



Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá debido a condiciones meteorológicas y a la descarga de ríos

Yubián Andrés Bedoya Henao

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Director

Vladimir G. Toro Valencia

Doctor (PhD) en Oceanografía física

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Bedoya Henao & Toro Valencia, 2023)
Referencia	Bedoya Henao, Y. A., & Toro Valencia, V. G. (2023). <i>Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá debido a condiciones meteo-marinas y a la descarga de ríos</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte Seleccione cohorte posgrado.

Grupo de Investigación Sistemas Marinos y Costeros (GISMAC).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el Prof. Vladimir G. Toro Valencia, por su invaluable guía y apoyo durante todo el proceso de investigación y redacción de esta tesis. Su paciencia, motivación y supervisión fueron fundamentales para que pudiera completar este trabajo sobre un tema que me apasiona profundamente como lo son las ciencias del mar.

También agradezco al proyecto CODI "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. 2017-17008" por el financiamiento otorgado para la matrícula, salidas de campo, eventos académicos y demás gastos durante estos dos años de investigación.

Asimismo, mi gratitud al proyecto "Influencia de la hidrodinámica en las condiciones ambientales del Golfo de Urabá" financiado por la Convocatoria conjunta de proyectos de I+D+I en el marco de la agenda regional de I+D -> I, por impulsar mi interés en continuar esta línea de investigación y proveer inspiración y recursos invaluable.

Debo un agradecimiento especial al Prof. Julien Jouanno, cuya experiencia y consejos fueron fundamentales para el manejo y ejecución del modelo numérico. Su apoyo constante fue una luz de esperanza en los momentos más difíciles y gracias a él pudimos culminar este trabajo con grandes resultados.

Finalmente, agradezco a la Prof. Yuley Cardona y su grupo de investigación OCEÁNICOS de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, en especial a los estudiantes Manuela Guarín, Maximiliano Arredondo y Luisa Gutiérrez, por sus acertadas recomendaciones y por facilitarnos los recursos computacionales necesarios para realizar las simulaciones.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos específicos.....	17
1. Metodología.....	18
1.1 Información de la zona de la estudio y mediciones de campo	19
1.1.1 Información de la zona de estudio	19
1.1.2 Batimetría de la zona de estudio	20
1.1.3 Caudal de los ríos Atrato y León	21
1.1.4 Marea	23
1.1.5 Forzadores atmosféricos	25
1.1.6 Condiciones iniciales y de frontera.....	27
1.1.7 Campañas de medición	27
2. Modelación numérica.....	29
2.1 Discretización de la zona de estudio	30
2.2 Esquemas de parametrización	31
2.3 Integración del modelo.....	31
3. Análisis preliminares de las salidas del modelo	33
3.1 Comparación de campos de temperatura y la salinidad superficial en el dominio padre	35
3.2 Comparación de la temperatura y la salinidad en la malla hija.....	39
3.3 Comparación de datos de la corriente en un transecto vertical	44
3.4 Comparación de datos in situ de nivel del mar con datos modelados de onda de marea.....	49

4. Resultados y discusiones.....	52
4.1 Patrones de circulación mensual multianual	52
4.2 Caracterización de la circulación media usando la función corriente.	58
4.3 Transporte promedio por capas	63
4.4 Patrones superficiales y verticales de salinidad y temperatura	67
5. Comparación de un escenario referencia y escenarios con diferentes forzamientos	71
5.1 Comparación de la magnitud y dirección de la corriente con los diferentes escenarios	71
5.2 Comparación de la circulación en los diferentes escenarios por medio de la función corriente.....	75
5.3 Comparación del transporte en los diferentes escenarios.....	79
5.4 Análisis de los campos de corrientes entre los diferentes escenarios simulados	82
6. Conclusiones	91
Referencias	93
Anexos.....	98

Lista de tablas

Tabla 1 Factor de ajuste a los caudales de la estación Bellavista.....	22
Tabla 2. Lugar, fecha y equipos utilizados en las campañas de medición	24
Tabla 3. Información de las variables atmosféricas utilizadas para forzar el modelo.....	25
Tabla 4. Información de la base de datos utilizadas para forzar el modelo	27
Tabla 5. Equipos y variables medidas	28
Tabla 6. Parámetros de la configuración de las coordenadas sigma	31
Tabla . Períodos cálidos (rojo) y fríos (azul) asociados al evento Niño y Niña basados en un umbral de +/- 0.5°C para el Índice del Niño Oceánico (ONI).....	32
Tabla 8. Características de las bases de datos usadas para la comparación de variables espaciales	35
Tabla 9. Estadísticos de la comparación entre los perfiles promedio medidos y modelados (figuras 20 y 22) de la componente norte-sur en la campañas 1 y 2	48
Tabla 10. Análisis de la varianza y correlación de las componentes u y v de la corriente en los diferentes escenarios simulados para el mes de febrero.....	85
Tabla 11. Análisis de la varianza y correlación de las componentes u y v de la corriente en los diferentes escenarios simulados para el mes de octubre	87

Lista de figuras

Figura 1. Batimetría y ubicación del dominio padre y dominio hijo (Golfo de Urabá).....	20
Figura 2. Bocas del río Atrato y río León con los porcentajes de descarga solo del caudal del río Atrato.....	21
Figura 3. a) Ciclo multianual del caudal en la desembocadura del río Atrato (Vélez <i>et al.</i> ,2000))(barras azules) y ciclo multianual estación Bellavista (barras rojas). b) Ciclo multianual en la desembocadura del río León.....	22
Figura 4. Años 2011 a 2019. (Magenta) caudal diario del río Atrato en la estación Bellavista del IDEAM. (Azúl) ciclo anual estimado de los caudales del río Atrato en la desembocadura (Vélez <i>et al.</i> , 2000). (Marrón) valores mensuales en la desembocadura de acuerdo al ajuste a los datos de la estación Bellavista.	23
Figura 5. Localización de los sensores de presión al interior del Golfo de Urabá.....	24
Figura 6. Ciclo multianual en la magnitud y dirección del viento de la base de datos ERA5.	26
Figura 7. Puntos de medición con CTD en dos campañas del año 2018	28
Figura 8. Resolución de las malla de calculo. (a) malla padre con resolución horizontal de 2 km aprox. (b) malla hija con resolución horizontal de 0.5 km aprox. y 32 niveles verticales	30
Figura 9. Comparación de la salinidad superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Primer trimestre de los años 2011-2013-2015	36
Figura 10. Comparación de la temperatura superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Primer trimestre de los años 2011-2013-2015	37
Figura 11. Comparación de la salinidad superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SOD. Tercer trimestre de los años 2011-2013-2015	38
Figura 12. Comparación de la temperatura superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Tercer trimestre de los años 2011-2013-2015.....	39
Figura 13. Campaña de medición de 02/06/2018. a) transecto; datos de salinidad: b) in situ; c) modelados; d) perfiles en cada punto de medición: e) RMSE; f) SKILL	40
Figura 14. Campaña de medición de 02/06/2018. a) transecto; datos de temperatura: b) in situ; c) modelados; d) perfiles en cada punto de medición: e) RMSE; f) SKILL.....	41
Figura 15. Campaña de medición 02/06/2018. a) transecto; datos de salinidad: b) in situ; c) modelados; d) perfiles en cada punto de medición e) RMSE; f) SKILL	42

Figura 16. Campaña de medición de 02/06/2018. a) transecto; datos de temperatura: b) in situ c) modelados d) perfiles en cada punto de medición e) RMSE; f) SKILL	42
Figura 17. Campaña de medición 2018/05/02. Datos de salinidad: a) in situ; b) modelados; c) transecto; d) perfiles en cada punto de medición: e) RMSE; f) SKILL.....	43
Figura 18. Campaña de medición 2018/05/02. Datos: a) in situ; b) modelados; c) transecto; d) perfiles en cada punto de medición: e) RMSE; f) SKILL.....	43
Figura 19. Marea en Turbo y fase lunar. (Figura superior) Junio de 2022. (Figura inferior) Junio 2011.....	45
Figura 20. Campaña 23 y 24 de junio (2022). Componente norte-sur (v). Promedio de los datos medidos por el ADCP a lo largo del transecto este-oeste (línea punteada negra). a) y b) dato medidos por el ADCP; c) y d) datos modelados.....	46
Figura 21. Marea en Turbo y fase lunar. (Figura superior) septiembre de 2022. (Figura inferior) septiembre 2011.	47
Figura 22. Campaña 3 y 4 de septiembre (2022). Componente norte-sur (v). Promedio de los datos medidos por el ADCP a lo largo del transecto este-oeste (línea punteada negra). a) y b) dato medidos por el ADCP; c) y d) datos modelados.....	48
Figura 23. Los 5 constituyentes principales de la marea en los diferentes puntos de instalación de los sensores.....	49
Figura 24. <i>Onda de marea en el golfo de Urabá.</i> a) Líneas cotidales de la onda de marea. b) Gráficos de dispersión, marea astronómica modelada vs observada	51
Figura 25. <i>Transectos verticales de la magnitud de las corrientes mensuales multianuales</i>	53
Figura 26. Transectos verticales de la dirección de las corrientes mensuales multianuales	54
Figura 27. Transectos verticales de la magnitud y dirección de las corrientes mensuales multianuales para los meses de febrero (primera fila) y octubre (segunda fila). Columna izquierda rapidez (cm/s) y columna derecha dirección.....	55
Figura 28. División en profundidad del golfo en capas. Los planos en azul muestran la separación de las capas y el grosor de cada una de estas (vista desde el costado este del golfo) ..	56
Figura 29. Corriente promedio multianual de la capa superficial en los meses de febrero y octubre.....	57
Figura 30. Corriente promedio multianual de la capa intermedia (izq.)y la capa de fondo (der.) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo).....	58
Figura 31. Capa superficial. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica.....	60

- Figura 32.** Capa intermedia. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica.....61
- Figura 33.** *Capa de fondo. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica*62
- Figura 34.** División del golfo en tres zonas: norte (ZN), central (ZC) y sur (ZS) de acuerdo a los análisis con la función corriente.....63
- Figura 35.** Capa superficial. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte).....64
- Figura 36.** Capa intermedia. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte).....65
- Figura 37.** Capa de fondo. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte).....66
- Figura 38.** Estructura vertical de temperatura (izq) y la salinidad (der) en los meses de febrero (primera fila) y octubre (segunda fila)67
- Figura 39.** Salinidad. Estructura vertical (izq). Campo superficial promedio (der) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo)69
- Figura 40.** Temperatura. Estructura vertical (izq). Campo superficial promedio (der) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo)70
- Figura 41.** Magnitud de las corrientes mensual multianual al interior del golfo de Urabá. Meses de febrero (arriba) y octubre (abajo). Escenarios simulados de izquierda a derecha: Referencia, sin marea, sin viento, sin ríos72
- Figura 42.** Dirección de las corrientes mensual multianual al interior del golfo de Urabá. Meses de febrero (arriba) y octubre (abajo). Escenarios simulados de izquierda a derecha: Referencia, sin marea, sin viento, sin ríos74
- Figura 43.** Capa superficial. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual para los diferentes escenarios simulados en los meses de febrero (fila 1) y octubre (fila 2). Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica76
- Figura 44.** Capa intermedia. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual para los diferentes escenarios simulados en los meses de febrero (fila 1) y octubre (fila 2). Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica78

- Figura 45.** Capa superficial. Transporte promedio mensual multianual para los meses de febrero y octubre. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte).....79
- Figura 46.** Capa intermedia. Transporte promedio mensual multianual para los meses de febrero y octubre. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte).....80
- Figura 47.** Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin viento para el mes de febrero. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo.....83
- Figura 48.** Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin río para el mes de febrero. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo.....84
- Figura 49.** Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin viento para el mes de octubre. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo.....86
- Figura 50.** Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin río para el mes de octubre. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo.....86
- Figura 51.** Análisis de la varianza y correlación de las componentes u y v de la corriente en los diferentes casos simulados para cada mes del año en escenarios Niña (2011, fila 1), Neutro (2013, fila 2), Niño (2015, fila 3) y promedio multianual (fila 4).....88

