

Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal

Oceanic circulation of the Gulf of Urabá using high temporal resolution wind fields

DOI: 10.26640/22159045.2019.516

Fecha de recepción: 2019/10/07 Fecha de aceptación: 2019/12/20

Vladimir Giovanni Toro Valencia¹; Wilmar Mosquera²; Nery Barrientos³; Yubian Bedoya⁴

CITAR COMO:

Toro Valencia, V. G.; Mosquera, W.; Barrientos, N.; Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Bol. Cient. CIOH*; 38(2):41-56. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2019.516

RESUMEN

Los procesos físicos que tienen mayor influencia en la dinámica oceánica al interior del golfo de Urabá (GU) son la variabilidad de los campos de viento, las diferencias de densidad y las descargas fluviales. La influencia de la dinámica de los campos de viento en la circulación oceánica se ve afectada por la variación latitudinal de la zona de convergencia intertropical que genera dos épocas climáticas: época seca (diciembre a marzo) y época lluviosa (mayo a noviembre). Con el propósito de avanzar en el conocimiento hidrodinámico del GU, en este trabajo se analizó la modulación que producen la variación estacional y espacial de los campos de viento sobre corrientes oceánicas a escala intra e interanual. Se utilizó el modelo numérico de circulación oceánica regional ROMS-CROCO, haciendo uso del forzamiento atmosférico de tiempo variable durante el periodo 2010-2015. Con base en los campos de viento se encontró que el GU puede dividirse dinámicamente en tres zonas (norte, centro y sur). Los resultados sugieren que cuando el campo de viento tiene dirección norte-sur, contraria al flujo del río Atrato, genera una circulación oceánica que confina las aguas dulces en el sur del GU. En este escenario se encontraron las menores magnitudes de la corriente superficial, principalmente para la zona centro y sur, con valores promedio de 0.1 m/s. Cuando el esfuerzo del viento está en la misma dirección del flujo del río Atrato (sur-norte) la magnitud de las corrientes superficiales se incrementa, y la mayor parte del flujo sale del GU por su costado este (escenario más común). Además, se encontró que la descarga fluvial del río Atrato tiene influencia en gran parte del interior del GU en promedio hasta los 3 m de profundidad. Entre los 4 m y 8 m se encuentra la haloclina, formada por la transición de aguas dulces a saladas, lugar donde se presenta un corte de velocidades, que permite la formación de remolinos en las aguas profundas del GU. Cabe resaltar que en bahía Colombia se encontró un flujo de tres capas casi permanente, dando lugar a una mayor circulación de las masas de agua y un mayor intercambio de flujo con la zona central del GU. Igualmente, a partir de los 10 m es notoria la influencia de algunos sistemas de corrientes del mar Caribe en la circulación del GU. En trabajos futuros se espera emplear bases de datos de viento con una resolución espacial fina y tener en cuenta el aporte real (serie de datos) del río Atrato, así como de otros afluentes importantes como el río León.

PALABRAS CLAVE: golfo de Urabá, eventos atmosféricos, circulación oceánica, ROMS-CROCO, épocas climáticas.

¹ Orcid: 0000-0003-4398-9472. Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental- GIGA. Universidad de Antioquia (UdeA)- Sede Ciencias del Mar. Carrera 28 No. 107-49. Turbo (Antioquia). Correo electrónico: vladimir.toro@udea.edu.co

² Orcid: 0000-0001-5936-2418. Universidad de Antioquia (UdeA)- Sede Ciencias Del Mar. Carrera 28 No. 107-49. Turbo (Antioquia). Correo electrónico: wandres.mosquera@udea.edu.co

³ Orcid: 0000-0002-7539-2841. Universidad de Antioquia (UdeA)- Sede Ciencias Del Mar. Carrera 28 No. 107-49. Turbo, (Antioquia). Correo electrónico: nery.barrientos@udea.edu.co

⁴ Orcid: 0000-0002-8358-2717. Universidad de Antioquia (UdeA)- Sede Ciencias Del Mar. Carrera 28 No. 107-49. Turbo, (Antioquia). Correo electrónico: yubian.bedoya@udea.edu.co

ABSTRACT

The physical processes that have the greatest influence on ocean dynamics within the Gulf of Urabá (GU) is the variability of wind fields, differences in density and river discharges. The influence of wind field dynamics on ocean circulation is affected by the latitudinal variation of the Intertropical Convergence Zone, which generates two climatic periods: dry season (December to March) and rainy season (May to November). With the purpose of advancing in the hydrodynamic knowledge of the GU, in this work we analyzed the modulation produced by the seasonal and spatial variation of the wind fields on ocean currents on an intra and interannual scale. The ROMS-CROCO regional ocean circulation numerical model was used, using a variable time atmospheric forcing during the 2010-2015 period. Based on the wind fields, it was found that the GU can be dynamically divided into three zones (north, center and south). The results suggest that when the wind field has a north-south direction, contrary to the flow of the Atrato River, it generates an oceanic circulation that borders fresh waters in the south of the GU. In this scenario, the lowest magnitudes of the surface current were found, mainly for the central and southern zone, with average values of 0.1 m / s. When the effort of the wind is in the same direction of the flow of the Atrato river (south-north), the magnitude of the surface currents increases and most of the flow leaves the GU by its east side (most common scenario). In addition, it was found that the river discharge of the Atrato River has a large influence on the interior of the GU on average up to 3 m deep. Between 4 m and 8 m is the halocline, formed by the transition from freshwater to salt water, where there is a speed cut, which allows the formation of eddies in the deep waters of the GU. It should be noted that in Colombia Bay an almost permanent three-layer flow was found, resulting in greater circulation of water bodies and greater flow exchange with the central area of the GU. Likewise, after 10 m the influence of some systems of currents of the Caribbean Sea on the circulation of the GU is noticeable. In future work it is expected to use wind databases with a fine spatial resolution and take into account the real contribution (data series) of the Atrato river, as well as other important tributaries such as the Leon river.

KEYWORDS: *Gulf of Urabá, atmospheric events, ocean circulation, ROMS-CROCO, climatic seasons.*

INTRODUCCIÓN

Comprender la circulación oceánica del golfo de Urabá (GU) permitirá a largo plazo inferir comportamientos biológicos (transporte de nutrientes y algas), monitorear ecosistemas marino-costeros (corales en punta Caribana), elaborar esquemas de contingencia frente a posibles casos de emergencias en el GU (derrame de hidrocarburos y aguas de lastre por las terminales portuarias).

De manera particular, la circulación en el GU es modulada, principalmente, por la descarga de los ríos y el esfuerzo del viento (Roldán, 2008). Los efectos de la descarga de afluentes caudalosos sobre la hidrodinámica del GU, sumados a sus condiciones atmosféricas particulares (vientos Alisios a fin e inicio de año y vientos del Sur desde mediados de año) conforman una región dinámicamente compleja con un intercambio poco entendido entre las aguas del GU y del mar Caribe; Escobar, Velásquez y Posada, (2015) afirman que el GU tiene un patrón de circulación complejo que comprende simultáneamente una

circulación estuarina típica, con flujos promedios en tres capas e incluso con circulación inversa. Asimismo, el GU es uno de los mayores estuarios de Colombia que contiene sitios con alto valor ecológico y que, además, se considera una región estratégica portuaria a nivel nacional e internacional con la proyección de tres terminales portuarias, como Puerto Antioquia, Puerto Pisisí y Puerto Darién. Por lo anterior, es importante conocer las características del campo de corrientes en superficie y a diferentes niveles de la columna de agua como primer paso para entender el comportamiento hidrodinámico al interior del GU y su intercambio con el mar Caribe.

Con el fin de determinar el comportamiento de la circulación en el GU, trabajos preliminares han utilizado información secundaria (Molina, Molina y Chevillot, 1992; Chevillot, Molina, Giraldo y Molina, 1993) y mediciones puntuales *in situ* (Montoya y Toro, 2006; Álvarez y Bernal, 2007; Montoya, 2010; Escobar, 2011; Escobar *et al.* 2015). Además, varios autores (Montoya y Toro, 2006; Roldán, 2008; Montoya, 2010; Escobar, 2011; Escobar *et al.* 2015; Mosquera, 2017) han hecho

uso de modelos numéricos (ELCOM, CAEDYM, ECOMSED y Delft3D) con el fin de describir los principales patrones de circulación en el GU, pero debido a las características del modelo aplicado utilizaron una magnitud y dirección de viento fijas para toda su área de modelación, simulando diferentes épocas climáticas. Asimismo, estos trabajos no tuvieron en cuenta la influencia de la contracorriente Panamá-Colombia (CCPC) y la corriente del Caribe (CC) en el estudio de la circulación al interior del GU.

