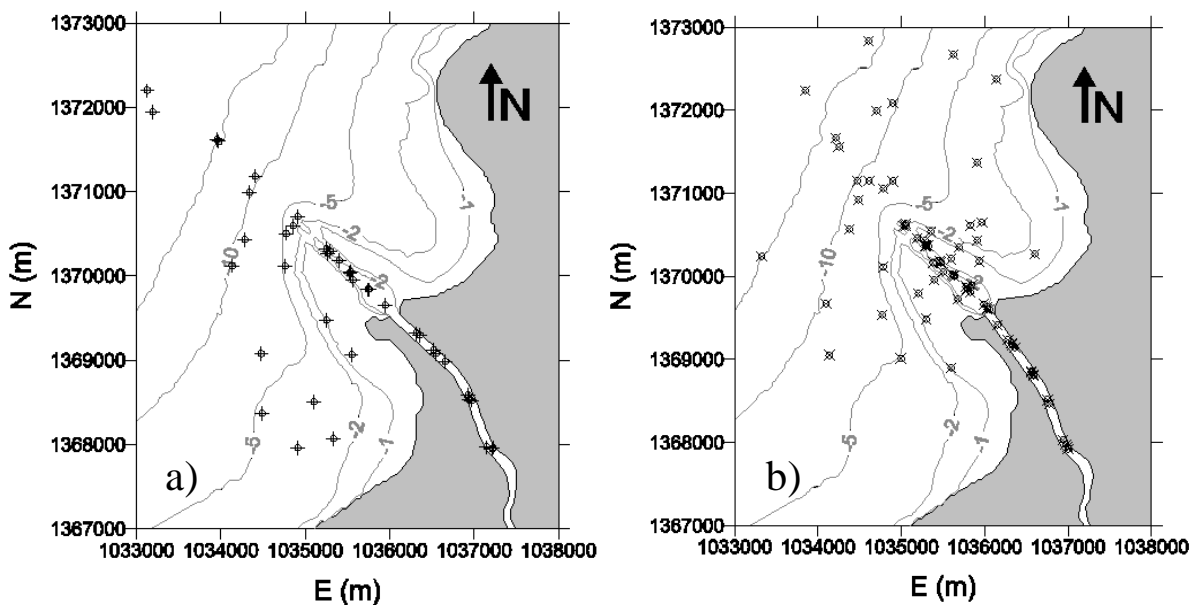


Figura 4.- Distribución espacial de los perfiles medidos en a) la primera campaña, b) la segunda campaña de campo.

Se observa en la Figura 5 que la variación vertical de la salinidad (que en estuarios está estrechamente relacionada con la variación de la densidad), difiere notablemente de la época seca a la época húmeda. En la época seca se presenta un fuerte gradiente vertical de salinidad manteniéndose una capa superficial de agua dulce de 10m de espesor sobre una capa de agua oceánica salada que se extiende hasta el fondo de la bahía Colombia; la transición entre agua dulce y agua de mar se produce en menos de 0.3m. En contraste, en la época húmeda se presentan valores altos de salinidad en superficie y una intrusión de la cuña salina por el canal navegable; la salinidad

va aumentando gradualmente con la profundidad hasta los 5m donde el agua casi ha alcanzado los valores máximos de salinidad.

De las mediciones también se observa que el agua oceánica salada es más cálida que el agua dulce proveniente del río, sin embargo el agua oceánica es más densa por su alto contenido de sal. Respecto a la turbidez se observa que en ambas épocas del año se presentan valores altos en el agua proveniente del río y una rápida disminución en el canal navegable a medida que el río se adentra en el mar, hasta ser casi nula al final del canal.