Resumen

El Golfo de Urabá (GU) es un estuario de gran importancia científica debido a su compleja hidrodinámica y ecosistemas asociados. Las condiciones de este estuario están determinadas por la descarga del río Atrato, cuyo caudal varía entre 4000 y 5000 m³/s, así como por los forzamientos atmosféricos y la marea micromareal. Para estudiar los efectos de estas variables sobre el GU, se implementó el modelo oceánico regional CROCO, el cual se configuró con dos dominios anidados, uno exterior de ~2 km de resolución (Caribe cercano) y otro interior de ~0.5 km enfocado en el GU. El modelo se forzó con caudales de los ríos Atrato y León, niveles de marea del modelo TPXO, información de vientos y flujos de calor de la base de datos ERA5 de los años 2010 a 2018. Se observó que durante la estación seca (diciembre-abril), predominó un flujo superficial hacia el norte debido a la influencia de los ríos y a pesar de los vientos del norte, mientras que las capas medias e inferiores fluyeron hacia el sur. En la estación húmeda (mayo-noviembre), con vientos débiles del sur, el flujo superficial tuvo dirección hacia el noreste del GU. En general, estos resultados sugieren que el modelo reprodujo adecuadamente los patrones de circulación observados en el GU. De otro lado, se realizaron simulaciones adicionales suprimiendo el forzamiento de marea, viento y ríos. Los resultados sugieren que la marea tiene poco efecto sobre la circulación general, inferior al 10%, mientras que el caudal de los ríos (principalmente el Atrato) y la intensidad de los vientos ejercen un control dominante. El viento modifica significativamente la circulación superficial, controlando en mayor medida la componente zonal, mientras el caudal del río Atrato controla los flujos profundos y superficiales, en especial la componente meridional. En el caso sin viento, se observó como el transporte neto disminuye, la pluma sale por el oeste y el intercambio con el exterior decrece. Por otro lado, sin el caudal del río Atrato, la circulación en Bahía Colombia se invierte completamente debido al viento. Por lo tanto, la circulación en el GU es modulada principalmente por el caudal de los ríos (Atrato) y por la intensidad del viento.

Palabras clave: Golfo de Urabá, hidrodinámica, río Atrato, CROCO

Abstract

The Gulf of Urabá (GU) is a coastal region of great scientific importance due to its complex hydrodynamics and associated ecosystems. The main modulation of oceanic circulation in the GU originates from the discharge of the Atrato River, whose flow varies between 4000 and 5000 m³/s, as well as from atmospheric forcing. To study these effects, the regional oceanic model CROCO was implemented, including modules of waves, tides, sediment transport and atmospheric forcing. The model was configured with two nested domains, an outer one with ~2 km resolution and an inner one with 0.5 km resolution focused on the GU. It was forced with observed discharges from the Atrato and León rivers, tides from the TPXO model, winds and heat fluxes from the ERA5 database for 9 years (2010-2018). The model adequately reproduced the observed circulation patterns in the GU. During the dry season (December-April), a northward surface flow prevails due to the Atrato and northerly winds, while the mid and lower layers flow southward. In the rainy season (May-November) with weaker southerly winds, the surface circulation exits the GU through the northeast. The tides showed little effect on circulation, less than 10%, while the Atrato and winds exert dominant control. Additional simulations were performed suppressing the tidal, wind and river forcing. The results indicate that the wind significantly modifies the surface circulation, controlling the zonal component to a greater extent, while the Atrato controls the deep and surface flows, especially the meridional component. Without wind, the net transport decreases, the plume exits through the west and exchange with the exterior decreases. Without the Atrato, the circulation in Bahía Colombia completely reverses due to the wind.

Keywords: Gulf of Urabá, hydrodynamic, Atrato River, CROCO

Introducción

La comprensión de los procesos hidrodinámicos del océano es de gran importancia, ya que la sostenibilidad de los ecosistemas, algunas actividades económicas y sociales son gobernados en gran parte por la dinámica marino-costera de cada sitio. Su entendimiento abarca intrincados procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan entre sí. Lo anterior implica un análisis de alta resolución a escalas espaciales y temporales de la dinámica oceanográfica y costera. De manera particular, el Golfo de Urabá (GU) es un estuario gobernado por la descarga de los ríos y la variabilidad de la intensidad y dirección del viento (Roldán, 2008). El caudal de los ríos, especialmente el Atrato sumado a la presencia de los vientos Alisios, conforman una región dinámicamente activa con un intercambio poco entendido al interior del GU y con las aguas del mar Caribe. Comprender la circulación a diferentes niveles de profundidad y alta resolución espacial y temporal, es fundamental para elucidar su efecto sobre procesos biológicos y químicos.

Las investigaciones sobre los patrones de circulación en el Golfo de Urabá (GU) se han basado en el análisis de información secundaria (Molina *et al.*, 1992; Chevillot *et al.*, 1993; Escobar *et al.*, 2015) y en mediciones in situ (Montoya y Toro, 2006; Álvarez y Bernal, 2007; Montoya, 2010; Escobar *et al.*, 2015). Utilizando imágenes del satélite SPOT de febrero de 1989, Molina *et al.* (1992) y Chevillot *et al.* (1993) caracterizaron la circulación superficial mediante el rastreo de las plumas de sedimentos de los ríos Atrato, León y Turbo como trazadores naturales. Estos autores definieron las características hidrodinámicas del GU durante la estación seca, con vientos alisios del norte de aproximadamente 5 a 6 m/s, y la estación húmeda, con vientos del sur de 2 a 4 m/s. Concluyeron que, durante la estación húmeda, no se produce un confinamiento del agua, lo que permite un intercambio más eficaz entre las aguas del GU y el océano abierto.

No obstante, la caracterización de los principales patrones de circulación del GU (Montoya y Toro, 2006; Escobar, 2011; Escobar, Velásquez y Posada, 2015), así como la dispersión de sedimentos y coliformes (Lonin y Vásquez, 2005; Montoya *et al.*, 2005; Roldán, 2008; Montoya, 2010), se ha realizado mediante la implementación y análisis de resultados de modelos numéricos, como ELCOM, CAA EDYM, ECOMSED y Delft3D. En el Caribe Colombiano, Guerrero (2016) utilizando el modelo numérico ROMS-AGRIF llevó a cabo simulaciones bajo diferentes configuraciones, incluyendo escenarios con y sin la influencia de los ríos. Los resultados modelados se contrastaron con datos medidos por satélite y reanálisis. Además, se implementaron

técnicas de análisis y separación de escalas para examinar los procesos en la submesoescala. De manera general, concluyeron que el modelo ROMS-AGRIF posee la capacidad de representar adecuadamente la variabilidad espacio/temporal de las corrientes oceánicas a nivel de submesoescala.

Roldán (2008), utilizando resultados de un modelo número en el GU, sugiere que los principales forzadores de las corrientes superficiales son los flujos de los ríos y la intensidad y dirección del viento. En su trabajo, se describen patrones de circulación para la estación húmeda y seca. Durante la estación húmeda, se encontraron dos vórtices, situados al oeste del GU, girando de manera anticiclónica y ciclónica, lo que produce en ese lugar una corriente sur-norte relativamente intensa. Por otro lado, durante la estación seca, el patrón de circulación superficial se caracteriza por las corrientes norte-sur, que confinan las aguas en la región sur de la bahía. De acuerdo con sus resultados, estas aguas superficiales se evacuan mediante una contracorriente en dirección norte, que se extiende por todo el dominio a profundidades superiores a 4 m. En Bahía Colombia, los resultados muestran dos capas en cada una de las estaciones climáticas, una capa de agua dulce de 4 m en la estación húmeda y 6 m en la estación seca, y debajo de esta, una capa de agua salada. Por otro lado, Lonin y Vásquez (2005) observaron que la capa superficial depende del flujo descargado por los ríos, mientras que la capa inferior depende de la corriente que se origina en el Caribe y se dirige hacia el interior del GU.

El régimen de circulación del GU podría estar influenciado por la onda de la marea, que es de tipo micromareal con amplitudes máximas 0,4 m (Restrepo y Correa, 2002). Según Silva *et al.* (1978), las mareas del GU originan corrientes norte-sur durante su ascenso y corrientes sur-norte durante su descenso. Sin embargo, los resultados de Escobar (2011) con modelos numéricos indican que la marea tiene un impacto limitado en los patrones de circulación en el GU, mientras que la descarga del río Atrato ejerce un efecto significativo en todo el dominio espacial debido a la aceleración de su flujo provocada por los altos caudales (Latandret-Solana, 2021). Por otro lado, se presentan dos regímenes de los vientos durante el año, con variaciones significativas en la dirección y la intensidad. La existencia de estos dos regímenes de viento, junto con las descargas fluviales, producen una transición de un régimen estuarino en la región centro-sur a condiciones de mar abierto en el norte (INVEMAR, 2001).

En la investigación sobre los patrones de circulación superficial en la plataforma interna del GU con derivadores superficiales durante épocas de mucha y poca lluvia, Hernández *et al.*, (2021)

indicaron que, durante la temporada de lluvias, las corrientes predominantes siguen una trayectoria hacia el norte, influenciadas por los vientos del sur. En contraste, en la temporada seca, las corrientes se dirigen hacia el sur, influenciadas por los vientos del norte. Estas observaciones sugieren una fuerte relación entre los patrones de circulación y las condiciones meteorológicas locales. Además, la configuración geográfica, como la presencia de bahías, también afecta las trayectorias de los derivadores, modificando localmente los patrones de circulación esperados. Las conclusiones destacan la importancia de considerar tanto los factores climáticos como las características geomorfológicas para entender la dinámica de las corrientes costeras en esta región.

Un estudio similar realizado sobre el estuario tropical con régimen micro-mareal mixto de la Bahía de Cartagena para caracterizar su hidrodinámica, utiliza tanto mediciones *in situ* como modelaciones numéricas. Los resultados obtenidos indican que la dirección y velocidad del viento influyen significativamente en las corrientes superficiales y en la circulación residual de la bahía. Durante la temporada seca, predominan las corrientes hacia el sur, mientras que en las temporadas húmeda y de transición, se observa una inversión hacia el norte. Las simulaciones numéricas mostraron una alta correlación con los datos medidos, validando la eficacia del modelo utilizado. Estos hallazgos no solo aportan un entendimiento más profundo de los procesos hidrodinámicos en la Bahía de Cartagena, sino que también proporcionan una base sólida para la gestión y planificación de las actividades costeras en la región (Rueda Bayona *et al.*, 2013).

A pesar de los avances previos, persisten vacíos significativos en la comprensión de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá a diferentes profundidades y su modulación por los forzadores mencionados. La mayoría de los estudios realizados hasta ahora se han centrado principalmente en caracterizar la circulación superficial utilizando imágenes satelitales o mediciones *in situ*. Sin embargo, se conoce muy poco sobre la hidrodinámica en las capas media e inferior de la columna de agua y cómo esta es influenciada por la descarga de los ríos, los campos de viento y las mareas. Esta deficiencia en la información existente impide comprender de manera integral los patrones de circulación tridimensionales y sus implicaciones en los procesos biogeoquímicos y el transporte de sedimentos en el estuario. Por lo tanto, el presente estudio pretende abordar este vacío mediante el uso de un modelo numérico de alta resolución que permita analizar la circulación a diferentes profundidades y determinar la influencia relativa de los distintos forzadores en cada capa de la columna de agua a escalas anuales y estacionales.