La importancia de realizar la modelación con campos de viento con la máxima resolución espacial y temporal radica en la visualización y comprensión que este permite tener respecto a los procesos de interacción océano-atmósfera que se pueden desarrollar de manera diferencial en el GU, teniendo en cuenta su conformación morfológica, así como la presencia de la desembocadura del Atrato, como es el caso de remolinos. Considerando las evidencias anteriores, se propone como principal pregunta de investigación ¿cómo el forzamiento del campo atmosférico modula la circulación oceánica al interior del GU? Para esto se utilizará un modelo tridimensional como CROCO forzado con campos de vientos e información de la descarga del río Atrato, permitiendo una comprensión más

detallada de la circulación en superficie y en fondo de lo que se tiene actualmente.

ÁREA DE ESTUDIO

El GU se encuentra localizado en el extremo noroccidental de Colombia sobre la costa Caribe. Políticamente está constituido por el departamento del Chocó en la parte occidental y el departamento de Antioquia en el extremo oriental, con un total de 512 km de línea de costa para el GU (Figura 1). El GU tiene un área aproximada de 1 800 km², con un ancho promedio en la zona central de 15 km y una distancia axial (norte-sur) de 70 km (Corpourabá, 2010). La batimetría del GU se caracteriza por profundidades promedio de 40 m, con valores mínimos promedio de hasta 20 m en la zona sur y las mayores profundidades de hasta 80 m en su frontera abierta. En general, su fondo está conformado por material lodoso y sedimentario, producto de la fuerte descarga de los ríos Atrato, León, Turbo y Caimán, entre otros (Chevillot *et al.*, 1993). Vélez y Aguirre (2016) concluyen que el depósito y acumulación de sedimentos finos de origen terrígeno prevalecen en la margen noreste del GU, en contraste la abundancia de restos de organismos calcáreos sugiere que en la margen noroeste existen condiciones predominantemente marinas.

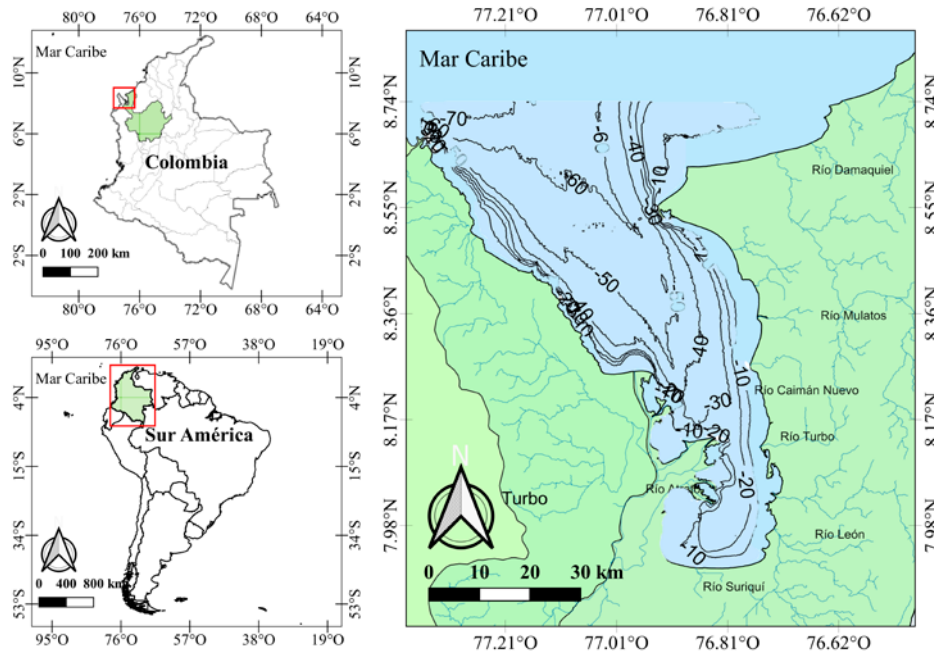


Figura 1. Área de estudio, ubicación geográfica del GU.

El río Atrato cuenta con un caudal promedio de $4\,900\text{m}^3/\text{s}$ en su desembocadura, mientras que el caudal del río León tiene en promedio $75.5\text{m}^3/\text{s}$ (Roldán, 2008). De otro lado, el río Turbo cuenta con un caudal mensual multianual del orden de $5\text{m}^3/\text{s}$, el río Currulao de $10\text{m}^3/\text{s}$ y el río Guadualito en la estación El Tres de $3\text{m}^3/\text{s}$ (Invemar, 2017).

Otra característica importante del GU son sus condiciones atmosféricas y, de manera particular, el régimen de vientos. La climatología de la región está afectada por la traslación de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual alcanza su posición más meridional en los meses de diciembre a marzo, conformando la llamada época seca, y se ubica en su posición más septentrional entre los meses de mayo y noviembre, conformando la época húmeda.

De acuerdo con Thomas, García, Cesaraccio y Rojas, (2007), en la época seca se evidencia la presencia de los vientos Alisios, los cuales tienen una dirección predominante del norte y nordeste con valores promedios de intensidad de 4 m/s, pero que pueden alcanzar hasta 10 m/s. En la época húmeda se presentan vientos con dirección predominante del sur e intensidades promedio de 2 m/s y no alcanzan valores superiores a 4 m/s. La existencia de estos dos regímenes de viento, así como de las descargas de los ríos generan una transición de un régimen estuarino en la zona centro-sur a condiciones de mar abierto en el norte (Roldán, 2008).

METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo radica en determinar la influencia del esfuerzo del viento sobre las corrientes oceánicas, por lo tanto se usó un campo de vientos con información cada hora para obtener mayor acercamiento a la circulación real. Entre las bases de datos con información en el GU se seleccionó la que tenía la mejor relación de resolución espacial y temporal, ERA5 (C3S, 2017). El periodo en el que se llevó a cabo este análisis fue del 01/01/2010 al 31/10/2015, debido a la falta de información más actualizada.

La base de datos ERA5 fue validada con información proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) para bahía Colombia y Capurganá de enero a marzo del 2010, en el proyecto 'Investigación

para la reversión del proceso de erosión de las costas del mar de Antioquia' (Salazar, Posada y Molina, 2018); se calculó un RMSE de 4.7 para bahía Colombia y 6 para Capurganá; el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.1 para bahía Colombia y 0.4 para Capurganá, indicando que existe una correlación positiva y, finalmente, se determinó la relación entre desviaciones estándar, en bahía Colombia fue de 1.3 y en Capurganá de 3, señalando una leve sobreestimación de los datos medidos respecto a los datos de ERA5 para el GU.

La modelación numérica, en la actualidad, se ha convertido en un componente muy importante para las investigaciones en oceanografía física, pues el desarrollo computacional actual ha permitido que estos modelos alcancen detalles al nivel de las observaciones a muy bajo costo económico. Por lo anterior, para este estudio se implementó el modelo de circulación oceánica regional *Coastal and Regional Ocean Community Mode* (Croco, por su acrónimo en inglés).

Croco es un sistema de modelación oceánica basado principalmente en ROMS-Agrif, con el núcleo no-hidrostático de SNH, algoritmos de MARS y HYCOM para los sedimentos y las coordenadas verticales, respectivamente. Croco permite la anidación de dominios, resolviendo escalas muy finas y sus interacciones con escalas mayores. La parametrización de mezcla vertical utilizada fue: perfil K, la advección de momento lateral fue sesgado en sentido ascendente de tercer grado y un esquema de húmedo-secado para las cuadrículas.

Este modelo resuelve las aproximaciones de diferencias finitas del promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS), utilizando la aproximación hidrostática y de Boussinesq con un algoritmo de paso de tiempo dividido-implícito. Utiliza también una malla horizontal curvilínea Arakawa C y coordenadas verticales que siguen la batimetría y la línea de costa -coordenadas sigma- (Shchepetkin y McWilliams, 2005).

