

# DESCRIPCIÓN DE LOS PATRONES ESTACIONALES DE CIRCULACIÓN HIDRODINÁMICA EN EL GOLFO DE URABÁ (COLOMBIA)

Luis Javier Montoya Jaramillo, Mauricio Toro Botero M. y Andrés Gómez-Giraldo

Grupo OCEANICOS, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Facultad de Minas

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada sobre los patrones de circulación hidrodinámica en el Golfo de Urabá (Colombia), utilizando la simulación matemática como herramienta de análisis. Para la simulación se utilizó el modelo ELCOM, el cual fue calibrado y validado con información de campo recolectada durante seis campañas realizadas entre los años 2004 y 2007, información que incluyó perfiles de temperatura y salinidad, ph, turbidez, en una red de puntos de monitoreo diseñada para cubrir todo el golfo. La información climatológica (precipitación, humedad relativa del aire, temperatura del aire, radiación solar, etc.) se obtuvo de estaciones locales; y la información hidrológica (caudales de los ríos afluentes) se obtuvo a partir del modelo HidroSIG Java, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. La información de los dos principales agentes forzadores de la hidrodinámica, campo de vientos y mareas, también se obtuvo también de estaciones cercanas a la zona de estudio y de un análisis de componentes astronómicas de marea, utilizando información de la estación de San Cristóbal, Panamá. Después de hacer un análisis de sensibilidad del modelo a los diversos parámetros (numéricos y físicos), se procedió a la calibración del modelo con unas de las series de campo y finalmente a su validación con información no utilizada en la etapa de la calibración. En estas dos etapas se identificaron el campo de vientos y la marea como los agentes forzadores dominantes de la circulación en el Golfo, concentrándose sus efectos sobre la dispersión de la pluma del río Atrato sobre el golfo de una manera que depende de la estación climática regional: En la época seca, la pluma del río Atrato se favorece para ser evacuada del golfo creando una zona de salinidad alta en el sur, en la bahía Colombia, dándose un ascenso de la haloclina hasta profundidades alrededor de los 2 m. En la época de lluvias, la pluma es deflectada hacia el sur, bajando la salinidad en la bahía Colombia y profundizándose la haloclina. Finalmente, se

utilizó el modelo para realizar predicciones a cerca de los patrones típicos mensuales de circulación en el golfo.

Palabras Claves: Simulación Matemática, Pluma del río Atrato, Patrones de circulación, Golfo de Urabá

## **ABSTRACT**

### **Description of the seasonal hydrodynamic circulation patterns in the Gulf of Uraba (Colombia).**

In this work the results of a research over the circulation patterns in the Gulf of Urabá (Colombia), using a numerical Model (ELCOM) as the analysis tool, is presented. For the numerical simulations, The ELCOM model was used and was calibrated and validated with 6 field campaigns developed during the years 2004-2007, information that included temperature and salinity profiles, pH, turbidity in a selected network that covers the entire Gulf. Climatic information (precipitation, air relative humidity, air temperature, solar radiation, etc.) were obtained from local stations and the hydrologic information (river discharges) were obtained from the software HidroSIG Java, developed by The National University of Colombia. Information of the two main forcing agents of the Gulf hydrodynamics, wind field and tides, were obtained from local stations and from a astronomical constituents frequency analysis done from timer series data from the San Cristobal, Panama, tide station. After a sensitivity analysis of the ELCOM model to numerical and physical parameters were performed, the calibration of the model was done with some of the data collected during the mentioned field campaigns and the model validation was done with the field data not used during the calibration step. During these two steps the wind field and the tides were identified as the two dominant factors of the Gulf circulation patterns, domination concentrated in the spreading of the Atrato river plume over the Gulf, spreading that depended on the two typical climatic seasons: during the dry season, the plume leaves the Gulf directly to the north-east producing relative high salinities in the south, Bahia Colombia, showing a movement of the halocline towards the surface to depths near 2 m. During the rainy season, the plume is deflected south, towards the Bahia Colombia producing low salinities and a deepening of the halocline. Finally, a monthly typical circulation pattern was simulated.

Key words: Numerical Modeling, Atrato river plume, Circulation patterns, Gulf of Urabá

## INTRODUCCIÓN

El golfo de Urabá se encuentra localizado en el extremo sur de la costa Caribe Colombiano, entre los 7°55' y 8°40' de latitud norte y los 76°53' y 77°23' de longitud oeste (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El golfo se caracteriza por su forma alargada, semi-cerrada, orientado en dirección norte-sur con una longitud aproximada de 80 Km, con un ancho promedio de 25 Km en dirección este-oeste, con bajas profundidades, con un promedio de 34 m y máximas de 80 m, y con fondos lodosos y sedimentarios productos de la fuerte sedimentación en los ríos (Chevillot *et al.*, 1993). Esta topografía del fondo es, relativamente uniforme, de forma cóncava y con pendientes más abruptas hacia la margen oeste (Chevillot *et al.*, 1993).

En el campo de la oceanografía física son pocos los estudios que se han realizado en el golfo de Urabá, entre los que se pueden mencionar el de Molina *et al.* (1992) y el de Chevillot *et al.* (1993), los cuales presentan una descripción de las corrientes en el golfo apoyándose en los patrones en las plumas de sedimentos del río Atrato analizados con imágenes satelitales. 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 ambas márgenes.

Estos autores asocian las corrientes en el golfo con las dos épocas climáticas de la zona las cuales, a su vez, están influenciadas por el ciclo de vientos. Chevillot *et al.* (1993) en sus reportes de salinidad muestran fuertes variaciones en la salinidad en las aguas del golfo entre la temporada lluviosa y seca, registrando mayores salinidades en la época lluviosa, especialmente al sur en la bahía Colombia, comportamiento que explican por el régimen de vientos. En la época seca, los vientos son particularmente activos y provenientes del norte o nordeste y confinan las aguas de los ríos al interior del golfo, mientras que en la época húmeda los vientos soplan en dirección contraria favoreciendo que las descargas de los ríos sean evacuadas del golfo.

Lozano (1998) menciona que las altas velocidades y la alta persistencia de la dirección del viento durante la época seca, incrementan la frecuencia de los oleajes fuertes del noroeste (NW) y resalta el papel que tiene el viento en la distribución de salinidad y temperatura en el golfo.

Silva *et al.* (1978) reportan que el régimen de circulación al interior del golfo es complejo, por ser el resultado de la combinación de factores como mareas, oleaje, vientos superficiales, aportes fluviales de los ríos Atrato y León, diferencias de densidad, efecto Coriolis y diferencias de presión barométrica. Las mareas originan corrientes norte-sur durante su ascenso y sur-norte en el período de descenso. El oleaje genera corrientes paralelas a las costas, que son posiblemente los responsables de los movimientos de arenas y variaciones de las líneas de playa. Los aportes de los ríos Atrato y León generan corrientes sur-norte, dependiendo del régimen de descarga de estos ríos. Ahora, como todas las variables que influyen en la generación de corrientes son independientes entre si, algunas presentan patrones de variación cíclicos predecibles, mientras que otras varían en forma aleatoria, dándose una combinación de todas que produce un patrón de circulación discontinuo no uniforme. De acuerdo a observación de fotografías aéreas se tiene una corriente sur-norte, recostada a la costa este del golfo lo cual es explicable si se tiene en cuenta el efecto Coriolis y las corrientes generadas por el oleaje (Silva *et al.*, 1978).

La descarga del río Atrato afecta la hidrodinámica de la zona generando un comportamiento de tipo estuarino, formando una capa superficial menos densa. Una adecuada caracterización del área de influencia de estas descargas contribuye a identificar sus efectos sobre la zona costera (Bernal *et al.*, 2005). Álvarez (2008) investigó los sedimentos superficiales del fondo marino en el golfo de Urabá con el objeto de establecer patrones de la dispersión de los sedimentos y encontró que las direcciones de transporte de los sedimentos siguen un patrón que integra la circulación superficial a lo largo del ciclo anual, consistente con los descritos en los estudios de Chevillot *et al.* (1993), Montoya y Toro (2006) y Roldán (2008).

