

# Patrón de circulación en bahía Barbacoas y su influencia sobre el transporte de sedimentos hacia las islas del Rosario

## Circulation pattern at the "Barbacoas" bay and its influence on sediment transport to the "Rosario" islands

Andrés Gómez-Giraldo<sup>1</sup>, Andrés F. Osorio<sup>1</sup>, Francisco M. Toro<sup>1</sup>, Juan D. Osorio<sup>1</sup>, Oscar A. Álvarez<sup>1</sup> & Alfonso Arrieta<sup>2</sup>

1. Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera - OCEANICOS. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

2. Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental, Universidad de Cartagena, Cartagena  
eagomezgi@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 24 de Julio de 2009 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2009 / Versión Final: 24 de Septiembre de 2009

### Resumen

La universidad Nacional adelanta el estudio de la alternativa final de análisis para disminuir el caudal y la carga sólida del Canal del Dique hacia la bahía de Cartagena. Dado que estas acciones aumentarían los flujos hacia el mar por el Caño Correa y hacia Bahía Barbacoas por los caños Matunilla y Lequerica, se realizó un estudio de las corrientes marinas en la zona costera inmediata a Bahía Barbacoas a fin de investigar el patrón de transporte de sedimentos que llega a esta bahía. El estudio que se presenta considera la simulación matemática con el modelo tridimensional ELCOM, modelo calibrado y validado con datos recolectados en campo. Los resultados de la simulación muestran que el patrón de corrientes en la bahía está fuertemente influenciado por el régimen de vientos y que la marea y los afluentes tienen un papel secundario. Los sedimentos aportados por el Canal del Dique fueron simulados mediante un trazador inerte y no fue considerada la sedimentación, por lo que los resultados obtenidos solo permiten identificar el patrón horizontal de transporte. El trazador simulado alcanza las cercanías de las islas del Rosario en bajas concentraciones y de manera eventual.

**Palabras Clave:** Bahía Barbacoas, Simulación hidrodinámica, circulación estuarina, flujo estratificado.

### Abstract

The National University of Colombia is pursuing a study which analyzes several alternatives to reduce the flow and sediment discharge from the "El Canal del Dique" to the Cartagena bay. Any of these alternatives may increase these discharges into the Barbacoas Bay through the Matunilla, Lequerica and Correa mouths, making it necessary to study the circulation patterns in a region covering Barbacoas Bay in order to identify the sediment paths and loads discharging into the bay. The study was undertaken by numerical modeling of a region covering Barbacoas Bay, using the 3D ELCOM model which was calibrated and validated with field measurements. The simulations showed that the circulation patterns in the bay are strongly influenced by the wind with the tide and the influent rivers playing a secondary role. Sediments coming from the "Canal del Dique" were simulated by a neutral tracer and no sedimentation was considered along their paths. The simulations showed also that the tracer reaches the "El Rosario Islands", near the mouth of the bay, in low concentrations and during sporadic events.

**Key Words:** Barbacoas Bay, Hydrodynamic Simulations, Estuarine circulation patterns, stratified flows.

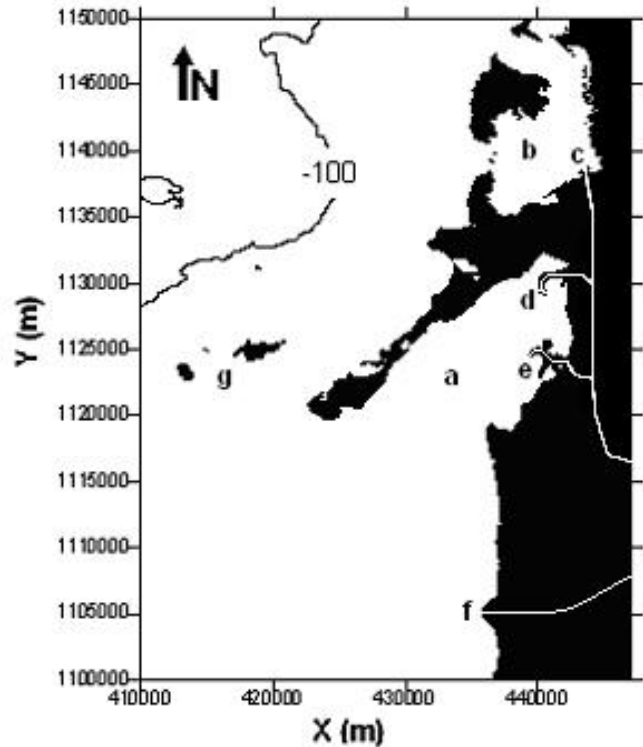
## 1. Introducción

El Canal del Dique es una obra fluvial construida por los españoles hace cerca de 450 años con el propósito de comunicar el río Magdalena con la bahía de Cartagena. Esta vía de comunicación, que se mantiene operativa después de varios siglos y de algunas modificaciones, deriva parte del caudal líquido y de los sedimentos transportados por el río Magdalena hacia las Bahías de Cartagena y Barbacoas. El caudal líquido, componente fundamental del balance hídrico de los cuerpos cenagosos que se localizan alrededor del canal, se desvía desde el río Magdalena hacia Bahía Barbacoas a través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica, y otra parte llega a la bahía de Cartagena en su desembocadura final (Figura 1).

Tuchkovenko et al. (2000) afirman que los sedimentos del Canal del Dique que llegan a la Bahía de Cartagena afectan la navegación en la bahía por la disminución de su calado. Además, causan la mortalidad de los organismos bénticos y la disminución de zooplancton. También afirman que los elementos tóxicos absorbidos en los sólidos suspendidos, son peligrosos tanto para los hidrobiontes como para los seres humanos. Por estas razones, se plantea la necesidad de reducir el caudal líquido que llega a la bahía desde el canal, reduciendo así el aporte sedimentario a ésta. Para tal fin, la Universidad Nacional de Colombia (UNAL, 2007) planteó diferentes alternativas de reducción del caudal que llega a la bahía de Cartagena mediante la construcción de obras hidráulicas que no afectan el intercambio hídrico entre el canal y el complejo cenagoso aledaño a sus márgenes y, por tanto, no generan consecuencias negativas para los ecosistemas cenagosos y para la fuente de agua del acueducto de la ciudad de Cartagena, entre otros efectos.

Las alternativas planteadas por UNAL modifican los caudales que son descargados a Bahía Barbacoas y al Mar Caribe a través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica, modificaciones que van acompañadas de un mayor aporte de sedimentos finos que pueden ser transportados hacia las Islas del Rosario (Figura 1), con la posibilidad de generar graves daños ambientales. Debido a la necesidad de conocer el riesgo de impacto negativo de una variación en los caudales líquidos y sólidos sobre las Islas del Rosario, se realizó el estudio de los patrones de circulación y de

transporte de sedimentos en la región del Mar Caribe que cubre Bahía Barbacoas, el sector del caño Correa y las Islas del Rosario. En este artículo se describe la metodología y se presentan la información utilizada y los resultados más relevantes del estudio.



**Figura 1.** Zona de estudio en donde se identifican: a) Bahía Barbacoas; b) bahía de Cartagena. c) boca Pasacaballos del Canal del Dique; d) boca Lequerica; e) boca Matunilla; f) boca caño Correa; g) Islas del Rosario. Sistema de coordenadas UTM, datum Bogotá, zona 18N.

### 1.1. Circulación en estuarios y distribución de salinidad.

Un estuario es un cuerpo de agua costero, semiconfinado que tiene una conexión abierta con el mar y dentro del cual el agua de mar se mezcla con agua dulce derivada del drenaje terrestre (Pritchard, 1967). La diversidad de tamaños, formas, regímenes de salinidad, sistemas de circulación, y biota en estuarios se debe a la interacción de numerosos factores como el tamaño y forma de la cuenca del estuario, la naturaleza de los sedimentos aportados al sistema, las corrientes de marea, la descarga fluvial, el oleaje y el viento (Chapra, 1997).

El movimiento del agua en un estuario está regulado por agentes forzadores externos, como la marea, los aportes de agua dulce desde los ríos, el viento, la forma de la costa y la topografía de fondo. También está controlado por la variación espacial de la densidad, pues la importancia relativa de la fuerza de boyancia determina si el estuario permanece estratificado verticalmente con el agua dulce de los ríos circulando sobre el agua salada más densa, o si se mezcla verticalmente generando un gradiente longitudinal de densidad (Pritchard, 1967). Esta relación entre circulación es recíproca ya que la variación espacial de la densidad es a su vez función de la circulación y otros procesos de transporte. Esto implica que simular adecuadamente el campo de densidad en un estuario implica tener también resuelto el campo de velocidad de una manera adecuada, por lo que un modelo hidrodinámico se puede calibrar con base en mediciones de densidad.

## 1.2. Antecedentes

El primer estudio sobre la desembocadura del Canal del dique fue realizado por Urbano et al. (1992), quien analizó la dinámica de la pluma turbia del Canal en la bahía de Cartagena con la ayuda de imágenes satelitales.

En 1997 se usó el modelo CODEGO, desarrollado por Lonin en el año 1994, para estimar el transporte del sedimento en suspensión del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena (Lonin, 1997) y posteriormente este mismo modelo se aplicó en estudios de impacto ambiental del Canal en las bahías de Cartagena y Barbacoas (Tuchkovenko et al., 2000).

En un estudio posterior, UNAL (2002) desarrolló un completo estudio de la evolución morfológica de varias décadas de Bahía Barbacoas, en especial, de las bocas Matunilla y Lequerica usando fotografías aéreas de diferentes épocas, evidenciando el crecimiento de éstas.