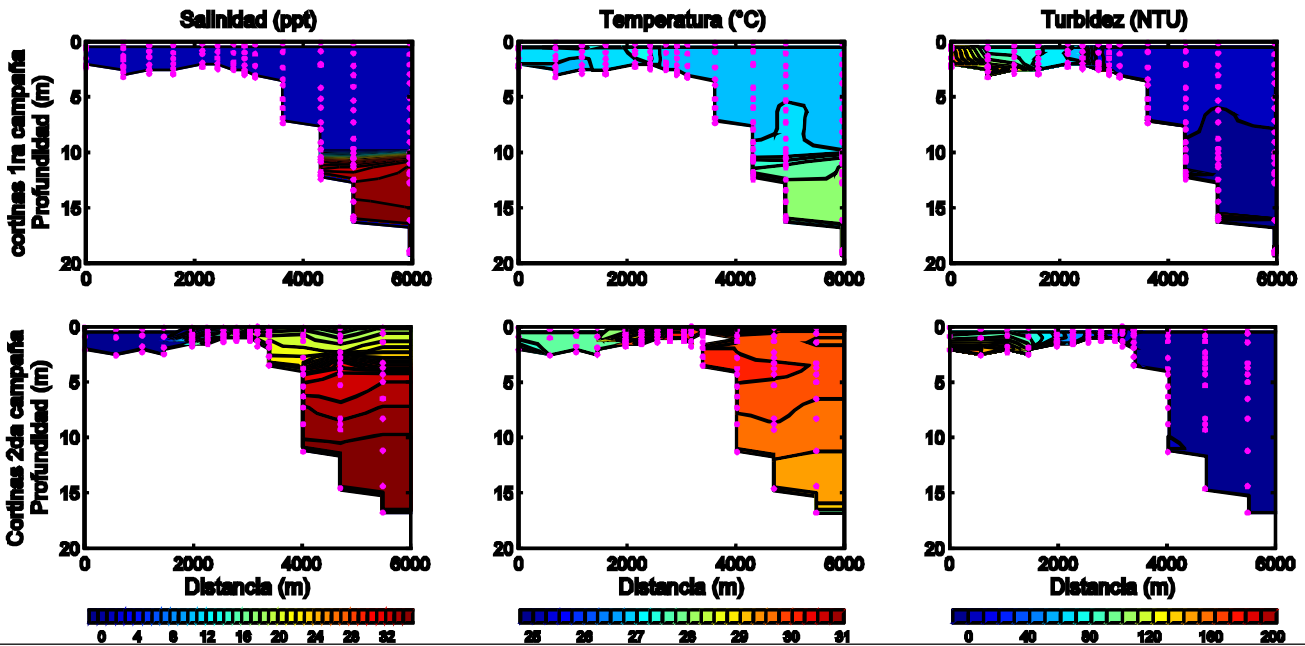


Figura 5.- Cortinas de salinidad, temperatura y turbidez levantadas a lo largo del canal navegable y mar adentro en la misma dirección en las dos campañas de campo.

## RESULTADOS

### Análisis de Sensibilidad

ELCOM es un modelo en diferencias finitas que discretiza el espacio por medio de una malla de celdas rectangulares. Dado que la desembocadura del río León, el prodelta y el canal navegable, tienen una orientación –noroeste - sureste (Figura 2), se decidió rotar el dominio de cálculo 45 grados en sentido anti-horario y luego generar la malla para definir mejor los contornos del canal de tal forma que el eje vertical de la malla queda en sentido noroeste – sureste.

De los análisis de sensibilidad a los parámetros numéricos se encontró que el dominio de simulación debe ser el que se muestra en la Figura 6, que comprende todo el Golfo de Urabá, de tal forma que la frontera abierta del dominio esté lo suficientemente lejos de la desembocadura del río León para evitar efectos artificiales producidos por las condiciones de frontera.

Dada la importancia de representar con el mayor detalle la hidrodinámica cerca de la boca del río León y a lo largo del canal navegable, es necesaria una malla de cálculo lo suficientemente fina para obtener un buen detalle de tal manera que se simuló utilizando una malla de tamaño de celda variable que permita definir con buen detalle las zonas claves, pero que permita agilidad en los cálculos trabajando con celdas grandes en las zonas menos relevantes como la parte externa del Golfo de Urabá. La Figura 6 muestra la variación espacial del tamaño de celda de la malla de cálculo utilizada para las simulaciones. Cerca de la boca del río la malla está formada por celdas de

10m en la dirección paralela al canal del río y 20m en la dirección perpendicular al eje del canal, mientras que en las fronteras superiores del dominio (noroeste y noroeste), se definieron celdas de hasta 2500m x 3000m.