Otros estudios como los de Urbano (1993), Franco y Gómez (1996), Velásquez y Rave (1996), Robertson y Martínez (1999), Universidad Nacional-Corpoúraga (1998), Velásquez (2000) y Correa y Vernet (2004) se concentran en la problemática de la dinámica costera, en los problemas de erosión y sedimentación, desde una perspectiva geológica o geomorfológica de los procesos en la zona.

Son pocos los estudios que se han realizado sobre la estratificación vertical en las aguas del golfo, la cual puede constituir un elemento importante para explicar la circulación hidrodinámica en esta zona, caracterizada por una gran variabilidad de regímenes de circulación y por unos fuertes gradientes en salinidad y temperatura. En uno de sus primeros estudios, utilizando modelación matemática validada con mediciones de campo, Montoya y Toro (2006) encontraron también que la estructura de la pluma estuarina formada por la descarga del río Atrato en el golfo está influenciada por varios factores como los vientos, las corrientes asociadas a las mareas, los caudales del río, el efecto de la contracorriente Panamá-Colombia, encontrando que 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 (la bahía Colombia) con valores altos de salinidad. Por otro lado, cuando los vientos soplan del noroeste o no se presentan vientos, la pluma alcanza gran parte de la bahía Colombia, al sur del golfo.

En un estudio reciente, Roldán (2008) utilizando simulaciones numéricas soportadas con datos de campo, explica el patrón de circulación en la bahía Colombia para las dos épocas climáticas extremas, encontrando que en la Bahía Colombia se generan dos capas, una superficial de agua dulce de 4 m de profundidad en la época húmeda y de 6 m en la época seca y debajo de ésta una capa más densa de aguas marinas. Los resultados muestran que las corrientes superficiales son generadas por la acción combinada de los vientos y el caudal de los ríos, describiendo dos patrones típicos al interior de la bahía, uno para la época húmeda caracterizado por la presencia de dos vórtices uno occidental que gira en sentido horario y un segundo, al oriente, girando en sentido antihorario, produciendo una corriente en sentido sur-norte relativamente fuerte. En la época seca, el

patrón de circulación en superficie se caracteriza por corrientes en sentido norte-sur, confinando las aguas dulces en el sur de la bahía, las cuales son evacuadas a través de una contracorriente profunda hacia el norte que se extiende por todo el dominio a profundidades mayores de 4 m.

En este estudio se realizaron una serie de mediciones entre los años 2004 a 2007, que sirvieron para calibrar y validar un modelo hidrodinámico, que permitió aproximarnos a los patrones de circulación. Utilizando modelos numéricos, calibrados y validados con los datos obtenidos de seis campañas de medición se analizó la hidrodinámica del golfo de Urabá. Los resultados de diferentes escenarios de simulación permitieron analizar la circulación en el golfo bajo diferentes condiciones climáticas. Se realizó una descripción general del patrón de circulación considerando su estructura en las tres dimensiones y la variabilidad espacial y temporal inducida por la pluma del río Atrato. Los patrones aquí descritos pueden ser útiles para la gestión de la zona de estudio, describiendo las principales características de la circulación en la zona. A diferencia de varios estudios previos, se presentan no solo las características superficiales sino que se presenta también la estructura vertical de dichas corrientes.

### **Características climáticas del golfo de Urabá**

Dada su ubicación geográfica, el golfo de Urabá presenta un clima que se encuentra afectado por la ubicación de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) el cual muestra dos períodos climáticos bien marcados que coinciden con las épocas de estiaje y de lluvias: durante la época de estiaje (los meses de diciembre a marzo), dominan los vientos alisios del nordeste provenientes del mar Caribe cuando la ZCIT se encuentra al sur, ocupando una posición septentrional en el Pacífico. Durante el resto del año se tiene una época de lluvias coincidente con los vientos alisios del sudoeste, cuando la ZCIT se encuentra sobre la costa pacífica del Chocó. Las temperaturas medias diarias en la zona se encuentran entre 26 °C y 28 °C, con máximos en los meses de marzo a junio y mínimos en febrero, agosto y octubre (INVEMAR, 2003) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a). La humedad relativa media mensual fluctúa entre 78.9% y 88.7%, con valores mensuales más bajos

hacia el norte y en los meses de febrero y marzo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

b). La radiación solar promedio en la zona es de  $329.5 \text{ W/m}^2$ , con valores máximos diarios que oscilan entre  $694 \text{ W/m}^2$  y  $841 \text{ W/m}^2$ , presentando mayores valores en los meses de abril y septiembre (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** c). Por la alta humedad presente en la zona, se tienen valores altos de cobertura de nubes de alrededor del 69.8 %. La precipitación anual en las estaciones en la zona (según datos del Hidrosig java, Vélez *et al.*, 2000) oscilan entre 4500 y 1500 mm, con una tendencia monomodal a lo largo del año, especialmente notoria en las estaciones ubicadas al occidente del golfo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** d), donde se observan menores precipitaciones hacia el norte del golfo y mayores valores en la zona sur y en la margen occidental del mismo. En algunas estaciones se observa una leve tendencia a la disminución de los niveles pluviométricos durante los meses de junio y julio con respecto a los registrados de mayo a noviembre (INVEMAR, 2003). Valores de evaporación medida en las estaciones Riogrande, el Mellito y Arboletes, registran valores anuales de 1075 mm, de 1119 mm y de 1414 mm, respectivamente, con valores máximos en los meses de marzo y julio y mínimos en junio y octubre (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e). Estas temporadas climáticas se manifiestan en el comportamiento de los vientos afectados por la localización de la ZCIT (Universidad de Antioquia, 1997). La circulación de los vientos se puede definir por los vientos alisios del norte (INVEMAR, 2003), entre los meses de enero y marzo con valores promedios diarios entre 3.3 m/s y 3.8 m/s, mientras que para el período de lluvias, de mayo a noviembre, los vientos dominantes vienen del sur con velocidades medias diarias inferiores a 2.2 m/s. En la estación Los Cedros, al sur de la zona de estudio los vientos predominantes son hacia el norte, noroeste y noreste (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** f) con una componente proveniente del noroeste con una gran persistencia a lo largo de todo el año y con velocidades altas, particularmente en la época seca. La estación Turbo (ubicada en la zona central de la zona de estudio) mostró dos componentes principales del viento, una del norte y otra del sur ambas con gran persistencia (correspondientes a la temporada húmeda y seca), con mayores velocidades en las direcciones sur y sur-este (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** g).

## Principales afluentes al golfo de Urabá

Los principales ríos que desembocan al golfo son el río Atrato, el río León, el río Turbo, el río Caimán Viejo, el río Caimán Nuevo y el río Currulao. La descarga del río Atrato es muy superior a las de las otras corrientes con caudales entre 2500 m<sup>3</sup>/s en los meses más secos en marzo y 5000 m<sup>3</sup>/s en los meses más lluviosos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), comportamiento consistente con las temporadas descritas (Lozano, 1998; Lonin y Vasquez, 2005; Silva *et al.*, 1978; Comisión Técnica Francesa, 1984 y Restrepo y Kjerfve B., 2000). Estos caudales son reportados en estaciones aguas arriba de la descarga al golfo, los caudales en la desembocadura en este estudio se estimaron utilizando técnicas hidrológicas de balances hídricos como la presentada por Vélez *et al.* (2000) (utilizando el software HydroSIG Java).

## Mareas

En la zona de estudio se tiene un régimen micromareal, con mareas de amplitud de no más de 40 cm (ver Correa y Vernet, 2004 y Silva *et al.*, 1978). 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) a cuyos registros horarios se les realizó un análisis de las frecuencias astronómicas principales eliminando los efectos meteorológicos y locales de la señal (Cardona y Fernández, 2002 y Pawlowicz *et al.*, 2002). Las cinco componentes de la marea más significativas se presenta en la 0 (ver Montoya y Toro, 2006).