En un estudio bien reciente, la UNAL (2007) analizó la restauración ambiental y la navegabilidad del Canal del Dique, evaluando varias alternativas para el manejo hidro-sedimentario del Canal del Dique. El estudio concluye, entre otros aspectos, que no es posible recomendar actuaciones definitivas de manejo hidro-sedimentológico del Canal sin conocer el clima marítimo y la hidrodinámica de las zonas litorales de influencia del Canal.

Es dentro de este marco de referencia que se halla el estudio de circulación de Bahía Barbacoas que aquí se presenta.

## 2. Zona de estudio

### 2.1. Generalidades

Bahía Barbacoas tiene un área aproximada de 120 km<sup>2</sup> y se encuentra localizada en el litoral Caribe Colombiano, entre las longitudes 75°31' W y 75°43' W y las latitudes 10°07' N y 10°15' N, al sur de la Bahía de Cartagena y al Este de las Islas del Rosario, tal como se muestra en la Figura 1.

Esta bahía se considera un estuario ya que allí descargan las aguas dulces provenientes del Canal del Dique, canal artificial cuya alineación actual fue establecida en 1952 y que fue construido para permitir la comunicación fluvial entre el río Magdalena, en el sector de Calamar, y la Bahía de Cartagena. En 1958 se abrieron las bocas de Lequerica y Matunilla (Figura 1), las cuales desembocan en Bahía Barbacoas cerca de las Islas del Rosario, con el fin de disminuir la carga de sedimentos que llegaba, en aquel entonces, a la Bahía de Cartagena (UNAL, 2002). Las Islas del Rosario son el hábitat de extensos arrecifes de coral y por tanto de una gran variedad de fauna y flora, ambiente que se puede ver afectado por las descargas de sedimentos ocasionando el blanqueamiento y la necrosis de ciertas partes del tejido vivo y muerte de las colonias de corales (Hubbard, 1986).

### 2.2. Climatología

Entre los fenómenos físicos que caracterizan la hidroclimatología Colombiana (Poveda, 2004), el más determinante en la zona de Bahía Barbacoas es el relacionado con la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual hacia el mes de agosto, se localiza en su punto más al norte sobre el Mar Caribe. En esta época, los vientos alisios en la zona del Caribe Colombiano se caracterizan por magnitudes bajas y direcciones variables con componentes del este y del sur. Hacia el mes de enero, la ZCIT se encuentra en su posición más al sur generando, sobre el Mar Caribe fuertes y constantes vientos provenientes del noreste (Andrade, 1993).

Otro fenómeno de meso escala que influye en la dinámica de vientos y caudales sobre el canal del Dique y sobre Bahía Barbacoas es el ENSO (El Niño South Oscillation). Según Poveda (2004), existe una importante correlación entre el fenómeno ENSO y los caudales del Río Magdalena en Calamar, a la entrada del Canal del Dique.

En cuanto a la hidrología de la zona, según UNAL (2007), en promedios de largo plazo, el 24% del caudal del Canal del Dique llega a la Bahía de Cartagena por la boca Pasacaballos, el 14% sale por el Caño Correa y el 26% llega a Bahía Barbacoas distribuido en 21% por la boca Matunilla y el 5% por la boca Lequerica. El 36% restante desemboca por caños menores o se queda almacenado en el sistema cenagoso del canal.

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica del aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena, el promedio de la humedad relativa para el periodo entre 1988 y 1991 es de 82% con valores mínimos de 67% y máximos de 95%. Los registros no muestran un comportamiento periódico fuertemente marcado por una escala diurna, anual o inter-anual.

En cambio, los registros de temperatura del aire para la misma estación, sí presentan un marcado ciclo anual unimodal con valores máximos en los meses de junio, julio y agosto, con promedios diarios del orden de 29°C, y valores mínimos en los meses de noviembre, diciembre y enero, con promedios diarios del orden de 25 °C (UNAL, 2007).

### 3. Metodología Utilizada

Para la estimación del patrón de circulación de la Bahía Barbacoas y sus posibles efectos sobre las Islas del Rosario se utilizó el modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) desarrollado por el *Centre for Water Research (CWR)* de la Universidad de Australia Occidental. Este modelo tridimensional es una herramienta de simulación numérica de los procesos hidrodinámicos y termodinámicos en lagos y estuarios que permite estudiar el comportamiento espacial y temporal de velocidad, temperatura y salinidad en cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales externos. ELCOM resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo no permanente, viscoso e incompresible usando la aproximación

hidrostática para la presión y la técnica de descomposición de Reynolds. El modelo discretiza el espacio por medio de una malla estructurada rectangular, uniforme o variable, en coordenadas cartesianas (Hodges y Dallimore, 2006), y obtiene la solución numérica de las ecuaciones basado en el método semi-implícito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (1992). ELCOM ha sido aplicado exitosamente en una gran variedad de proyectos en golfos, estuarios y lagos (Hodges et al., 2000; Stocker e Imberger, 2003; Laval et al., 2003; Dallimore et al., 2003; Appt et al., 2004; Gómez-Giraldo et al., 2006).

Aunque el propósito del estudio es el de caracterizar la dinámica del transporte de sedimentos aportados por los caños del Canal del Dique en la Bahía Barbacoas, no se modeló explícitamente el transporte de sedimentos dado que no se dispone de la información necesaria sobre las características físicas de estos sedimentos como son su densidad y su distribución de tamaños de grano. Se modeló, entonces, la hidrodinámica de la bahía con la idea de que proporcione una buena indicación del patrón horizontal de transporte de los sedimentos finos que viajan en suspensión y que son propensos a ser transportados largas distancias. Para identificar la trayectoria del material suspendido, se utilizó un trazador inerte y de flotabilidad neutra que, al ser inyectado en la bahía con los caudales fluviales, permite identificar el patrón de transporte horizontal y describir la trayectoria a lo largo de la cual se daría la sedimentación en función las características del sedimento.

Antes de ser utilizado para estimar condiciones hidrodinámicas específicas, el modelo numérico fue calibrado y validado con información de campo para las condiciones físicas encontradas durante las campañas de campo realizadas para tal efecto. En estas campañas, se midieron las variables que caracterizan el forzamiento externo ejercido sobre el cuerpo de agua y las variables que caracterizan la dinámica al interior del cuerpo. Del primer grupo de variables hacen parte la velocidad y dirección del viento, los niveles de marea en las fronteras abiertas del dominio, los caudales afluentes, etc.; el segundo grupo de variables se usa para comparar los resultados obtenidos con el modelo y sirvió como patrón de referencia para juzgar la calidad de los resultados de la modelación.

En el proceso de calibración se ajustaron algunos parámetros físicos y numéricos del modelo con el fin de mejorar los resultados del mismo de tal forma que reprodujeran adecuadamente las

mediciones. Además de la información recolectada en campo, se utilizó información secundaria como cartas náuticas para la definición de la batimetría y series de caudal en los caños que vienen del Canal del Dique. La información secundaria sirvió para complementar la información recolectada durante la campaña de campo y para caracterizar los agentes externos que afectan la hidrodinámica de la bahía.

### 3.1. Campañas de medición y tipos de instrumentos.

Para reunir la información necesaria para calibrar el modelo hidrodinámico, se realizó una campaña de campo donde se tomaron datos de temperatura, salinidad, turbidez y velocidad del agua a lo largo y ancho de la bahía. Se midió el nivel de superficie libre en dos estaciones y se registraron variables

climáticas como velocidad del viento, temperatura del aire, etc. A continuación se hace una breve descripción de estas variables.

#### 3.1.1. Mareas

Durante la campaña de campo se registraron variaciones del nivel del mar cada 5 minutos durante el período comprendido entre el 15 de octubre al 8 de noviembre de 2008. Estos registros se tomaron directamente con sensores de presión Global Water en la bahía de Cholón sobre la costa de la Isla de Barú en el lado de mar abierto (Playas de Cholón), y en el sector de La Paz, al interior de Bahía Barbacoas (Figura 2). El registro en la primera estación sirvió para preparar las condiciones de frontera para el modelo numérico en su etapa de calibración, mientras que el segundo registro fue utilizado para evaluar la calidad de los resultados del modelo.

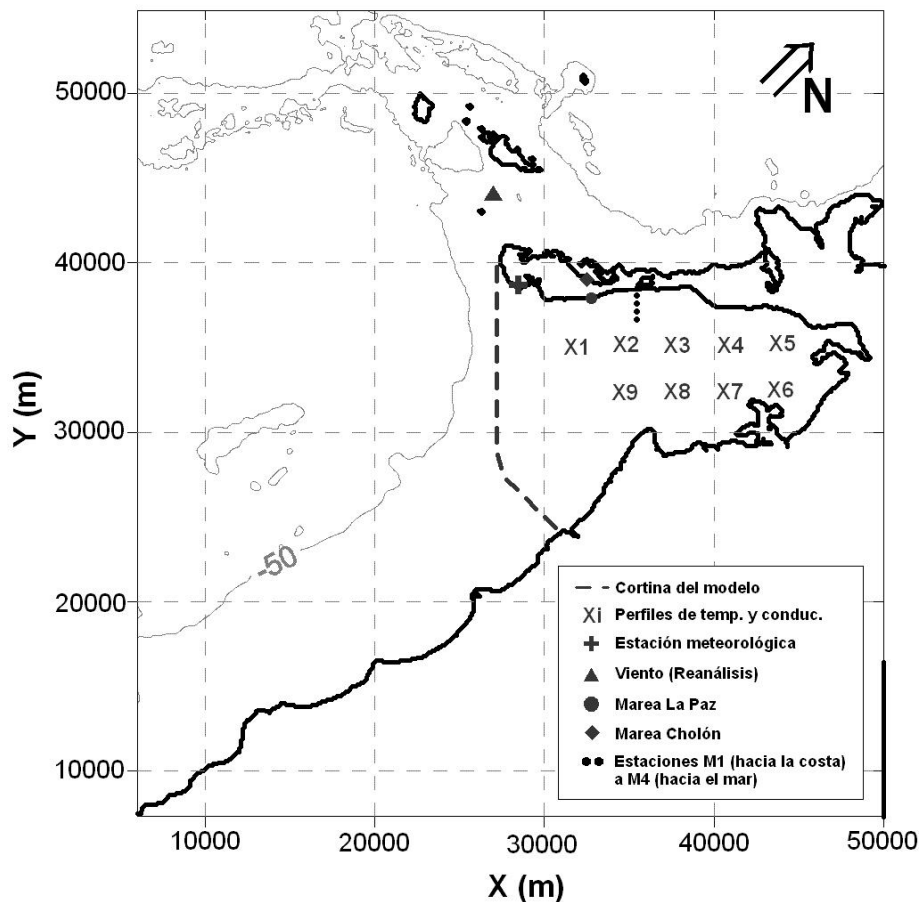


Figura 2. Ubicación de los equipos de medición y distribución espacial de los perfiles levantados durante la campaña de campo