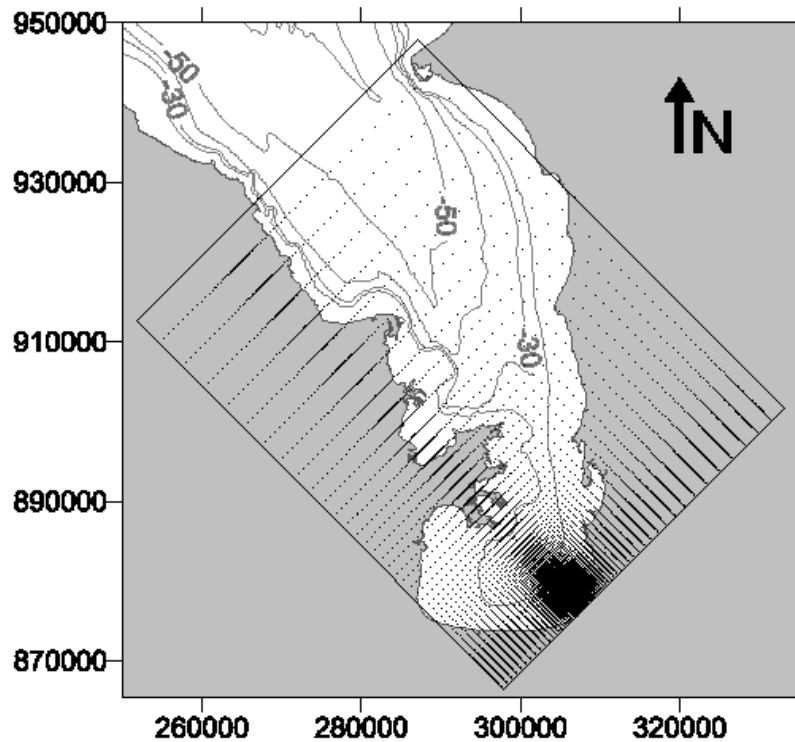


Figura 6.- Dominio de cálculo orientado en sentido noroeste – sureste. Se muestra la variación espacial del tamaño de celda en el dominio de cálculo. Sistema de coordenadas UTM.

Para la malla vertical, se escogió un esquema de 38 capas de espesor variable, con espesor de 0.5m en las zonas más someras donde se encuentra la desembocadura del río y a profundidades cercanas a los 10m, donde se encontró, según las mediciones de campo, la mayor variación de densidad del agua (Figura 5); mientras que en las zonas más profundas, donde las variaciones en vertical son suaves y menos relevantes, se tomaron celdas de hasta 6.5m de espesor. Por último, se encontró que el intervalo de cálculo apropiado para conservar la estabilidad numérica del modelo es de 30s.

#### Calibración

Para calibrar el modelo ELCOM se simuló el periodo de 28 días comprendido entre el 10 de febrero el 9 de marzo de 2009, durante el cual se realizó la primera campaña de campo correspondiente a la época climática seca. La información meteorológica necesaria para las simulaciones fue tomada de las mediciones realizadas en esta primera campaña.

El principal parámetro que se ajustó durante la calibración del modelo fue la magnitud del viento. La calibración del modelo se realizó comparando los perfiles simulados de salinidad con aquellos medidos en campo, ya que la temperatura del agua tiene poco efecto en la densidad del agua en estuarios en comparación con la salinidad. La calibración mostró que la magnitud del viento medida por la estación meteorológica debe ser amplificada por un factor de 1.3. Esta mayoración de la magnitud del viento se justifica debido a la menor resistencia que ejerce el agua al viento en comparación con el que le ejerce la tierra en donde estaba instalada la estación.