Se plantea la hipótesis de que la descarga de los ríos Atrato y León es el principal forzador que modula la circulación hidrodinámica dentro del Golfo de Urabá durante todo el año, ejerciendo una influencia dominante en los patrones de corrientes superficiales, medias y profundas. Si bien los campos de viento tienen un efecto importante durante las épocas de los alisios del norte y sur, su influencia se limita principalmente a las capas superficiales de la columna de agua. Por otro lado, se espera que el forzamiento debido a la onda de marea micromareal tenga un impacto relativamente menor en comparación con los ríos y el viento.

Esta hipótesis se sustenta en los hallazgos previos que sugieren que la descarga del río Atrato, debido a sus altos caudales (que oscilan entre 4000 y 5000 m³/s), ejerce un control dominante en la hidrodinámica del estuario. Además, algunos estudios indican que la capa superficial depende en gran medida del flujo fluvial, mientras que las capas inferiores se ven influenciadas por las corrientes provenientes del mar Caribe (Lonin y Vásquez (2005)). En contraste, existen resultados que atribuyen un impacto limitado a la marea en los patrones de circulación (Escobar, 2011).

Al probar esta hipótesis mediante simulaciones numéricas de alta resolución, se busca cuantificar la importancia relativa de cada forzador y comprender mejor su papel en la modulación de la circulación tridimensional en el Golfo de Urabá.

El presente documento está estructurado de la siguiente manera: La sección 1 proporciona una descripción de los objetivos y de manera detallada se presenta la metodología empleada en esta investigación, que abarca aspectos como el área de estudio, las bases de datos utilizadas y otra información pertinente. En la sección 2, se presenta una descripción del modelo oceánico CROCO, incluida su configuración para el área de estudio y los conjuntos de datos incorporados. Posteriormente, en la sección 3, se muestra el proceso de validación con datos satelitales e *in situ*. En la sección 4 se analizan y discuten los patrones de circulación y transporte por capas de los resultados de la simulación de referencia. Por otro lado, en la sección 5 se realiza una comparación de escenarios con y sin forzadores, lo que permitió cuantificar su importancia relativa en la circulación al interior de golfo. Por último, en la unidad 6, se presentan de manera sucinta las principales conclusiones.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la influencia de la descarga hídrica de los ríos Atrato y León y los campos de viento en la circulación del Golfo de Urabá.

Objetivos específicos

1. Caracterizar los regímenes hídricos del río Atrato y los campos de viento al interior del GU utilizando información de diferentes bases de datos.
2. Implementar el modelo oceánico CROCO al interior del GU, utilizando información hídrica y climática en el periodo 2010-2018.
3. Analizar los patrones promedio de la circulación oceánica del GU en las dos épocas climáticas y en diferentes niveles.
4. Evaluar la modulación a la circulación del GU debido a la descarga de los ríos Atrato y León, el forzamiento del viento y la marea.

1. Metodología

Para valorar los efectos que tienen los diferentes forzadores en la hidrodinámica al interior del golfo, se llevaron a cabo simulaciones numéricas usando el modelo CROCO. Este modelo permite incorporar con suficiente detalle los procesos físicos de interés del estuario. Las etapas seguidas en la metodología de esta investigación fueron:

1. Mediciones de campo

- Se usaron mediciones de corrientes marinas en un transecto vertical realizadas por medio de un perfilador acústico de corriente Doppler (ADCP).

- Las mediciones se realizaron en un transecto a lo largo de la latitud 8.1°N del golfo con una longitud entre 8 a 10 km.

- El ADCP midió perfiles verticales instantáneos de velocidad y dirección de la corriente con resolución de 0.5 m vertical.

- También se realizaron mediciones de perfiles termohalinos (temperatura y salinidad) con un CTD a lo largo del recorrido.

- De manera simultánea, se realizaron mediciones del nivel del mar con 4 sensores fijos durante 3 meses empezando una semana antes de las mediciones con el ADCP.

2. Modelación numérica

- Se implementó el modelo hidrodinámico CROCO al interior del golfo con dos mallas anidadas. Una malla llamada “padre” para el exterior del GU y una malla “hija” para el interior del GU.

- Se incluyeron niveles de marea, campo de viento, descargas de ríos (Atrato y León), flujos de radiación, precipitación y evaporación.

- Se evaluaron estadísticamente los resultados con parámetros como error cuadrático medio, error medio absoluto relativo, coeficiente de correlación y coeficiente de determinación.

3. Patrones de circulación

- Luego de validar el modelo con datos medidos, se modelaron escenarios en donde se retiró un forzador a la vez: el flujo del río, los campos de viento y la marea.

- Con esta información se analizaron los patrones de circulación superficiales y de fondo.

La metodología propuesta va encaminada a dar respuesta a cada uno de los objetivos propuestos. La etapa 1 de mediciones de campo provee datos observacionales necesarios para caracterizar los patrones termohalinos y validar posteriormente el modelo numérico. La etapa 2 de modelación numérica aborda directamente el Objetivo 2 de implementar el modelo CROCO. Finalmente, la etapa 3 de análisis de patrones de circulación permite evaluar la modulación de los diferentes forzadores (Objetivo 4 y objetivo general).

A continuación, se detallan cada uno de los puntos de la ruta metodológica.

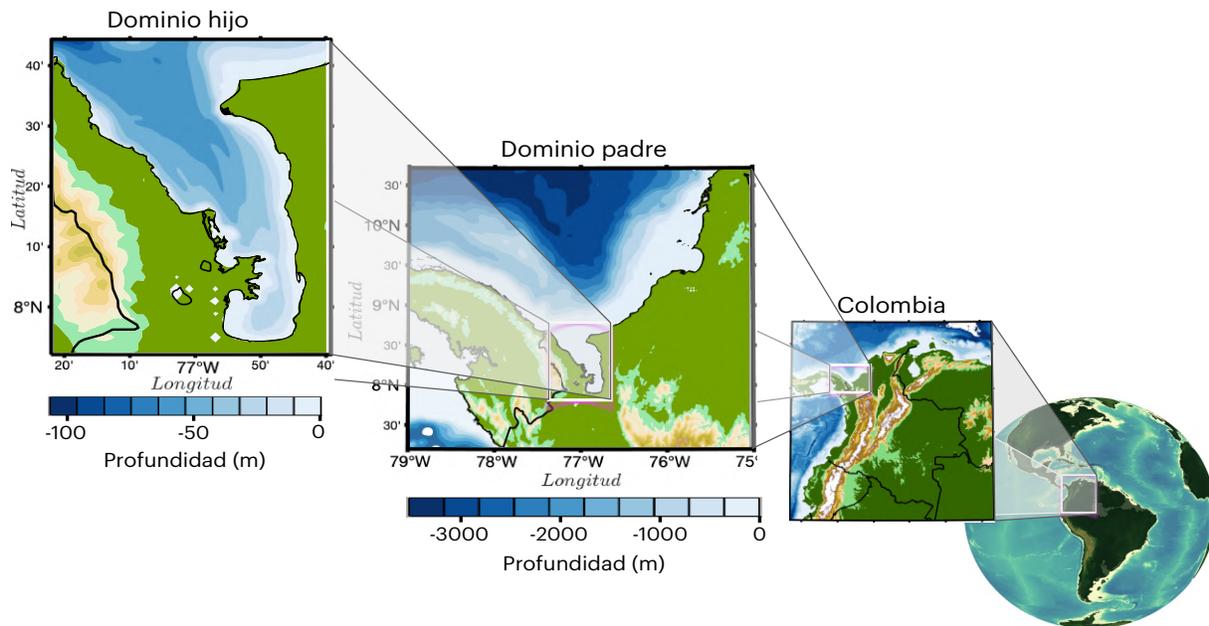
1.1 Información de la zona de la estudio y mediciones de campo

1.1.1 Información de la zona de estudio

El Golfo de Urabá, situado a lo largo de la costa caribeña de Colombia, pertenece a los departamentos de Chocó en el oeste y el departamento de Antioquia en el este, con una línea de costa del lado antioqueño de aproximadamente 512 km. Tiene una superficie aproximada de 1800 km², un ancho medio (este-oeste) de 15 km en la región central y una longitud de 80 km de norte a sur (Corpourabá, 2014). La Figura 1 ilustra la batimetría de la región del Caribe, con profundidades que oscilan entre 80 y 4000 m al norte del dominio de la región, e incluye el GU. La batimetría del GU se caracteriza por una profundidad promedio de 40 m, con profundidades poco profundas (<20 m) en la zona sur y mayores profundidades en su borde abierto (hasta 80 m), con fondos fangosos y sedimentarios como resultado de la fuerte carga de sedimentos que transportan los ríos Atrato, León, Turbo y Caimán, entre otros (Chevillot *et al.*, 1993).

El GU es un estuario con altas descargas de agua dulce y teniendo en cuenta que es semicerrado al norte. Su descarga fluvial se produce principalmente en la región central (Figura 2) y crea un estuario estratificado con baja salinidad superficial (10 g/kg) y aguas más saladas (35-36 g/kg) en las zonas más profundas (Toro *et al.*, 2019).

Otra característica importante del GU son sus condiciones atmosféricas, específicamente su régimen de vientos. Según INVEMAR (2001), los vientos alisios soplan en dirección suroeste con intensidades promedio de 6 m/s entre enero y marzo, mientras que la estación de lluvias, de mayo a noviembre, trae vientos predominantes del sur con intensidades inferiores a 2 m/s.

Figura 1. Batimetría y ubicación del dominio padre y dominio hijo (Golfo de Urabá)

1.1.2 Batimetría de la zona de estudio

Se utilizaron dos fuentes de información batimétrica. Para el dominio padre (Figura 1), se empleó el conjunto de datos Etopo2 (<https://bit.ly/3NVxgGx>), con una resolución de 2 minutos de arco (aproximadamente 3.7 km). En cuanto al dominio hijo, se utilizó la información de la carta náutica 412 (<https://bit.ly/3K0ildj>), con una resolución promedio de 0.06 minutos de arco (0.1 km) (Barrientos, Mosquera, 2019).

Para integrar ambos dominios con resoluciones diferentes y evitar gradientes pronunciados en la batimetría, que podrían causar divergencias en la simulación del modelo, se utilizó la opción "*new child topo*" de la herramienta *Matlab Nesting GUI*, incluida en *CROCO_TOOLS* (<https://bit.ly/43nDEMt>). Esta opción permite modificar el archivo de topografía de entrada para el dominio hijo. Luego, se seleccionó la opción "*match volume*" para hacer coincidir el volumen de la cuadrícula hija con el del padre cerca de los límites de acoplamiento. También fue necesario definir el factor r para el suavizado de la topografía adyacente, propuesto por Beckmann y Haidvogel (1993). Finalmente, se eligió el número de puntos de cuadrícula en los que coincidieron las dos mallas y así conectarlos e interpolar la batimetría adecuadamente.

1.1.3 Caudal de los ríos Atrato y León

En el GU desembocan numerosos ríos de importancia, entre ellos el Atrato, León, Turbo, Caimán Viejo, Caimán Nuevo y Currulao. El río Atrato, en particular, es el que mayor aporte de caudal realiza, siendo aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la suma de los demás (Montoya, 2016). Su caudal se divide en siete brazos principales, el Roto, Tarena, Pavas, Matuntugo, Coco Grande, Urabá y Leoncito, siendo el Roto el principal, ya que aporta cerca del 66% del agua al GU (Escobar, 2015) (Figura 2).

Los datos de caudal del río Atrato se usaron de la estación Bellavista del IDEAM (código 11077010), la cual se encuentra a más de 100 km de la desembocadura. Sin embargo, esta medición no tiene en cuenta el aporte de la cuenca entre la estación y la desembocadura. En ese sentido Vélez *et al.* (2000), usaron técnicas de balances hídricos con el software HidroSIG Java para realizar estimaciones climatológicas del caudal total en la desembocadura como se observa en la Figura 3a. (barras azules). También se puede notar en la misma figura que el caudal dado por la estación Bellavista (barras rojas) es considerablemente menor en algunos meses al caudal promedio en la desembocadura.

