

## CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO PARA EL ESTUDIO DE LOS PATRONES DE CIRCULACIÓN EN EL GOLFO DE URABÁ, COLOMBIA

*Luis Javier Montoya J. & Mauricio Toro B.*

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*  
*ljmontoyj@unalmed.edu.co, fntoro@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 16 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 05 de Julio de 2006

### RESUMEN

Se efectúa un estudio numérico para explicar los principales factores que afectan la dinámica oceanográfica del golfo de Urabá. Se presentan los pasos que fueron seguidos para la calibración de un modelo matemático (modelo ELCOM). Se realizaron una serie de experimentos numéricos para analizar la sensibilidad del modelo a parámetros numéricos y a forzamientos físicos. Dicho análisis ayudó en la descripción de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá. Se presentan los resultados de una campaña de mediciones, la cual mostró la fuerte estratificación en las aguas del Golfo, explicado por el efecto de las descargas del río Atrato. Se prestó especial atención en la capacidad del modelo de describir la pluma turbia del río. Del análisis de los diferentes factores se encontró que la dirección del viento es fundamental para explicar la dinámica de la pluma del río Atrato. Se analizaron los patrones obtenidos en las dos épocas climáticas típicas en la zona, vientos del noroeste y vientos del suroeste. El modelo mostró que cuando los vientos son predominantemente del suroeste, la pluma es evacuada del Golfo por el extremo noreste, mientras que cuando los vientos son predominantes del noroeste, éstos son capaces de invertir la dirección de la pluma, confinándola en la zona sur del Golfo. Se analiza el papel de otros factores (mareas, rotación de la tierra, entre otros) sobre la circulación, mostrando algunos efectos particularmente importantes para en ciertas zonas.

**PALABRAS CLAVES:** Modelos Hidrodinámicos, Calibración, Circulación Oceánica, Golfo de Urabá (Colombia), Simulación Numérica

### ABSTRACT

This paper presents the numerical study to explain the driving forces that affect the oceanographic dynamics in the Gulf of Urabá, Colombia. The steps followed for the calibration of a mathematical model known as ELCOM are showed. Several numerical experiments were conducted to analyze the model sensitivity to numerical and physical driving forces. This analysis helps us to describe the circulation patterns in the Gulf of Urabá. Field data showed that the Gulf water is stratified, explained by the discharge of the Atrato River. The wind direction is very important to explain the Atrato river plume dynamics. The simulated circulation patterns were analyzed in two typical climatic seasons in the zone. Norwesterly and southwesterly winds were studied and the model showed that if winds are mainly southwesterlies the plume leaves the Gulf by its northeastern boundary; on the other hand, northwesterly winds are able to invert the plume direction, and it is confined to the south region of the Gulf. Other driving forces (tides, Earth's rotation, among others) show particularly important effects for some local zones.

**KEY WORDS:** Hydrodynamic Models, Calibration, Ocean Circulation, Gulf Urabá (Colombia), Numerical Simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes tipos de frentes oceánicos, los frentes estuarinos han recibido una especial atención (vea Lagnier, 1993). Los frentes estuarinos cumplen un importante papel en la circulación en las regiones cercanas a la costa por su productividad, el transporte de sedimentos y contaminantes e influyen significativamente en procesos que afectan la calidad de las aguas (Lagnier, 1993).

Durante los últimos tiempos, la modelación numérica ha sido ampliamente utilizada para el estudio de dichos frentes o plumas, tanto para la explicación de los procesos que rigen su hidrodinámica (ver por ejemplo, Wiseman y Garvine, 1995, Garvine, 1999, O'Donell, 1990, Oey y Mellor, 1993 o Chao, 1988) como para la descripción de frentes estuarinos en la naturaleza (Baptista et al., 2005, Wong et al., 2004, Simionato et al., 2004, Marsaleix et al., 1998, Ulses et al., 2005, Ruddick et al., 1995, Xing y Davies, 2002, Estournel et al. 1997, Kourafalou, 2001).

En este trabajo se pretende explicar la circulación oceánica en el golfo de Urabá y el papel que cumplen el viento, las mareas, la descarga del río Atrato y la rotación de la tierra en la circulación de la zona. Para este propósito se han utilizando simulaciones numéricas. También se busca presentar un análisis del efecto de los principales parámetros numéricos sobre el desempeño del modelo numérico utilizado. Para las simulaciones se utilizó el modelo ELCOM el cual es un modelo hidrodinámico desarrollado por el “Centre for Water Research” (C.W.R.) de la Universidad de “Western Australia” y que ha sido aplicado exitosamente en una gran variedad de ambientes acuáticos (Dallimore et al., 2003, Hodges et al., 2000, Laval, 2002, Leon et al., 2004). Para la calibración se prestó especial atención en la capacidad del modelo de representar adecuadamente la estratificación encontrada en gran parte del golfo. Se presentan los resultados de una campaña de mediciones y se comparan los resultados obtenidos con el modelo con los de dicha campaña.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado en la costa Caribe colombiana en cercanías a la frontera entre Colombia y Panamá. Se ubica entre las latitudes

7°55' N y 8°40' N y las longitudes 76°53' W y 77°23' W. Tiene una forma alargada semicerrada, con una orientación sur-norte en la región al sur del delta del río Atrato, y una noroeste-sureste al norte de dicho delta. Tiene aproximadamente 80 km de largo, en promedio 25 km de ancho y bajas profundidades con un promedio de 30 m y valores máximos de 80 m en la frontera abierta, al norte. En la parte central del golfo, hacia el suroeste desemboca el río Atrato formando un delta típicamente fluvial, tal como lo mencionan Restrepo y Correa (2002). Los aportes de agua dulce del río Atrato se pueden estimar como un caudal promedio multianual de 2740 m<sup>3</sup>/s y los aportes promedios anuales de sedimentos de 11.26x 10<sup>6</sup> ton/año (30.84 kton/día) según Restrepo y Kjerfve (1999). En la Figura 1 se presenta la ubicación de la zona de estudio.

Por la posición de la zona de estudio, la circulación de los vientos está afectada por el mar Caribe y el Océano Pacífico. Su climatología está afectada por la ubicación de la zona de convergencia intertropical, que alcanza su posición más meridional sobre el océano Pacífico en los meses de diciembre a marzo y se ubica sobre la zona norte del Chocó y la región de Urabá entre los meses de mayo y noviembre. Se presentan típicamente dos temporadas climáticas, una seca con poca precipitación entre diciembre y marzo, con predominio de los vientos alisios que entran por el norte y el noroeste y una temporada lluviosa de mayo a noviembre con vientos provenientes del Pacífico desde el sur y suroeste (Universidad de Antioquia, 1997).

En el campo de la oceanografía física son pocos los estudios que se han realizado en el golfo de Urabá. Son importantes los estudios de Molina et al., (1992) y de Chevillot et al., (1993) quienes realizan una descripción de las corrientes superficiales en el golfo apoyándose en los patrones de la pluma de sedimentos del río Atrato utilizando imágenes de satélite. Dichos estudios presentan una corriente de entrada por la margen occidental y otra de salida por la margen oriental. También describen una deriva litoral en la costa en sentido norte a sur en las dos márgenes. Chevillot et al., (1993) reportan fuertes variaciones en la salinidad en las aguas del golfo entre la temporada lluviosa y seca, registrando mayores salinidades en la época lluviosa. Dicho comportamiento lo explican por las variaciones del régimen de vientos entre estas dos temporadas, así en la temporada seca los vientos confinan las aguas del río Atrato al interior del

golfo, mientras que en la época húmeda los vientos ayudan a que las descargas de agua sean evacuadas (Chevillot et al., 1993).

### 3. DATOS Y MÉTODOS

Se recolectaron datos de campo en un crucero denominado Urabá I en el mes de Octubre de 2004, a bordo del BI/Ancón, del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andreis (INVEMAR). Se realizaron mediciones en 32 estaciones (ver Figura 1), en las que se tomaron perfiles de salinidad,

temperatura y oxígeno disuelto utilizando CDT0 (Seabird del INVEMAR) y se tomaron muestras de 3 litros agua a diferentes profundidades mediante una botella tipo Nansen, para la medición de la concentración de sólidos suspendidos mayores a 6 micras mediante filtración y peso del material retenido en filtros 595 y para la medición de la turbidez con un turbidímetro HACH modelo 2100A de la Universidad Nacional de Colombia. Las condiciones climáticas durante el muestreo, correspondieron a las condiciones típicas de la temporada lluviosa, con vientos predominantes del suroeste con velocidades promedio de 2.3 m/s y en el rango de 0 a 7 m/s.