En la Figura 7 se muestran algunos de los perfiles de salinidad medidos en la primera campaña de campo y los correspondientes perfiles simulados para el día y hora en que fue medido cada perfil.

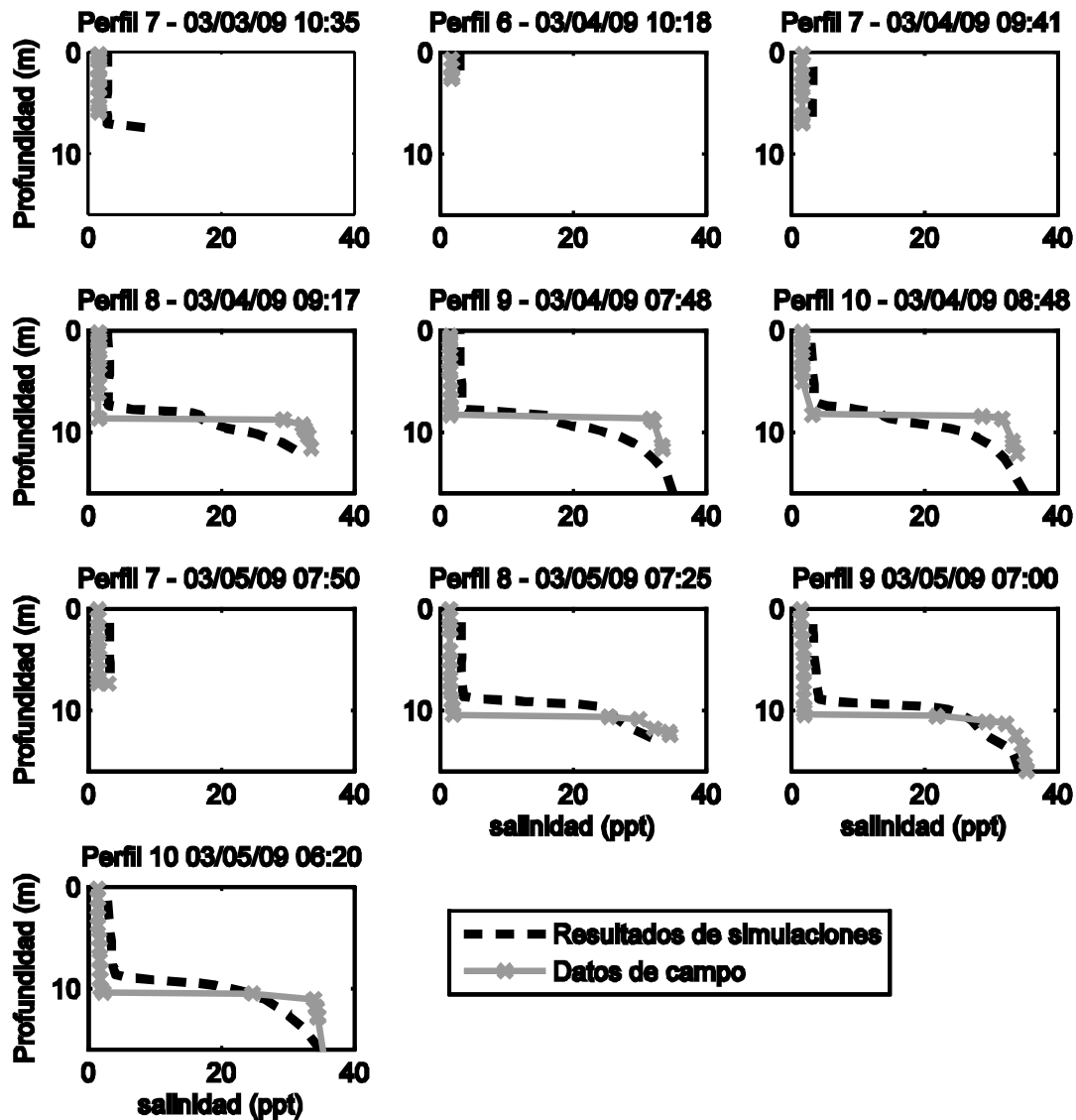


Figura 7.- Perfiles de salinidad medidos en la primera campaña de campo y simulados con el modelo ELCOM. Etapa de calibración.