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL GOLFO DE URABÁ

### Características del modelo hidrodinámico utilizado

En este estudio se utilizó el modelo ELCOM, desarrollado por el "Centre for Water Research", CWR, de la Universidad de Australia Occidental, el cual resuelve las ecuaciones de transporte de Reynolds y una ecuación para transporte de especies, usando la aproximación de Boussinesq y despreciando los términos no hidrostáticos de la presión. La evolución de la superficie libre se encuentra de la

integración vertical de la ecuación de conservación de masa. Para el manejo de la turbulencia, el modelo utiliza una aproximación del coeficiente de torbellino en la horizontal (Hodges, 2000; y Hodges, y Dallimore, 2001) y un modelo uni-dimensional de mezcla en la vertical (Imberger y Paterson, 1990). El mezclado vertical se calcula utilizando un esquema explícito de balance de energía cinética turbulenta que se aplica en cada paso temporal (Hodges, 2000; y Hodges, y Dallimore, 2001), balance que se hace a partir del esfuerzo inducido por el viento en la superficie, el cual introduce un flujo de momentum que se distribuye en la vertical utilizando un modelo de capa de mezcla. Para la solución numérica de las ecuaciones se utiliza un método semi-implícito con una discretización cuadrática tipo Euler-Lagrange de los términos advectivos en las ecuaciones de momentum (Casulli y Cheng, 1992) y el esquema ULTIMATE QUICKEST para un adecuado manejo de los términos advectivos en la ecuación de transporte para los escalares (Leonard, 1991).

### **Calibración y validación**

Se realizaron seis campañas entre el 2004 y el 2007, en un total de 221 estaciones en las que se tomaron perfiles de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto utilizando un CDTO Seabird (en las tres primeras campañas) y con sonda multiparamétrica en IQ net system 2020 XT marca WTW( en las tres últimas campañas). Los datos de estas campañas fueron utilizados para la calibración y validación del modelo. Con la información recolectada en la primera campaña se ajustaron uno a uno diferentes parámetros comparando los resultados de las una serie de experimentos numéricos o simulaciones con datos de campo en las estaciones en donde se realizaron las mediciones. Se utilizaron valores de los parámetros dentro de rangos físicos reportados en la literatura y se seleccionó el valor que ofreciera una mejor aproximación para luego continuar con el ajuste de otro parámetro. Los parámetros, coeficientes y variables que se calibraron fueron: el modelo de mezcla, el coeficiente de difusión turbulenta, el porcentaje de distribución de la descarga del río Atrato por las diferentes bocas, el mezclado en el campo cercano y el coeficiente de extinción de la luz. La 0 resume las principales características que fueron tenidas en cuenta en las simulaciones realizadas para la calibración.

Los datos recolectados en las otras campañas fueron utilizados en la validación del modelo, obteniéndose buenos ajustes al comparar los perfiles de temperatura y salinidad medidos con los simulados para las condiciones de las diferentes campañas así: error medio cuadráticos entre 1.43 ups y 5.5 ups (para la salinidad en la tercera y cuarta campañas, respectivamente) y entre 0.47 °C y 1.62 °C (para la temperatura en la segunda y sexta campañas, respectivamente) y valores entre estos rangos para las otras campañas.

## **CIRCULACIÓN ESTACIONAL EN EL GOLFO DE URABÁ**

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones para obtener las condiciones típicas de los patrones mensuales de circulación en el Golfo de Urabá.

### **Características generales de la circulación**

Para analizar la dinámica estacional del golfo de Urabá se consideró el efecto conjunto del esfuerzo generado por el viento, las corrientes inducidas por las mareas y la circulación baroclínica por la descarga del río Atrato, considerando como variable dominante viento en las diferentes temporadas climáticas. Se realizaron simulaciones con condiciones de viento del año 2006 extraídas del proyecto NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay *et al.*, 1996).

Todas estas simulaciones las simulaciones mostraron una circulación típica de un estuario fuertemente estratificado, con el desarrollo de una pluma del río que se extiende por gran parte del golfo y que afecta principalmente las capas superficiales. Las características de esta capa superficial de agua dulce varían a lo largo del golfo como consecuencia del mezclado producido por el viento y la marea. La pluma generada por el río Atrato tiene características superficiales, ocupando no más de 2 m de profundidad, recostada a la margen oriental del golfo y cubriendo gran parte de él, con una tendencia hacia el noroeste, siguiendo el alineamiento impuesto por la línea de costa y saliendo del

golfo recostada al la margen noreste. Se encontraron salinidades en las capas superficiales entre 10 ups (incluso menores en cercanías a las bocas de los ríos) y 36 ups en las zonas oceánicas al noroeste y en las capas más profundas, con un patrón de circulación superficial complejo, con una dirección dominante de la corriente superficial hacia el noreste y con variaciones de acuerdo al ciclo de las mareas. Este efecto fue más notorio en las capas más profundas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), en donde se presenta la velocidad zonal a lo largo del corte A-A (ver localización en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b)) que se muestra como un flujo superficial en los 2 m que sale del golfo y un flujo y reflujos en las capas inferiores (por debajo de 2 m) de acuerdo con la marea. La capa superficial que sale del golfo, presentó mayor magnitud en las velocidades que la capa más profunda donde las velocidades disminuyen rápidamente con la profundidad, variando su dirección en un ciclo diario que sigue la marea.

Este flujo estratificado es producido por las descargas de los ríos, particularmente las del río Atrato y del río León, los cuales generan una capa superficial de aguas menos saladas, aguas afectadas directamente por el campo de vientos y que es evacuada del golfo por la margen noreste; mientras que la capa más profunda está mucho más afectada por el movimiento periódico inducido por la marea, generando un flujo que entra o sale del golfo a diferentes horas del día. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan la variación de la salinidad a lo largo del corte A-A, en dirección sur-norte, y la posición de la haloclina, determinada como la profundidad a la cual se presenta el mayor gradiente vertical de salinidad. Se pueden observar zonas perfectamente distinguibles: una zona superficial hasta profundidades de casi 2 m con salinidades por debajo de las 25 ups y que identifica la pluma de aguas fluviales, y una segunda zona de profundidades mayores a 2 m con salinidades oceánicas. El flujo de entrada debe compensar agua salada arrastrada por las capas superficiales, con lo que en promedio el flujo de entrada por una sección transversal al golfo es igual al flujo de salida de las capas superficiales, el que es igual al caudal descargado por el río.

### **Características estacionales de la circulación**

Para analizar las características estacionales de la circulación en el golfo de Urabá, se utilizaron campos de vientos de cada uno de los meses del año. Dada la información disponible, las rosas de viento para los diferentes meses del año 2006 que se utilizaron en las simulaciones se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la cual se observan que los meses de la temporada seca (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a), (b) y (c)) tienen componentes principalmente suroeste, con presencia de vientos en las otras direcciones, manifestando una mayor variabilidad en la dirección del viento que el resto del año y en el cual, el mes de abril, puede considerarse como una situación de transición. Los vientos con dirección predominante noreste entre junio y noviembre (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (e) - (k)), con una situación de transición durante diciembre (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (l)) representan el campo de vientos utilizado para la estación climática seca.

Se realizaron simulaciones durante todo el año con el fin de analizar el comportamiento de las corrientes en el golfo en respuesta a estas condiciones de viento y los resultados que se presentan corresponden a la velocidad y a la salinidad en superficie, por ser éstas las variables que presentan mayores cambios en respuesta a estos cambios en el viento. Para el análisis se consideraron tres temporadas: seca, transición y lluviosa.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los patrones de velocidad y de salinidad promedio simulados para algunos meses del año 2006, la situación de la temporada seca (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a) y (b)), un caso de transición (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c) y (d)) y la temporada húmeda (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (e) y (f)).

### **Escenario en la temporada seca**

En los meses de la temporada seca, cuando los vientos son principalmente del suroeste (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a) y (b)), la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(a) presenta la distribución de salinidad y las velocidades en la superficie obtenida en las simulaciones del mes de enero de 2006 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b) muestra la situación obtenida para el mes de febrero de 2006. Se observa que la influencia del agua descargada por el río Atrato ocupa una mayor extensión en el golfo, generando una zona de agua dulce al sur, en bahía Colombia y una pluma que sale alcanza la costa oriental del golfo, deflectándose hacia el norte.