La Figura 3 muestra los registros medidos del nivel del agua en la estación de Cholón y en la estación de La Paz. De esta figura puede observarse que las señales de Cholón y La Paz están prácticamente en fase y tienen la misma amplitud con algunas pequeñas diferencias, especialmente durante los dos primeros

días de mediciones. El rango de la marea para este período en las dos estaciones fluctúa entre 40 y 45 cm con una componente diurna muy clara y otra semi-diurna que se hace evidente al final del período de medición. La señal en la estación de La Paz, en general, está del orden de 5 cm por encima de la señal en Cholón.

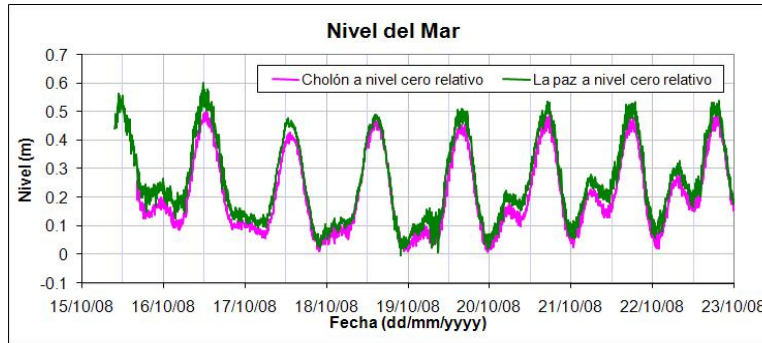


Figura 3. Variación del nivel del mar en el período 15-22 de octubre de 2008.

### 3.1.2. Datos Climatológicos

Durante esta campaña se instaló una estación climatológica Davis Vantage PRO ubicada a unos 15 msnm en donde se registró la información de vientos locales, humedad relativa y temperatura del aire cada media hora. En la Figura 2 se presenta la localización de la estación meteorológica respecto a las Islas del Rosario y otros sitios de interés del presente estudio.

Debido a que no existen registros de la radiación solar cerca de la zona de estudio y no se contaba con un radiómetro, ésta se calculó de manera analítica (Martin y McCutcheon, 1999) en función de algunas características espaciales, temporales y atmosféricas de la zona de estudio.

### 3.1.3. Datos Oceanográficos

Se midieron perfiles de temperatura, salinidad y turbidez al interior del cuerpo de agua, en diferentes puntos de la bahía, con los sensores propios de un equipo marca AANDERAA, en un mismo punto a diferentes horas del día con el propósito de observar las variaciones durante el ciclo diario. La ubicación de las estaciones de medición se muestra en la Figura 2.

Los perfiles medidos en campo se utilizaron para calibrar el modelo. La Figura 4 muestra los campos de densidad y turbidez

en un corte vertical construido a partir de perfiles levantados en las estaciones M (cuatro estaciones en total), ubicadas hacia el extremo nor-oeste de la bahía, donde M1 corresponde al perfil más cercano a la costa y M4 al perfil orientado hacia el interior de la bahía (Figura 2). Las variables como densidad y turbidez permiten identificar masas de agua de calidades y orígenes diferentes, identificando así el espesor de la capa de agua dulce menos densa y su variabilidad espacial y la manera como la concentración de sedimentos suspendidos, asociados con la turbidez, varía espacialmente.

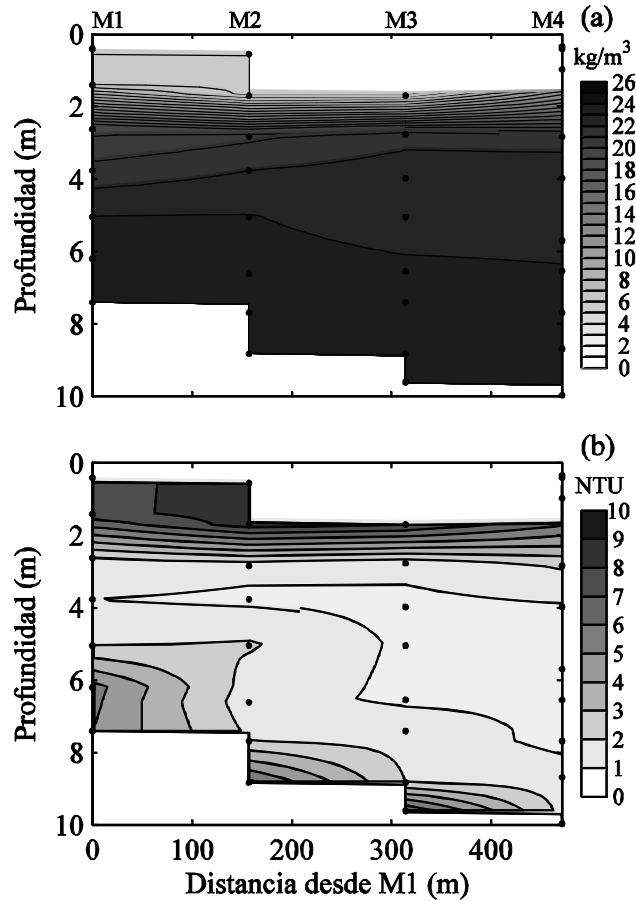
Las dos variables muestran la presencia de una capa superficial de agua dulce de menos de 1.5 m de espesor. Por debajo de esta capa existe una zona de aproximadamente un metro de espesor en donde se presenta un gradiente fuerte de densidad entre el agua dulce, en la superficie, y el agua salada y densa del fondo. La turbidez muestra cómo los sedimentos observados en la superficie se localizan solo en la delgada capa superficial de agua dulce proveniente de los caños.

## 3.2. Malla de cálculo

El dominio de simulación escogido para este estudio (Figura 2) cubre toda la Bahía Barbacoas, las Islas del Rosario, una región al Norte hacia la Isla de Tierra Bomba en mar abierto y una región al sur de la boca del Caño Correa.

Dado que la isla de Barú tiene una orientación noreste - suroeste (Figura 1), la malla de cálculo se orientó en esta dirección para

definir de manera más adecuada los contornos de la Isla Barú y poder representar adecuadamente una eventual corriente litoral.

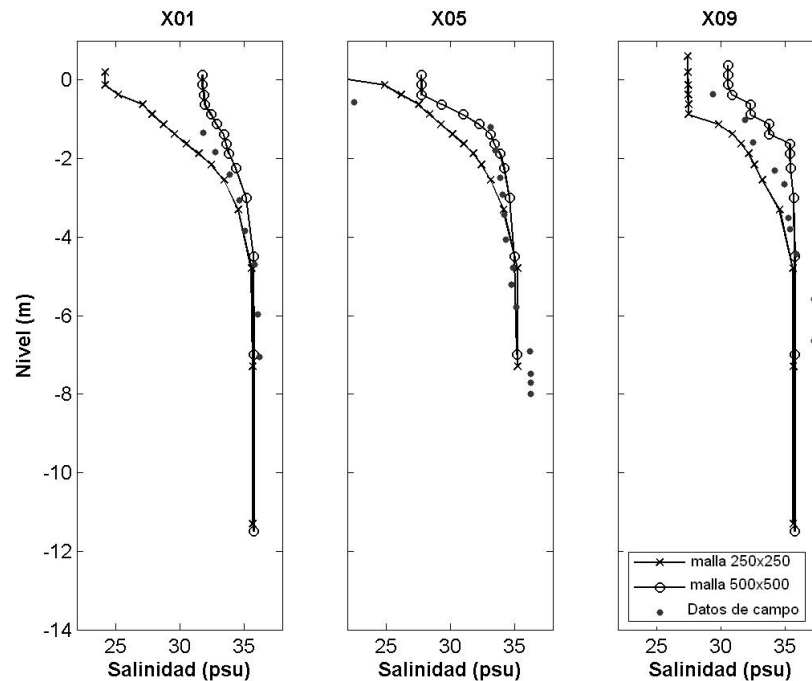


**Figura 4.** Campos de (a) densidad del agua (en unidades  $\rho$ ) y de turbidez del agua (b) a lo largo de un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4.