Figura 2. Bocas del río Atrato y río León con los porcentajes de descarga solo del caudal del río Atrato

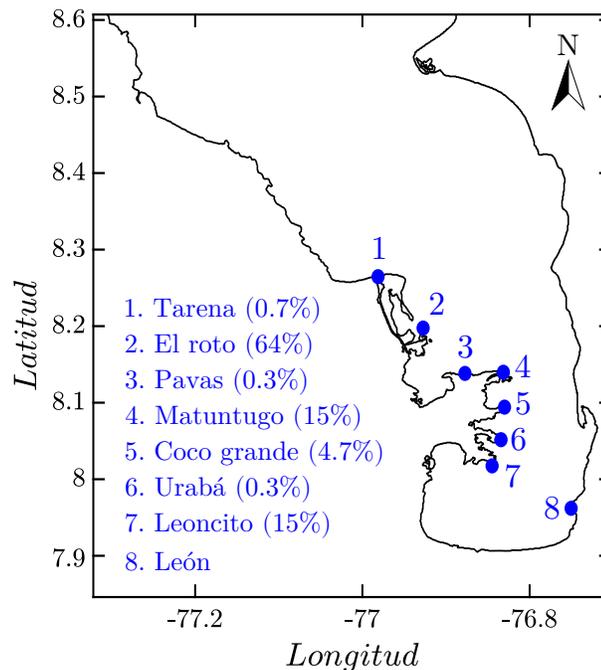
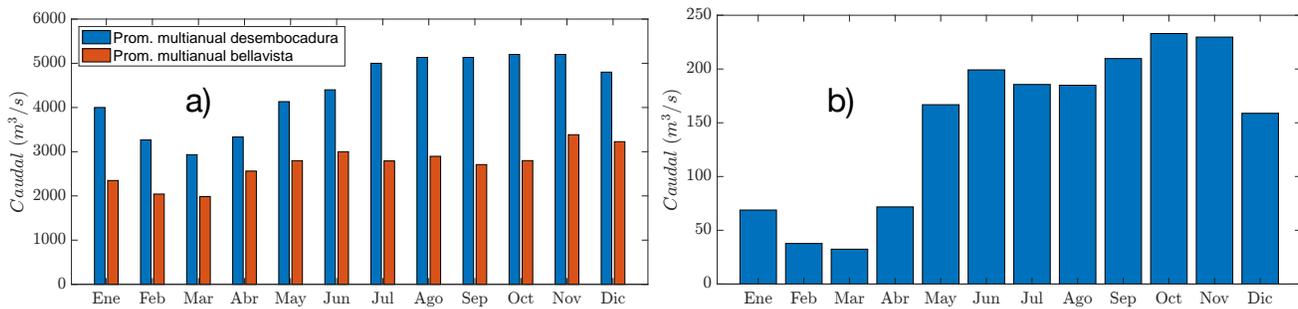


Figura 3. a) Ciclo multianual del caudal en la desembocadura del río Atrato (Vélez et al.,2000))(barras azules) y ciclo multianual estación Bellavista (barras rojas). b) Ciclo multianual en la desembocadura del río León



Con el fin de obtener valores diarios adecuados del caudal del río Atrato para una simulación en tiempo variable, se combinó el caudal climatológico y el caudal mensual de la estación Bellavista siguiendo la metodología utilizada por Caicedo-Herrera (2012). Con este fin se siguieron los siguientes pasos:

1. Se calculó el promedio multianual del caudal en la estación Bellavista. Se obtuvo un factor de ajuste para cada uno de los meses del año de la siguiente manera (ecuación 1):

$$factor = \frac{\text{Valor del caudal multianual en la desembocadura}}{\text{Valor del caudal multianual en la estación bellavista}} \quad (\text{ecuación 1})$$

Al calcular este factor se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1
Factor de ajuste a los caudales de la estación Bellavista

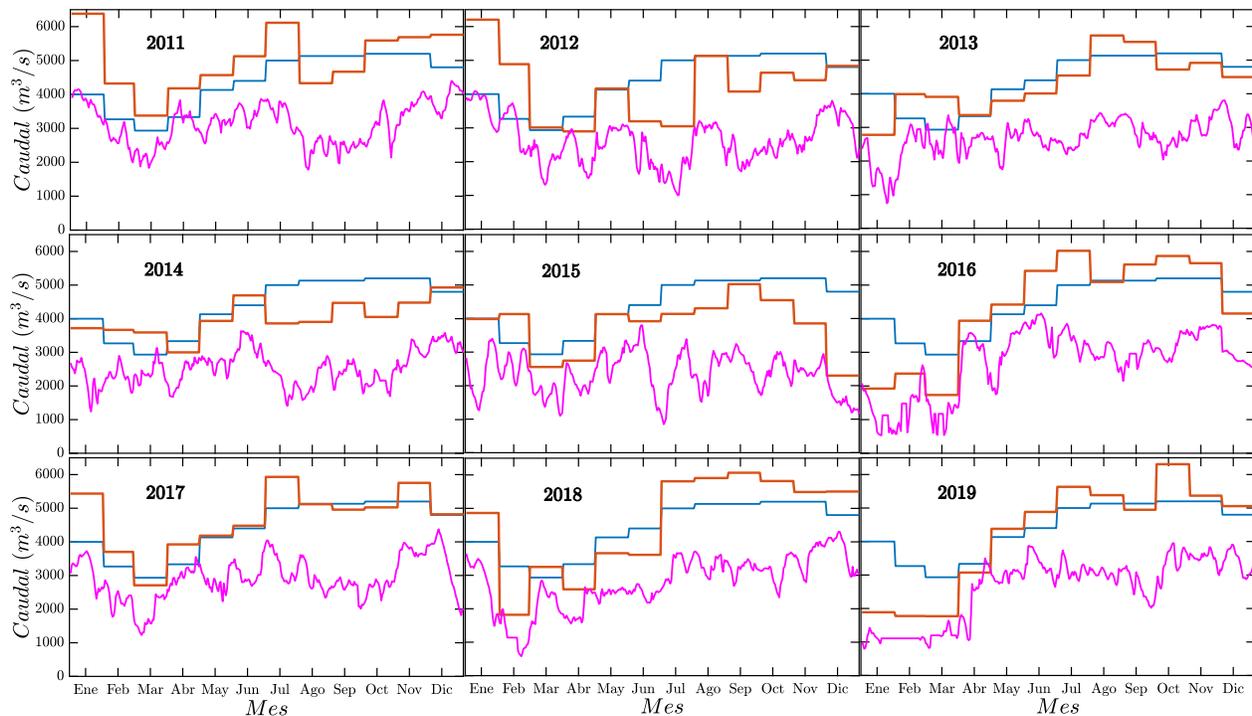
Mes:	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Factor	1.70	1.60	1.48	1.30	1.48	1.47	1.79	1.77	1.89	1.86	1.54	1.49

2. Posteriormente, se obtuvieron los caudales mensuales en Bellavista. Los factores obtenidos se multiplicaron con los caudales mensuales entre los años 2011 y 2019 de la estación Bellavista (Figura 4, línea color café). Los valores de estos caudales fueron repartidos de acuerdo a los porcentajes de las diferentes bocas del Atrato (Figura 2) con el fin de ser utilizados en la simulación en tiempo variable.

Para el río León utilizamos los valores multianual de la estación Barranquillita (Figura 3b), el cual se usó durante toda la simulación repitiéndolo año a año. Roldán (2008) estimó un caudal multianual promedio de $87.1 \text{ m}^3/\text{s}$ para la misma estación, y Montoya (2010). un caudal medio de $75.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en la desembocadura del río León.

Otros tributarios menores que desembocan en el golfo de Urabá no se tuvieron en cuenta por sus bajos caudales. Aunque es de aclarar que en el análisis de procesos a escalas cada vez más finas, será necesario incluirlos. Algunos de ellos y su media multianual son: río Zungo ($2.4 \text{ m}^3/\text{s}$), Carepa ($6.7 \text{ m}^3/\text{s}$), Apartadó ($5.7 \text{ m}^3/\text{s}$), Chigorodó ($14.9 \text{ m}^3/\text{s}$), Turbo ($3.7 \text{ m}^3/\text{s}$), Guadualito ($2.6 \text{ m}^3/\text{s}$), Currulao ($8.7 \text{ m}^3/\text{s}$), Mulatos ($4.5 \text{ m}^3/\text{s}$) (Montoya, 2010).

Figura 4. Años 2011 a 2019. (Magenta) caudal diario del río Atrato en la estación Bellavista del IDEAM. (Azúl) ciclo anual estimado de los caudales del río Atrato en la desembocadura (Vélez et al, 2000). (Marrón) valores mensuales en la desembocadura de acuerdo al ajuste a los datos de la estación Bellavista.



1.1.4 Marea

El GU tiene un régimen micro-mareal, con amplitudes que no superan los 40 cm y semi-diurno, lo que significa que hay dos mareas altas y dos mareas bajas cada día (Restrepo y Correa, 2002; Restrepo y López, 2008). Los principales componentes de las mareas son dos

armónicos semi-diurnos (M2 y N2) y dos armónicos diurnos (K1 y O1) (Barranco *et al.*, 2021). Este patrón es similar al de otras áreas del Caribe colombiano, que tienen una marea mixta diurna y es una característica esencial del sistema hidrodinámico del GU (Barranco *et al.*, 2022).

CROCO cuenta con rutinas de Matlab para incorporar información de la onda de marea. Los datos de la marea proceden de los modelos globales de mareas oceánicas TPXO6 y TPXO7 de la Universidad Estatal de Oregón (<https://bit.ly/454GwiT>).

Figura 5. Localización de los sensores de presión al interior del Golfo de Urabá

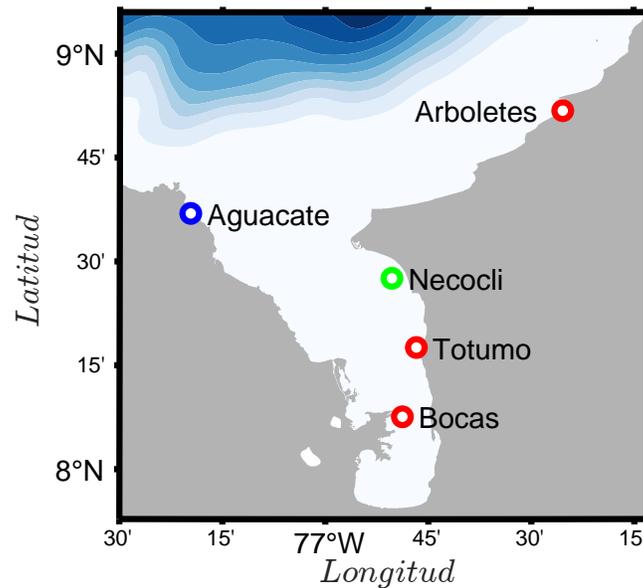


Tabla 2. Lugar, fecha y equipos utilizados en las campañas de medición

Nro	Equipo	Lugar	Ubicación		Fecha	
			Latitud	Longitud	Inicio	Fin
1	Sensor de presión	Arboletes	8°51'47.20"	76°25'21.60"	14/06/2022	25/08/2022
2		Totumo	8°17'36.00"	76°46'44.20"	16/06/2022	06/09/2022
3		Bocas	8°07'51.80"	76°48'46.40"	15/06/2022	09/09/2022
4	AquaDopp	Aguacate	8°36'56.70"	77°19'39.00"	17/06/2022	07/09/2022
5	AquaPro	Necoclí	8°27'35.68"	76°50'17.95"	14/06/2022	08/08/2022

Con el fin de verificar los datos de los modelos globales se analizaron datos de sensores de presión del nivel del mar (Figura 5). En la Tabla 2 se muestran las posiciones, así como las fechas de instalación y recuperación de los equipos.