### **Escenario en los meses de transición**

En algunos meses se presentan situaciones de transición, en los cuales los vientos presentan mayor variabilidad, especialmente en su dirección (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (d) y (l)). Para ilustrar los patrones superficiales obtenidos en esta situación se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c) y (d) la velocidad y salinidad promedio en los meses de marzo y abril de 2006, en los cuales aparece una zona de altas salinidades al sur en bahía Colombia, una menor extensión de la zona de influencia fluvial y una mayor mezcla. Se observa también que para este caso la pluma presentó una mayor extensión hacia el oeste, posiblemente en respuesta a los vientos.

### **Escenario en la temporada húmeda**

En los meses de la temporada húmeda, los vientos son principalmente del noreste (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (f) a (k)), propiciando la evacuación de las aguas del río y generando una zona de agua salada al sur, en bahía Colombia, (**¡Error! No se encuentra el origen**

**de la referencia.** (e) mes de septiembre y (f) mes de noviembre), y una pluma fluvial de mayor extensión, con dirección noreste. Durante las simulaciones en esta temporada se observa una zona de influencia oceánica al noreste con salinidades altas, que casi no se ve afectada por la descarga del río Atrato.

Aunque no son muy grandes las diferencias en las velocidades entre los diferentes meses, la temporada lluviosa presentó las velocidades con magnitud levemente más alta, posiblemente en respuesta a vientos más intensos y persistentes y a mayores descargas del río en dicha temporada.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se compara la variación temporal de la salinidad en tres puntos de monitoreo: P1 ubicado al norte del golfo, P2 en la zona central y P3 al sur en bahía Colombia (ver localización en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b)). Se comparan los resultados obtenidos en el mes de enero que se consideran típicos de la temporada seca y el mes de octubre típico de la temporada húmeda. Estos puntos de monitoreo permiten ilustrar que las mayores diferencias en salinidad se producen en la capa superficial, mientras que por debajo de los 4 m de profundidad, el comportamiento es homogéneo. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b), (d) y (e) que ilustran los perfiles durante la temporada lluviosa, muestran una pluma más superficial, con una haloclina levemente superior que la que se genera durante la temporada seca, posiblemente por el transporte inducido por el viento en estas capas superficiales que propician la salida de la pluma del río durante la temporada lluviosa. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (e), en la temporada seca en bahía Colombia se pueden observar valores de salinidades en la capa superficial superiores a los obtenidos durante la temporada lluviosa **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (f), en respuesta a los vientos que ahora dirigen parte de la pluma hacia el sur. Se observa una haloclina un poco más profundizada, alrededor de 3.5 m, reflejo de una mayor mezcla al interior de la pluma, en los meses de enero y febrero. Un factor importante para los meses de la temporada seca es el gradiente de presión generado por el aumento en la superficie libre en cercanías a la descarga de los ríos y en bahía Colombia por la masa de agua

arrastrada hacia estas zonas, este gradiente induce un flujo que propicia la salida de la pluma del golfo.

## **CONCLUSIONES**

Del análisis del ciclo anual de la pluma se encontró que en los meses de enero y febrero, cuando los vientos son del norte, la pluma del río Atrato ocupa una mayor extensión en el golfo, generando una zona de agua dulce al sur, en bahía Colombia, e induciendo mucha más mezcla de la pluma, mientras que en meses de mayo a noviembre, cuando los vientos son principalmente del sur, se propicia la evacuación de las aguas del río y se genera una zona de agua salada al sur en bahía Colombia. En los otros meses se presentan situaciones de transición, en donde la pluma toma diferentes patrones de acuerdo a las características de los vientos. Durante todo el año, independientemente del ciclo de vientos se encontró que por debajo de los 4 m de profundidad la salinidad es prácticamente constante con valores oceánicos. En los meses de enero y febrero, se nota una leve profundización de la haloclina en bahía Colombia, con mayor mezcla al interior de la pluma.

## **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.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Álvarez, A. 2008. Estudio del transporte de sedimentos superficiales en el piso marino del Golfo de Urabá. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Álvarez, A., y Bernal, G. 2007. Estimación del campo de transporte neto de sedimentos en el fondo de Bahía Colombia con base en análisis de tendencia del tamaño de grano. Avances en recursos hidráulicos. 16, 41-50.
- Bernal, G., Montoya, L., Garizabal, C., y Toro, M. 2005. La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del golfo de Urabá, Colombia. Gestión y Ambiente. 8 (1), 123-135.
- Cardona, Y., y Fernández, J. 2002. Análisis de mareas por el método de la descomposición en armónicos. Medellín: Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia .
- Casulli, V., y Cheng, R. 1992. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. International Journal for numerical methods in fluids. 15, 629-648.
- Chevillot, P., A., M., Giraldo, L., y Molina, C. 1993. Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. Boletín científico CIOH. 14, 79-89.
- COMISIÓN TÉCNICA FRANCESA. 1984. Golfe d'Uraba; Etudè d'Environnement, recommandations pour l'Etudè du futur port. Informe técnico.
- Correa, I., 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, 7-28.
- Franco, E., y Gomez, J. 1996. Evolución de la línea de costa del litoral Antioqueño. Aspectos geomorfológicos. Sector río Necoclí-Turbo. Medellín: Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Hodges, B. 2000. Numerical Techniques in CWR-ELCOM (code release v.1). Perth: Centre for Water Research.
- Hodges, B. R., y Dallimore, C. 2001. ELCOM Science Manual. Perth: Centre for Water Research.

- Imberger, J., y Patterson, J. C. 1990. Physical Limnology. *Advances in Applied Mechanics*. 27, 303-475.
- INVEMAR. 2003. Diagnóstico, zonificación y la definición de la estructura administrativa de la unidad ambiental costera del Darién, Caribe Colombiano. Santa Marta: INVEMAR.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., y otros. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 77 (3), 437-471.
- Leonard, B. 1991. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 88, 17-74.
- Lonin, S., y Vásquez, J. 2005. Hidrodinámica y distribución de coliformes en el golfo de Urabá. *Boletín científico CIOH*. 23, 76-89.
- Lozano, L. 1998. Caracterización y diagnostico integral de la zona costera que comprende la bahía Colombia desde el río Turbo hasta Matuntugo. Cartagena: Escuela naval Almirante Padilla, Facultad de Oceanografía Física.
- 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.
- Montoya, L., y Toro, F. 2006. Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*. 13, 37-54.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers and Geosciences*. 28, 929-937.
- Restrepo, J., y Kjerfve, B. 2000. Water discharge and sediment load from the Western slopes of the Colombian Andes with focus on río San Juan. *Journal of Geology*. 108, 17-33.
- Robertson, K., y Martínez, N. 1999. Cambios en el nivel del mar durante el Holoceno en el litoral Caribe Colombiano. *Cuadernos de Geografía*. 8 (1), 168-198.

- Roldán, P. 2008. Modelamiento del patrón de circulación de Bahía Colombia, golfo de Urabá. Aplicación a problemas de sedimentación en las bocas del río León. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Silva, G., Ramírez, E., y Caldwell, J. 1978. Proyecto Darién, Colombia - OEA. Estudio para la Orientación del Desarrollo de la región del Darién. Estudio de un puerto para Urabá. Medellín: Informe técnico. Organización de los Estados Americanos.
- Universidad de Antioquia. 1997. Microcirculación atmosférica de la zona bananera de Urabá. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Universidad Nacional de Colombia - CORPOURABA. 1998. Evaluación de las zonas de erosión críticas en el litoral Caribe Antioqueño. Medellín: Informe técnico.
- Urbano, J. 1993. Análisis de ingeniería para protección de costas. Caso de estudio: Defensa del litoral en el apostadero naval de Turbo. 3-18: Boletín científico CIOH. 13.
- Velásquez, C., y Rave, J. 1996. Dinámica costera y geomorfología en el golfo de Urabá Antioqueño. Sector boca Tarena-espiga de Turbo. Medellín: Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Velásquez, N. 2000. Geomorfología y dinámica en el Urabá Chocoano: cabo Tiburón - bahía Acandí. Medellín: Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, J., Poveda, G., y Mesa, O. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.