Para iniciar se realizó una recopilación y procesamiento de la información referente a batimetría, condiciones oceánicas iniciales y de frontera (temperatura y salinidad en la columna de agua), forzadores atmosféricos (flujos de calor y de humedad, esfuerzo del viento, entre otros)

y caudal del río Atrato; esta información se resume en la Tabla 1. Posteriormente, se procesaron estos datos y mediante la herramienta Croco Tools se llevó a cabo el pre-procesamiento.

Tabla 1. Características de las bases de datos con las que se forzó el modelo.

Bases de datos	Periodo	Resolución espacial	Resolución temporal	Variables extraídas
ETOPO2	2006	0.03°	N.A.	Batimetría
Carta Náutica N° 412	2009	0.001°	N.A.	Batimetría
ERA5	2010-2015	0.3°	Horaria	Componente de la velocidad a 10 m de altura: zonal (U10) y meridional (V10); radiación de onda corta; radiación de onda larga; precipitación; temperatura y humedad medidas a 2m de altura
MERCATOR Glorys2 V3	2010-2015	0.25°	Diaria	Salinidad y temperatura

La batimetría se obtuvo de las bases de datos mencionadas en la Tabla 1 y se realizó un acoplamiento de estas mediante la herramienta Alex Tools. Con respecto a la descarga hídrica al interior del GU, los ríos más caudalosos son Atrato y León; sin embargo, al interior del GU se tiene poco registro de las descargas fluviales de los diferentes ríos. El río Atrato cuenta con registro de caudal por el Ideam en la estación Bellavista [11077010], que se encuentra aproximadamente a 178 km de la desembocadura del río. Pero, dada la lejanía de dicha estación a la desembocadura del río, para efectos de este trabajo se propuso usar el ajuste al ciclo anual de caudales mensuales

del río Atrato en la desembocadura, propuesto por Montoya (2010) (Figura 2). Este autor estimó el caudal mediante técnicas hidrológicas de balances hídricos como la presentada por Vélez, Poveda y Mesa, (2000), utilizando el software HydroSIG Java. Para la modelación se repitió este ciclo anual en los años simulados, debido a que se pretendía evaluar únicamente la influencia del viento en la circulación; forzando el modelo con caudal constante se pudo evaluar con mayor claridad el aporte del viento a la circulación, se espera en trabajo futuro incluir caudales mensuales diferentes en cada año.

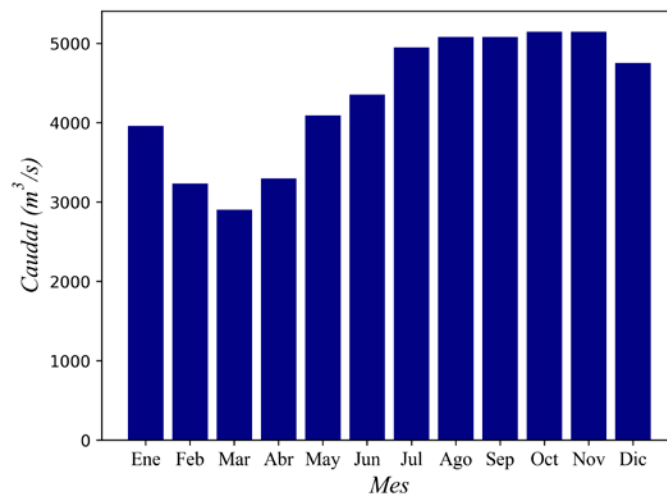


Figura 2. Ciclo anual de caudales mensuales del río Atrato. (Tomado de: Montoya, 2010).

Es necesario aclarar que en el modelo numérico se consideraron las cuatro bocas principales del Atrato: el Roto, Matuntugo, Leoncito, Coco Grande. Los caudales mostrados fueron distribuidos en cada una de las bocas de acuerdo a los porcentajes propuestos por Roldán (2008): boca el Roto 65 %, Matuntugo 15 %, Leoncito 15 % y Coco Grande 5 %, finalmente se obtuvo un caudal mensual para cada una de las bocas y se repitió el ciclo anual.

Respecto a los campos de viento, se realizó una interpolación espacial a los datos de ERA5 (33.3 km) en una malla con resolución de

0.6 km, esto se logró mediante la herramienta del modelo Croco (llamada Croco Tools) utilizando una interpolación cúbica. Una vez se realizó el preprocesamiento, se configuró el modelo. Para el dominio de cálculo se usaron dos mallas (Figura 3): (1) una malla gruesa o dominio principal que se diseñó con una cuadrícula rectangular y una resolución de $1/48^\circ$ (aprox. 2.3 km) delimitada por las latitudes 7.2°N y 10.7°N y las longitudes 79°W y 75°W (Figura 3a), y (2) una malla fina o dominio anidado el cual tuvo una relación 1:4 con respecto al dominio principal, por lo tanto, una resolución espacial de 0.6 km, aproximadamente (Figura 3b).

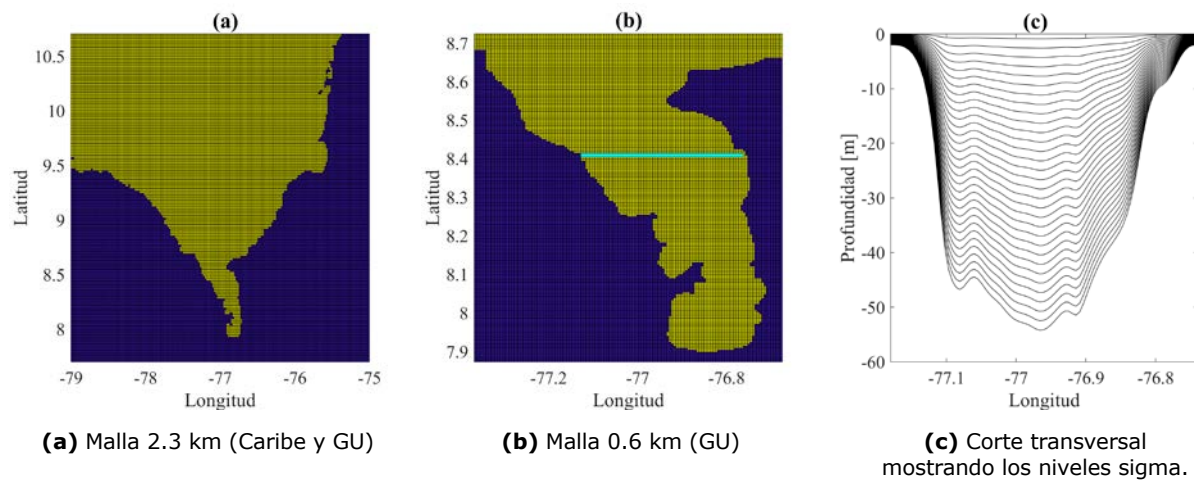


Figura 3. Dominios de cálculo **(a y b)**. Esquema de un corte transversal **(c)**.

Para la resolución vertical el modelo utiliza coordenadas Sigma. Teniendo en cuenta que las máximas profundidades que alcanza el GU en la parte norte son de 80 m, en este trabajo se utilizaron 32 niveles (Figura 3c). Considerando los resultados obtenidos por Velásquez y Guevara (2018), los cuales muestran una haloclina cerca de la superficie, se utilizaron los parámetros de discretización de los niveles sigma en superficie $\theta_s=7.0$, y en el fondo $\theta_b=2.0$). Finalmente, las salidas o resultados del modelo se obtuvieron con una discretización temporal diaria y el análisis final de los resultados se presentó en promedios trimestrales para cada año.

Validación del modelo

Se realizó un análisis de la estabilidad numérica del modelo, utilizando para esto promedios diarios del parámetro de energía cinética (J/kg). Los resultados sugieren que la energía cinética se estabiliza rápidamente alrededor de valores bajos (en promedio 0.01 J/kg), tanto para el dominio grande como para el dominio anidado, lo cual indica que las integraciones de las ecuaciones del modelo se están resolviendo adecuadamente. Debido a lo anteriormente mencionado, se pueden tomar los primeros 6 meses como "calentamiento" del modelo y los demás ser utilizados en la caracterización del

comportamiento hidrodinámico bajo condiciones de tiempo variable.

Con el fin de analizar el desempeño del modelo, se realizó una comparación entre las salidas del modelo numérico y mediciones *in situ*. Sin embargo, en el momento solo se tenían mediciones espaciales (salinidad, temperatura y densidad) realizadas en 2018 en la campaña oceanográfica Tarena II. Ya que esta campaña no se encontraba dentro del periodo de modelación, a partir de información atmosférica (dirección y magnitud del viento) extraída de la NOAA se determinó que 2012 fue el año con condiciones similares para la comparación. Para trabajos futuros se espera ampliar el periodo de modelación y poder realizar comparaciones más justas entre el modelo y mediciones *in situ*.