Con el fin de determinar el tamaño de celda ideal, se realizó un análisis de sensibilidad, empleando celdas de 500 m x 500 m y 250 m x 250 m con los mismos forzadores externos en ambos casos. Se compararon los resultados del modelo utilizando la malla gruesa y la malla refinada para un período de simulación que comprende la campaña de campo. La comparación de resultados indica que al utilizar la malla fina se obtienen valores de salinidad en superficie menores en un 10% que aquellos obtenidos con la malla gruesa. Sin embargo, con ambas mallas se obtuvo prácticamente la misma localización vertical de la haloclina en todo el dominio. Para efectos de interpretación de

resultados en lo relacionado con las corrientes y con las rutas que siguen los trazadores (representando los sedimentos en suspensión), se consideró que la precisión y la resolución espacial obtenida con la malla gruesa es adecuada.

En la Figura 5 se comparan los perfiles de salinidad obtenidos de simulaciones con ambos tamaños de celda y los datos de campo en las estaciones X01, X05 y X09 (Figura 2). Según la Figura 5 el perfil de salinidades obtenido con la malla gruesa (500 m x 500 m) reproduce de manera aceptable en las tres estaciones las variaciones del perfil de salinidad en la profundidad.



**Figura 5.** Comparación de los perfiles de salinidad obtenidos mediante simulación numérica, empleando celdas de 500 m x 500 m y 250 m x 250 m y registrados en la campaña de campo en las estaciones X01, X05 y X09 el día 18 de octubre

En la dirección vertical, se definieron 21 capas con espesor variando desde 0,25 m cerca a la superficie hasta 40 m en las zonas profundas. La malla fina vertical cubre los primeros 3 m, profundidad a la cual se localiza la haloclina.

### 3.3 Selección de casos de estudio

Luego de algunas simulaciones preliminares y de terminado el proceso de calibración del modelo, se detectó que las fuerzas externas más importantes para la dinámica del sistema son los vientos y los caudales del Canal del Dique. A partir de las series de tiempo de estas variables, se detectó que la variabilidad temporal en los caudales y en la magnitud y dirección del viento no han estado históricamente en fase, por lo que se consideraron en este estudio tanto las condiciones críticas para el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario que están determinadas por altos caudales afluentes, como también escenarios críticos definidos por la magnitud y dirección del viento y su combinación con los caudales.

Se consideró además que el análisis de un par de situaciones críticas no da una idea real de las condiciones de largo plazo, de tal manera

que la elección de los escenarios de modelación se hizo acompañada de un análisis de probabilidad conjunta de ocurrencia de eventos de viento y de caudales afluentes que tenga en cuenta largos periodos de registro para la selección de los casos.

Los datos de velocidad y dirección del viento fueron tomados de la base de datos del reanálisis regional NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) que tiene una resolución temporal de 3 horas, una resolución espacial de 0.25 grados y que cubre el período entre el 1 de enero de 1979 y el 31 de diciembre de 2006. La Figura 2 muestra la ubicación del punto del modelo de reanálisis que se escogió para el análisis. La Figura 6 presenta la rosa de direcciones de viento para la serie en la cual se puede observar una alta probabilidad de vientos provenientes del nornoreste (30% aproximadamente), seguido de las direcciones aledañas de vientos del norte y del noreste (probabilidades del 11% y 9%, respectivamente).

Los datos de caudal se tomaron de los resultados de la simulación del canal del Dique realizado por la Universidad Nacional - sede Bogotá en un estudio sobre el canal del Dique (UNAL, 2007).

Con la información de vientos y caudales afluentes, se hizo el estudio de probabilidad conjunta para vientos y caudales medios mensuales durante el periodo comprendido entre enero de 1984



y diciembre de 2000, período suficiente para capturar la variabilidad intranual asociada, principalmente, a la variación de la ZCIT, y a la variación interanual asociada a las dos fases del ENSO (El Niño y La Niña), incluyendo así las condiciones de invierno y verano extremos. Este período también permite capturar las combinaciones más probables de vientos y caudales afluentes, que no están asociadas a eventos extremos. Para considerar la variación en la dirección del viento, se hace el análisis en las ocho direcciones principales: vientos provenientes del norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

El análisis de probabilidad conjunta direccional se realizó separando las series originales de velocidad de viento y caudales

en sub-series de acuerdo a la dirección del viento. Debido a que estas sub-series no tienen igual número de datos, porque la dirección del viento es una variable aleatoria, la probabilidad de ocurrencia de los eventos para una dirección no es directamente comparable con las probabilidades asociadas a otras direcciones. Se tomaron para el análisis final solo las 4 direcciones que se muestran en la Figura 7 por ser éstas las más probables (Figura 6) o las más críticas en el sentido de favorecer el transporte superficial en dirección a las islas del Rosario. Para las demás direcciones no se encontraron eventos muy probables o críticos. En la Figura 7 se muestran, encerrados en círculos, los casos puntuales que se escogieron como representativos para las simulaciones.



**Figura 6.** Rosa de direcciones de viento para la serie de Reanálisis utilizada en las simulaciones

Para las simulaciones se consideró que los forzadores predominantes del sistema son el viento, los caudales y la marea. No se tuvieron en cuenta las corrientes generadas por la rotura del oleaje debido a que el transporte generado por este proceso afecta principalmente a los sedimentos gruesos y ocurre a una tasa mucho más pequeña que aquella a la cual las corrientes transportan el sedimento fino. Adicionalmente, un análisis del viento sugiere que el oleaje más energético no produce transporte hacia las Islas del Rosario.

Una vez se determinaron los valores críticos o más probables de velocidad del viento y caudales, se procedió a identificar en las

respectivas series de viento y caudales, las épocas en las cuales se presentaron conjuntamente los valores seleccionados.

Se seleccionaron para las simulaciones finales, cuatro períodos de tiempo de 20 días representativos de los resultados del análisis de probabilidad conjunta. Estos períodos son:

**Período I:** Desde el 10 de diciembre de 1990 hasta el 30 de diciembre de 1990.

**Período II:** Desde el 1 de marzo de 1991 hasta el 20 de marzo de 1991.

**Período III:** Desde el 1 de septiembre de 1989 hasta el 20 de septiembre de 1989.

**Período IV:** Desde el 5 de julio de 1990 hasta el 25 de julio de 1990.

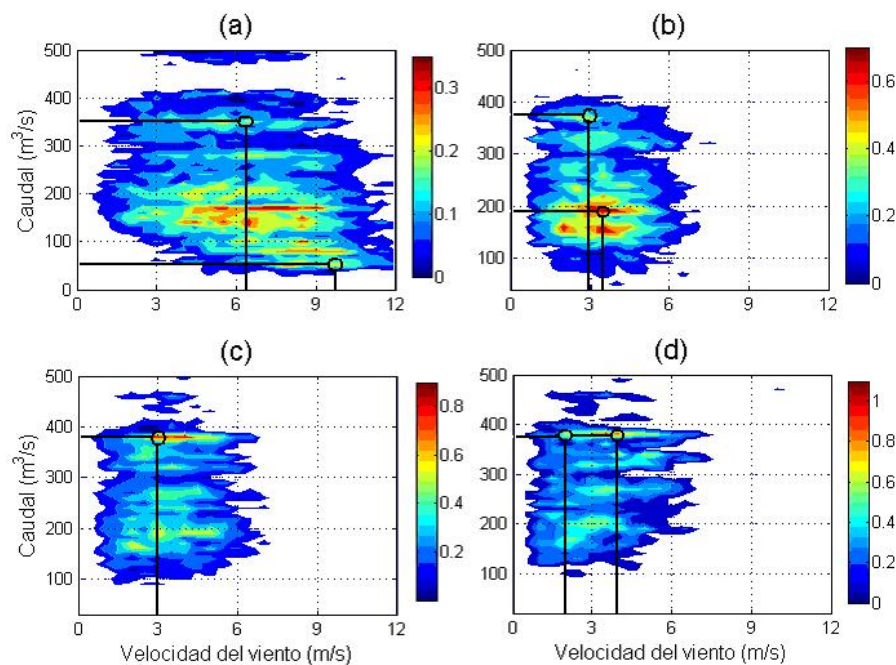
El período I se caracteriza por vientos del noreste con una frecuencia de ocurrencia alta (cerca al 25% del tiempo). Esta dirección de vientos puede favorecer las corrientes superficiales saliendo de Bahía Barbacoas. Además, existe un alto aporte de los efluentes. El período II considera una situación similar del campo de vientos a la del período I, pero con una mayor velocidad y ahora con caudales bajos.

Los periodos III y IV no se caracterizan ni por altos valores de velocidad del viento ni de caudales, sino que están caracterizadas por alta variabilidad en las direcciones del viento y por ocurrir un porcentaje alto del tiempo.

## 4. Resultados

### 4.1. Calibración y validación del modelo

Para calibrar el modelo ELCOM se consideraron varios parámetros a los cuales se les evaluó su influencia en los resultados. Estos parámetros fueron: Radiación solar, Coeficiente de extinción de la luz y nubosidad. Adicionalmente, se consideró el estudio de las condiciones de frontera de salinidad (tanto en la frontera de mar abierto como en las fronteras abiertas de los caños) y de marea. El campo de vientos utilizado durante esta etapa se construyó a partir de aquel medido en campo durante la campaña de medición.



**Figura 7.** Probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales totales por las bocas Correa, Matunilla y Lequerica. a) Para vientos en dirección noreste, b) Para vientos en dirección noroeste, c) Para vientos en dirección suroeste d) Para vientos en dirección sur. Los círculos indican las combinaciones de viento y caudal elegidas para la simulación de las alternativas.

Debido a que no se hallaron registros de Radiación Solar, se procedió a calcularla de manera sintética en función de la latitud, longitud, altitud, fecha, nubosidad y atenuación atmosférica con las expresiones propuestas para ello resumidas por Martin y McCutcheon (1999).