## LEYENDA DE LAS FIGURAS.

**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio

**Figura 2.** Parámetros climáticos del golfo de Urabá

**Figura 3.** Ciclo anual estimado de los caudales del río Atrato en la desembocadura utilizando la metodología de Vélez *et al.*, 2000.

**Figura 4.** Velocidad zonal y contornos de velocidad meridional, el 16 y el 17 de junio de 2006.

**Figura 5.** Variación de la salinidad a lo largo del corte A-A, el 16 y el 17 de junio de 2006

**Figura 6.** Ciclo mensual de vientos NCEP/NCAR Reanalysis (Kalnay *et al.*, 1996) para el año 2006 en la zona de estudio.

**Figura 7.** Velocidad y salinidad promedio mensual representativa en diferentes meses del año, simulaciones del año 2006.

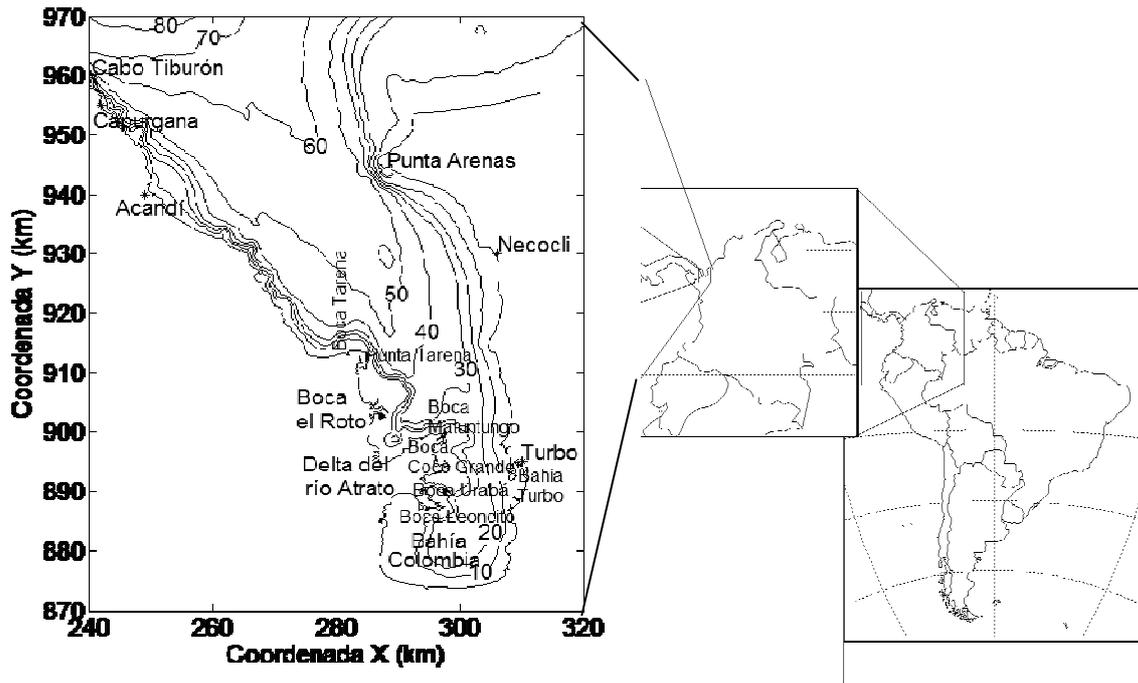
**Figura 8.** Variación temporal de la salinidad en estaciones de monitoreo, simulaciones del año 2006.

**Tabla 1. Frecuencias dominantes de marea astronómica en la estación San Cristóbal (Panamá)**

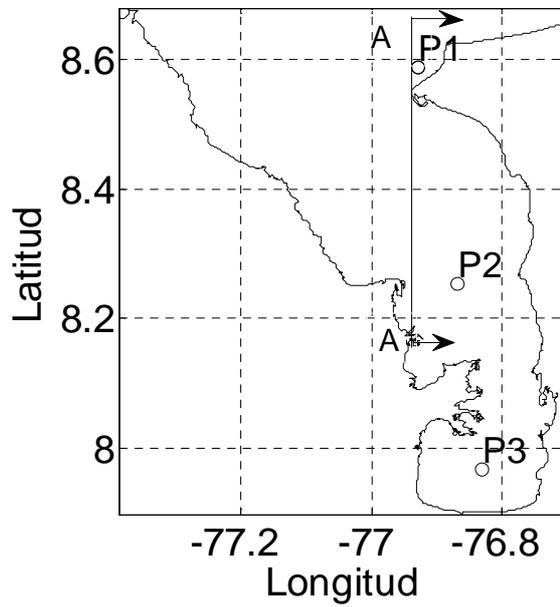
<b>Componente</b>	<b>Período (horas)</b>	<b>Amplitud (cm)</b>	<b>Fase (°)</b>
Mf	327.86	14.06	-12.48
	164.28	5.56	-118.70
O1	25.82	68.48	-100.70
K1	23.93	95.15	-110.35
M2	12.42	72.42	-161.70

**Tabla 2. Características consideradas en la modelación para la calibración del modelo ELCOM**

<b>Característica</b>	<b>Detalles</b>
<b>Modelo Hidrodinámico</b>	
<b>Batimetría</b>	
Carta Batimétrica	Carta batimétrica. Fuente: CIOH
<b>Características</b>	
Malla horizontal	Malla regular con celdas de 500 × 500 m
Malla vertical	Malla irregular con celdas de 0.25 m cerca a la superficie y
Paso temporal	112.5 segundos
Período de simulación	1 mes
<b>Forzamientos externos</b>	
Radiación solar	Se utilizaron datos obtenidos de <i>NCEP/NCAR Reanalysis Project</i>  <a href="http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml">http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml</a>
Cobertura de nubes	
Temperatura del aire	
Vientos	
Mareas	Se utilizó la predicción de las mareas considerando sus
Caudales de los ríos	Se estimaron los caudales promedio mensuales en las
Modelo de turbulencia	Esquema de capa de mezcla por el viento con transporte de
coeficientes de difusión en	100 m <sup>2</sup> /s
Condición de fricción con el	Deslizamiento libre
Condición de frontera de	Considerada para representar el mezclado en el campo
Coeficiente de extinción de	3.0

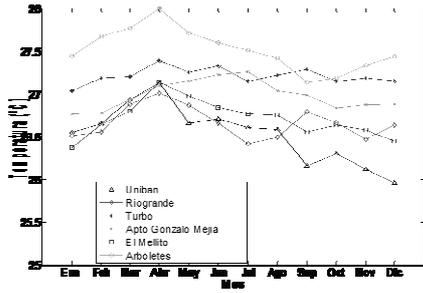


(a) Ubicación general y principales geofomas.

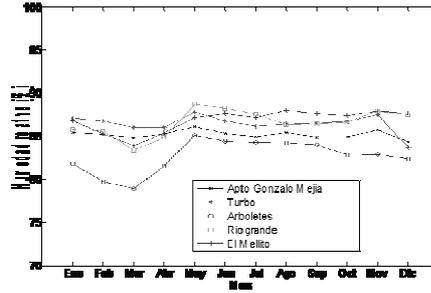


(b) Ubicación de cortes y puntos de monitoreo.

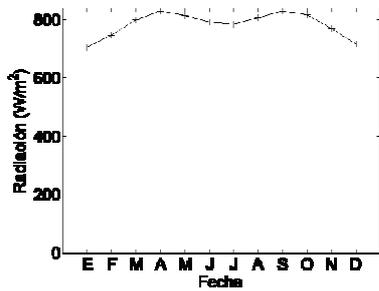
Figura 1.