Se evaluaron cortes verticales de salinidad y temperatura en cuatro secciones formadas por los puntos negros (Figura 4a). En ese caso

solo se muestra los cortes verticales medidos, modelados y el error absoluto de temperatura (Figura 4b) y salinidad (Figura 4c) del recuadro rojo. Se interpolaron los datos modelados a la profundidad de los datos medidos para realizar una comparación justa punto a punto, por ello se aprecia la misma batimetría; se calcularon parámetros estadísticos como RMSE con un 1.45 y 0.31, y R2 de 0.88 y 0.86 para las variables de salinidad y temperatura, respectivamente.

Los resultados obtenidos en la figuras 4b y 4c sugieren que el modelo representa bien las condiciones fisicoquímicas del GU. Se encontró un comportamiento similar en los cortes verticales de salinidad, sin embargo, se determinó un menor porcentaje de error en la evaluación de la temperatura; esto se asocia al pequeño intervalo de temperatura presente en el GU (entre 28°C y 30°C) que amplía el margen de error del modelo e, igualmente, disminuye la diferencia en los valores comparados.

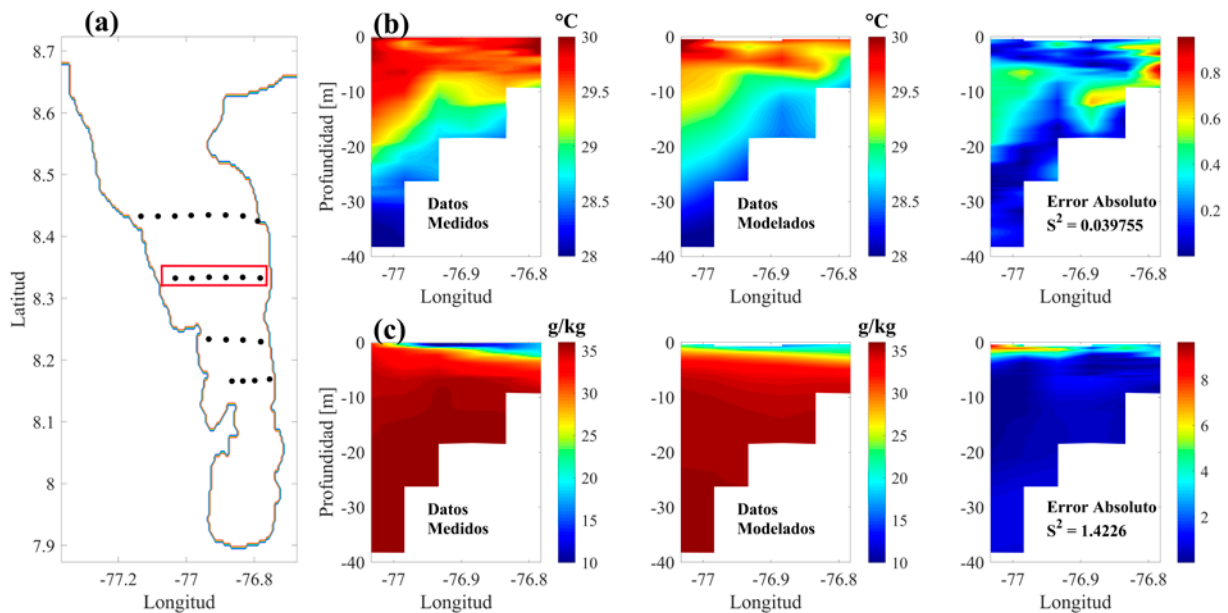


Figura 4. Comparación de parámetros fisicoquímicos entre las salidas del modelo numérico y datos *in situ* para el corte vertical 2 (recuadro rojo). **(a)** Mapa de puntos de muestreo de la campaña Tarena II al interior del GU. **(b)** Comparación de perfiles de temperaturas (medidos, modelados y el error absoluto). **(c)** Comparación de perfiles de salinidad (medidos, modelados y el error absoluto).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron las series de tiempo de magnitud del viento en los únicos cuatro puntos (nodos) de la base de datos de ERA5 ubicados al interior del GU (punto verde, azul, naranja y rojo) (Figura 5a). Se obtuvieron promedios mensuales para cada uno de los años en el periodo analizado, así como los valores promedios de los años 2011 y 2015 (que presentan mayores diferencias), los cuales se muestran en líneas continuas y discontinuas, respectivamente en la Figura 5b.

Los resultados mostrados en la Figura 5b evidencian claras diferencias entre el punto 1 y el punto 4, ubicados al norte y sur, respectivamente. Mientras que los puntos 2 y 3 presentan un comportamiento similar. El punto 1 presenta un comportamiento unimodal con valores altos en la época seca (hasta 5 m/s) y valores bajos

(2 m/s) en la época húmeda. En los puntos 2 y 3 se presentan valores de hasta 4 m/s en la época seca, y solo en el punto 3 valores similares alrededor de octubre. En el resto del periodo nuevamente se muestran valores de hasta 2 m/s. Para el punto 4 el comportamiento de la magnitud del viento es caótico respecto a los puntos anteriores y se observa un pico de hasta 4 m/s en el mes de octubre. A partir de los resultados del comportamiento del viento expuestos en la Figura 5b e información expuesta por autores (Escobar, 2011; Escobar *et al.*, 2015) que establecen procesos físicos característicos para ciertas áreas, y definen algunas diferencias del flujo a lo largo y ancho del GU (flujo de una capa al NE, circulación estuarina típica de dos capas en el centro del GU y un flujo de tres capas al sur en bahía Colombia). Por lo anterior, se propone la delimitación de tres zonas dentro del GU, zona norte, centro y sur (Figura 5a).

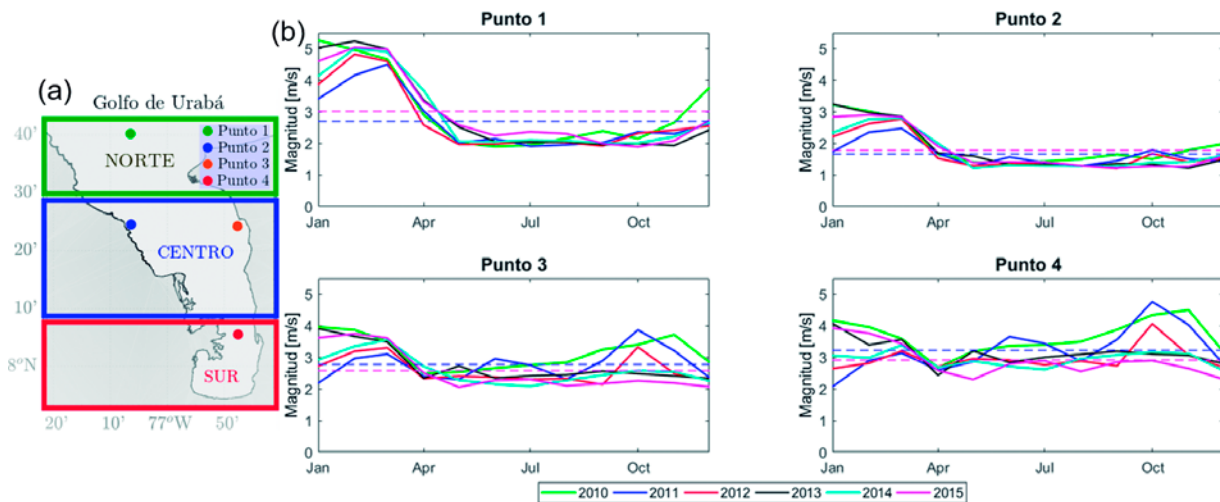


Figura 5. (a) Puntos (nodos) al interior del GU de la base de datos ERA5 zonas norte, centro y sur, con base en el análisis de viento. **(b)** Series de tiempo promedio mensuales de la magnitud del viento en los cuatro puntos especificados en la Figura 5a.

Los valores altos de la velocidad del viento en la zona norte y centro están asociados a los vientos Alisios que llegan a la región en la época seca. Mientras que los valores altos de velocidad mostrados en la zona centro y sur, pueden atribuirse a la presencia de vientos del Sur. Además, se realizó el cálculo del valor promedio anual para los años 2011 y 2015 (líneas discontinuas azul y magenta, respectivamente). Las diferencias de los promedios son hasta de 0.4 m/s entre el 2015 y 2011 para la zona norte,

mientras que para la zona centro y sur los valores son de 0.2 m/s.