Los valores de nubosidad y del coeficiente de extinción de la luz, que influyen en la transferencia de calor entre la masa de agua y la atmósfera, fueron determinados después de un análisis de sensibilidad utilizando los perfiles de temperatura del agua. A pesar de algunas diferencias obtenidas entre los perfiles de

temperatura simulados y los medidos en campo, su influencia en los perfiles de densidad del agua es muy baja debido a que las variaciones de la densidad del agua estuarina se deben fundamentalmente a diferencias de salinidad, dejando el efecto de la temperatura en un segundo nivel.

La calibración también mostró que la magnitud del viento medida en la estación debe ser amplificada por un factor de 1.5. La obtención de este factor de amplificación se basó en un proceso de análisis de sensibilidad comparando perfiles de temperatura y salinidad obtenidos a partir de un campo de vientos y comparados con los perfiles medidos y 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. El campo de vientos afectado por el factor de amplificación concuerda bien con valores registrados en forma discreta por el anemómetro del barco utilizado durante la campaña de campo.

La condición de salinidad en las fronteras abiertas se especificó como un perfil de salinidad constante en el tiempo y en la vertical de 36 psu, la cual corresponde con las referencias mundiales de salinidad en el Caribe (Levitus, 1982). Este hecho se manifestará en los resultados del modelo, tal como se explica más adelante. La salinidad especificada en las bocas de los caños fue de 0 psu, correspondiente a la del agua dulce.

Con el propósito de reducir el efecto de las condiciones iniciales en los resultados del modelo, y por lo tanto para reducir el tiempo de "calentamiento" del modelo, se especificaron perfiles de salinidad y temperatura iniciales semejantes a aquellos medidos en campo.

Para la malla gruesa utilizada en la calibración, se utilizó un paso de tiempo  $dt = 240$  s, valor que garantiza estabilidad del modelo para las condiciones simuladas (CFL del orden de 0,4). Con este intervalo de cálculo, una simulación típica de 17 días de simulación requiere 2 horas de CPU en un computador de escritorio con un procesador (AMD Athlon™ 64 X2 dual Core Processor 5600 + 1.8 GHz, 1.93 GB de RAM).

Finalmente, para las simulaciones de calibración se consideró un tiempo de simulación de 17 días del año 2008, entre el 06 de Octubre a las 0:00 y el 23 de Octubre a las 0:00. De estos 17 días, los primeros 10 corresponden al período de "calentamiento"

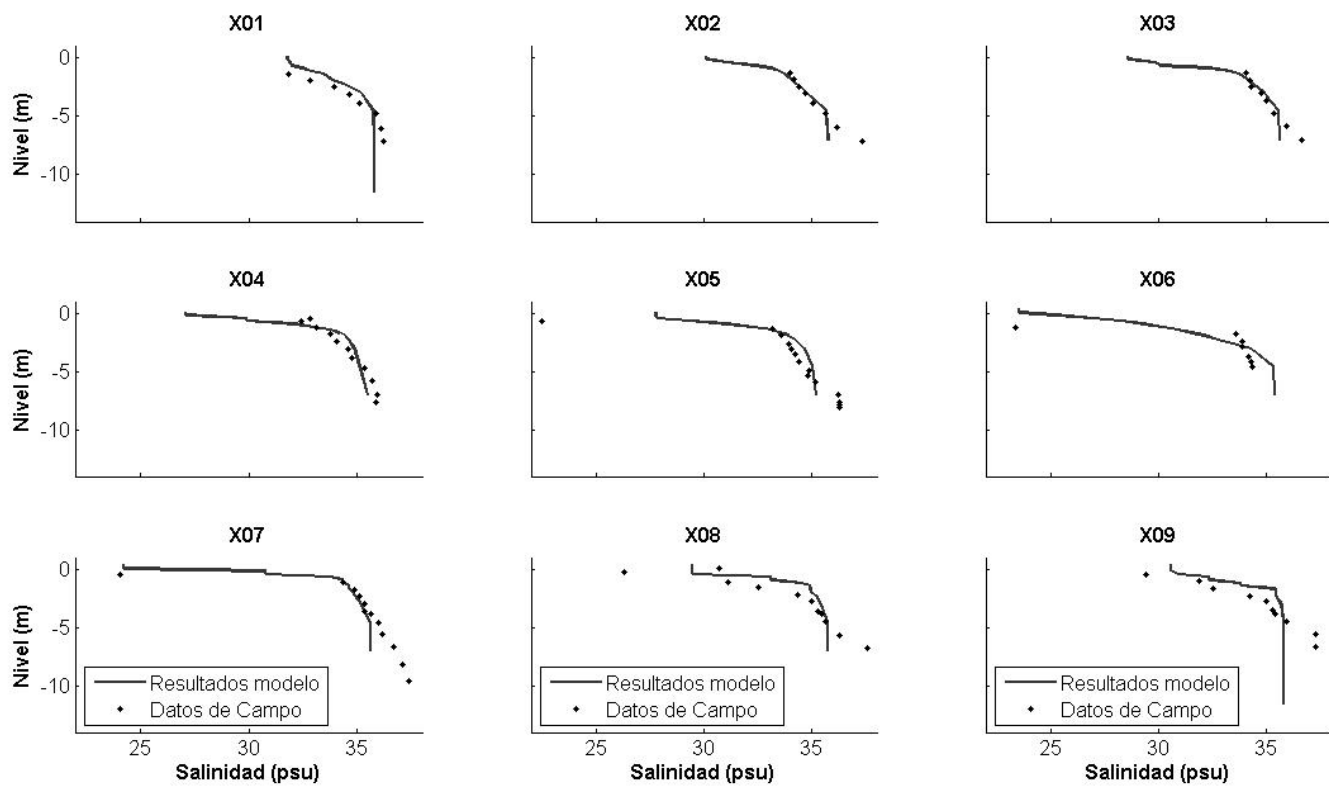
del modelo y el intervalo entre el 16 de Octubre y el 22 de Octubre corresponde al de la campaña de campo.

Debido a las condiciones de estratificación salina encontradas en Bahía Barbacoas (Figura 5), la calibración del modelo se realizó comparando los perfiles simulados de salinidad con aquellos correspondientes a las estaciones de medición en campo. Como se explicó anteriormente, los perfiles de temperatura tienen poco efecto sobre los perfiles de densidad y por lo tanto no se consideraron como relevantes en la calibración.

En la campaña de campo, se definieron las estaciones X01 a X09 mostradas en la Figura 2 para la medición de perfiles de salinidad y temperatura. En estas estaciones se realizaron mediciones los días 18 y 22 de Octubre. El día 18 de Octubre se hizo el recorrido en sentido horario, comenzando a las 6:40 a. m. en la estación X01 y terminando a la 1:40 p.m., en la estación X09. El día 22 se hizo el recorrido en sentido anti horario, comenzando a las 8:11 a.m. en la estación X09 y terminando a las 2:32 p.m. en la estación X01. La calibración se realizó con los datos tomados el 18 de octubre y la validación del modelo con los datos medidos el día 22 de octubre. Estas estaciones, que cubren toda Bahía Barbacoas, se encuentran localizadas en zonas de influencia de las plumas de agua dulce (X05, X06), en zonas de influencia de aguas oceánicas (X01, X02 y X09) y en zonas de transición (X03, X04, X07 y X08), dando una muy buena idea de la distribución espacial de la salinidad en la bahía.

La comparación entre los perfiles de salinidad simulados y los medidos en el día 18 de Octubre (calibración) se muestra en la Figura 8.

Para la zona de influencia oceánica, estaciones X01, X02 y X09, la comparación de los perfiles simulados y medidos muestra una buena correspondencia, capturando muy bien las características del perfil medido como la profundidad de la haloclina y los gradientes de salinidad. Esto es sumamente importante porque al haber estratificación vertical, la circulación generada por la transferencia de momentum por acción del viento depende del espesor de la capa superficial. Se aprecian unas diferencias hacia el fondo que corresponden a los valores altos de salinidad, por fuera del rango físico, y que en el modelo corresponden al valor asignado como condición de frontera de 36 psu para el agua oceánica.