La comparación de los perfiles simulados y medidos muestra una buena correspondencia (Figura 7), capturando muy bien las características del perfil medido como la salinidad en superficie, la profundidad de la haloclina y los gradientes de salinidad. Sin embargo, en los perfiles simulados la transición entre el agua dulce superficial y el agua salada profunda es más suave que la observada en campo. Dada la dificultad que representa para cualquier modelo reproducir gradientes tan fuertes, se considera que el modelo hace un buen trabajo.

#### Validación

En la etapa de validación del modelo ELCOM se simuló el periodo de 28 días comprendido entre el 1 y el 28 de septiembre de 2009 correspondiente a la época climática húmeda. Este periodo coincide con el periodo de ejecución de la segunda campaña de campo por lo que se cuenta con mediciones de campo para alimentar el modelo y para comparar con los resultados de las simulaciones. La Figura 8 presenta algunos perfiles de salinidad medidos en la segunda campaña de campo y los respectivos perfiles simulados.



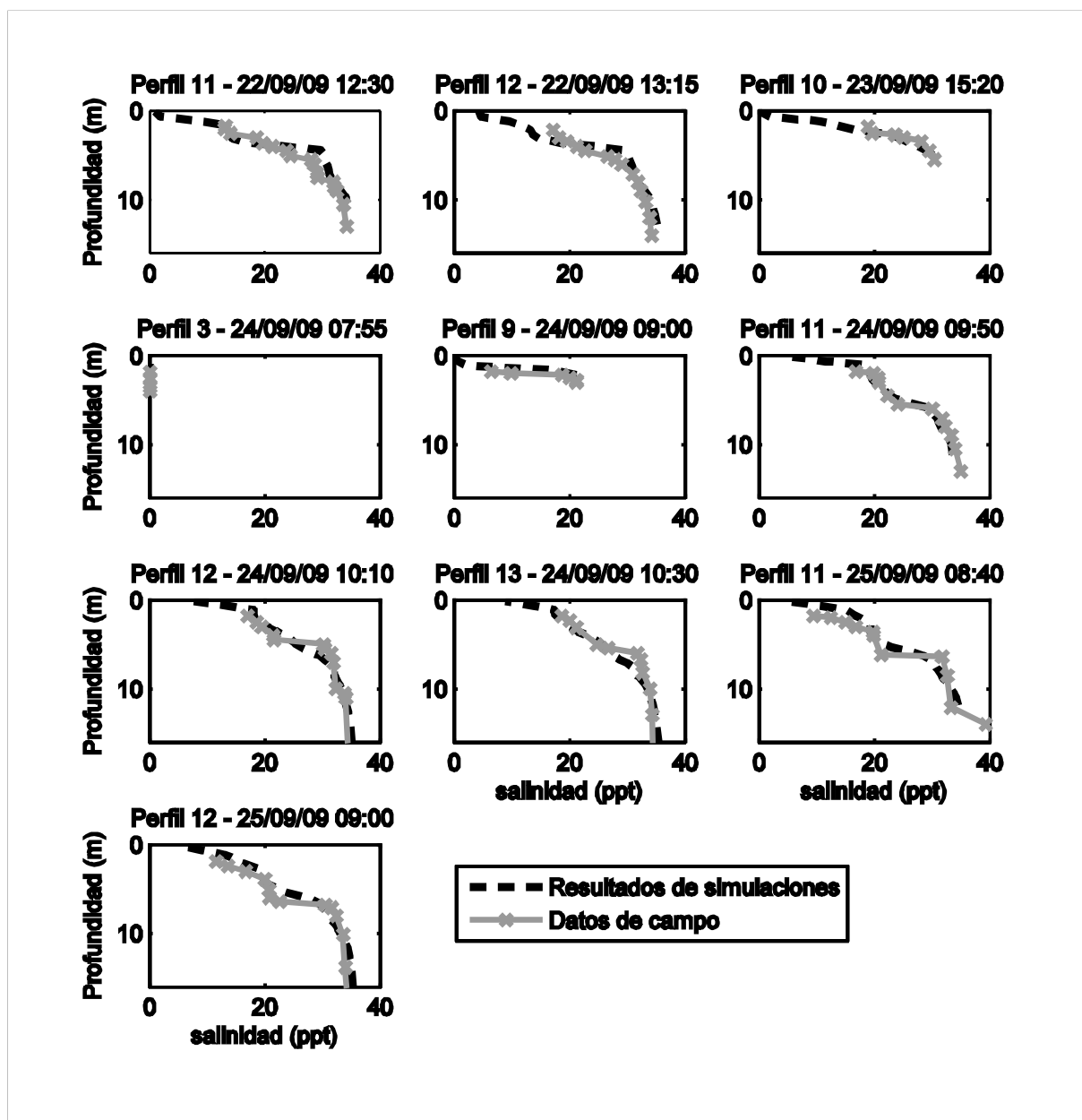


Figura 8.- Perfiles de salinidad medidos en la segunda campaña de campo y simulados en la etapa de validación.

La Figura 8 muestra que aunque las condiciones de salinidad medidas en la segunda campaña de campo son muy diferentes a las medidas en la primera, el modelo es capaz de reproducir la variación espacial y temporal de la salinidad de forma adecuada sin modificar ningún parámetro del modelo con respecto a la calibración.

Debido a los buenos resultados de la validación, se puede confiar en la capacidad del modelo para simular la dinámica de la zona de estudio en cualquier época climática. Por tanto, se presenta a continuación las predicciones del patrón de circulación dominante en cada una de las dos épocas climáticas del año.

Patrones generales de circulación

Debido a la gran diferencia entre el régimen de vientos, caudales y la estratificación vertical del agua en la zona de estudio para las dos épocas del año (lo que incide directamente en la transferencia de momentum de la atmósfera al océano), es de esperar que el patrón de circulación en las dos épocas climáticas difiera significativamente y por tanto el patrón de circulación se estudió por aparte para ambas épocas.