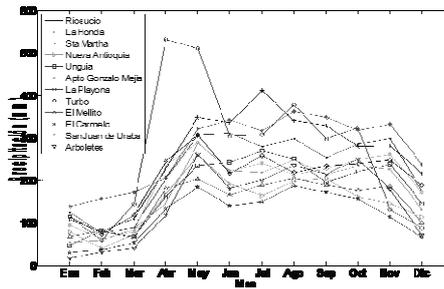
(a) Temperatura promedio mensual



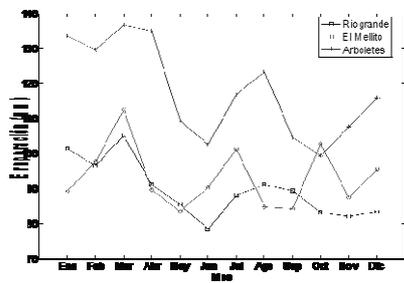
(b) Humedad relativa promedio mensual



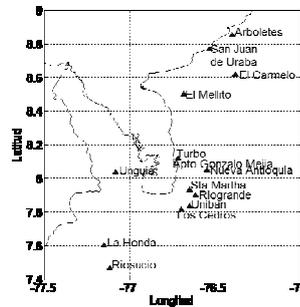
(c) Radiación solar máxima diaria



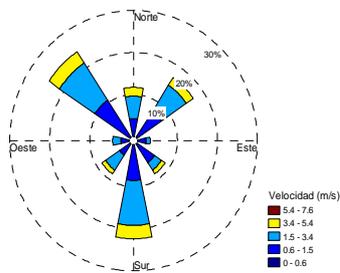
(d) Precipitación



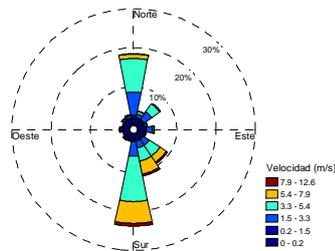
(e) Evaporación



(f) Estaciones meteorológicas



(h) Rosa vientos Los Cedros



(i) Rosa vientos Turbo

Figura 2.

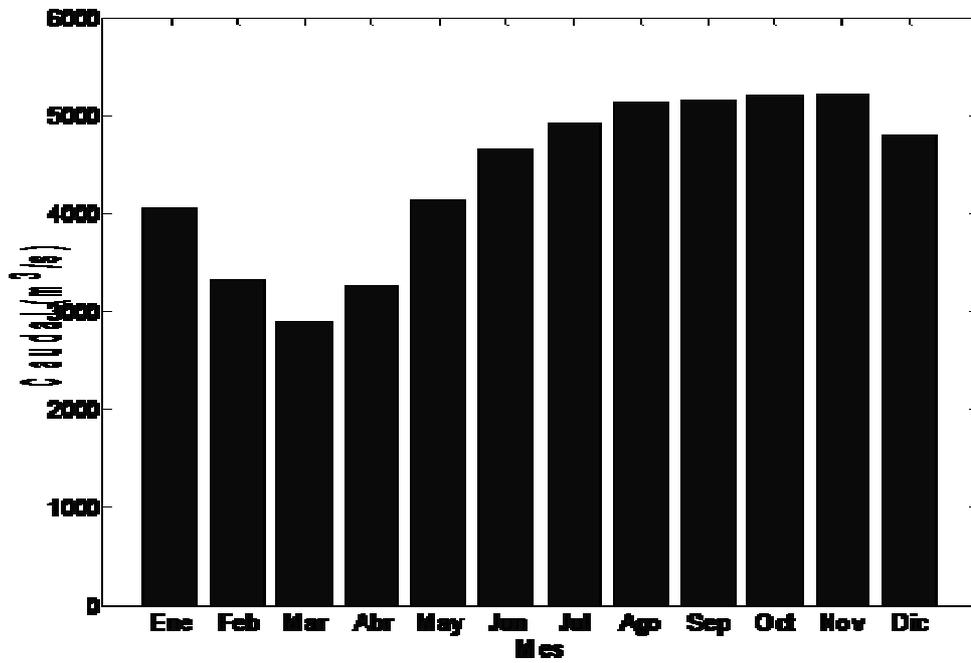
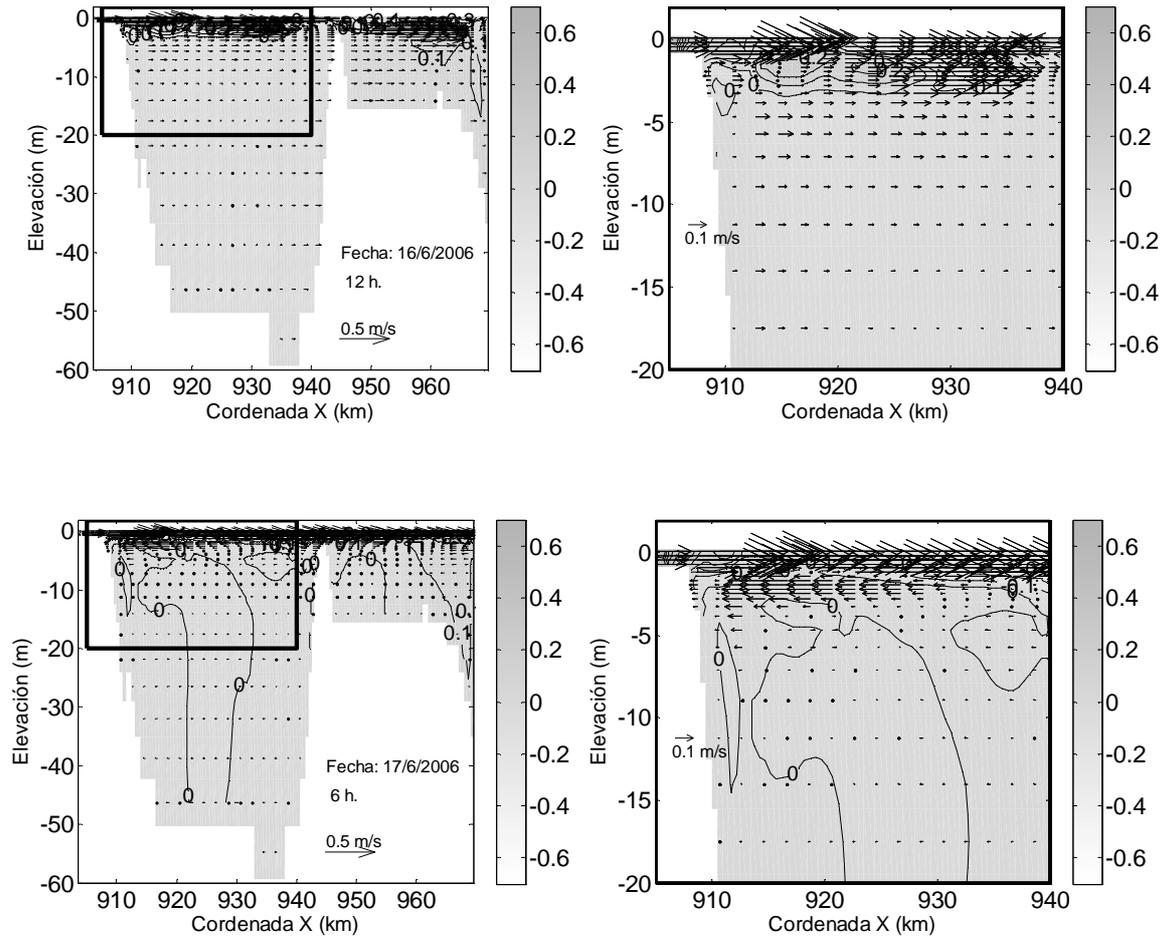


Figura 3.



Corte A-A

Figura 4.