1.1.5 Forzadores atmosféricos

ERA5 es un conjunto de datos de reanálisis global producido por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S) del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF). Proporciona estimaciones horarias de un gran número de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren todo el globo con un tamaño de malla de 28 km (20 km aprox. en el Ecuador) y proporcionan información de la atmósfera de hasta 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km (<https://bit.ly/46TXYYP>).

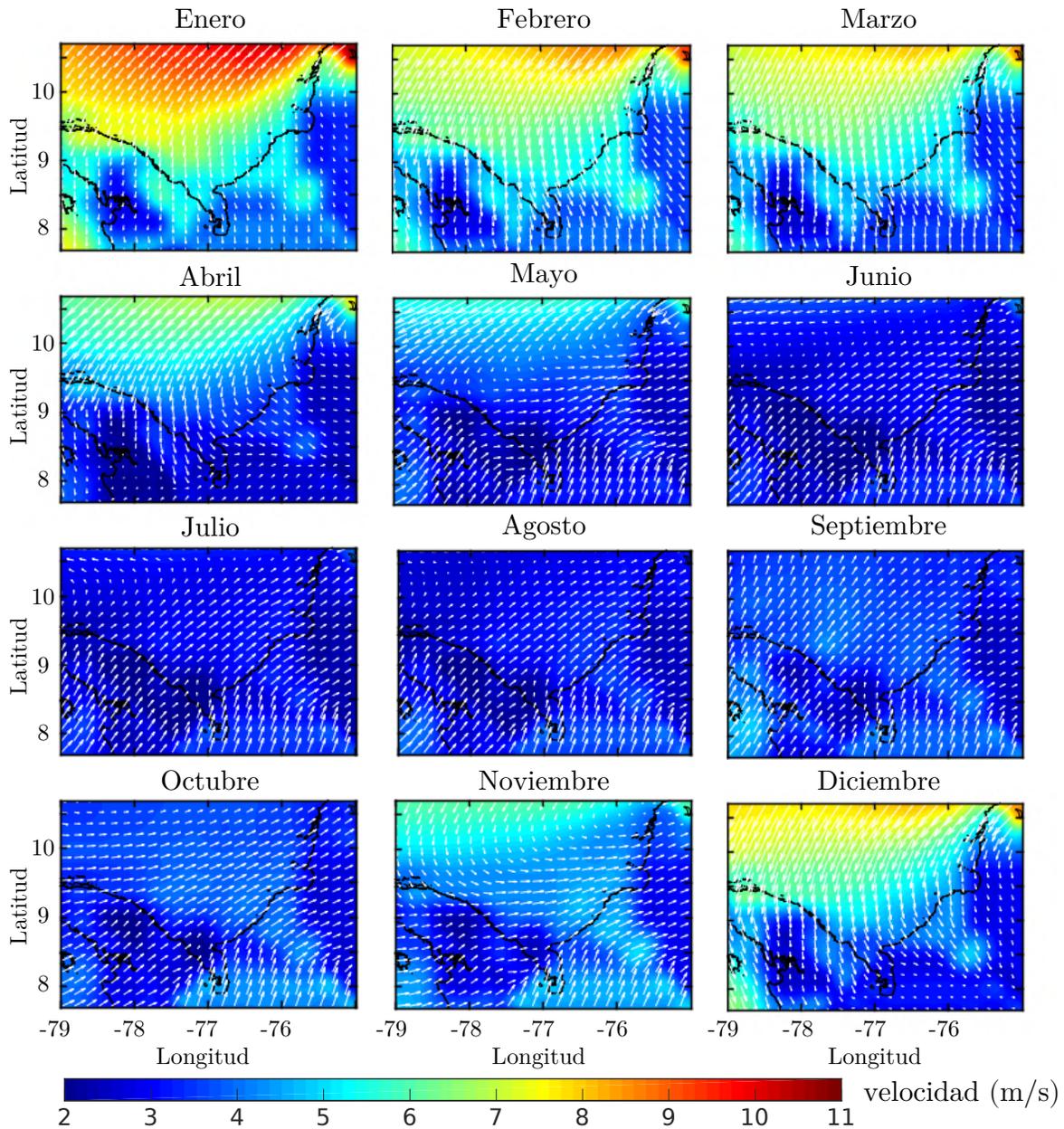
De aquí se tomó la información atmosférica que sirvió como forzador al modelo CROCO debido a su alta resolución temporal y espacial, así como a su amplia cobertura de variables climáticas y utilización por la comunidad científica para el estudio de la variabilidad climática y la modelación. Además, Barrientos y Mosquera (2019), mostraron su validez al comparar los vientos con otras bases de datos de reanálisis (CCMP V2 y ERA-Interim) para el periodo 2010-2015. Las variables atmosféricas usadas para forzar el modelo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Información de las variables atmosféricas utilizadas para forzar el modelo.

Base de datos	VARIABLES	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
ERA5	<ul style="list-style-type: none"> • Radiación de onda corta • Radiación de onda larga • Flujos de calor latente y sensible • Evaporación • Precipitación • Temperatura del aire a 2 m • Humedad • Velocidad del viento y componentes zonal y meridional 	1/4°(Aprox. 28 km)	1 hora	2009/01/01 - 2019/12/31

La Figura 6 muestra el ciclo anual de los vientos para un periodo de 10 años (2010-2019). Se observa como en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se caracterizan por tener magnitudes de la velocidad del viento mayores (8-11 m/s) a los demás meses en la parte norte del dominio y están dirigidos hacia el sur y suroeste. En los demás meses predominan vientos más débiles en casi todo el dominio de estudio (entre 2 y 5 m/s) y dirigidos hacia el norte y noreste.

Figura 6. *Ciclo multianual en la magnitud y dirección del viento de la base de datos ERA5.*



1.1.6 Condiciones iniciales y de frontera

Para forzar el dominio padre en las fronteras abiertas al norte y oeste se usaron condiciones iniciales y de frontera de variables como temperatura, salinidad, altura de superficial del mar y velocidades en la columna de agua, de la base de datos MERCATOR Glorys2 V1. Esta base de datos se escogió por su buena resolución espacial y temporal para una zona como el GU (Tabla 4).

Tabla 4. Información de la base de datos utilizadas para forzar el modelo

Base de datos	Variables	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
GLORYS2 V1	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Salinidad • Componentes zonal y meridional de las corrientes • Altura superficial del mar 	1/12 (Aprox. 9 km)	1 día	1993/01/01 - 2019/12/31

1.1.7 Campañas de medición

Para evaluar los resultados obtenidos con el modelo, se utilizaron datos medidos de corrientes y variables termohalinas durante dos campañas realizadas en el GU (Tabla 5). Los trayectos se llevaron, en direcciones norte-sur y dirección este-oeste a diferentes latitudes (Figura 7).

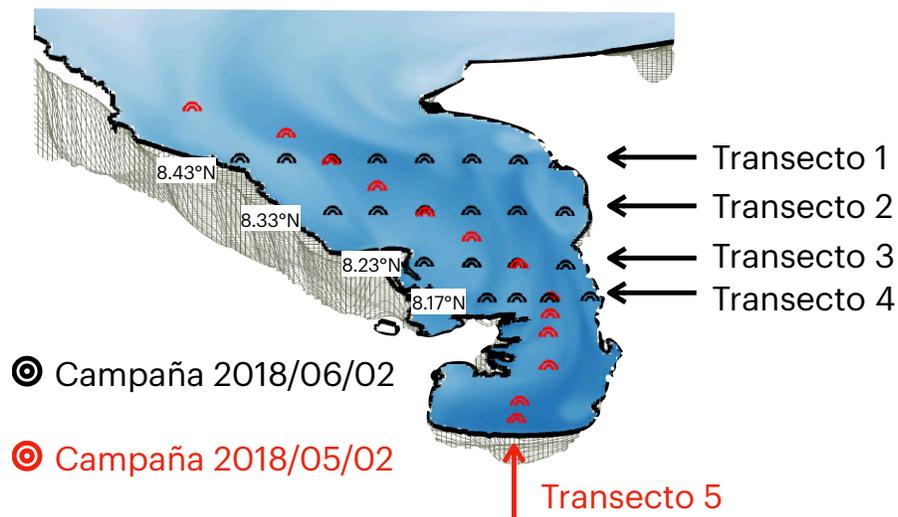
La primera campaña se llevó a cabo el día 02 de Mayo de 2018 en un recorrido sur-norte (Figura 7, puntos rojos). Se realizaron 13 lances CTD con una separación aproximada de 5 km entre cada punto.

En los transectos este-oeste (Figura 7, puntos negros), correspondiente a la segunda campaña el día 02 de junio de 2018, los puntos de muestreo de temperatura y conductividad nuevamente estuvieron separados aproximadamente 5 km.

Tabla 5. Equipos y variables medidas

Equipo	Variables
CTD (Conductividad, Temperatura y Profundidad)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura en toda la columna agua • Conductividad en toda la columna agua • Profundidad
ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler)	<ul style="list-style-type: none"> • Componente zonal (u) de la corriente en toda la columna de agua • Componente meridional (v) de la corriente en toda la columna de agua
SALINOMETRO	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura superficial del mar • Salinidad superficial del mar

Figura 7. Puntos de medición con CTD en dos campañas del año 2018



2. Modelación numérica

Para evaluar la influencia relativa de los diferentes forzadores (descarga de ríos, campos de viento y marea) sobre la hidrodinámica del Golfo de Urabá, se requiere de un modelo numérico robusto que permita representar adecuadamente los procesos físicos involucrados en este estuario. En este sentido, se seleccionó el modelo oceánico regional CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model) por varias razones:

- CROCO es ampliamente utilizado en la comunidad científica para estudios de dinámica costera y estuarina, con numerosas aplicaciones y validaciones previas en diversas regiones.
- Posee capacidades para simular con alto grado de detalle y resolución los principales forzadores de interés: descarga de ríos, campos de viento de alta resolución, ondas de marea y forzamiento atmosférico.
- Permite configurar mallas anidadas de alta resolución, lo cual es esencial para representar adecuadamente las características batimétricas y geométricas complejas del Golfo de Urabá.
- Cuenta con un sólido soporte técnico, documentación detallada y un conjunto de herramientas (CROCO_TOOLS) que facilitan la implementación, configuración y análisis de las simulaciones.

Por lo tanto, CROCO reúne las características idóneas para abordar el objetivo principal de cuantificar la modulación de los diferentes forzadores sobre la circulación en el Golfo de Urabá con el rigor científico requerido.

El modelo CROCO es una herramienta computacional que se ha utilizado en numerosos estudios de investigación para simular la dinámica oceánica en regiones marino-costeras de todo el mundo. Este modelo ha sido diseñado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones, lo que permite la simulación de fenómenos como los movimientos de las corrientes, el transporte de sedimentos, las alteraciones de la temperatura y la salinidad del agua y el forzamiento del viento y las mareas (<https://www.croco-ocean.org/>).