**Figura 8.** Perfiles de salinidad simulados y medidos del 18 octubre de 2008 en las estaciones X01 a X09

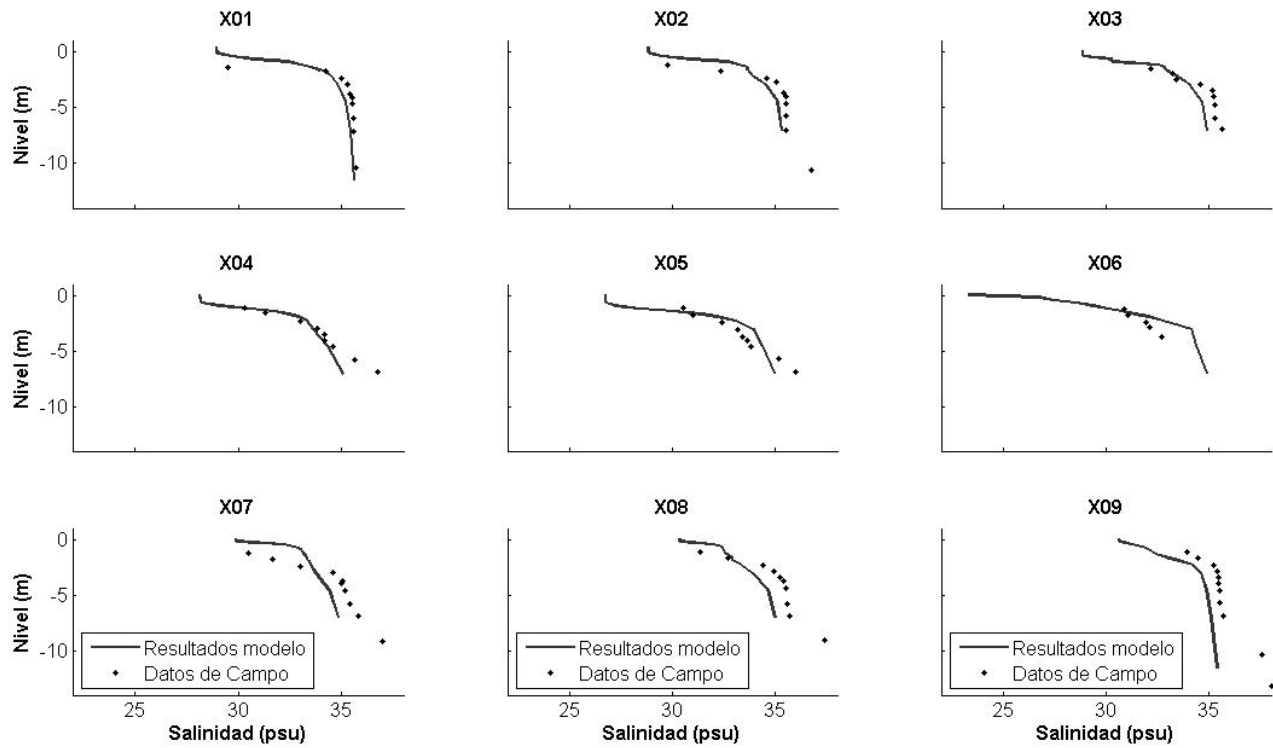
En la zona de influencia de las plumas de agua dulce (estaciones X05, X06), el modelo predice salinidades mayores que las mediciones cerca a la superficie con diferencias de hasta 5 psu, pero captura adecuadamente la forma del perfil medido. Se espera que una mejor resolución de la malla horizontal pueda corregir esta diferencia, pero la diferencia no es significativa para el movimiento de la capa superficial de agua. La resolución de la malla vertical es adecuada dado que el modelo captura la localización de la haloclina.

En la zona de transición, el modelo captura adecuadamente las características del perfil de salinidad medido, con pequeñas diferencias. Por ejemplo, en la estación X03 los perfiles simulados son menos salinos en la superficie aunque no se tiene buena resolución en las mediciones a profundidades menores de 1 m para confirmar esta diferencia, mientras que en la estación X04 las salinidades superficiales simuladas son ligeramente menores que las medidas. En las estaciones X07, X08 y X09, los perfiles simulados y los medidos concuerdan muy bien, a pesar de que

los perfiles simulados presentan salinidades menores a profundidades mayores a 8 m, y que corresponden a la condición de frontera de aguas oceánicas con salinidades de 36 psu que difiere de las mediciones con valores de 40 psu.

Los resultados de la validación se muestran en la Figura 9. Las estaciones con influencia oceánica muestran en este día un mejor comportamiento que el reportado en el día 18, especialmente en las estaciones X01 y X02. En la estación X09, se aprecian unas diferencias en magnitud pero las simulaciones capturan muy bien la forma del perfil medido. Como en el día 18, las salinidades simuladas a profundidades mayores a 8 m son ligeramente menores que las mediciones cuyos valores se acercan a 40 psu.

Para las estaciones con influencia de las plumas de agua dulce, las simulaciones reportan mayores salinidades en superficie que las mediciones, pero la forma de los perfiles simulados se ajusta bien a la forma de los perfiles medidos. En las zonas de transición, el modelo captura adecuadamente la forma de los perfiles.

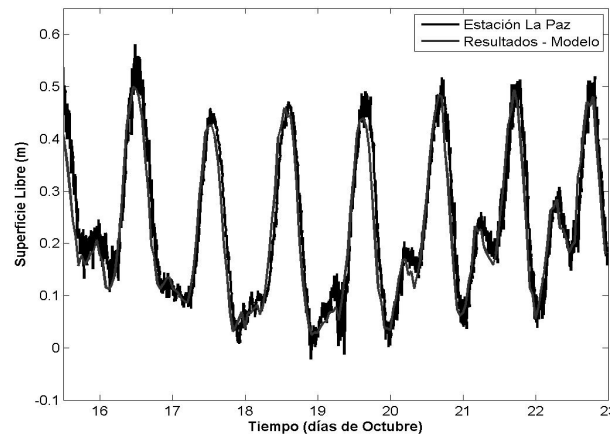


**Figura 9.** Perfiles de salinidad simulados y medidos en el día Octubre 22 en las estaciones X01 a X09

De acuerdo con los resultados presentados se puede concluir que el modelo quedó adecuadamente calibrado y validado para Bahía Barbacoas. La discretización de la malla horizontal tiene un efecto menor en los patrones generales de circulación, aunque en las regiones cercanas a las bocas el efecto puede ser importante. Este efecto se puede minimizar mejorando la resolución de la malla horizontal en estas zonas pero como el interés de este estudio se concentra en la circulación media en la bahía, los detalles cerca de las bocas no son relevantes. El hecho

de que el modelo capture la forma de los perfiles de salinidad garantiza que la física de los procesos (interacciones entre la pluma de agua dulce y el agua oceánica) presentes en Bahía Barbacoas está adecuadamente representada por el modelo.

Como parte del proceso de calibración, también se observó que el modelo reproduce adecuadamente los niveles de superficie libre observados en campo, tal como lo muestra la Figura 10 para el sitio conocido como La Paz (Figura 2).



**Figura 10.** Comparación de superficie libre entre el modelo y los datos medidos

## 4.2. Análisis de escenarios

Los resultados de la modelación muestran que la concentración del trazador empleado para dar una idea del patrón de transporte horizontal de la pluma de sedimentos en suspensión cambia en el tiempo y en el espacio como resultado de las corrientes generadas por la marea y, sobretodo, por el viento. La Figura 11 muestra, a manera de ejemplo, la distribución superficial de concentración de trazador en seis instantes de tiempo durante un día de la época climática III. Se aprecia cómo la pluma de trazador se contrae y luego se extiende durante el día siguiendo el forzamiento del viento. No se observa ninguna corriente periférica dominante que pudiera ser un medio preferencial para el transporte del trazador. Se aprecia que el trazador llega a la costa de la Isla de Barú proveniente de la boca del Caño Matunilla atravesando transversalmente la bahía y no como una corriente continua a lo largo de la costa.

La estructura vertical de la pluma en una sección transversal que atraviesa toda la bahía en su parte más externa en dirección noroeste-sureste (Figura 12) muestra que las concentraciones importantes de trazador se observan en una delgada capa superficial de unos 2 m de espesor, con excepción del extremo final del corte que se encuentra relativamente cerca de la boca del caño Correa, en donde se profundiza hasta unos 5 m debido a la proximidad del afluente. A pesar de que la profundidad de la pluma también varía debido fundamentalmente a cambios en la magnitud del viento, los valores significativos de concentración de trazador se encuentran siempre cerca de la superficie, por lo que los campos superficiales de trazador son un buen indicador del transporte.

Dado el carácter cíclico de los procesos, una forma adecuada de estudiar las condiciones en la bahía es mirar la concentración media en un período dado de tiempo que cubra varios ciclos diarios. La Figura 13 muestra la situación superficial para la concentración de trazador y la velocidad para cada una de las épocas climáticas obtenida como el promedio de los últimos 10 días de simulación. En la época climática I (Figura 13a) se aprecia que la pluma se mantiene recostada sobre la margen suroriental de la bahía y hacia el sur debido a la acción del viento, alejándose de las Islas del Rosario. Este comportamiento se repite durante

la época climática II (Figura 13b). Para la época climática III (Figura 13c), correspondiente a caudales altos en los caños y vientos débiles con direcciones predominantes del noroeste, suroeste y sur, pero fluctuantes, la pluma de concentraciones medias se extiende más allá de la entrada de la bahía, cubriendo una gran área hacia el sur. La concentración media del 1% no alcanza a las Islas del Rosario, pero se observa que la concentración media del 5% cubre toda Bahía Barbaçoas y se extiende también hacia el sur. Durante la época climática IV (Figura 13d), con menores caudales y con un régimen de vientos similar al de la época climática III pero con mayor frecuencia de eventos provenientes del sur, se observa que la condición media de la pluma también se extiende más allá de los límites de la bahía, cubriendo una menor área que en la época III, pero ahora el extremo norte de la pluma se aproxima a las Islas del Rosario.

Otro parámetro importante en el estudio de plumas fluviales es la velocidad de avance del frente, pues da una idea del tiempo disponible para que se lleven a cabo procesos fisicoquímicos, de difusión y de sedimentación. Como una manera indirecta de estimar la velocidad de avance del frente de la pluma en Bahía Barbaçoas, se calculó el avance máximo que logró la pluma en las 36 horas siguientes al comienzo de inyección del trazador. En la Figura 14 se muestra el avance de estas plumas en términos de las concentraciones del 1% y del 5% del valor de concentración especificado en las bocas de los caños, para las cuatro épocas climáticas. Estos resultados confirman que durante las épocas III y IV, los frentes de las plumas viajan más rápido hacia las Islas del Rosario que en las otras dos épocas climáticas. Al interpretar esta figura en conjunto con la Figura 13, se infiere que las plumas tienen poca probabilidad de llegar a las Islas del Rosario durante las épocas climáticas I y II.

Del análisis anterior, se deduce que las épocas en las cuales el viento presenta una mayor variabilidad en su dirección, con eventos esporádicos importantes (épocas III y IV), son las épocas críticas en términos de áreas de cubrimiento de la pluma y su avance hasta las Islas del Rosario.