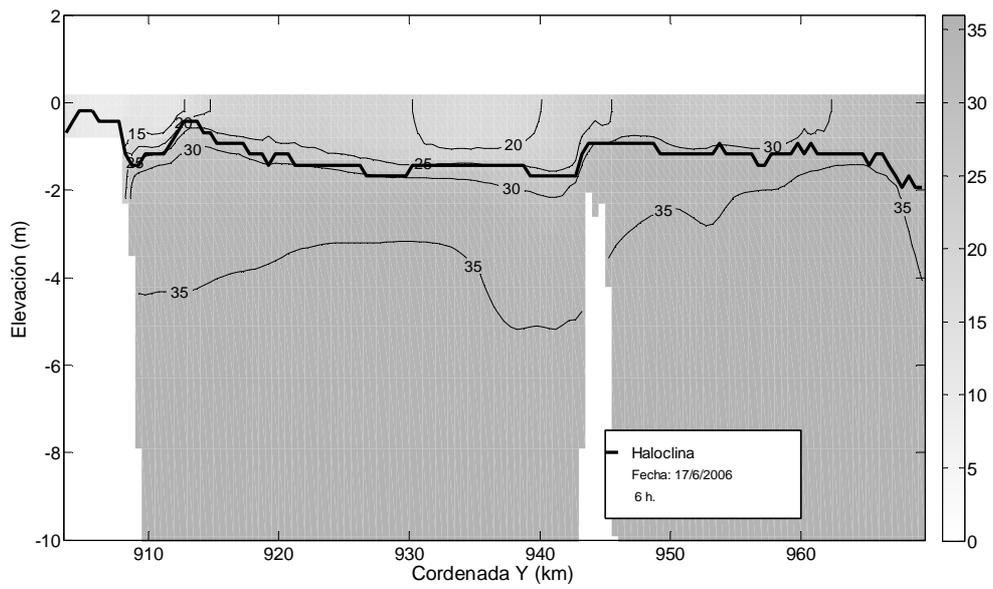
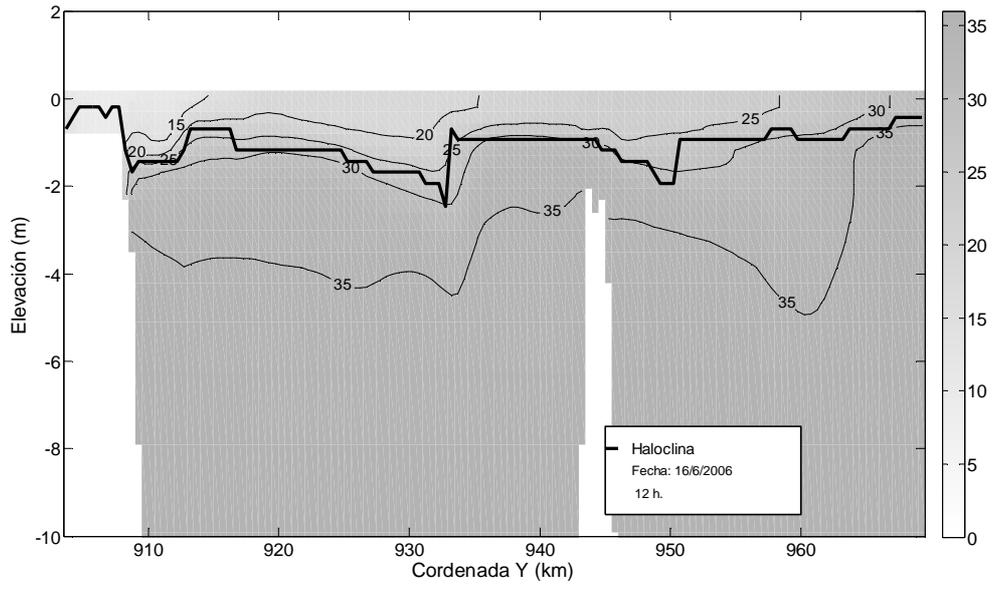


Figura 5.

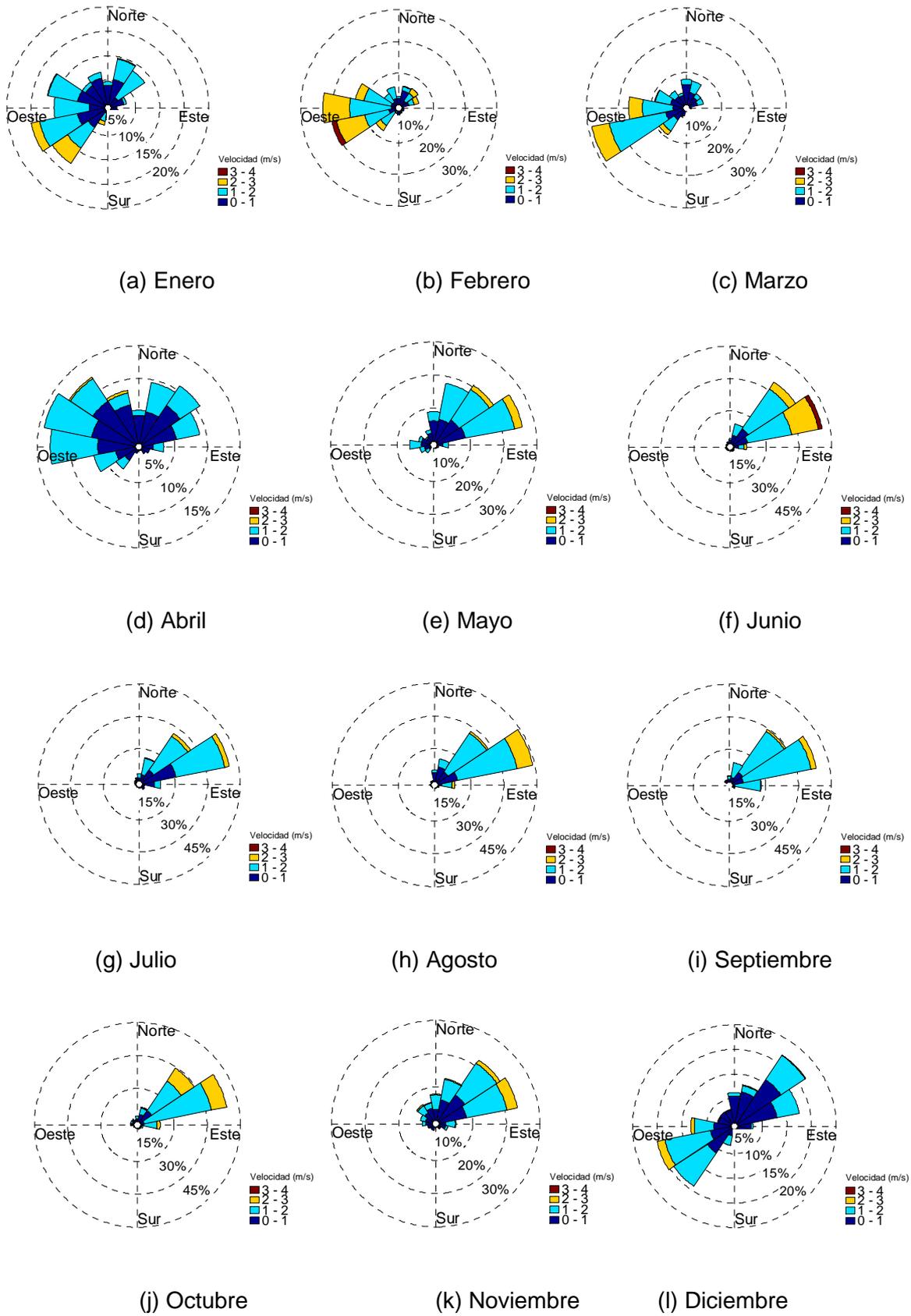
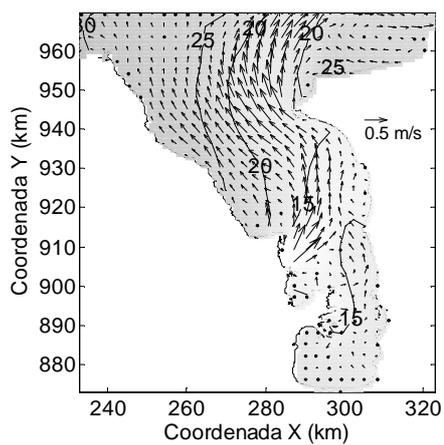
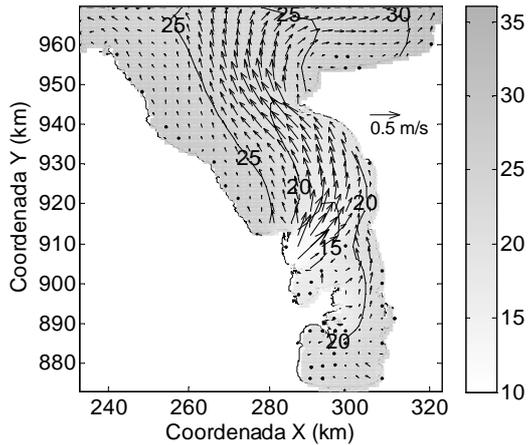


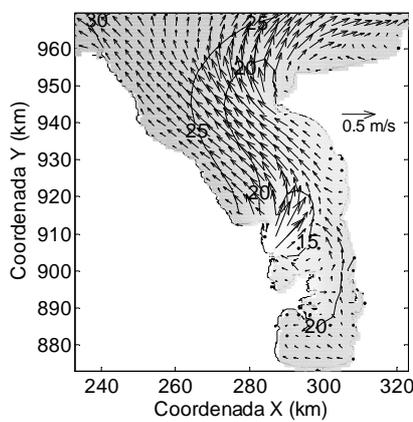
Figura 6.