CROCO usa métodos numéricos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, incluido el método de diferencias finitas. Este método divide el dominio en una malla de puntos discretos y resuelve las ecuaciones en cada punto. Sin embargo, estos métodos usan parametrizaciones que

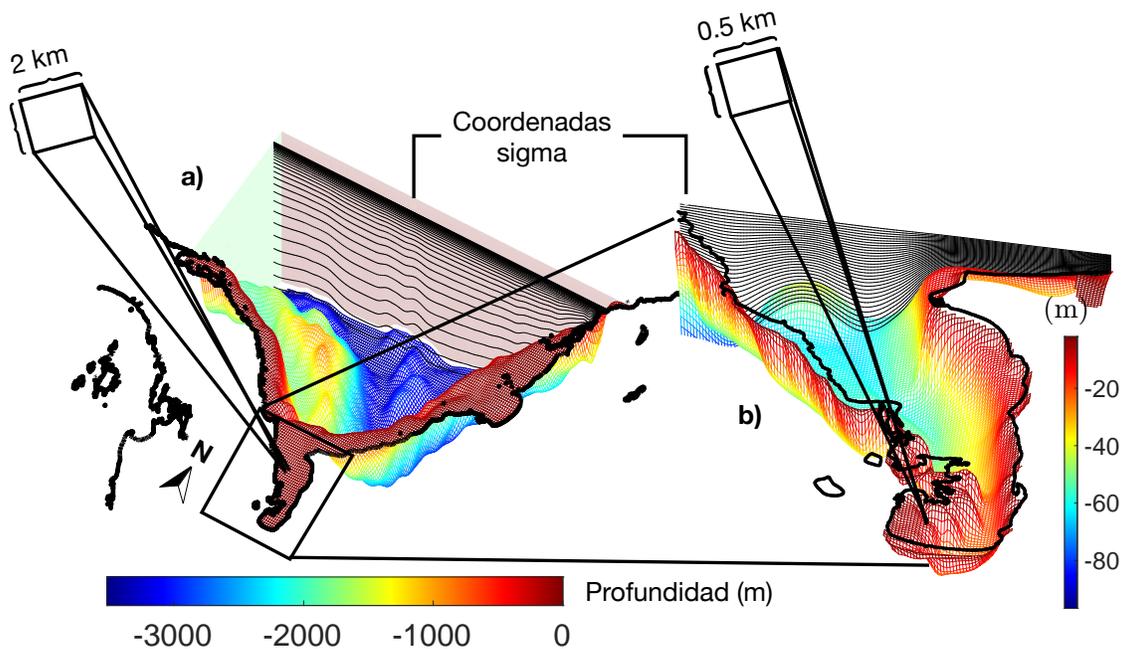
pueden afectar la precisión de la solución obtenida. Por lo tanto, es esencial verificar los resultados producidos por el modelo con las mediciones *in situ*.

2.1 Discretización de la zona de estudio

Para representar correctamente la geometría del GU se seleccionaron un dominio principal (padre) y un dominio anidado (hijo) para realizar cálculos detallados. El dominio principal tiene una resolución de 2 km y abarca el golfo de Urabá y el Caribe sur-occidental, extendiéndose hacia el norte hasta la latitud 10.7°N , hacia el este hasta Cartagena y hacia el oeste hasta el golfo de Guna Yala en Panamá, con fronteras abiertas al norte y al oeste. El dominio anidado tiene una resolución de aproximadamente 500 m y se extiende hacia el este hasta el Corregimiento Belén en Antioquia y hacia el oeste hasta La Miel en Panamá, con una frontera abierta al norte (Figura 8).

La elección de estos dominios se basó en la necesidad de capturar la variabilidad del Caribe sur-occidental y su posible relación con el GU y en el litoral antioqueño. Además, se seleccionó una resolución de 500 m para el dominio anidado, ya que permite obtener una solución estable y precisa para representar la circulación en la zona de estudio.

Figura 8. Resolución de las malla de calculo. (a) malla padre con resolución horizontal de 2 km aprox. (b) malla hija con resolución horizontal de 0.5 km aprox. y 32 niveles verticales



La resolución vertical se estableció mediante el uso de niveles sigma, que siguen la forma del terreno (https://croco-ocean.gitlabpages.inria.fr/croco_doc/model/model.grid.html). En cada dominio de cálculo se seleccionaron 32 niveles, con una mayor resolución en la superficie (**Tabla 6**). Con esta discretización vertical los primeros 10 m en la zona sur del golfo tuvieron 16 niveles en las partes más profundas y al norte los primeros 7 niveles en superficie mostraron 10 m de profundidad.

Tabla 6. *Parámetros de la configuración de las coordenadas sigma*

Parámetro	θ_s	θ_b	$h_{min}(m)$	N
Valor	7	2	2	32

2.2 Esquemas de parametrización

El archivo *cppdef.h* contiene una serie de opciones de configuración y esquemas de parametrización que se utilizan para ajustar el modelo y adaptarlo a las necesidades específicas de la región de interés. Estas opciones y esquemas de parametrización permiten al usuario controlar diversos aspectos del modelo, como la resolución de la malla, las condiciones de borde, la advección de la cantidad de movimiento y los trazadores, la mezcla vertical, la simulación de la salinidad y la densidad del agua, entre otros. En el Anexo 1 se muestra una descripción de las principales opciones utilizadas en la simulación de la zona de estudio.

2.3 Integración del modelo

El archivo de configuración, *croco_inter.in*, contiene opciones de integración del modelo que incluyen el paso temporal de la malla padre y la malla hija, la frecuencia con la que se guardan las variables, el número de desembocaduras de los ríos (8 salidas para la descarga de los ríos Atrato y 1 para el León con caudales variables), la inclusión de trazadores y constantes que parametrizan ciertos procesos físicos. El paso del tiempo seleccionado fue de 400 segundos para la malla padre y 100 segundos para la malla hija. Las variables se guardaron como promedios diarios y horarios, así como valores instantáneos.

Por otro lado, se configuró la marea mediante los siguientes 10 armónicos : M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm. Estos fueron calculados por Barranco *et al.*, (2022) al analizar una serie de marea de más de un año, ubicada en la estación guardacostas de Turbo (Anexo 2).

Se realizó una simulación por un período de 9 años (2010 a 2018), que abarca procesos con ocurrencia interanual como los eventos de Niña y Niño (Tabla 7), así como los períodos de neutralidad.

Tabla 7. *Períodos cálidos (rojo) y fríos (azul) asociados al evento Niño y Niña basados en un umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para el Índice del Niño Oceánico (ONI)*

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.2									

Fuente. (<https://bit.ly/43qgIMB>).

3. Análisis preliminares de las salidas del modelo

En un proceso de análisis de datos obtenidos con modelos numéricos, se realizan actividades de calibración y validación del modelo respecto a datos medidos. En la calibración, al comparar datos medidos y modelados se realiza el ajuste de parámetros físicos y geométricos con el fin de minimizar las diferencias entre los datos (Trucano *et al.*, 2006). En nuestro caso, la etapa de calibración no se hizo debido a que investigadores, como Solano (2020), usando ROMS (modelo del que deriva CROCO) en el mar Caribe, con diferentes resolución horizontal (3,6 km, 1,2 km y 740 m) concluyó el aumento en la resolución horizontal no siempre produce una mejora adicional en la precisión. Además, que una resolución de 1,2 km ofrece una representación aceptable de la batimetría y un equilibrio óptimo entre la precisión y el costo computacional.

Guerrero (2016) también realizó algunos análisis de sensibilidad con el modelo ROMS en el Caribe Colombiano con esquemas similares a los de Trucano *et al.* (2006), y obtuvo resultados adecuados tanto en superficie como en profundidad. Sin embargo, sugiere revisar las parametrizaciones de la mezcla vertical o lateral, lo cual podría mejorar significativamente los resultados de las condiciones de la circulación oceánica en el Mar Caribe. En este trabajo se usaron las parametrizaciones propuestas por Guerrero (2016).

La validación es un proceso fundamental en el que se comparan los resultados del modelo numérico con datos observacionales medidos en campo, con el fin de evaluar rigurosamente la precisión y capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad (Montoya, 2010). Si bien en este estudio no se realizó una validación estricta en el sentido de que la ventana temporal de los datos simulados por CROCO y los datos medidos en las campañas de campo no coinciden exactamente, sí se llevó a cabo una comparación cualitativa de los patrones de circulación modelados con las observaciones disponibles. Esta comparación es válida debido a que la hidrodinámica del Golfo de Urabá está fuertemente modulada por los regímenes climáticos estacionales de vientos y descarga de ríos. Por lo tanto, se seleccionó un período simulado por el modelo que representa condiciones similares a la época en la que se realizaron las mediciones de campo, permitiendo así una evaluación coherente de los patrones de circulación predominantes en el estuario.

Para este fin, se utilizaron los datos medidos en las dos campañas y se compararon variables como, perfiles de salinidad y temperatura, la magnitud y dirección de la corriente en el trayecto este-oeste medidos y niveles del mar en puntos específicos. Teniendo en cuenta que no coinciden temporalmente las salidas de campo (junio y septiembre de 2022) y las simulaciones del modelo (2010 al 2018), se buscó un año simulado con condiciones similares de ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) al periodo correspondiente a la salida de campo. El criterio para elegir el año similar se basó en índice ONI (Índice Oceánico de El Niño), el cual permite monitorear el ENSO. En la tabla 7 se observa que el año simulado con mayor similaridad al periodo de las mediciones es el año 2011, correspondientes a un año Niña (la anomalía de la temperatura superficial del mar por trimestre está por debajo de -0.5).

La comparación incluyó análisis cualitativos como cuantitativos, con el fin de establecer si el modelo tiene un comportamiento similar a los datos medidos y por lo tanto un desempeño adecuado para reproducir los procesos dinámicos al interior del GU. Para la comparación cuantitativa se usaron métricas que califican los resultados del modelo respecto a información medida *in situ* y datos provenientes de reanálisis global y sensores remotos.

1. **Métricas globales:** Siguiendo los trabajos de Willmott y Matsuura (2005), se emplearon las siguientes métricas: error medio cuadrático (Root mean square error, RMSE), error medio absoluto (Mean Absolute Error, MAE), habilidad (Skill, S) y la bondad del ajuste (Goodness of Fit, GF):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(P - O)^2}{N}}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |P - O|$$

$$S = 1 - \frac{\sum(P - O)^2}{\sum(|P - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2}$$

$$GF = \frac{\sum(\bar{O} - P)^2}{\sum(\bar{O} - O)^2}$$

donde P corresponde a los resultados modelados, O a los datos medidos u observados, N el número total de datos medidos, y \bar{O} es el promedio de las observaciones.

El RMSE y MAE son medidas de la diferencia entre los valores observados y modelados. El RMSE es una medida de la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado, mientras que el MAE es una medida de la media de los errores absolutos. Ambas métricas proporcionan una medida de la precisión del modelo respecto a las mediciones en términos de la magnitud de los errores.

Tanto S como GF son medidas de la capacidad del modelo para reproducir las características importantes de los datos observados. El S es una medida de la fracción de la varianza de los datos observados que es explicada por el modelo, mientras que GF es una medida de la proporción de la varianza de los datos observados que es explicada por el modelo en relación con la varianza total de los datos.

2. **Métricas locales:** En este caso se hacen comparaciones “punto a punto” entre los datos modelados e *in situ*. Como, por ejemplo: diferencias absolutas, diferencias relativas y el coeficiente de variación local (CVL) (Escobar, 2011):

$$CVL = \frac{O - P}{O}$$

3.1 Comparación de campos de temperatura y la salinidad superficial en el dominio padre

Se examinaron los promedios trimestrales de enero-febrero-marzo (EFM) y julio-agosto-septiembre (JAS) de los campos de salinidad y temperatura durante tres años relacionados con el ENSO: año Niña (2011); año neutro (2013); año Niño (2015). Para esta comparación se analizaron las bases de datos SODA y GLORYS, cuyas principales características se describen en la tabla 8.