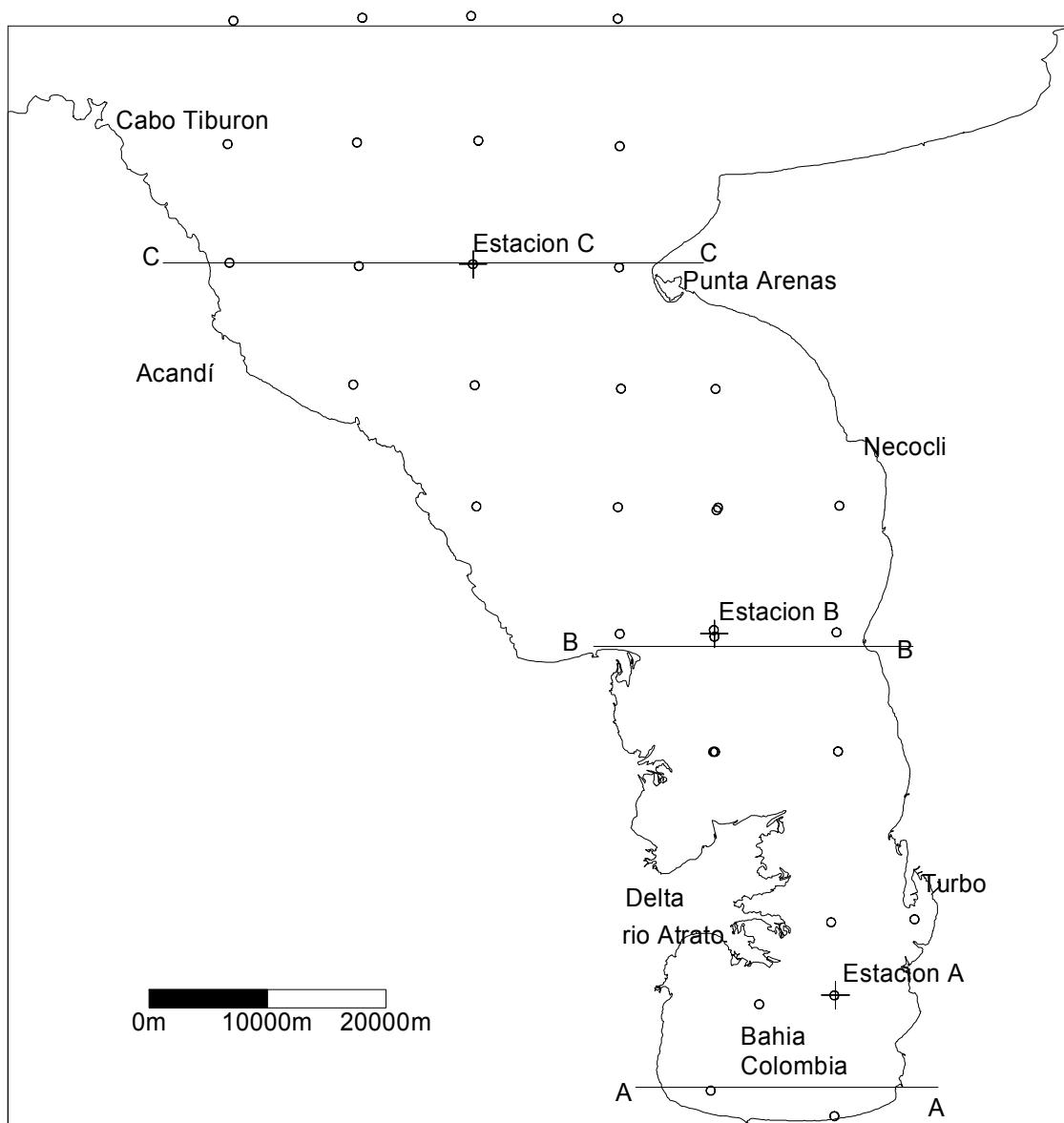


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Los datos de la campaña fueron utilizados para la calibración del modelo de simulación hidrodinámico ELCOM el cual simula flujos a superficie libre en estuarios considerando la salinidad, la temperatura, la radiación solar incidente, la acción del viento y las mareas.

El modelo ELCOM (Estuary and Lake Computer Model), desarrollado por “Centre of Water Research” (C.W.R.) de la Universidad de “Western Australia”, resuelve las ecuaciones de Reynolds y la de transporte, usando la aproximación de Boussinesq, despreciando los términos no hidrostáticos en la presión. Para el manejo de la turbulencia utiliza una aproximación del coeficiente de torbellino en la horizontal (Hodges et al., 2000) y un modelo uni-dimensional de mezcla en la vertical (Imberger y Paterson, 1990). La cota de la superficie libre se calcula utilizando una ecuación resultante del promediado de las ecuaciones de continuidad a lo largo de la vertical. Para la solución numérica de las ecuaciones, el modelo utiliza un método semi-implícito con una discretización cuadrática tipo Euler-Lagrange de los términos advectivos en las ecuaciones de momentum (Cassulli y Cheng, 1992) y el esquema ULTIMATE QUICKEST para la ecuación de transporte (Leonard, 1991). Detalles sobre el modelo se pueden encontrar en el manual científico en la dirección electrónica del CWR.

## 4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración es la fase más importante en el desarrollo e implementación de un modelo hidrodinámico (Mouhaan et al, 1994). En la actualidad no se reporta en la literatura especializada una metodología completamente aceptada para la calibración, y generalmente se requiere un laborioso proceso de ensayo y error. En este estudio se siguió la metodología presentada por Palacio y Toro (2002) en la cual realiza un estudio de la sensibilidad del modelo a diferentes parámetros tanto físicos como numéricos. El objetivo de este análisis de sensibilidad es el de conocer el comportamiento del modelo en diferentes situaciones para, de esa manera, identificar cuales son las principales variables que se deben controlar para efectos de la calibración y con el fin de encontrar parámetros que ofrezcan una adecuada representación de los fenómenos que se quieren simular.

Evaluar la sensibilidad del modelo a los parámetros numéricos ayuda a identificar los parámetros

relacionados con los esquemas numéricos implementados en el modelo, que en este caso están directamente relacionados con el tamaño del intervalo de cálculo y con el tamaño de la malla de discretización espacial. Una malla extremadamente fina ofrecerá buenos resultados, muy detallados, pero con un gran esfuerzo computacional (en términos de tiempo de cómputo de las simulaciones), mientras que una malla muy gruesa podría ofrecer un bajo esfuerzo computacional pero con resultados tan generales que no representen adecuadamente los fenómenos que se quieren simular. La selección de las características numéricas está en directa relación con los fenómenos que se quieren representar. Entonces, la selección de una malla adecuada no es siempre un problema sencillo, pues en muchas ocasiones no se conoce de manera a priori la escala que representa mejor los fenómenos involucrados.

Los problemas hidrodinámicos involucran fenómenos que se encuentran en diferentes escalas espaciales y temporales. Para solucionar este problema, los fenómenos de menor escala suelen ser parametrizados utilizando análisis de laboratorio para validar dichos parámetros. Adicionalmente, al realizar simulaciones, es necesario que las mallas utilizadas para la solución de las ecuaciones no originen errores de magnitudes tales que afecten la solución y que los errores por la discretización (los cuales son inevitables) no generen problemas de órdenes de magnitud similares a los fenómenos que se quiere estudiar. Para este caso, se espera que el modelo represente adecuadamente la estratificación salina, en nuestro caso particular.

Para la calibración de un modelo hidrodinámico es indispensable la información de campo. Hay que tener en cuenta que la resolución espacial y temporal con que se toman los datos de campo afectan la calibración: entre mayor sea la cantidad de información de campo recolectada mayores serán los esfuerzos que se requerirán para la calibración del modelo. Con los datos de campo recolectados para este estudio se buscó abarcar la mayor extensión espacial posible de la zona de estudio (ver la distribución de estaciones en la Figura 1) y para tener en cuenta la variación temporal se realizaron réplicas en 3 estaciones a diferentes horas del día.

### 4.1. Análisis de sensibilidad a los parámetros numéricos

#### 4.1.1. Tamaño de la malla

La selección de la mejor resolución de la malla, no es un problema simple. Aún en modelos de elementos finitos que utilizan mallas irregulares, se suelen hacer

recomendaciones sobre la configuración de la malla. En modelos que usan mallas rectangulares, una primera exigencia es la adecuada representación de las fronteras, lo cual no es sencillo de conseguir. Una mala selección de la malla puede introducir problemas en la solución, generando en algunas zonas problemas numéricos que inducen oscilaciones que se propagan en el tiempo, dando lugar a inestabilidades, o que si son controladas mediante el uso de filtros numéricos pueden producir una inapropiada representación de ciertos fenómenos locales (vea Gresho y Lee, 1981).

En este trabajo, para la selección de la malla más adecuada se realizó una evaluación de la sensibilidad del modelo a cambios en la misma, utilizando un método de ensayo en donde se generó una malla inicial, la cual fue tomada como “malla base” y se genera una doblemente densa y otra la mitad de densa y se cuantifican las diferencias entre ellas. Para la evaluación de la comparación se utilizó el error relativo promedio (E.R.). En la Figura 2 (a) se presentan dichos errores para diferentes tamaños de malla.

Puesto que la circulación en plumas estuarinas es un fenómeno fundamentalmente tridimensional, la malla en la vertical debe ser seleccionada de tal forma que represente adecuadamente los fenómenos de estratificación en la vertical. En frentes generados por descargas de ríos, en los cuales la acción de las mareas y los vientos no es suficiente para romper la estabilidad generada por las fuerzas de flotación, la acción del frente se ve limitada a los primeros metros. En estos primeros metros, se produce un alto gradiente en la densidad, responsable de la estabilidad. La malla en la vertical debe ser capaz de representar adecuadamente dichos gradientes. Para ello tiene que ser suficientemente fina en las primeras capas y variar gradualmente con la profundidad (donde los gradientes son menores). En la Figura 2 (b) se presentan los errores entre diferentes mallas en la vertical. Para el caso de estudio, la resolución vertical mostró ser el parámetro numérico más importante; al refinar la resolución en de la malla vertical, mejoran los resultados del modelo, esto por los fuertes gradientes de salinidad en las capas superficiales.