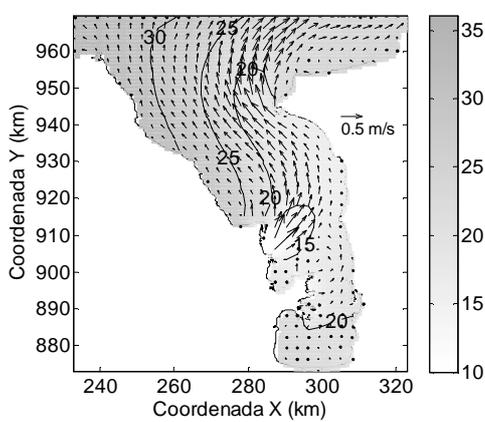
(a) Enero



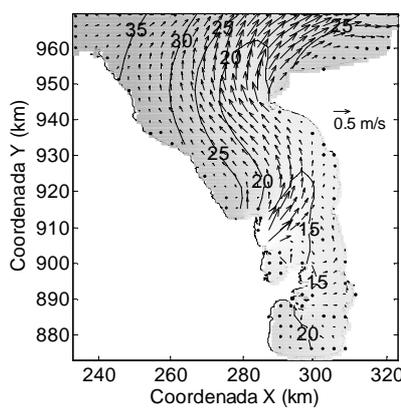
(b) Febrero



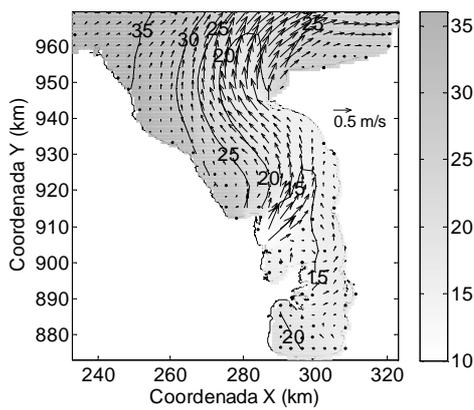
(c) Marzo



(d) Abril

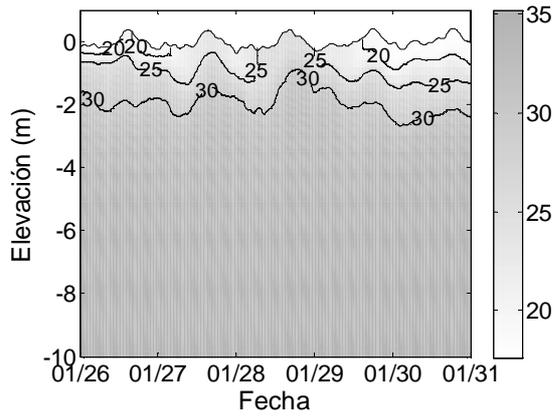


(e) Junio

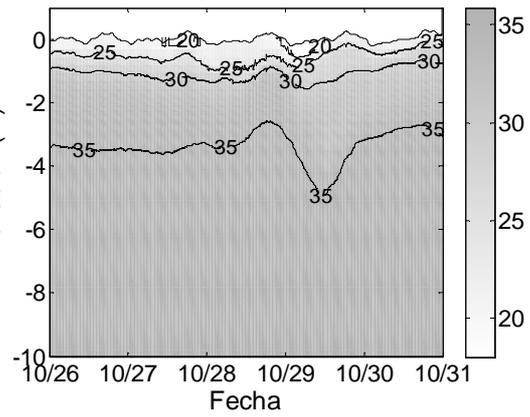


(f) Septiembre

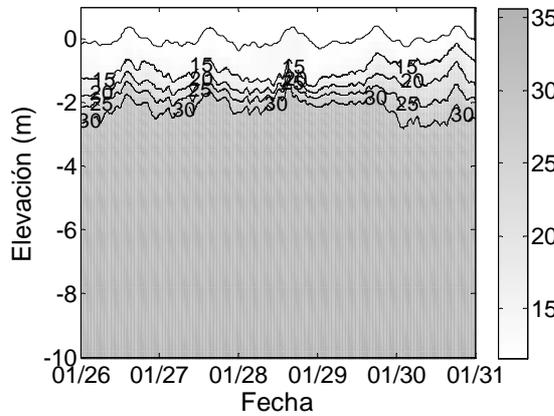
Figura 7.



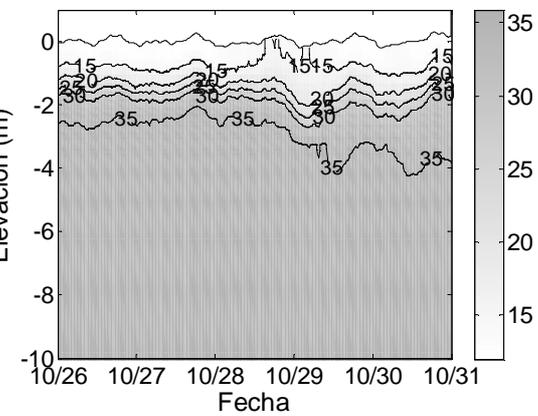
(a) Temporada Seca. P1 – Norte



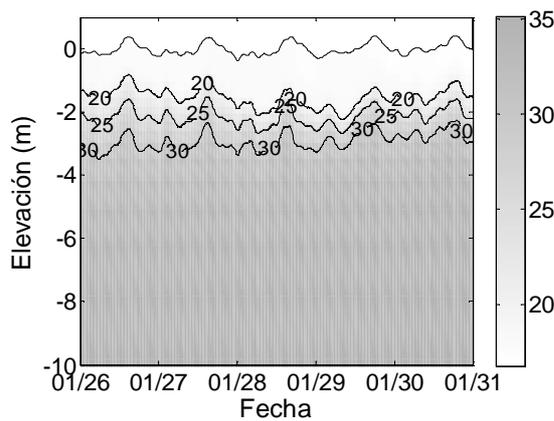
(b) Temporada de húmeda, P1 – Norte



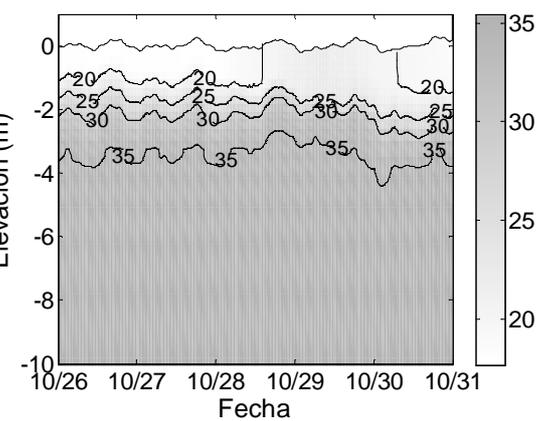
(c) Temporada Seca P2 – Centro



(d) Temporada de húmeda. P2 – Centro.



(e) Temporada Seca. P3- Sur



(f) Temporada de húmeda. P3- Sur.

**Figura 8.**