Para definir el patrón de circulación de la época seca se asume que las simulaciones definitivas de la calibración, con las mediciones de magnitud del viento afectadas por un valor de 1.3, son representativas de las condiciones que caracterizan la época seca (de diciembre a marzo). De igual forma, para definir el patrón de circulación de la época húmeda se asume que las simulaciones realizadas en la etapa de validación, con las mediciones de viento igualmente afectadas por un valor de 1.3, representan las condiciones medias que prevalecen en la zona de estudio en la época húmeda (entre abril y noviembre).

Patrones de circulación en la época seca

La Figura 9 cubre un área de 2000m x 2500m alrededor de desembocadura del río León y muestra la batimetría y el patrón general de circulación superficial en la desembocadura, hallado como la suma vectorial del promedio de las componentes de la velocidad para los últimos 20 días de simulación. Las corrientes más fuertes en esta época del año son generadas por la acción del viento que sopla desde el norte (Figura 9). Estas corrientes se debilitan y se desvían al acercarse a la desembocadura por efecto de la batimetría de tal forma que las corrientes no atraviesan la barra norte hacia el canal navegable. Por otra parte, la corriente del río fluye en dirección noroeste a lo largo del canal navegable y parece no debilitarse significativamente en su avance por el canal. Parte del flujo proveniente del río se desvía hacia el sur por efecto del viento. Debido a la poca profundidad del agua en la desembocadura, el patrón de circulación superficial representa lo que ocurre en profundidad.

Patrones de circulación en la época seca

En la figura 10 se muestra la batimetría de la desembocadura del río León y la magnitud y dirección de las corrientes superficiales medias alrededor de la desembocadura. Se observa que en la época húmeda las corrientes principales en la desembocadura son producidas por el caudal del río León. En esta época los vientos son débiles y no muestran un efecto significativo sobre las corrientes. El caudal del río fluye a lo largo del canal navegable sin debilitar su velocidad de flujo considerablemente. Sin embargo, parte de este caudal también fluye por encima de las barras norte y sur. Debido a la poca profundidad del agua en la desembocadura, el patrón de circulación superficial representa lo que ocurre en profundidad.