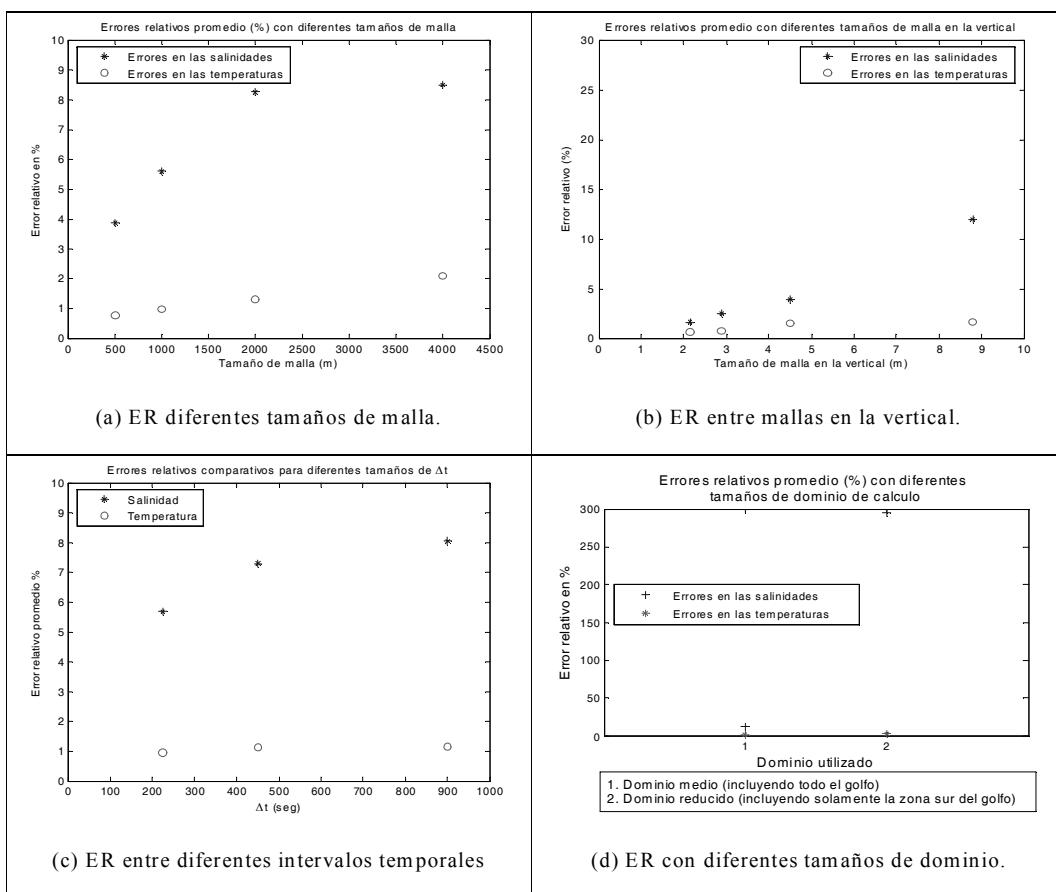


Figura 2. Análisis de sensibilidad a los parámetros numéricos

#### 4.1.2. *Tamaño del paso temporal*

El tamaño del intervalo de cálculo en la mayoría de los modelos (explícitos o semi-implícitos) se encuentra en estrecha relación con la discretización espacial utilizada. Aún en modelos implícitos, que no tienen ninguna restricción en el intervalo temporal para su estabilidad, intervalos más grandes generan aproximaciones más gruesas, por lo que es necesaria la evaluación del efecto del uso de intervalos mayores. Las principales restricciones al tamaño del intervalo temporal están dadas por la Condición de Courant-Frederix-Levi (CFL) y la restricción a la ecuación de transporte. La Figura 2 (c) presenta los errores con diferentes tamaños de intervalo temporal.

Otra característica temporal importante la constituye el “tiempo de calentamiento” del modelo. Muchos modelos inician sus simulaciones con condiciones muy lejanas a las condiciones de equilibrio (generalmente se inician con niveles, campos de salinidades, temperaturas y velocidades constantes), por lo que se toman cierto tiempo en conseguir condiciones “estables” (que cumplan con las leyes de conservación de masa, energía y momentum). Para esto suele ser suficiente con una simple observación del comportamiento de alguna de las variables (generalmente salinidad o temperatura) en un punto o varios puntos a lo largo del tiempo.

#### 4.1.3. *Dominio de cálculo utilizado*

Para realizar simulaciones en una determinada zona de estudio, es necesario delimitar un área cerrada sobre la cual se realizarán los análisis. Todo efecto por fuera de dichas fronteras será considerado como un forzamiento externo. En la realidad, lo que pasa por fuera del dominio de estudio afecta al mismo, pero al mismo tiempo, lo que pasa dentro del dominio afecta a su entorno, produciéndose retroalimentaciones que no se pueden representar como simples forzamientos externos. Una forma de considerar estas retroalimentaciones es el uso de modelos acoplados, o con el anidado de modelos, pero en todas las situaciones, siempre va ser necesaria la imposición de algún tipo de frontera.

Para ubicar adecuadamente la frontera, de tal forma que ésta no afecte significativamente la zona de estudio se puede realizar una evaluación de la sensibilidad del modelo a la ubicación de las mismas. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos con tres diferentes

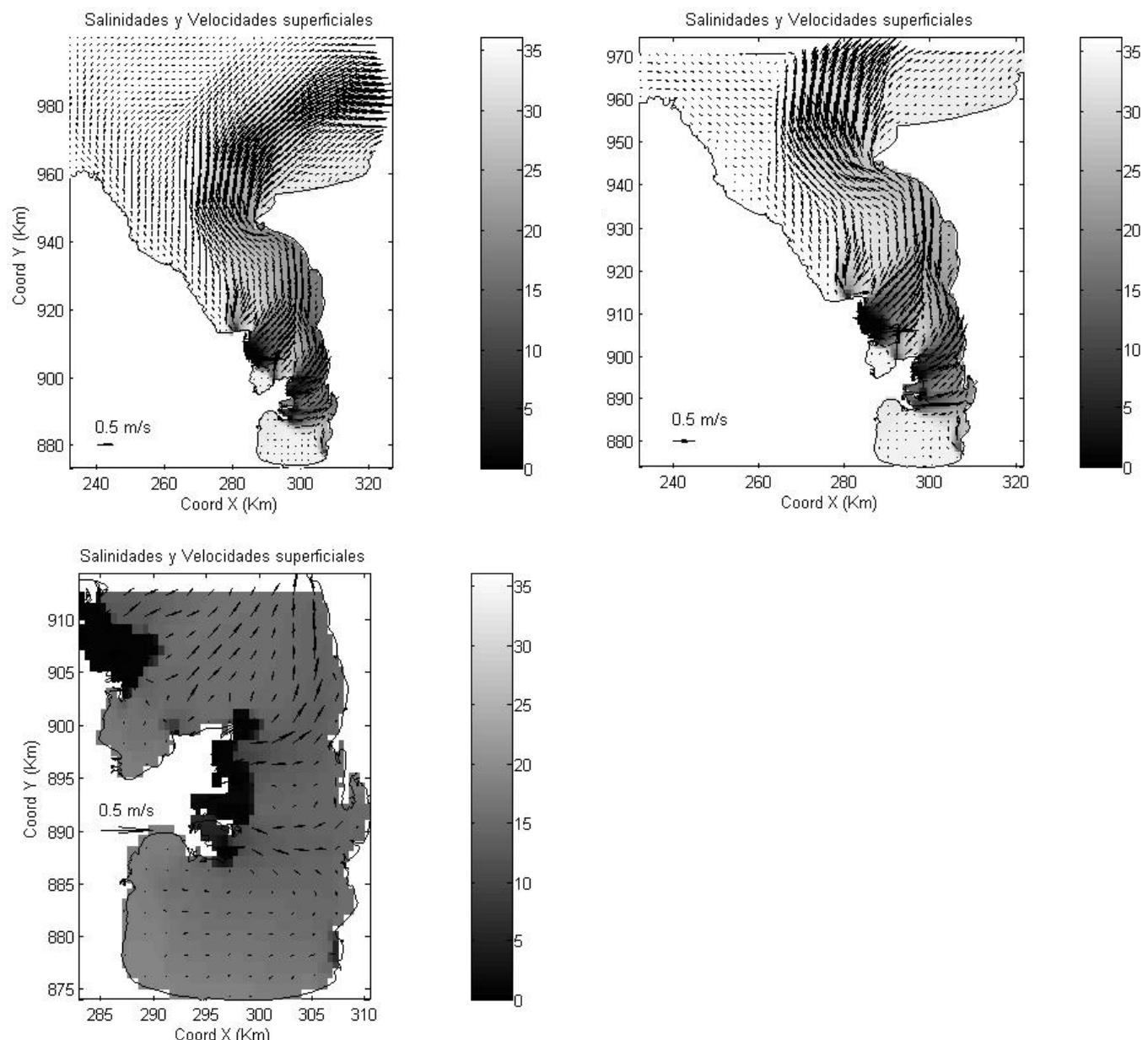
tamaños del domino de cálculo y en la Figura 2 (d) se puede observar los errores entre los diferentes dominios de cálculo (comparados con el dominio más grande). Se observa cómo la ubicación de las fronteras afecta los resultados especialmente en cercanías a las mismas y que una mala selección de la frontera puede afectar la calidad de los resultados, como sucede con la malla más pequeña, como se observa en las Figuras 3 (c) y 2 (d), mientras que al comparar las Figuras 3 (a) y (b) se observa que las diferencias entre ambos dominios se dan principalmente en la frontera. En las anteriores figuras, con el fin de resaltar la pluma del río, los tonos más oscuros representan las zonas con salinidades bajas y las zonas más claras las de alta salinidad.