Se analizaron los campos promedio mensuales de cada uno de los años y se determinaron que los años con mayor contraste fueron 2011, 2013 y 2015. En la Figura 6a se muestran los campos de vientos en el GU, promediados trimestralmente para los años 2011, 2013, 2015. Se utilizaron promedios trimestrales con el fin de ilustrar la época seca enero-febrero-marzo (EFM), época

húmeda julio-agosto-septiembre (JAS), y dos épocas de transición abril-mayo-junio (AMJ) y octubre-noviembre-diciembre (OND).

A partir de la información espacial se calcularon rosas de viento para cada uno de los trimestres y años analizados (Figura 6b). Los resultados evidencian un patrón bimodal de vientos en el GU. En el primer trimestre se presentan los vientos de mayor magnitud, los cuales provienen del norte y del noroeste debido al paso de los vientos Alisios. En el segundo trimestre, un periodo de transición

de época seca a húmeda, con influencia de los vientos del Norte y Noroeste, y el inicio de registro de vientos del Sur. En el tercer trimestre, época húmeda, se evidencian los vientos de menor intensidad en dirección sur-norte. Finalmente, en el cuarto trimestre, época de transición de húmeda a seca, se observan vientos provenientes del sur con mayor intensidad, comparados con los del norte y noroeste. Los campos de viento mostrados en la Figura 6a sugieren la existencia de campos de viento diferenciados entre la zona norte, centro y sur del GU.

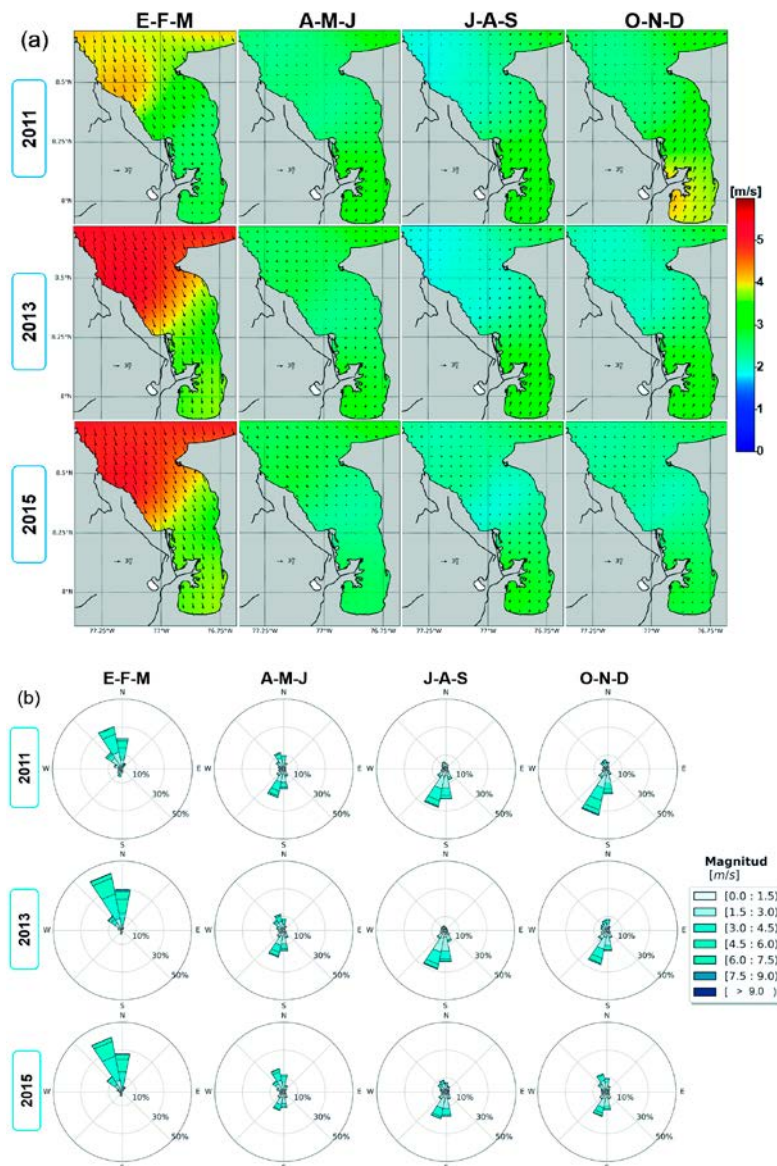


Figura 6. Análisis trimestrales de magnitud y dirección del viento en el GU para los años 2011, 2013 y 2015. **(a)** Campos de viento. **(b)** Rosas de viento.

Teniendo en cuenta los resultados de los campos de viento, se procedió a analizar los campos de corrientes, tanto en superficie como en profundidad. Con el fin de tener una idea de cómo es la circulación al interior del GU en profundidad se realizaron tres cortes verticales en las zonas norte, centro y sur en las latitudes 7.98° N, 8.34° N y 8.59° N, respectivamente (Figura 7, líneas horizontales negro, cian y azul, respectivamente). En cada corte vertical se analizó la dirección del flujo y la estructura vertical de la salinidad (figuras 7 a 10). No se

muestran los campos y cortes verticales de la temperatura del GU, ya que de acuerdo con Velásquez y Guevara (2018) la densidad del agua del GU está modulada, principalmente, por la salinidad. Además, es necesario tener en cuenta que los valores de temperatura en profundidad están en un intervalo corto de entre 28 °C y 30 °C. Por último, del periodo de tiempo modelado se escogieron los años 2011, 2013 y 2015 (a, b y c, respectivamente, en las figuras 7 a 10) por presentar los mayores contrastes en los resultados.

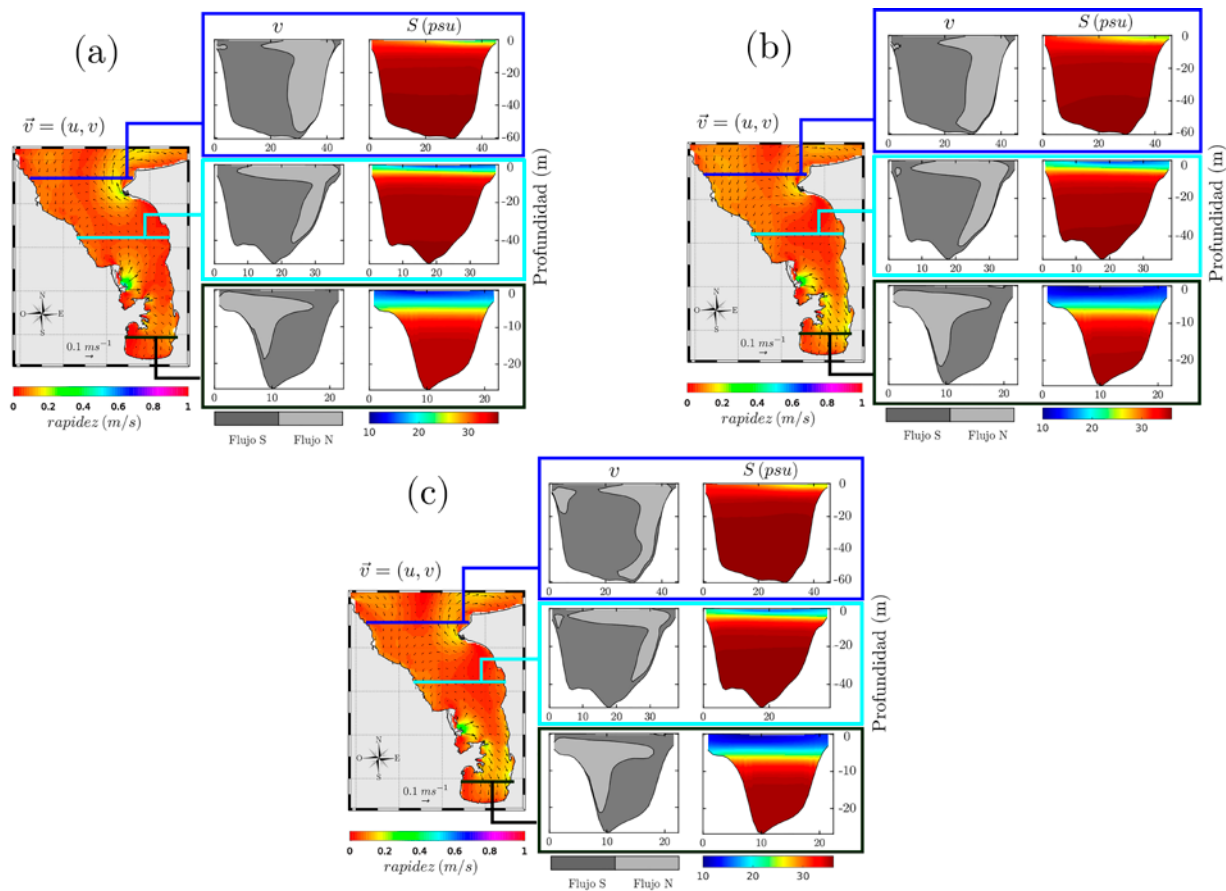


Figura 7. Campos de corrientes superficiales y transeptos verticales de salinidad y componente meridional del flujo (v) para el trimestre EFM, años: **(a)** 2011, **(b)** 2013, **(c)** 2015.