## CONCLUSIONES

El modelo matemático ELCOM utilizado rigurosamente es una buena herramienta para describir los procesos hidrodinámicos en desembocaduras. El hecho de que el modelo capture la forma de los perfiles de salinidad indica que la hidrodinámica de la zona de estudio es adecuadamente representada, incluyendo la transferencia de momentum atmosfera – océano, la magnitud y dirección de las corrientes y las interacciones entre la pluma de agua dulce y el agua de mar.

Se encontró que los patrones de circulación en ambas épocas del año son muy diferentes. En la época seca, cuando los caudales del río León son bajos y los vientos alisios soplan fuerte y constantemente del norte, las corrientes de mayor magnitud en la zona de estudio son generadas por la transferencia de cantidad de movimiento del viento a la superficie del mar por fricción; sin embargo, estas corrientes no atraviesan la zona sumergida del delta debido a que las bajas profundidades en esta zona hacen que las corrientes superficiales se debiliten y se desvíen al encontrarse con la parte norte del delta.

Por otra parte, en la época húmeda, cuando los caudales del río León son altos y los vientos débiles y de dirección variable, las corrientes principales en el sistema son generadas por el río en dirección hacia el mar. Al llegar al mar las aguas del río fluyen en forma de abanico pero la mayor parte del flujo se conserva por el canal central del delta.

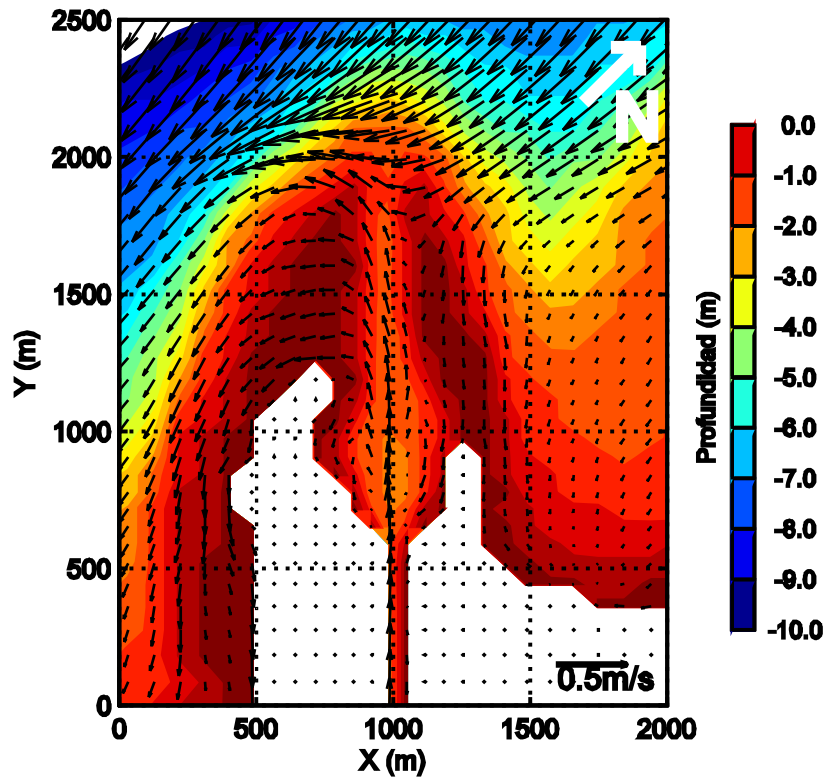


Figura 9.- Patrón de circulación por efecto del viento, el caudal y la marea en la desembocadura del río León en época seca.