#### 4.2. *Análisis de sensibilidad a los parámetros físicos*

Con el análisis de sensibilidad a los parámetros físicos se quiere valorar la respuesta del sistema a diferentes forzamientos externos, con el fin de determinar la importancia de cada uno de ellos en el comportamiento del mismo. Se estudian las principales entradas del sistema, por lo que este análisis suministra algunos elementos para la calibración y para el diseño de las campañas de medición.

Entre los principales forzamientos físicos que afectan la dinámica de un frente estuarino se encuentran el viento, las mareas, la rotación de la tierra y la descarga de los ríos (Simionato et al., 2004).

Para estudiar la respuesta del sistema ante los diferentes forzamientos se realizaron una serie de experimentos numéricos y se compararon entre sí. En la Tabla 1 se resumen dichos escenarios de simulación. Para el diseño de dichos experimentos se utilizaron características oceanográficas, hidrológicas y climáticas promedias típicas en la zona.



**Figura 3.** Resultados de simulaciones con 3 diferentes ubicaciones de las fronteras.

**Tabla 1.** Factores analizados en los experimentos numéricos.

Vientos	Descarga de los ríos	Rotación de la tierra	Mareas
SW	Caudales medios	Considerada	Semi-diurna
SW	Caudales altos	Considerada	Semi-diurna
SW	Caudales bajos	Considerada	Semi-diurna
SW	Caudales medios	Ignorada	Semi-diurna
SW	Caudales medios	Considerada	Ignorada
NW	Caudales medios	Considerada	Semi-diurna
Sin viento	Caudales medios	Considerada	Semi-diurna

#### 4.2.1. Efecto del viento

El viento cumple un papel fundamental en la circulación en una pluma estuarina. Chao (1988), con ayuda de modelación numérica, estudió el papel del viento en zonas donde el efecto de las fuerzas de Coriolis no pueden ser despreciadas. Otros autores han estudiado el efecto del viento sobre el movimiento de la pluma turbia en diferentes corrientes, utilizando modelación numérica y datos de campo (Garcia et al., 2002, Baptista et al., 2005, Marsaleix et al., 1998, Simionato et al., 2004 y Piñones et al., 2005) mostrando un significativo efecto del viento sobre la circulación de la pluma.

En nuestro caso, se plantearon tres escenarios de simulación, correspondientes a la dirección predominante del viento en la zona (ver Universidad de Antioquia, 1997), vientos del suroeste predominantes en la temporada húmeda, vientos del noroeste en la temporada seca (con velocidades de 2.5 m/s correspondientes al promedio del viento en ambas temporadas) y un escenario sin vientos. Los resultados de dichas simulaciones se presentan en la Figura 4 en la cual se observan diferencias apreciables en la salinidad superficial (nuevamente los tonos más oscuros indican zonas de menor salinidad). Los patrones presentados en la circulación superficial son consistentes con las mediciones realizadas para la época húmeda en donde los vientos soplan principalmente del suroeste. Para la época seca, el patrón muestra un comportamiento similar al presentado en trabajos anteriores para dicha época (vea Chevillot et al., 1993 y Molina et al., 1992)

#### 4.2.2. Efectos de las mareas

En la circulación estuarina, la marea cumple un papel fundamental en los procesos de mezclado. Gran cantidad de estuarios se encuentran total o parcialmente mezclados principalmente por el efecto de las mareas (vea Dyer,

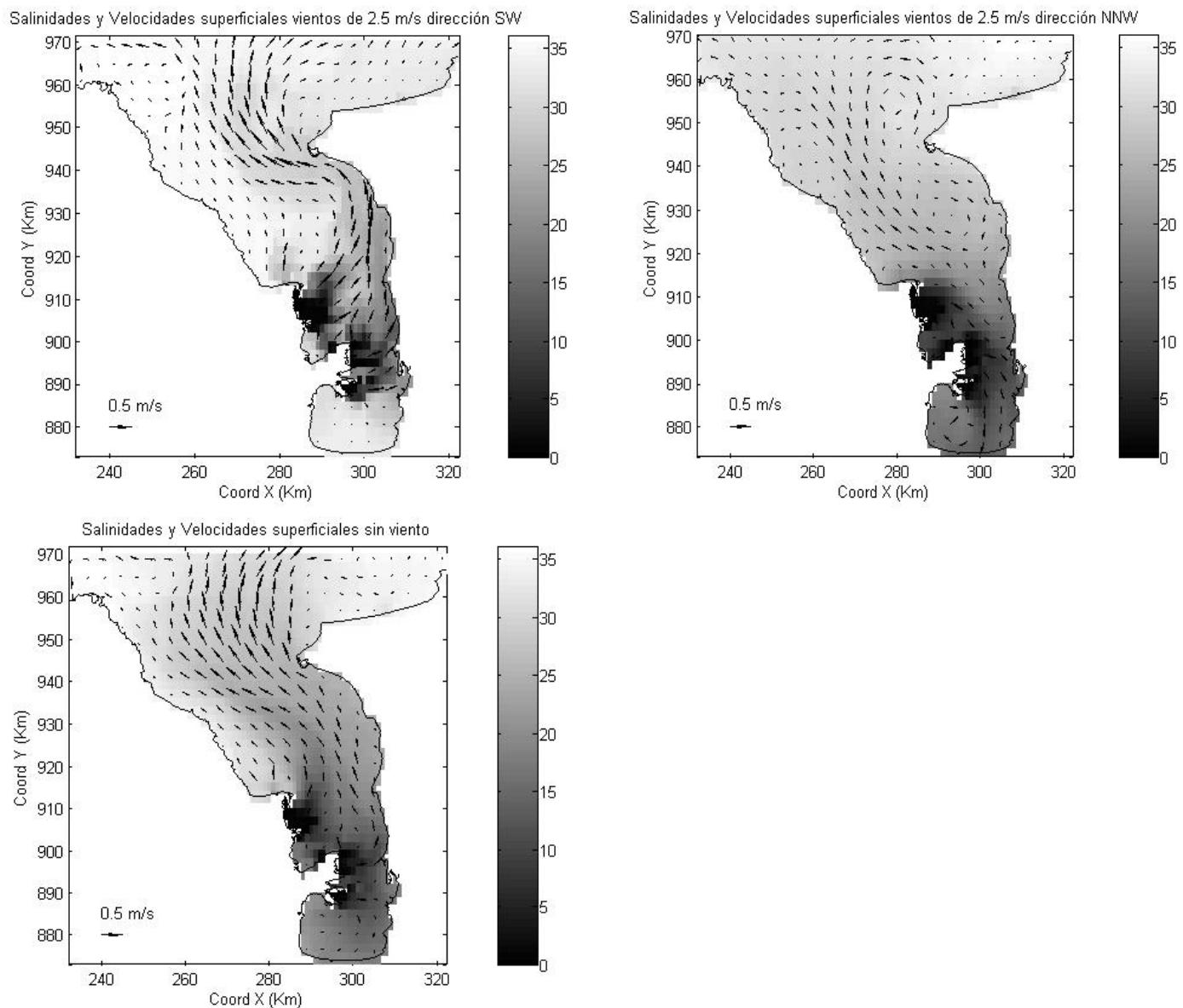
1988) y en muchos de ellos las mareas generalmente impiden el desarrollo de una pluma estuarina originando mezclados parciales o totales (vea Dyer, 1973, 1988)

En la zona de estudio se tiene un régimen micromareal, con mareas de amplitud de no más de 40 cm (vea Correa y Vernete, 2004). El mareógrafo más cercano es el de San Cristóbal en Panamá (ubicado en la latitud 9° 21' N y los 79° 54' W de longitud). Con los registros horarios de dicho mareógrafo se realizó un análisis de las frecuencias astronómicas principales de la señal de marea eliminando los efectos meteorológicos y locales de la señal (ver Cardona y Fernández, 2002), cuyos resultados en las componentes principales se presentan en la Tabla 2. Para el análisis del efecto de las mareas se realizaron simulaciones con y sin el efecto de la marea aplicada a la frontera. En la Figura 5 se presentan los resultados y las diferencias obtenidas. Se puede observar que las diferencias por el efecto de la marea sobre el flujo medio son pequeñas, presentándose las mayores diferencias (tonos más oscuros) en la zona central del golfo, la cual esta más directamente afectada por las descargas del río Atrato, sugiriendo que las mareas podrían contribuir a un movimiento local de la pluma, pero que en términos generales no controlan el movimiento general de la misma.