En el trimestre EFM (Figura 7) se observaron las menores magnitudes de la corriente superficial en comparación con las demás épocas. Se encontró una coincidencia entre los patrones de circulación y vientos en los lugares donde las magnitudes de viento son mayores. En la zona norte se observó un corte de velocidades entre la costa este (hacia

el norte, saliendo) y oeste (hacia el sur, entrando), lo cual concuerda con lo encontrado por Montoya (2010) y Escobar *et al.* (2015). En el año 2015 se observa una salida superficial de agua del GU recostada a la costa oeste, la cual probablemente es un remanente de la circulación superficial en la

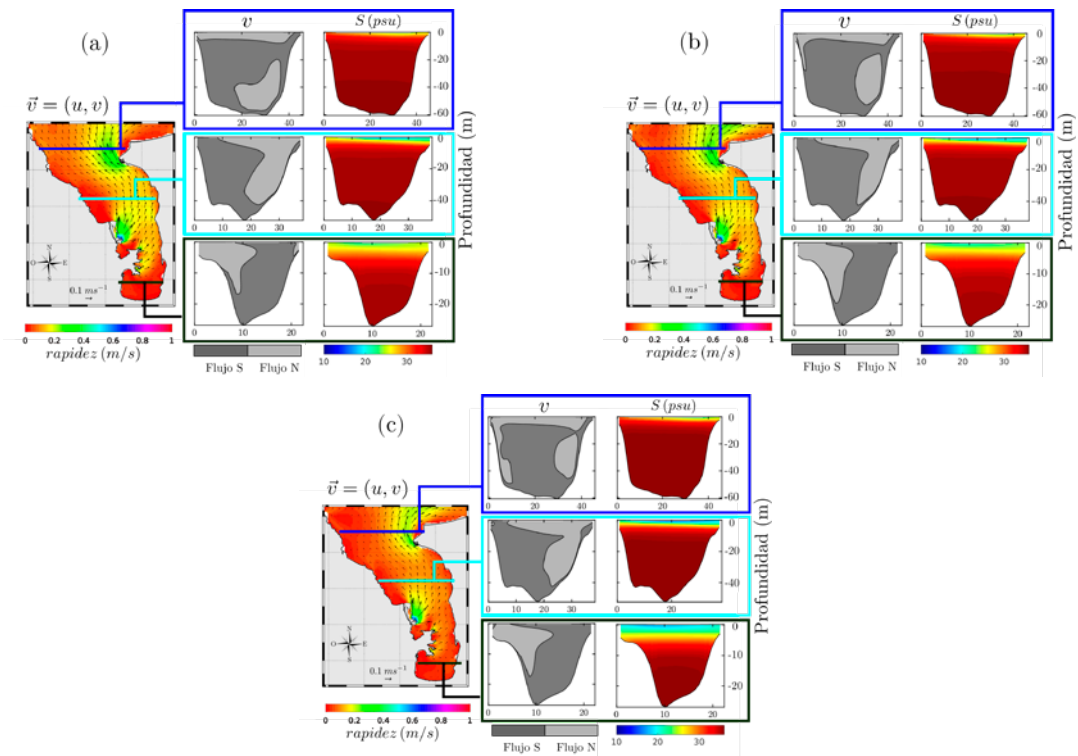


Figura 8. Campos de corrientes superficiales y transeptos verticales de salinidad y componente meridional del flujo (v) para el trimestre AMJ, años: (a) 2011, (b) 2013, (c) 2015.

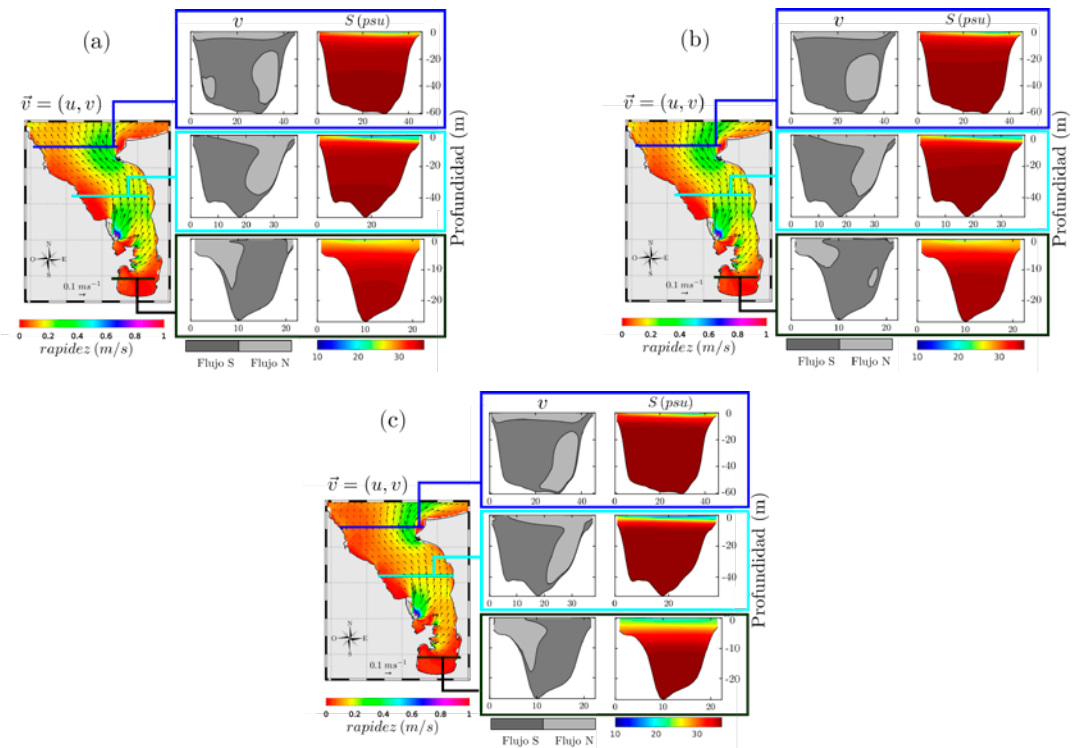


Figura 9. Campos de corrientes superficiales y transeptos verticales de salinidad y componente meridional del flujo (v) para el trimestre JAS, años: (a) 2011, (b) 2013, (c) 2015.