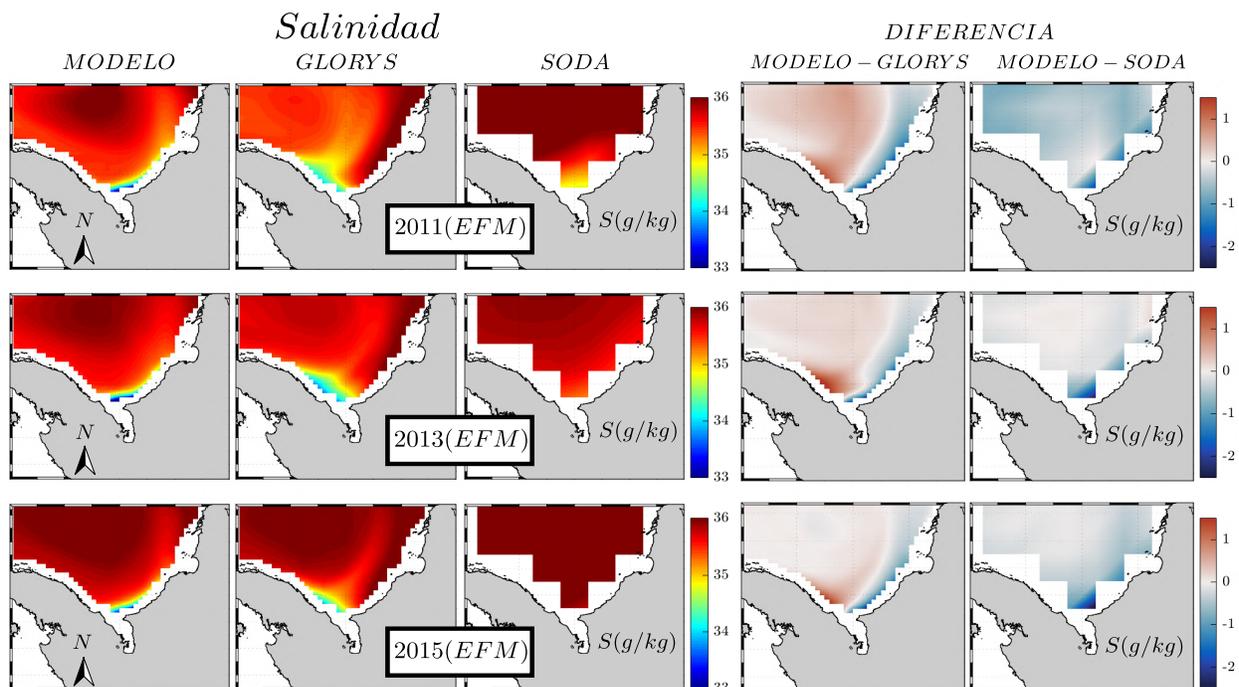
Tabla 8. Características de las bases de datos usadas para la comparación de variables espaciales

Bases de datos	Tiempo de registro	Resolución espacial	Resolución temporal	VARIABLES extraídas
SODA	1970 - al presente	0.5°	5 días	Salinidad, temperatura
MERCATOR GLORYS 2v1	1992-2019	0.25°	diaria	Salinidad, temperatura

Es de notar que debido a la diferencia en la resolución entre las bases de datos y los resultados modelados, se realizó una interpolación sobre la malla modelada para igualar la resolución de las bases de datos. A continuación, se presentan los valores espaciales y superficiales de salinidad y temperatura del modelo, de GLORYS y SODA y las diferencias entre los campos modelados y las bases de datos sobre la malla padre.

La Figura 9 muestra los campos modelados de salinidad superficial (izquierda), las bases de datos SODA y GLORYS (centro) y las diferencias entre el modelos y las bases de datos (MODELO - SODA y MODELO - GLORYS) (derecha) del primer trimestre (Enero, Febrero y Marzo, EFM) de los años 2011-2013-2015. El primer trimestre del año corresponde a la estación seca, que va de diciembre a abril, donde las precipitaciones son menos frecuentes, lo que resulta en salinidades comparativamente más altas que durante la estación húmeda.

Figura 9. Comparación de la salinidad superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Primer trimestre de los años 2011-2013-2015

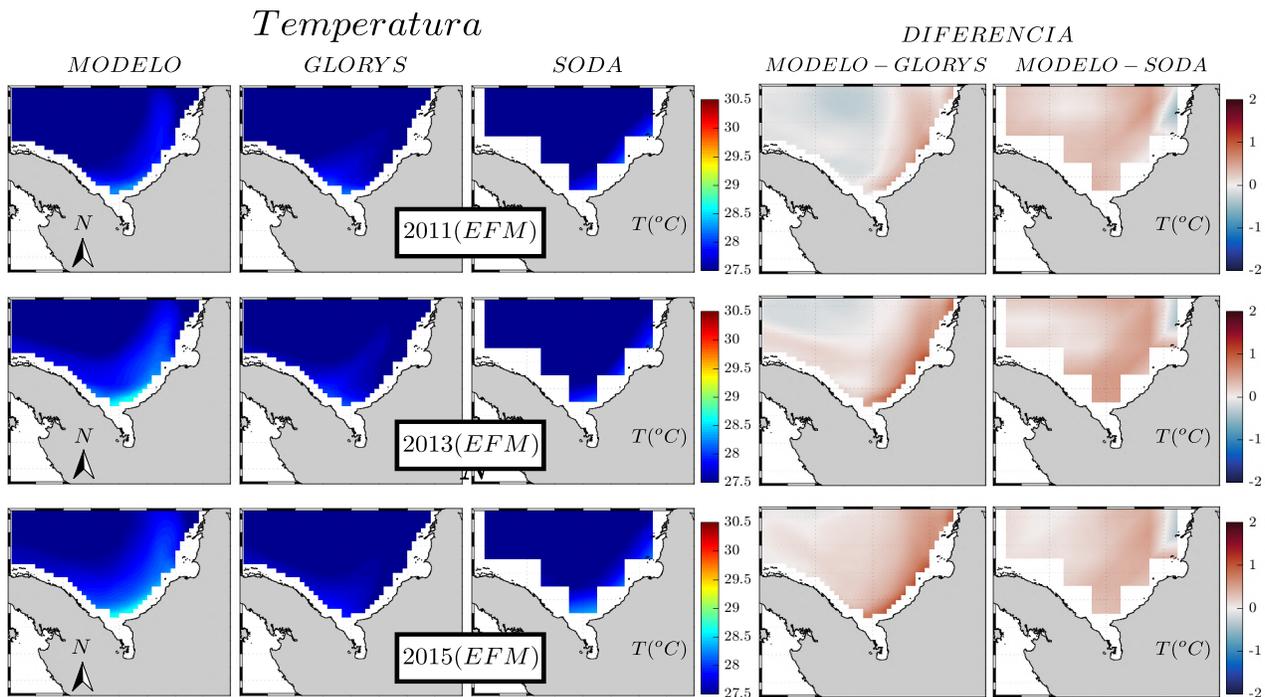


El modelo muestra valores similares en los campos modelados y de las bases de datos para estos tres años. Sin embargo, en 2011 y 2013, el modelo sobreestimó la base de datos GLORYS en la región centro-norte y la subestimó en el lado este, con un error relativo de menos del 4% en

la mayor parte del dominio. Por otro lado, el producto SODA presenta salinidades superiores a los 35,5 g/kg en la mayor parte de su superficie y, si bien los valores son superiores a los del modelo, los errores relativos espaciales no superan el 5%. Como era de esperar, durante el año del Niño de 2015, hubo un ligero aumento de la salinidad en los tres casos debido al incremento de la temperatura y la evaporación en la superficie del mar.

La Figura 10 muestra valores de temperatura media superficial correspondientes al modelo y las bases de datos GLORYS y SODA. Se observa como la temperatura oscila entre 27,5 °C y 28,5 °C, relativamente baja en comparación con la estación húmeda (Figura 12). Esto se debe en parte, a los vientos más intensos que desplazan el agua de la superficie del océano. Los errores relativos entre el modelo y las bases de datos son menores al 4% en todos los años.

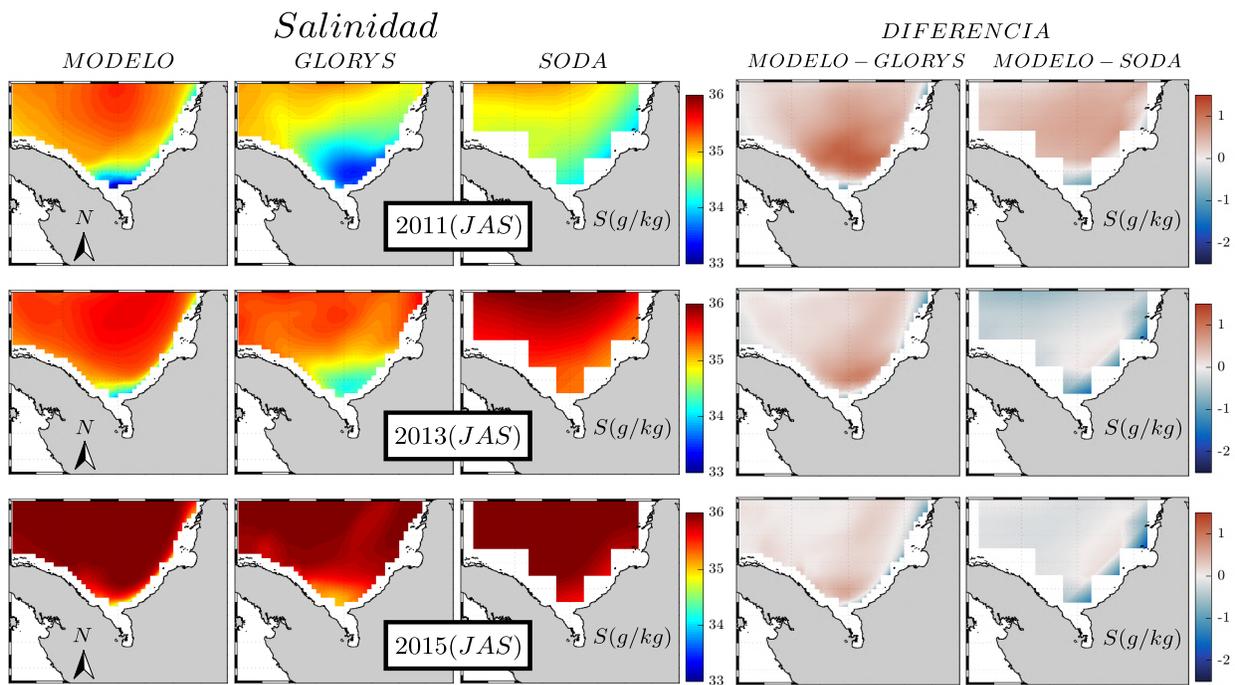
Figura 10. Comparación de la temperatura superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Primer trimestre de los años 2011-2013-2015



La Figura 11 ilustra los campos de salinidad superficial en el tercer trimestre (Julio, Agosto y Septiembre, JAS) de los años considerados en esta comparación. Este trimestre está enmarcado en la época húmeda de la región (mayo a noviembre). Los resultados muestran diferencias notorias