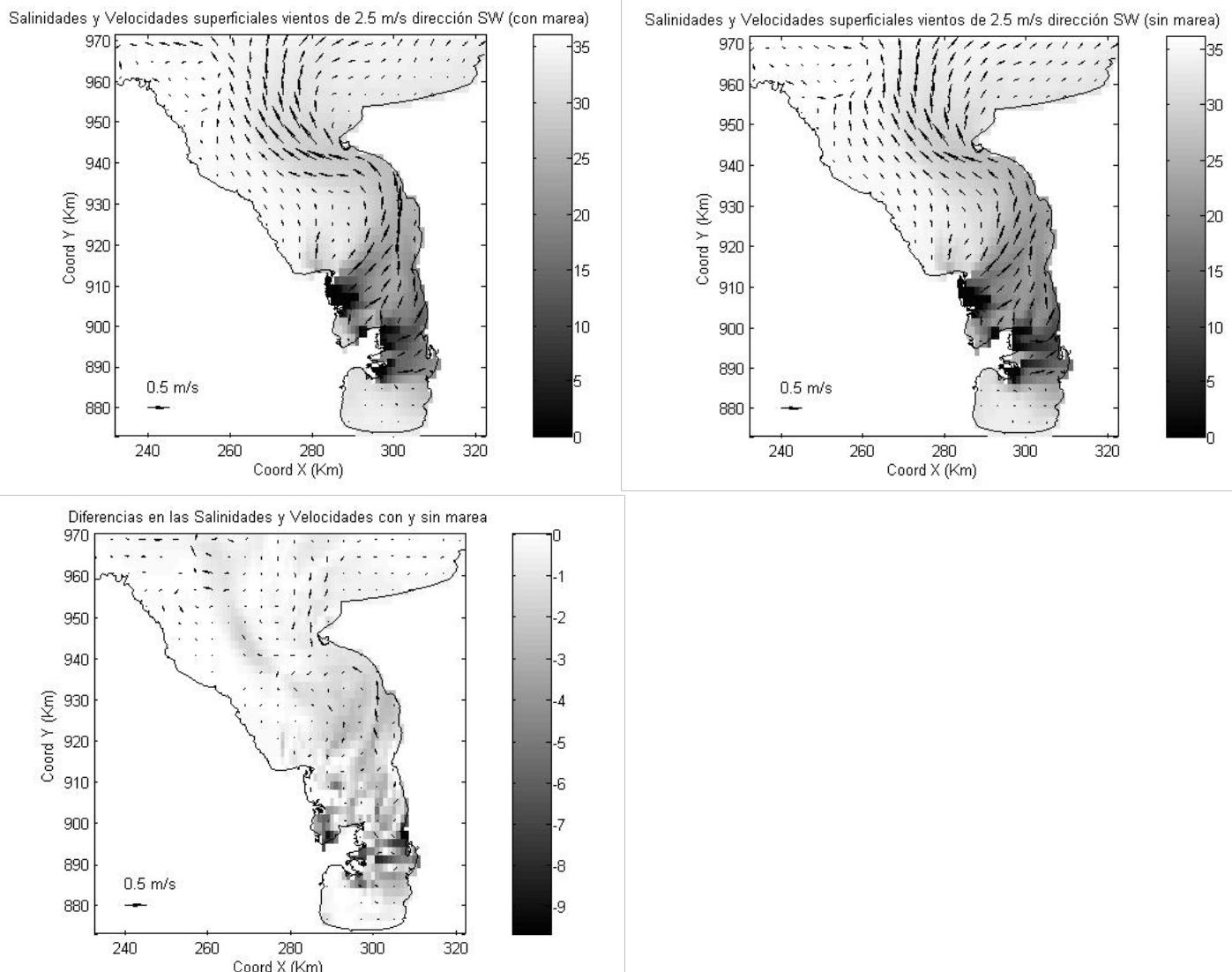
En la Figura 6 se presenta la variación en el tiempo de los perfiles de salinidad en las estaciones (A) y (B), seleccionadas en la zona sur y centro del golfo (la ubicación de estas estaciones se presenta en la Figura 1). En ellas se pueden observar los niveles de la superficie libre y como las mareas inducen oscilaciones verticales en la haloclinia.

**Tabla 2.** Frecuencias dominantes en para la estación San Cristóbal (Panama)

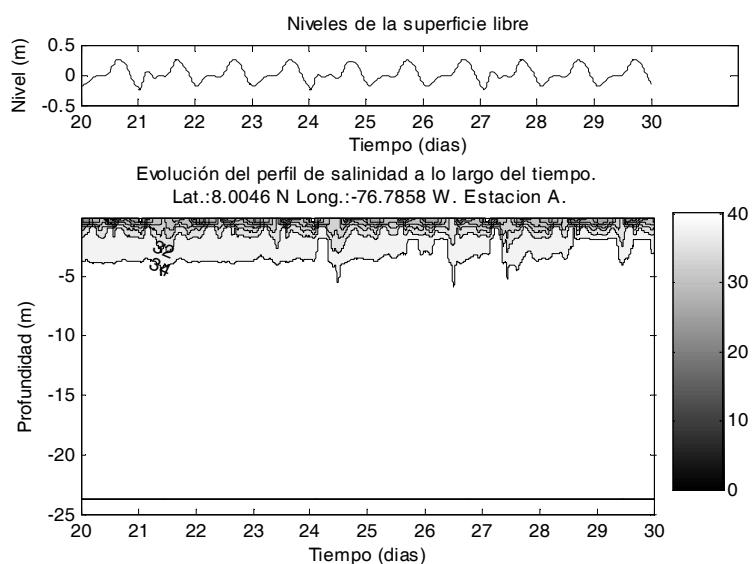
	Frecuencia (h <sup>-1</sup> )	Amplitud (cm)	Fase (°)
Mf	1.09	14.06	-12.48
	2.19	5.57	-118.71
O1	13.94	68.48	-100.70
K1	15.04	95.16	-110.35
M2	28.98	72.42	-161.70



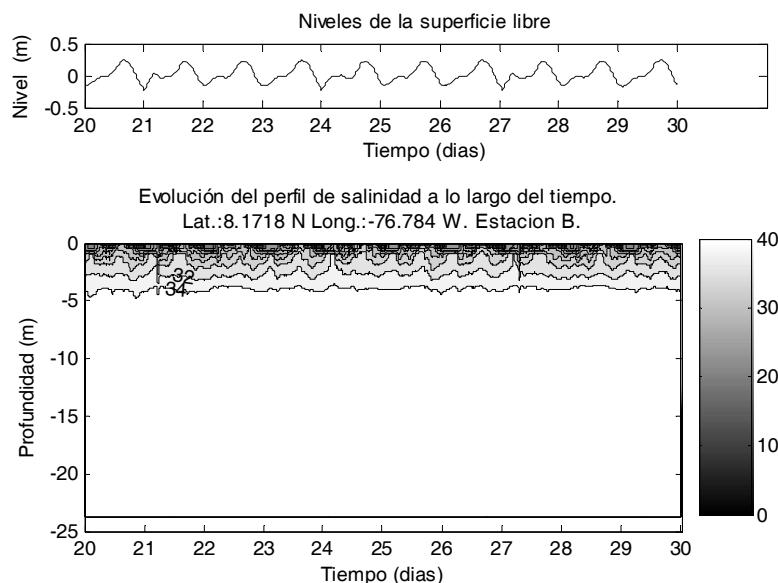
**Figura 4.** Resultados de simulaciones con 3 diferentes escenarios de viento.



**Figura 5.** Resultados de simulaciones con y sin mareas.



**Figura 6.** Evolución a lo largo del tiempo de la salinidad en las estaciones A y B.



**Figura 6. (Continuación)** Evolución a lo largo del tiempo de la salinidad en las estaciones A y B.

#### 4.2.3. Efecto de la descarga de los ríos

El aporte de los ríos cumple un papel muy importante en la circulación estuarina, por los aportes de agua dulce. La formación de una pluma turbia depende en gran medida de que la descarga sea lo suficientemente grande tal que los otros forzamientos (vientos y mareas) no sean capaces de romper la estabilidad generada por la capa boyante superficial generada por el agua más liviana descargada por el río (ver Bowman, 1988). Algunos autores han estudiado el efecto de las descargas de los ríos y han encontrado, que dichas descargas afectan los patrones de circulación local (Usles et al., 2005, Simionato et al., 2004).