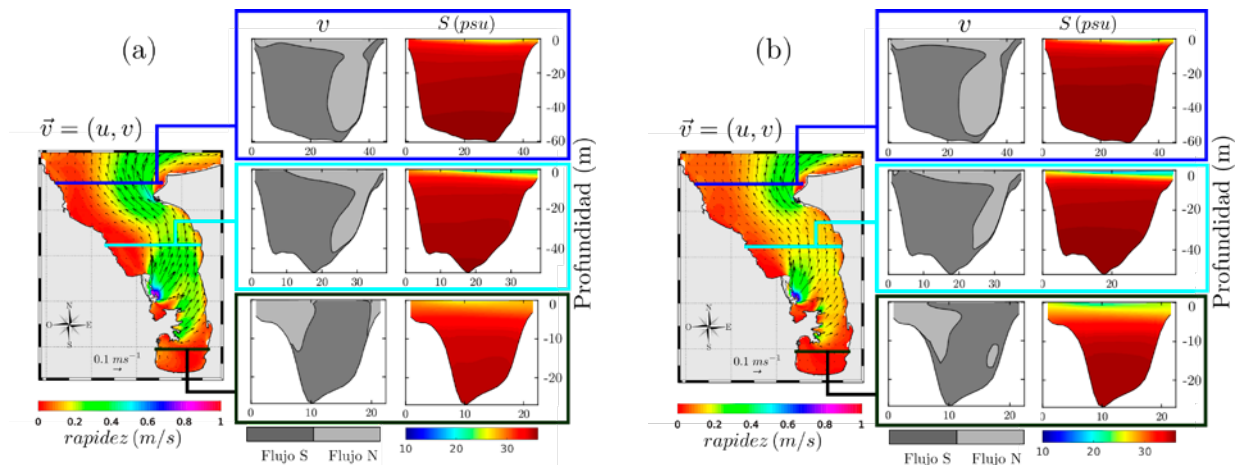


Figura 10. Campos de corrientes superficiales y cortes verticales de salinidad y componente meridional del flujo (v) para el trimestre OND de los años: **(a)** 2011 y **(b)** 2013.

A diferencia de los otros trimestres, el flujo que sale por la zona norte y centro llega a capas más profundas, a causa de la interacción entre las corrientes inducidas por el viento y las producidas por la descarga de los ríos. Se evidenció que la circulación superficial en los tres años (2011, 2013 y 2015) presenta un patrón similar, encontrándose una mayor variación espacial que temporal, lo que coincide con los resultados de Escobar *et al.* (2015).

En los cortes verticales de la zona centro se observa una fuerte influencia del caudal del río Atrato. Los resultados sugieren que en esta zona el flujo entra por la costa oeste y sale del GU en superficie abarcando gran parte de su ancho y, nuevamente, por la costa este. La influencia del río se puede evidenciar debido a los valores bajos de salinidad (menores a 22 g/L) en las capas superficiales.

En la zona sur los cortes verticales estuvieron ubicados sobre bahía Colombia, presentando un flujo de tres capas. Se observó cómo la corriente en dirección sur entra a bahía Colombia por la costa este entre 0 m y 2 m de profundidad, probablemente asociado a los patrones de dirección del viento (sentido norte-sur). Entre 2 m y 8 m se conforma una especie de vórtice, cuyo flujo entra por la costa este y gira de manera anticiclónica saliendo por la costa oeste, en parte debido a la conformación batimétrica y al flujo proveniente del Caribe en sentido sur. La tercera capa de flujo entra a bahía Colombia por la costa este a partir de los 9 m de profundidad, aproximadamente.

Estos patrones de circulación en profundidad coinciden con los resultados obtenidos por Roldán (2008) y Escobar *et al.* (2015). Las características de dirección, magnitud del viento y descarga del río permiten que en bahía Colombia exista una mayor estratificación en época seca. Esto se evidencia al comparar los campos de salinidad de los cuatro trimestres. Además, los resultados sugieren que las características del campo de viento y el caudal del río Atrato confinan las aguas en bahía Colombia, lo que explicaría la presencia de las corrientes débiles (entre 0 m/s y 0.1 m/s).

Para el trimestre AMJ (Figura 8) se observó cómo la corriente superficial entra al GU por la costa oeste, aunque prevalece el campo de corrientes que salen del GU por la costa este. Este comportamiento se debe en parte a que en este trimestre aparecen vientos que soplan desde el sur. De acuerdo con estos resultados, se evidencia como en este trimestre la haloclina es más somera en la zona centro y sur del GU respecto a EFM.

Ahora bien, en el trimestre JAS (Figura 9) en general el campo de dirección del viento está en la misma dirección de la descarga del río (sur-norte), por lo tanto, el flujo que sale del GU se incrementa en superficie y fondo respecto a los dos trimestres anteriores. De hecho, en la zona norte el flujo en superficie alcanza a cubrir casi todo el ancho del GU. Los comportamientos en las zonas centro y sur son similares a los trimestres anteriores. Finalmente, en el trimestre OND (Figura 10) se evidenció un patrón de circulación

similar al de JAS, pero con magnitudes superiores en la velocidad de la corriente y una haloclína más somera respecto a JAS.

Durante los tres últimos trimestres, en las zonas norte y centro se observó que cuando la dirección del viento es sur-norte, el flujo que sale del GU por el lado este es más superficial y ocupa gran parte de su ancho. En estas zonas el agua que entra al GU lo hace principalmente por las capas intermedias y profundas en todo su ancho.

En la zona sur bahía Colombia se observó de manera casi permanente un corte de velocidades en vertical, con un flujo de agua que sale por la capa superficial de la costa oeste (en casi todo su ancho) y entra desde una capa intermedia y hasta cerca del fondo por el lado este del GU. De acuerdo con los resultados, en los últimos tres trimestres, de manera especial JAS, los valores de las magnitudes son mayores lo que indicaría una mayor circulación al interior de bahía Colombia y un mejor intercambio con la zona centro del GU. Esto sugiere que los tiempos de residencia en bahía Colombia podrían ser menores en época húmeda. Por otro lado, para esta zona los resultados muestran que los patrones de circulación entre tres años analizados son similares.

En general, se observa que para todos trimestres, a partir de 10 m de profundidad, aproximadamente, el flujo entra al GU, lo cual se evidencia con los altos valores de salinidad (mayores a 30 g/L). Este flujo en profundidad y en sentido norte-sur podría estar influenciado por la presencia de la corriente del Caribe (CC) y la contracorriente Panamá-Colombia (CCPC).

Respecto a la salinidad (figuras 8, 9 y 10) se observó cómo a pesar de los grandes aportes del río Atrato, en la medida que la dirección del viento es sur-norte la haloclína es más somera en la zona sur y centro del GU. Mediciones realizadas en Tarena II (Calderón, 2019) muestran que la ubicación promedio (3 m) de la haloclína podría estar influenciada por los vientos fuertes, los cuales mezclan la capa superior haciéndola más profunda (hasta los 10 m). Esto se debe a que la dirección del viento está en fase con la dirección de la descarga del río, lo que permite un incremento de la magnitud de la velocidad de la corriente sur-norte en superficie. Estas aguas al salir mucho más rápido en el Caribe que en otros trimestres,

son reemplazadas por aguas intermedias con mayor salinidad. Cabe resaltar que se utilizaron caudales máximos promedios multianuales (no hay variación interanual) y esto, eventualmente, podría cambiar si se incluye la serie de caudales del periodo de estudio.

Con el objetivo de analizar de manera simultánea el campo de vientos y de corrientes en las tres zonas mencionadas, se realizaron histogramas de las magnitudes de estas variables. Para ello se promedió trimestralmente (para la totalidad de datos en cada zona) los datos de corrientes (diarios) y vientos (horarios) contenidos en archivos mensuales, los archivos resultantes correspondientes a cada trimestre se dividieron por zona (Figura 5a), esto se repitió para cada año y se graficó. En la Figura 11 se presentan estos análisis de viento y corrientes en cada una de las zonas en que se dividió el área de estudio, para los años 2011 y 2015, en las época seca (EFM) y época húmeda (JAS), respectivamente.

En cuanto a las corrientes se presenta el mismo comportamiento para los años 2011 y 2015, con magnitudes, principalmente, en el intervalo 0 m/s - 0.35 m/s. Las mayores magnitudes se observan en la zona norte y ligeramente mayores en el trimestre JAS, coincidiendo con la época húmeda, donde la intensidad del viento es menor comparada con EFM.

En cuanto a las magnitudes del viento, durante el año 2015 se observaron valores de velocidades mayores para la época seca que en la época húmeda para todas las zonas, siendo la zona norte la que presenta las mayores velocidades (hasta 5 m/s). En la zona centro se observaron valores entre 2 m/s y 5 m/s, y en la zona sur alrededor de 2 m/s y 4 m/s. Durante el año 2011 se conserva el comportamiento en la zona norte, aunque con frecuencias menores al año 2015. En la zona centro el espectro de magnitudes es amplio (entre 2 m/s y 5 m/s), sin embargo, sus frecuencias vuelven a ser bajas. En la zona sur son mayores las magnitudes para el trimestre JAS respecto a EFM, pero con frecuencias menores. Los resultados sugieren que el patrón de corrientes es similar para los dos años analizados. Y que existen diferencias apreciables en los campos de vientos para los años 2011 y 2015 en la zona norte, no siendo tan evidentes para las zonas centro y sur del GU.