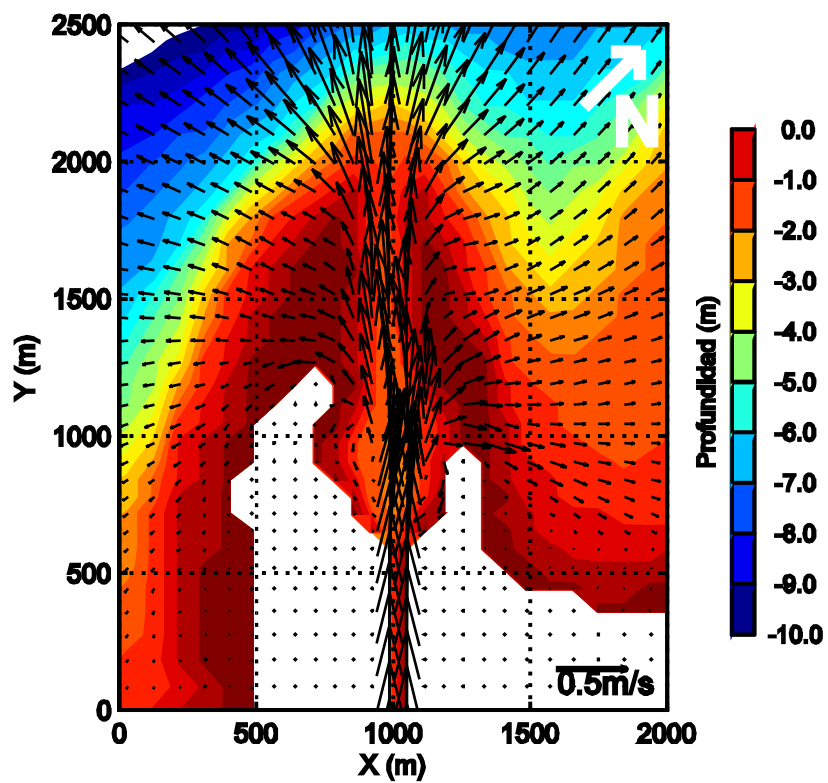


Figura 10.- Patrón de circulación por efecto del viento, el caudal y la marea en la desembocadura del río León en época húmeda.

Los patrones de circulación encontrados determinan las trayectorias que toman los sedimentos en la desembocadura. En la época seca estos sedimentos se depositarán en el canal navegable, o en el costado sur de la desembocadura; mientras que en la época húmeda los sedimentos se depositarán además en el costado norte del delta o saldrán del sistema atravesando el canal navegable. También se observa que no se presentan corrientes significativas al interior del delta provenientes de la bahía Colombia que pudieran traer sedimentos, por lo que se puede concluir que los sedimentos que se acumulan en la desembocadura provienen en su totalidad del río León.

Para el desarrollo del modelo morfodinámico de la desembocadura que se realizará posteriormente es fundamental la información sobre la hidrodinámica del sistema hallada en este estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Buceos Industriales y Dragados de Urabá por financiar la investigación y al CWR de la Universidad de Australia Occidental por permitir la utilización del modelo ELCOM. Se agradece también a los estudiantes de maestría Juan Felipe Ochoa, Juan David Osorio y Ricardo Román por su apoyo en las campañas de campo y en el procesamiento de información.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. (1993). Análisis de la velocidad del viento sobre el Mar Caribe. Boletín Científico CIOH. 13, 33–44.
- Gómez-Giraldo E.A., A.F. Osorio, F.M. Toro, J.D. Osorio y O.A. Álvarez (2009). Patrón de transporte horizontal de sedimentos en bahía Barbaçoas y su influencia sobre las islas del Rosario. Rev. Avances en Recursos Hidráulicos, 20.
- Hodges, B. y C. Dallimore (2006). Estuary, lake and coastal ocean model: ELCOM, science manual. Centre of Water Research: Univ. of Western Australia.
- Montoya L.J y F.M. Toro (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. Rev. Avances en Recursos Hidráulicos. 13: 37 – 54.
- Poveda G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 28(107): 201-222.
- Roldán P. (2008). Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo de Urabá - implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- UNAL (2006). Estudio de Impacto del cierre de la difluencia del Río León al caño Tumaradó.