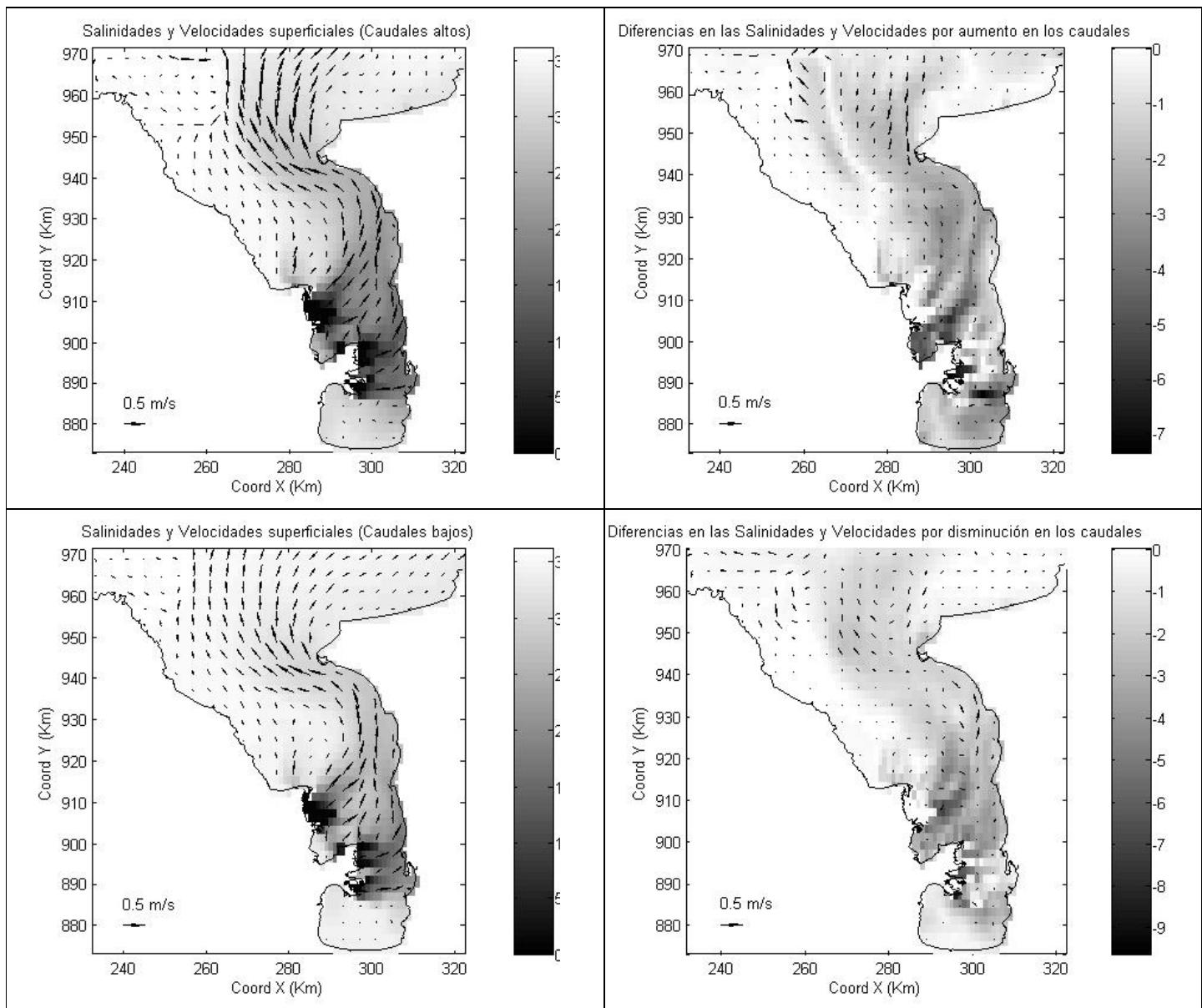
Para analizar la sensibilidad del modelo a las descargas de los ríos, se comparó un escenario medio de circulación con vientos en dirección SW (presentado en las Figura 5 (a), 4 (a)), con caudales un 25% más altos y un 25% más bajos a los medios antes presentados. En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos con dichos escenarios y se puede observar cómo la descarga de los ríos afecta principalmente la magnitud de las salinidades. Para un escenario de caudales altos, la pluma es más intensa y en un escenario de caudales bajos menos intensa. Las mayores diferencias en la salinidad se observan en cercanía a las descargas, disminuyendo a medida que se aleja de la misma.

#### 4.2.4. Efecto de la rotación de la tierra

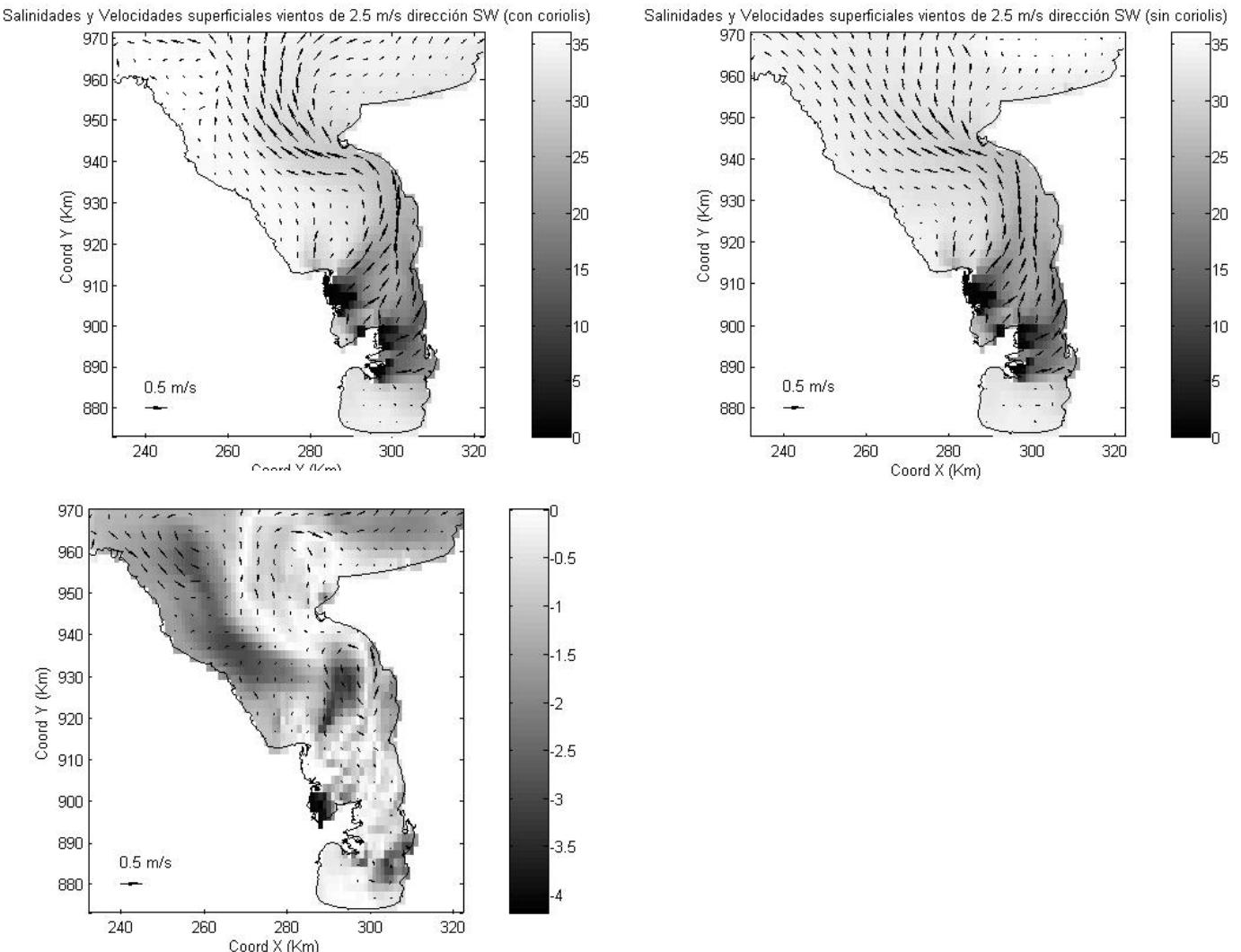
La mayoría de los estudios reconocen el efecto de la rotación de la tierra como un efecto importante para la dirección de los frentes estuarinos (vea Chao, 1988). Ante la ausencia de otros forzamientos externos, como los vientos, el movimiento de la pluma estaría controlado por la fuerza de flotación y por el forzamiento de coriolis. El número de Rosby (radio de Burger) para la zona de estudio es de 1.3, sugiriendo que el efecto de coriolis puede ser despreciado. En la Figura 8 se presentan los resultados de las simulaciones considerando el efecto de la rotación de la tierra y despreciando dicho efecto. Se observa que las diferencias son pequeñas (Figura 8c), la fuerza de Coriolis hace que la pluma se recueste a la margen oriental, ayudando a que la zona noroccidental del golfo se vea poco afectada por dicha pluma.

#### 4.3. Resultados de las simulaciones para las condiciones de las campañas de medición

Finalmente, y después del análisis de sensibilidad presentado en los párrafos anteriores, se realizó una simulación para las condiciones medidas durante la campaña de campo realizada en Octubre de 2004.