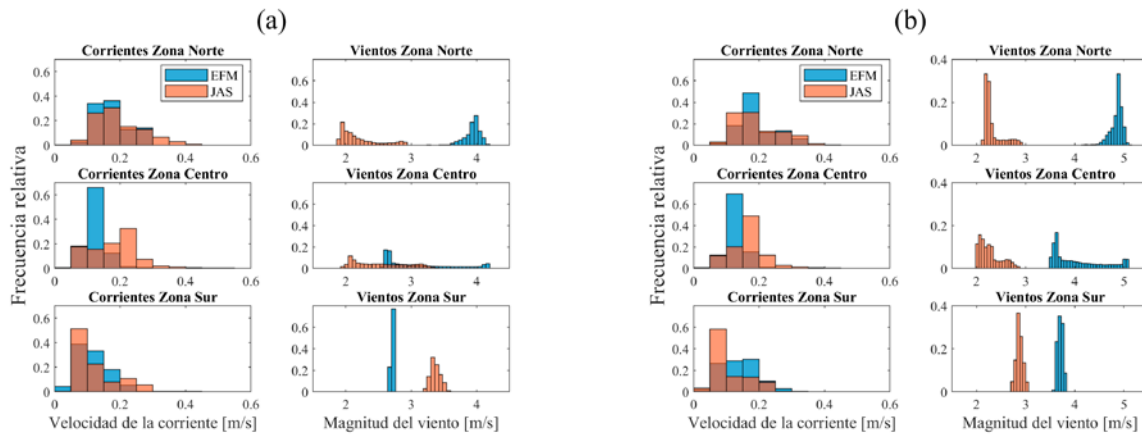


Figura 11. Histogramas de la magnitud del viento y las corrientes para los trimestres EFM (época seca, color naranjado) y JAS (época húmeda, color azul) para los años: **(a)** 2011 y **(b)** 2015.

Pese a las diferencias en los histogramas de viento, se percibe el mismo patrón en los histogramas de corrientes a causa de otros procesos físicos que pueden estar influenciado el comportamiento de estas. Además, no siempre la magnitud y dirección de las corrientes están en fase con el viento. Se espera realizar experimentos numéricos que permitan definir cuáles son los umbrales en los cuales sucede esto dentro del GU. En trabajos futuros se recomienda el uso de una base de datos con una resolución espacial y temporal fina, como WRF. Además, se sugiere usar datos de caudal con variación interanual, tanto para el río Atrato, como para otros ríos que desembocan en el GU.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sugieren que la dirección e intensidad del viento en diferentes épocas climáticas del año modulan la circulación en el GU, siendo más significativas las variaciones de la circulación a nivel espacial; por lo tanto se establece que el GU se debe analizar en tres zonas: norte, centro y sur.

Se observó que la dirección predominante de las corrientes superficiales en la costa este es sur-norte. Asimismo, se evidenció cómo la haloclina se hace más superficial y existe un aumento de la velocidad de la corriente a medida que se sale del GU.

En el trimestre EFM se detectaron las mayores intensidades de los vientos debido a la presencia de los vientos Alisios del noroeste. Esto permite que dentro del GU en este trimestre se presenten las menores magnitudes de la corriente, debido a la diferencia en dirección entre la descarga del río y el campo de vientos. En la zona norte y centro, el flujo entra por la costa oeste en toda la columna de agua y sale por la costa este. En la zona sur se presenta un flujo de tres capas que entra en superficie y fondo por la costa este, girando y saliendo en una capa intermedia por la costa oeste. En los trimestres restantes se observa de forma general el mismo patrón de circulación (flujo entrando por el oeste, saliendo por el este) y cómo la intensidad de los vientos del norte disminuye y dominan los vientos del sur. En estos trimestres la descarga fluvial está en la misma dirección que el viento, ocasionando que el flujo que sale del GU se extienda en la totalidad de su ancho superficial. Estas condiciones permiten que el GU se considere un estuario bien estratificado.

Se encontró que en bahía Colombia la circulación no presenta variaciones significativas entre las épocas climáticas del año. Sin embargo, los resultados sugieren que a medida que se intensifican los vientos provenientes del sur en bahía Colombia habrá mayor recirculación de la masa de agua. De la misma manera se encontró que la circulación oceánica en todo el GU por debajo de los 10 m de profundidad no está influenciada por las épocas climáticas. La haloclina

se ubica entre 4 m y 10 m de profundidad, y que su variación depende de la época climática. Por último, por debajo de los 10 m al parecer el GU está dominado por los sistemas de corrientes del Caribe (CC y CCPC).

En general, los resultados de la circulación oceánica obtenidos a partir de los campos de viento variables sugieren la influencia de otros moduladores, como los caudales variables de los ríos Atrato y León, que deberán ser analizados en trabajos posteriores. De esta manera podrán ser estudiadas modulaciones a la circulación oceánica y su relación con eventos interdecadales.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el proyecto CODI (2017-17008) de la Universidad de Antioquia 'Análisis de la modulación a la circulación oceánica en el golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia, a través de simulación numérica'.

Los autores agradecen su apoyo en la elaboración de este trabajo a Julien Jouanno del Legos -Observatoire Midi-Pyrénées- (Francia), al grupo Oceanicos de la Universidad Nacional, y de manera especial a la profesora Yuley Cardona. Así como al programa I-COOP+2017 (Referencia COOPB20337) del CSIC (España).

Por último, agradecemos a los revisores por los comentarios y sugerencias realizados.

REFERENCIAS

Álvarez, A. M.; Bernal, G. (2007). Estimación del campo de transporte 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.

Calderón, Y. (2019). *Variabilidad espacio-temporal del potencial energético salino por medio de mediciones in situ en el golfo de Urabá, mar Caribe colombiano*. Tesis de pregrado. Universidad de Antioquia, sede de Ciencias del Mar, Turbo.

Corpouraba, (26 de noviembre de 2010). Golfo de Urabá. <http://www.corpouraba.gov.co/el-golfo-de-uraba>

Chevillot, P.; Molina, A.; Giraldo, L.; Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*; 14:79-89. <https://doi.org/10.26640/22159045.62>

Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: *Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Escobar, C. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). Universidad EAFIT. *Bol. Cient. Invemar*; 40(2): 327-346. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2011.40.2.114>

Escobar, C.; Velásquez, L.; Posada F. (2015). Marine currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*: 31, Issue 6:1363-SD1374. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00186.1>

Invemar. (2017). *Informe técnico final: aportes sedimentarios y evolución litoral de la franja oriental del golfo de Urabá, zona de Turbo*. 23-25 pp.

Molina, A.; Molina C.; 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. *Bol. Cient. CIOH*; 11:43-58. <https://doi.org/10.26640/22159045.45>

Montoya, L. J. (2010). *Dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión en contaminantes y sedimentos*. Tesis doctoral. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Montoya, L. J.; Toro F. M. (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.

Mosquera, S. M. (2017). *Análisis de las variables incidentes en la circulación hidrodinámica del Golfo de Urabá*. (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Sede Ciencias del Mar.

- Roldán, P. A. (2008). *Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo de Urabá*. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de maestría. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 113 pp.
- Salazar, J. F.; Posada, J. A.; Molina R. (2018). *Proyecto Investigación para la reversión del proceso de erosión de las costas del mar de Antioquia*. Recuperado de: Componente de Modelación Atmosférica.
- Shchepetkin, A. F.; J. C. McWilliams, (2005). El Sistema Regional de Modelado Oceánico: una topografía de superficie libre, explícita dividida, siguiendo el modelo de coordenadas del océano. *Ocean Modeling*; 9:347-404.
- Thomas, Y.-F.; García, V. C.; Cesaraccio, M., Rojas, G. X., (2007). El Paisaje en el Golfo. Pp. 79-131, en García- Valencia, C. (Ed). (2007). *Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras -Invemar- y Gobernación de Antioquia. Santa Marta, Colombia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar Nº 12.
- Velásquez, A.; Guevara, J. (2018). *Caracterización termohalina de la región central del golfo de Urabá, a partir de la descarga de los ríos*. (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, sede de Ciencias del Mar, Turbo.
- Vélez, J.; Poveda, G.; Mesa, O. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
- Vélez, C.; Aguirre, N. (2016). Influencia del río Atrato en el Golfo de Urabá durante el Holoceno Tardío, Mar Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*; 45:73-97. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2016.45.1.631>