## 5. Discusión y conclusiones

El uso de un trazador inerte no permite evaluar el transporte real ni las concentraciones de sedimento en suspensión reales en la bahía, debido a que el trazador no experimenta sedimentación. Un estudio del proceso de sedimentación requiere mediciones específicas y calibración rigurosa de los parámetros que gobiernan este proceso, incluyendo el proceso de floculación de los sedimentos finos por las sales disueltas en el agua de mar. Sin embargo, el estudio con el trazador inerte permite, no solo estimar el camino a lo largo del cual el material suspendido es transportado horizontalmente mientras es susceptible de sedimentarse, sino que también permite estimar las características de la componente horizontal del transporte.

La discretización espacial seleccionada se obtuvo como un compromiso entre precisión obtenida en los resultados y el tiempo de simulación de cada caso en estudio. A pesar de que la discretización es adecuada para simular las características del flujo lejos de las bocas de los caños, evaluar en detalle el comportamiento de las plumas y los sedimentos al salir de cada caño exige una malla más fina en cercanías de esas bocas. Dicha malla fina fue construida pero su implementación implicaba tiempos de simulación de unas 20 horas por cada simulación. Esto no resulta práctico cuando se desean realizar múltiples análisis.

A pesar de todas las limitaciones, los resultados de las simulaciones son bastante buenos para el grueso de la bahía, según se observa de la buena calibración y validación, obteniéndose una buena representación de la propagación de la pluma una vez ha experimentado la difusión inicial. Es especialmente valiosa la adecuada representación que el modelo hace del espesor de la capa superficial sobre la cual se distribuye el momentum impartido por el viento. Esto garantiza que la masa acelerada por el viento está bien simulada y por lo tanto, también lo están las aceleraciones y velocidades horizontales.

Las épocas en que se presentan los eventos de avance de la pluma hasta las Islas del Rosario no están caracterizadas por fuertes vientos, sino que son aquellas en las cuales la dirección de los vientos fluctúa, es decir cuando la ZCIT está más al norte. Las épocas de vientos fuertes (noviembre, diciembre, enero) no son

críticas debido a que en estas épocas la ZCIT está en su posición más al sur y los vientos alisios soplan constantemente hacia el suroeste sobre todo el Mar Caribe, alejando la pluma de las Islas del Rosario.

Otro resultado interesante de las simulaciones es el de que no se identifican corrientes concentradas que sirvan como medio dominante de propagación de la pluma, como se sospechaba inicialmente, sino que la pluma presenta un frente ancho que se extiende por varios kilómetros.

Para estimar adecuadamente concentraciones de sedimentos y de otras especies que afectan la calidad del agua en Bahía Barbacoas y el área del Mar Caribe hasta las Islas del Rosario, se debe realizar un estudio más detallado que considere procesos como la floculación y depositación de partículas suspendidas, y los procesos bioquímicos que ocurren en el cuerpo de agua. Consideramos que hace falta un estudio integral (mediciones de campo y modelación numérica) que permita conocer la verdadera magnitud de las diferentes dinámicas sobre los aportes sedimentarios del Canal del Dique en diferentes épocas del año así como las características físicas de los sedimentos que llegan a la Bahía Barbacoas. Dicho estudio debe tener un carácter estacional y multianual para contemplar los diferentes fenómenos climáticos y la interacción con las dinámicas marinas.

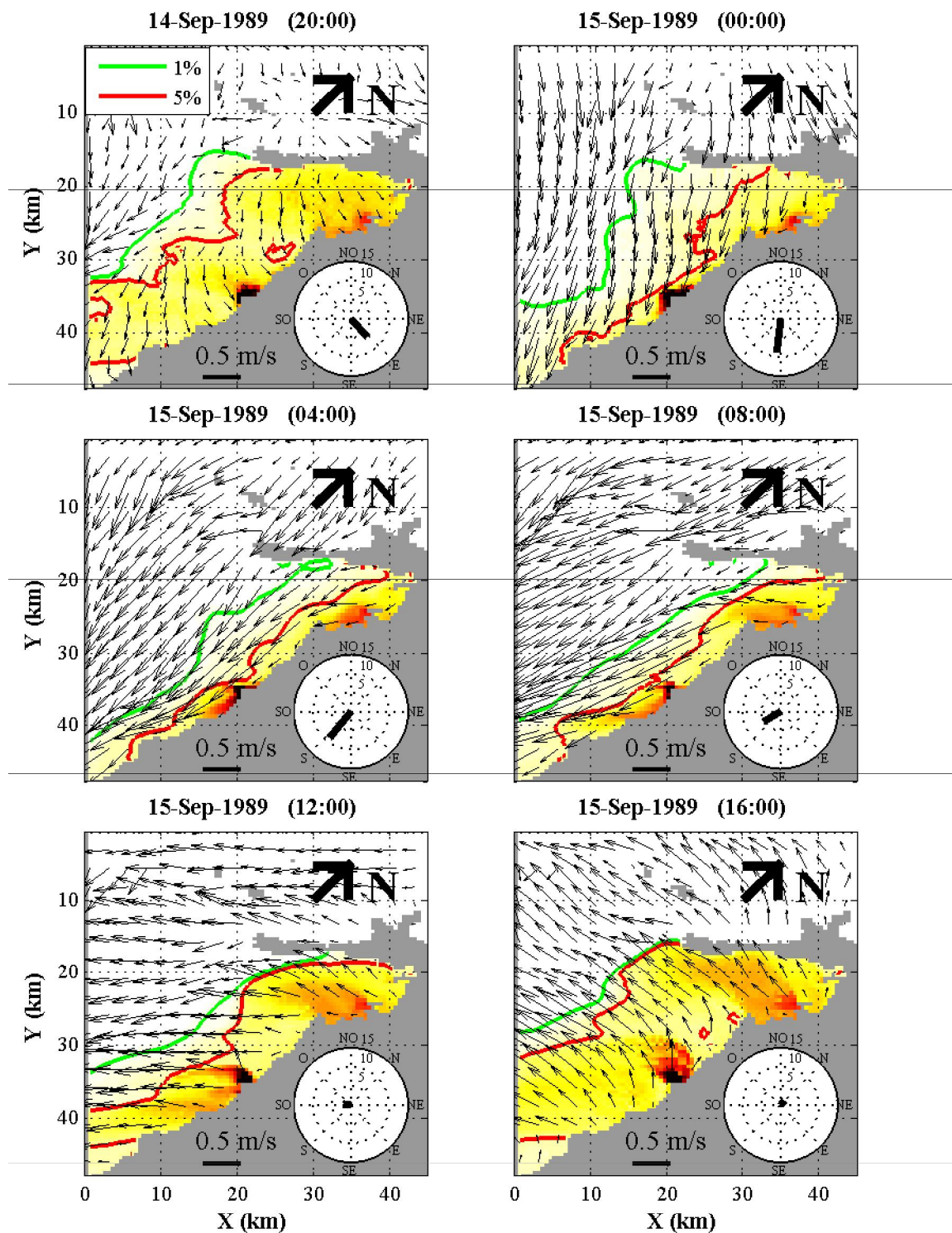
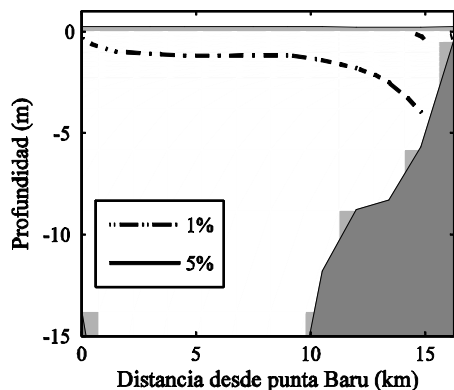
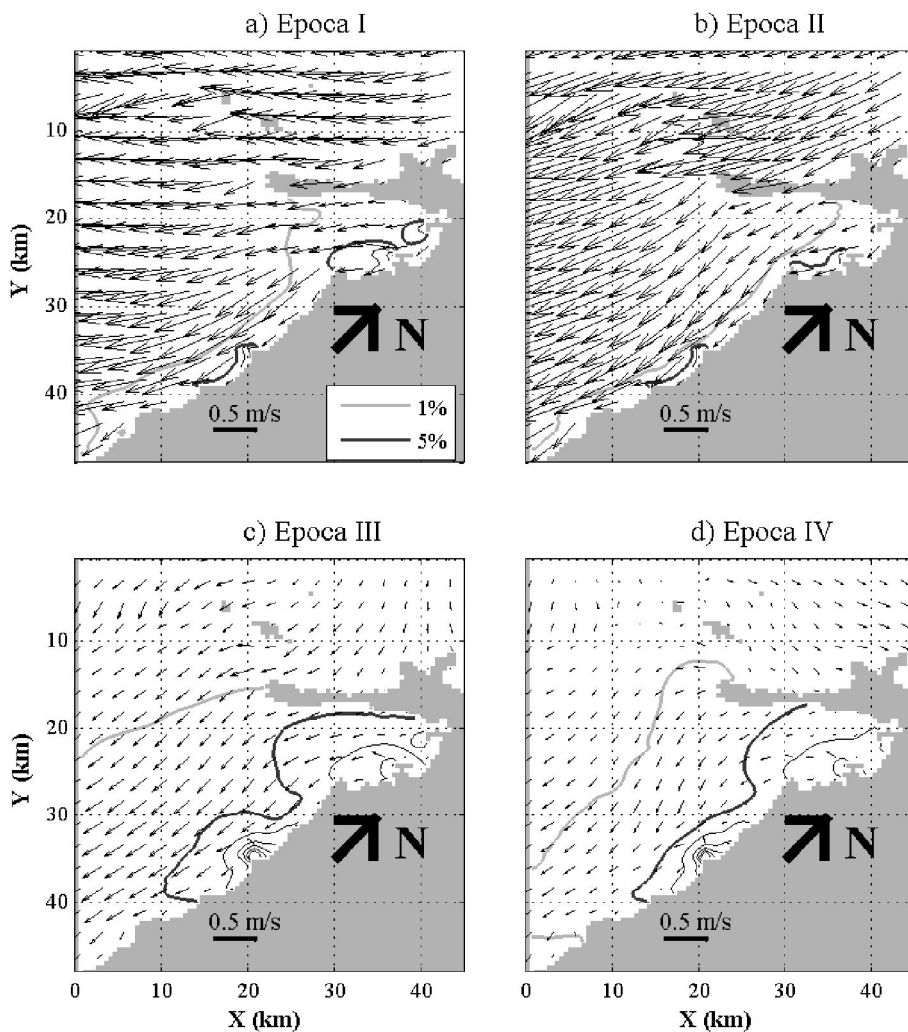


Figura 11. Secuencia de la concentración de trazador y de la velocidad en superficie durante un ciclo diario en la época climática III. Se destacan las concentraciones de 1% y 5% de la concentración especificada en la salida de los caños. El recuadro muestra la magnitud y dirección del viento en cada instante.