**Figura 7.** Resultados de simulaciones con las descargas promedios, invierno y verano.



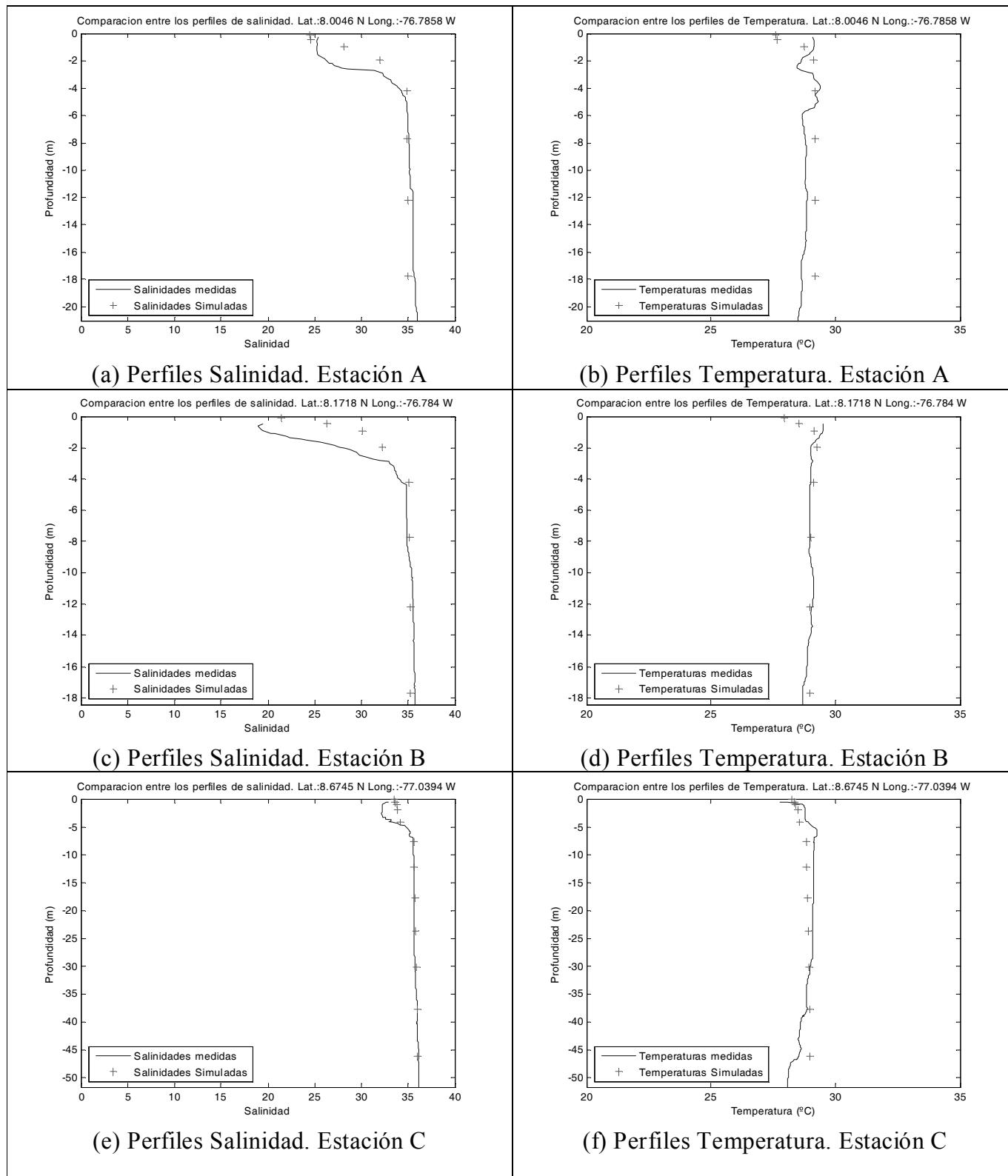
**Figura 8.** Resultados de simulaciones ignorando el efecto de la fuerza de Corilis.

En la Figura 9 se presentan los perfiles de salinidad y temperatura medidos y los simulados en las estaciones (A), (B) y (C), cuya ubicación se presenta en la Figura 1, en la zona sur, centro y norte del golfo respectivamente, observándose en términos generales buenos ajustes en la temperatura y en la salinidad, especialmente en las capas más profundas del golfo. En la Figura 10 se presentan perfiles a lo largo de cortes transversales en las secciones indicadas en la Figura 1. Dichos cortes indican la presencia de una capa de agua dulce en la capa superior del golfo, especialmente notoria en la parte central del golfo (corte B-B, Figura 10 (b)) efecto que se puede explicar por la descarga de los ríos en dicha zona. En la zona norte (corte C-C, Figura 10 (c)) se observa que dicha capa se ha mezclado un poco, presentando salinidades un poco mayores en la capa superficial, y que el núcleo de bajas salinidades se encuentra recostado

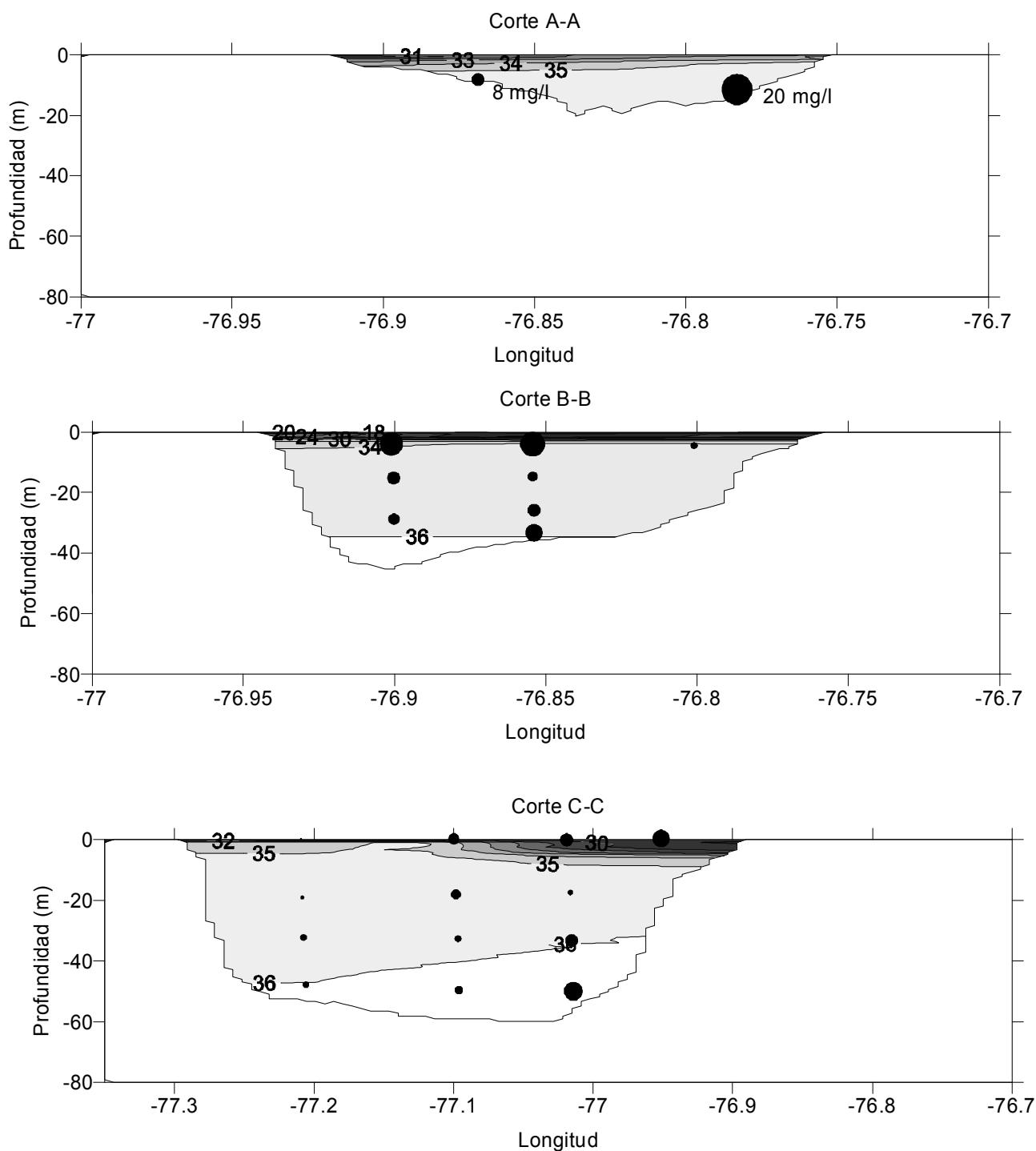
a la margen occidental; en la margen oriental, se observan salinidades altas. En la zona sur (corte A-A, Figura 10 (a)) se observan salinidades altas. En las capas más profundas, por debajo de los 5 metros, las salinidades son prácticamente constantes a lo largo de todo el golfo.

## 5. DISCUSIÓN

Se encontró que las aguas del golfo presentan una fuerte estratificación salina, con variaciones medidas entre 2.38 mg/l y 36.4 mg/l. En cuanto a la estratificación vertical se encontró que el agua dulce aportada por los ríos ocupa tan solo los 2 primeros metros. Para profundidades superiores a 5 m las salinidades son casi homogéneas con valores entre 34 mg/l y 36 mg/l.



**Figura 9.** Comparación entre los perfiles obtenidos y las simulaciones.



Nota: el tamaño de los puntos representa las concentraciones de sedimentos medidas en las diferentes profundidades.

**Figura 10.** Perfiles de salinidad en diferentes cortes (corte A-A, a lo largo de los  $7.9302^{\circ}$  de latitud Norte, corte B-B, a lo largo de los  $8.2534^{\circ}$  de latitud Norte y corte C-C a lo largo de los  $8.5889^{\circ}$  de latitud Norte).

El agua dulce del río Atrato se dispersa y queda atrapada en las capas superficiales, formando un frente estuarino. Cuando los vientos soplan del suroeste, la circulación de dicha pluma es hacia el noreste, saliendo del golfo por el flanco oriental y dejando la zona sur (en Bahía Colombia) con salinidades altas, al igual que en la zona noroeste del golfo. Este patrón de circulaciones se observó tanto en las mediciones como en las modelaciones. Cuando los vientos soplan del noroeste o no se presentan viento se observa que la pluma alcanza a gran parte de la bahía Colombia: dichos patrones son coherentes con los presentados por Chevillot et al. (1993) para la temporada seca.

Las temperaturas superficiales medidas variaron entre 26.5°C y 31.5°C. De las mediciones se observa que la descarga del río Atrato genera una capa de agua menos salada y más fría en los primeros metros.

Con los resultados del análisis de sensibilidad se encontró que el modelo mostró una gran sensibilidad al viento, especialmente en la circulación de las aguas superficiales. La dirección de los vientos afecta la dirección de la pluma del río. También se pudo observar, ver Figura 6, que el ciclo de mareas afecta el ciclo de descargas diurnas del río, propiciando o dificultando la descarga de la pluma.