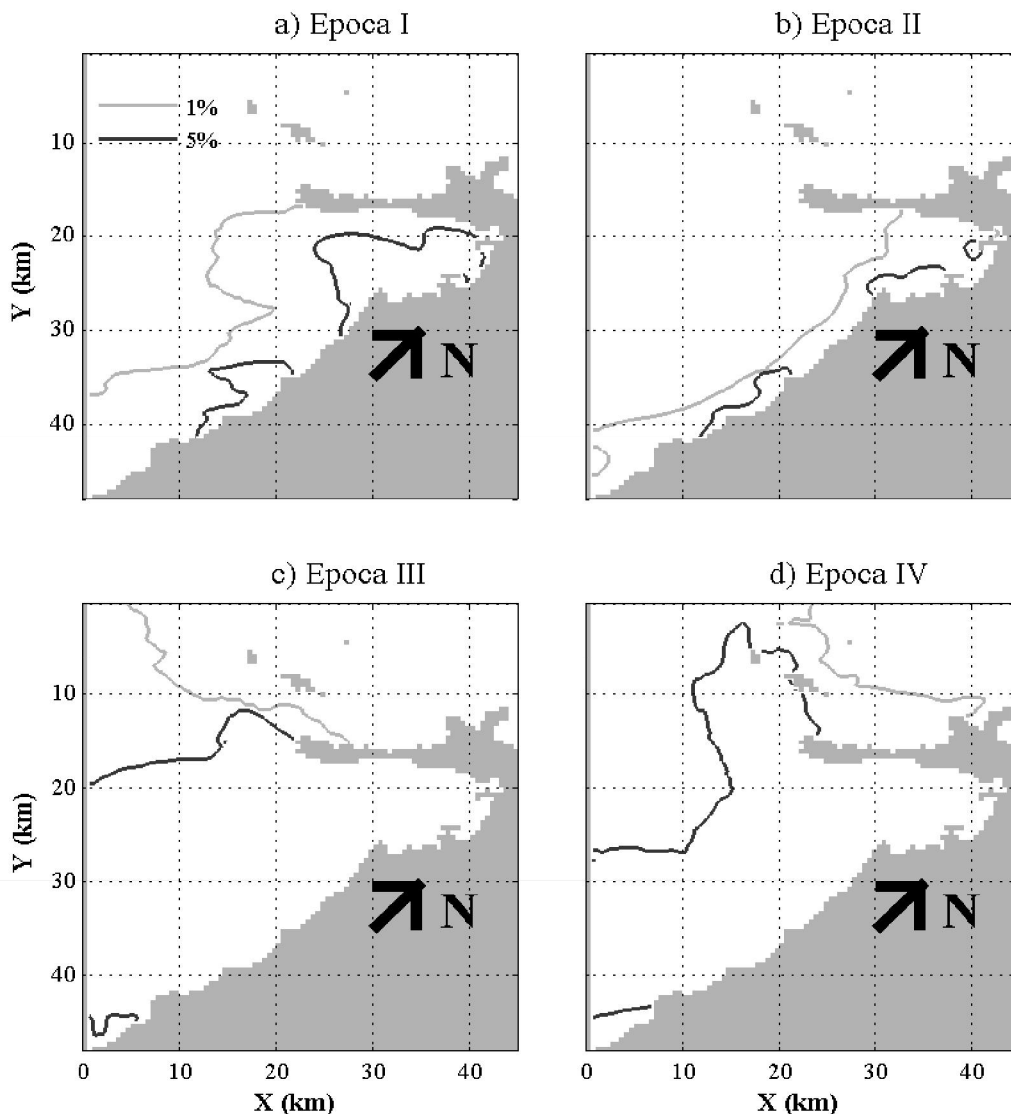




**Figura 12.** Ubicación en profundidad de las líneas de concentración media del 1% y del 5% obtenidas al promediar los resultados de los últimos diez días de simulación de la época climática III a lo largo de una sección transversal a la entrada de la bahía.



**Figura 13.** Campo superficial del promedio de 10 días de concentración de trazador y velocidad para (a) Época climática I, (b) Época climática II, (c) Época climática III y (d) Época climática IV. Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.



**Figura 14.** Avance máximo en 36 horas de la pluma superficial de trazador en 36 horas para (a) Época climática I (b) Época climática II, (c) Época climática III y (d) Época climática IV. Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.

## 6. Agradecimientos

El grupo de investigación OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, agradece a la empresa Exocol y al Doctor Carlos Andrade por los recursos y el equipo de trabajo puesto en la campaña de campo; a la empresa HidroConsultores Ltda. por los equipos facilitados para la campaña de campo; al hotel Sport Barú por facilitar sus

instalaciones para el alojamiento e instalación de un medidor de nivel. Se agradece además a los estudiantes Ángela María Gómez y Julián Ceballos por su apoyo en el procesamiento de la información, a los profesores Jaime Iván Ordoñez y a Luis Alejandro Camacho de la Universidad Nacional - Sede Bogotá. Al CWR se le agradece por permitir la utilización del modelo ELCOM, y finalmente a Cormagdalena por financiar el proyecto: "Estudio de viabilidad de realizar sedimentación controlada en

Bahía Barbacoas y de reducción de la sección transversal del Canal del Dique" dentro del cual se desarrolló este trabajo.

## 7. Bibliografía

- Appt, J., Imberger, J. and Helmut, H. K., 2004. Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance. *Limnol. Oceanogr.*, 49(4), pp. 919-933.
- Andrade, C. A., 1993. Análisis de la velocidad del viento sobre el Mar Caribe. *Boletín Científico del CIOH* 13, pp. 33-44.
- Casulli, V. and Cheng R., 1992. Semi-implicit finite difference methods for threedimensional shallow water flow. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 15, pp. 629 - 648.
- Chapra, S., 1997. *Surface Water-Quality Modelling*. McGraw-Hill, pp. 844.
- Dallimore, C. J., Hodges, B. and Imberger, J., 2003. Coupling an underflow model to a three-dimensional hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), pp. 748-757.
- Gómez-Giraldo, A., Imberger, J. and Antenucci, J. P., 2006. Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret. *Limnol. Oceanogr.* 51, pp. 229-246.
- Hodges, B., Imberger, J., Saggio, A. and Winters, K. B., 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.*; 45 (7), pp. 1603-1620.
- Hodges B. and Dallimore C., 2006. *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. Science Manual*. Centre of Water Research. University of Western Australia.
- Hubbard, D. K., 1986. Sedimentation as a control of reef development. *Coral reef*; 5, pp. 117-125
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R. and Collins, W., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*; 77 (3), pp. 437-471.
- Laval, B., Imberger, J., Hodges, B. R. and Stocker, R., 2003. Modeling circulation in lake spatial and temporal variations. *Limnology and Oceanography*; 48 (3), pp. 983-994..
- Levitus, S., 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean*, NOAA Professional Paper No. 13, pp. 191
- Lonin, S., 1997. Cálculo de la transparencia del agua en la bahía de Cartagena, *Boletín Científico CIOH*. Vol. 18, pp.85-92.
- Martin, J. L. and McCutcheon, S. C., 1999. *Hydrodynamics and transport for water quality Modeling*. New York, Lewis Publishers.
- Poveda G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28(107), pp. 201-222.
- Pritchard, D., 1967. Observation of circulation in coastal plain estuaries. G. H. Lauff (Ed.), *Estuaries. Am. Assoc. Adv. Sci. Spec. Publ.*, 83 pp. 37-44.
- Stocker, R. and Imberger, J., 2003. Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography*; 48 (3), pp 971 - 982.
- Tuchkovenko, Y., Lonin S. y Calero L., 2000. Modelación ecológica de las bahías de Cartagena y Barbacoas bajo la influencia del Canal del Dique. *Avances en Recursos Hidráulicos*; 7, pp 76-94.
- UNAL, 2002. *Dinámica Fluvial Deltaica y Litoral del Canal del Dique*. Universidad Nacional de Colombia - Ministerio del Medio Ambiente. Cap. 1, 3, 5.
- UNAL, 2007. *Estudios e investigaciones de la obras de restauración ambiental y de navegación del canal del dique*. Informe de Hidrología. Universidad Nacional de Colombia - Cormagdalena, pp. 4-44
- Urbano, J., Thomas, Y. F., Parra, C. y Genet, P.Y., 1992. Dinámica de la pluma de turbidez del canal del Dique en la Bahía de Cartagena, Colombia. *Boletín Científico CIOH* 11, pp 3-14.