## 6. CONCLUSIONES

Se encontró que las aguas del golfo presentan una fuerte estratificación salina, explicada por los aportes del río Atrato. El río Atrato genera una pluma estuarina estable, cuyos efectos se extienden por gran parte del golfo. Tanto las observaciones como las simulaciones mostraron que las mayores variaciones de temperatura y salinidad se producen en la superficie (profundidades menores a 2 m) y que las capas inferiores se ven poco afectadas por dichas variaciones.

Se encontró una particular sensibilidad del modelo a la discretización en la vertical, siendo necesario un alto nivel de detalle en las primeras capas para representar adecuadamente la estratificación presente en el golfo. Los parámetros numéricos pueden afectar la calidad de los resultados, para evitar esto se recomienda estudiar la sensibilidad del modelo a los mismos. Para las simulaciones y el análisis de sensibilidad, en este caso, se utilizaron tamaños de malla, tiempos y dominios de cálculo, que minimizaran los errores originados por la discretización numérica.

Las modelaciones inducen a pensar en dos posibles modos de la pluma. Un primer modo, con dirección suroeste-noreste, inducido por vientos provenientes del suroeste. Otro modo se presenta cuando los vientos soplan del noroeste, que producen una inversión orientándola hacia el sur.

Otros factores también mostraron efecto sobre la circulación, como las descargas de los ríos que intensifican o disminuyen la intrusión de la pluma, o las mareas que afectan su estructura vertical, pero conservando la dirección impuesta por el viento. Algunos de estos efectos fueron corroborados en la campaña de mediciones. Se midieron algunas evidencias que sugieren la presencia de oscilaciones en haloclina en la vertical. Los resultados de las simulaciones mostraron un comportamiento similar, muy en fase con el movimiento de las mareas, sugiriendo una relación entre dichas oscilaciones y la marea.

Se encontró que el modelo ELCOM representó adecuadamente las temperaturas y las salinidades en las estaciones de monitoreo, con errores de 1.6% y 5.4% respectivamente. Los mejores ajustes se encontraron para las zonas más profundas del golfo, sin embargo el modelo es capaz de representar el efecto de la estratificación en las capas superficiales.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones por su colaboración en la presente investigación: 1.) Colciencias por el patrocinio del programa de Doctorado del autor principal; 2) Al “Centre for Water Research” de la Universidad “Western Australia” por el soporte técnico en el uso y aplicación del modelo ELCOM; 3) Al fondo ISA – Universidad Nacional quien financió la campaña de mediciones; 4) Al INVEMAR y el personal técnico del BI/Ancón por su apoyo para las mediciones.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Baptista, A., Zhang, Y., Chawla, A., Zulauf, M., Seaton, C., Edward P. Myers E.P., Kindle, J., Wilkina, M., Burla, M. y Turner, P., 2005, A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary–plume–shelf systems: II. Application to the Columbia River, *Continental Shelf Research*, 25, pp. 935–972.

- Bowman, M.J., 1988, Estuarine front. En: Kjerfve, B. Hydrodynamics of estuaries Boca Raton, Fla. CRC Press. pp. 85-131.
- Cardona, Y. y Fernández J.M., 2002, Análisis de mareas por el método de la descomposición en armónicos, Trabajo de grado - Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), Facultad de Minas, Medellín, 171 P.
- Correa, I.D. y Vernet, G., 2004, Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana, Boletín Investigaciones Marinas y Costeras, 33. pp. 7-28.
- Cassulli, V. y Cheng, R.T., 1992, Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow, International Journal of Numerical Methods in Fluids 25, pp. 629-648.
- Chao, S.Y., 1988, River -Forced estuarine plumes, Journal of Physical Oceanography, 18. Jan. pp.72-88.
- Chao, S.Y., 1988, Wind-driven motion of estuarine plumes, Journal of Physical Oceanography, 18. Aug., pp.1144-1166.
- Chevillot, P., Molina A., Giraldo L. y Molina C., 1993, Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá, Boletín científico CIOH. 14 . pp. 79-89
- Dallimore, C.J., Hodges B e Imberger J., 2003, Coupling an underflow model to a three dimensional hydrodynamic model, Journal of hydraulic engineering, 129(10): 748-757.
- Dyer, K.R., 1973, Estuaries: a physical introduction, John Wiley y Sons. Aberdeen. 140 P.
- Dyer, K.R., 1988, Tidally generated estuarine mixing processes, En: Kjerfve, B. Hydrodynamics of estuaries, Boca Raton, Fla. CRC Press. pp. 41-57.
- Estournel, C., Kondrachoff, V., Marsaleix, P. y Vehil, R., 1997, The plume of the Rhône: numerical simulation and remote sensing, Continental Shelf Research, Vol. 17. No. 8. pp. 899-924.
- Garcia B., Hickey, B.M. y Kawase, M., 2002, Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume, J. Geophys. Res., 107, pp (en : <http://coast.ocean.washington.edu/coastfiles/plumemodel.html>)
- Garvine, R.W., 1999, A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges, Continental Shelf Research, Vol. 15, No. 13, pp. 1585-1596.
- Gesho, P.M y Lee, R.L., 1981, Don't suppress the wiggles—They're telling you something!, *Computer & Fluids*. 9 (2). pp 223-225.
- Hodges B., Imberger J., Saggio, A. y Winters, K.B., 2000, Modelling basin-scale internal waves in strafied lake, Limnology and Oceangraphy, 45(7): pp. 1603-1620.
- Imberger, J. y Paterson, J.C., 1990, Physical limnology. Advances in Applied Mechanics. 27, pp. 303-475.
- Kourafalou, V.H., 2001, River plume development in semi-enclosed Mediterranean regions: North Adriatic Sea and Northwestern Aegean Sea, Journal of Marine Systems, 30 (4), pp. 181-205.
- Largnier J., 1993, Estuarines fronts: How important are they?, Estuaries. Vol. 16. No. 1. pp. 1-11.
- Laval, B.E., 2002, Modelling transport in lakes and estuaries, PhD Thesis. University of Western Australia, Centre for Water Research.
- Leon, L.F., Imberger, J., Smith, R.E.H., Hecky, R.E., Lam, D.C.L. y Schertzer, W.M. 2004, Modeling as a Tool for Nutrient Management in Lake Erie: A Hydrodynamics Study, J. Great Lakes Research, JGLR, Special Issue (sub. Jan/2004) (en: <http://sciborg.uwaterloo.ca/~lfleonvi/papers.html>)
- Leonard, B.P., 1991, The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 88, pp. 17-74.
- Marsaleix, P., Estournel, C., Kondrachoff, V. y Vehil, R., 1998. A numerical study of the formation of the Rhône River plume. Journal of Marine Systems.14. pp. 99-115.
- Molina, A., Molina, C. y Chevillot, P., 1992. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. Boletín Científico CIOH, 11: 43-58.

- Mouthaan, E.E.A, Heemink, A.W. y Robaczewska, K.B., 1994. Assimilation of ERS-1 altimeter data in a tidal model of the continental shelf Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 34 (4), pp. 285-319.
- O'Donell J., 1990. Surface fronts in estuaries: a review. *Estuaries*. Vol. 16. No.1. pp. 12-39.
- Oey, L. y Mellor, G.L., 1993. Subtidal variability of estuarine outflow, plume, and coastal current: a model study. *Journal of Physical Oceanography*, 23, Jan, pp 164-171.
- Palacio, C.A., y Toro, F.M., 2002. Metodología para la Validación de un Modelo Hidrodinámico Específico en Zonas Intermareales. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 9: 37-46.
- Piñones, A., Valle-Levinson, A., Narváez, D.A., Vargas, C.A., Navarrete, S.A., Yuras, G. y Castilla, J.C., 2005. Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 65. pp. 513-525.
- Restrepo, J.D. y Correa, I.D., Ed. 2002. *Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral pacífico Colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín. 221 P.
- Restrepo, J.D. y B. Kjerfve, 2000. Water discharge and sediment load from the Western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *Journal of Geology*, 108. pp 17-33.
- Ruddick, K.G., Deleersnijder, E., Luyten, P.J. y Ozer, J., 1995. Haline stratification in the Rhine-Meuse freshwater plume: a three-dimensional model sensitivity analysis. *Continental Shelf Research*, Vol. 15, No. 13, pp. 1597-630.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Meccia, V. y Nuñez, M., 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, pp.261-273
- Ulses, C., Grenz, C., Marsaleix, P., Schaaff, E., Estournel, C., Meulé, V. y Pinazo, C., 2005. Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input. *Journal of Marine Systems*.56. pp. 113– 132.
- Universidad de Antioquia, 1997. *Microcirculación atmosférica de la zona bananera de Urabá Reporte técnico*.
- Wiseman, W.J. y Garvine, R.W., 1995 Plumes and coastal currents near large river mounths *Estuaries*. Vol. 18, No. 3, pp. 509-517.
- Wong, L.A., Chen, J.C. y Dong, L.X., 2004. A model of the plume front of the Pearl River Estuary, China and adjacent coastal waters in the winter dry season. *Continental Shelf Research*, 24, pp. 1779–1795
- Xing, J. y Davies, A.M., 2002. Influence of topographic features and along shelf flow upon the Ebro plume. *Continental Shelf Research*. 22 (2), pp 199-227