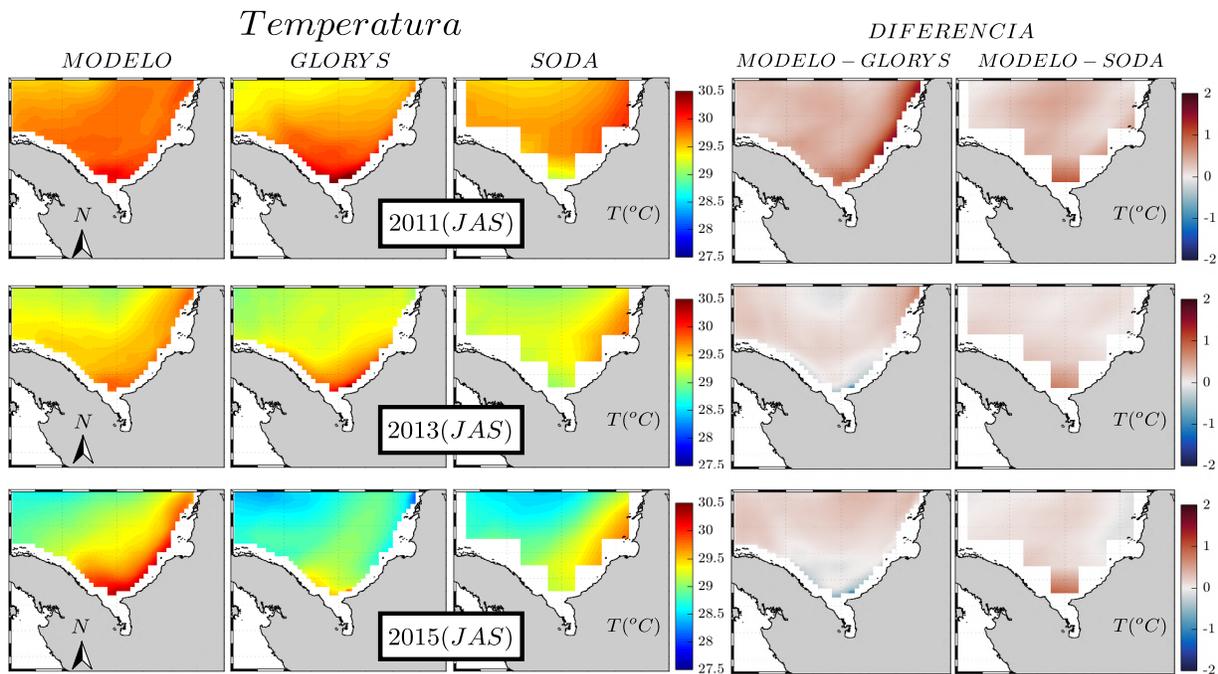
en comparación con la estación seca y en particular el modelo refleja cambios latitudinales importantes. La salinidad superficial aumenta ligeramente en los años analizados, con valores más bajos en la Niña (2011) y valores más altos en el Niño (2015), oscilando entre 35,5 y 36,5 g/kg, tanto para el modelo como para los productos satelitales considerados. El error relativo se mantuvo por debajo del 4% en todos los escenarios.

Figura 11. Comparación de la salinidad superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Tercer trimestre de los años 2011-2013-2015



Como se muestra en la Figura 12, la temperatura también muestra un patrón de aumentos sucesivos de norte a sur en el tercer trimestre. Excepto en los datos modelados en 2011 y en el lado este de la costa en 2013 y 2015, donde las temperaturas son más altas que en el resto del dominio. Se observa una diferencia de temperatura de hasta 3°C en gran parte del dominio en comparación con el primer trimestre (Figura 10). Esto es probablemente causado por el paso de la ZCIT, la cual se ubica al norte en esta época del año y puede provocar una disminución de la intensidad del viento y un aumento de la temperatura superficial.

Figura 12. Comparación de la temperatura superficial entre los datos modelados y las bases de datos GLORYS y SODA. Tercer trimestre de los años 2011-2013-2015



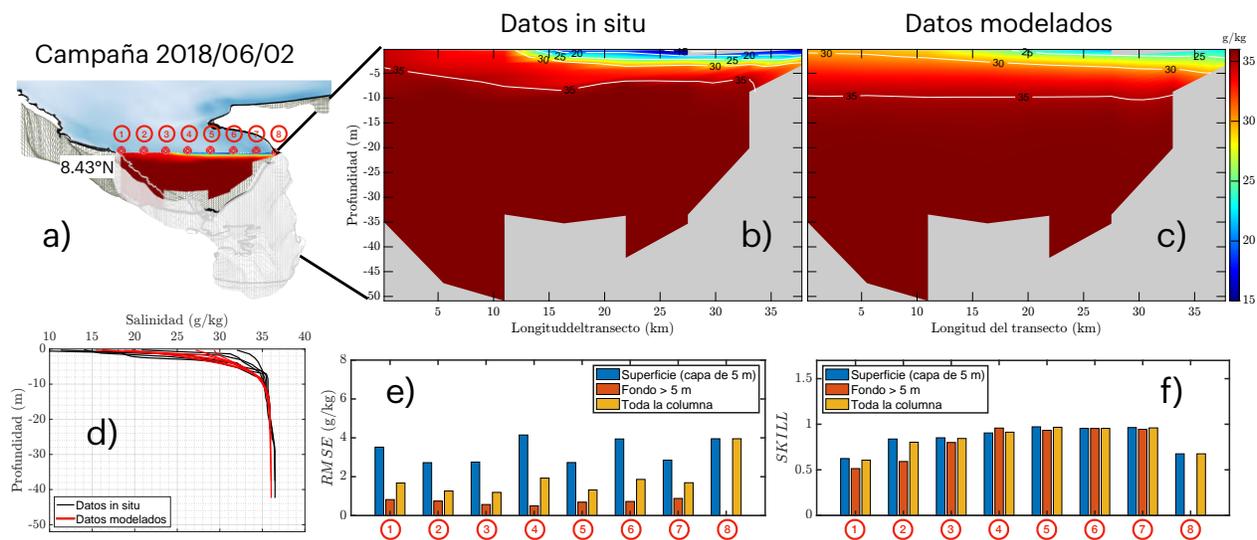
Los resultados anteriores sugieren que el modelo representa con éxito las variables de temperatura y salinidad superficial dentro del dominio exterior al golfo durante los tres años considerados. Sin embargo, con el fin de evaluar la validez de los resultados del modelo en profundidad, se comparó el comportamiento de las variables fisicoquímicas a lo largo de la columna de agua. Con este fin se compararon datos de perfiles y transectos verticales al interior del golfo sobre la malla hija.

3.2 Comparación de la temperatura y la salinidad en la malla hija

A continuación, se presenta un análisis que tiene como objetivo comparar los perfiles de salinidad y temperatura que se obtuvieron durante dos campañas de medición. Para llevar a cabo esta comparación, empleamos los datos de los promedios diarios del modelo y los datos medidos de manera instantánea en la campaña de medición de 02/06/2018. Para evaluar el rendimiento del modelo se utilizaron el error cuadrático medio (RMSE) y el SKILL desde superficie hasta 5 m de profundidad y desde 5 m hasta el fondo. Esto se debe a que en promedio en los primeros 5 m se encuentra la haloclina.

En las figuras 13 b), c) y d), se observa que el campo de salinidad del transecto modelado y medido son similares. Es de notar que las isohalinas mantienen en promedio el mismo nivel de profundidad. Además, en superficie y desde el centro hasta el lado oriental, observamos una superficie menos salina, lo que puede atribuirse a la pluma del río, tal como lo documentan García *et al.* (2010). Al observar la magnitud de la salinidad, los resultados sugieren que el modelo demuestra una adecuada capacidad para su representación en profundidades superiores a 5 metros, con una RMSE inferior a 1 g/kg (Figura 13e barras rojas). Por el contrario, el RMSE en la superficie oscila entre 3 g/kg y 4,2 g/kg en todos los puntos de medición, lo que sugiere una menor precisión en dicha capa. La figura 13 (f) muestra la capacidad del modelo para reproducir de forma eficaz las mediciones de campo. El valor SKILL se acerca a 1 en la mayoría de los puntos tanto en la superficie como el fondo. Sin embargo, cabe señalar que la eficacia del modelo disminuye ligeramente y se mantiene cerca de 0,5 cerca de la costa, específicamente en los puntos 1 y 8.

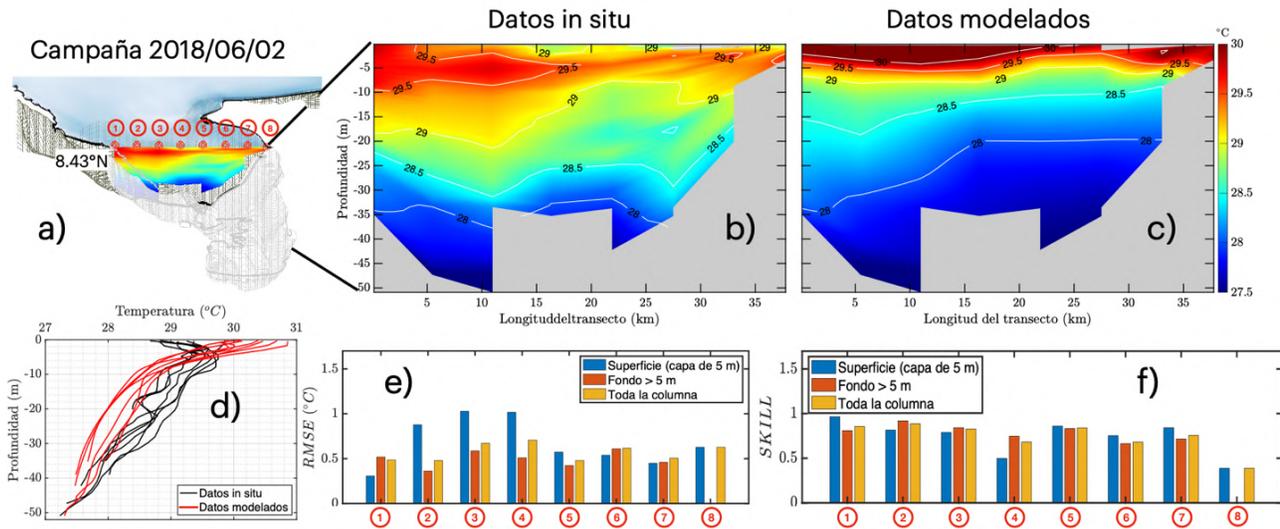
Figura 13. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de salinidad; **c)** in situ; **d)** modelados; **e)** perfiles en cada punto de medición; **f)** RMSE; **g)** SKILL .



Respecto a la temperatura, en la Figura 14 se hace evidente que el modelo tiende a sobreestimar la temperatura de la superficie, particularmente en los puntos 2, 3 y 4, que están situados al oeste con valores de error de aproximadamente 1 °C. En otros puntos, tanto en la superficie como en la profundidad, el error cuadrático medio (RMSE) se mantiene cerca de 0,5 °C. Además, en la capa intermedia, caracterizada por temperaturas que oscilan entre 28 °C y 29,5 °C,

los datos medidos muestran un mayor gradiente dentro de la columna vertical, mientras que el modelo muestra un gradiente menor hacia la región oriental del Golfo.

Figura 14. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de temperatura: **b)** *in situ*; **c)** modelados; **d)** perfiles en cada punto de medición: **e)** RMSE; **f)** SKILL



La Figura 15 muestra las mediciones de salinidad tomadas a lo largo del transecto situado a una latitud de 8,33° N. El modelo presenta un rendimiento sobresaliente al mostrar valores similares entre los datos medidos y observados y su precisión se encuentra en un nivel óptimo. Sin embargo, los datos *in situ* revelan una estratificación en la superficie, que es ligeramente más pronunciado de lo que predice el modelo. Esta diferencia puede atribuirse a la mezcla de las aguas más saladas del Caribe y el agua más dulce del río Atrato, que el modelo no alcanza a capturar. No obstante, es importante señalar que el nivel de eficiencia del modelo es muy satisfactorio, como lo indican los valores de Skill que se aproximan a 1 (Figura 15 f). Además, los valores de RMSE, especialmente para profundidades superiores a 5 m, se mantienen consistentemente por debajo de 0,5 g/kg en todos los puntos de muestreo.

Respecto al campo de temperatura (Figura 16) este es similar al del transecto de la Figura 14. Sin embargo, en este caso, las diferencias más significativas se observan en profundidades superiores a 5 m, sin superar un RMSE de 1 °C. Es de notar que en la capa superficial, la mayoría de los puntos no superan una diferencia de 0,5 °C.

Figura 15. Campaña de medición 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de salinidad: **b)** *in situ*; **c)** modelados; **d)** perfiles en cada punto de medición **e)** RMSE; **f)** SKILL

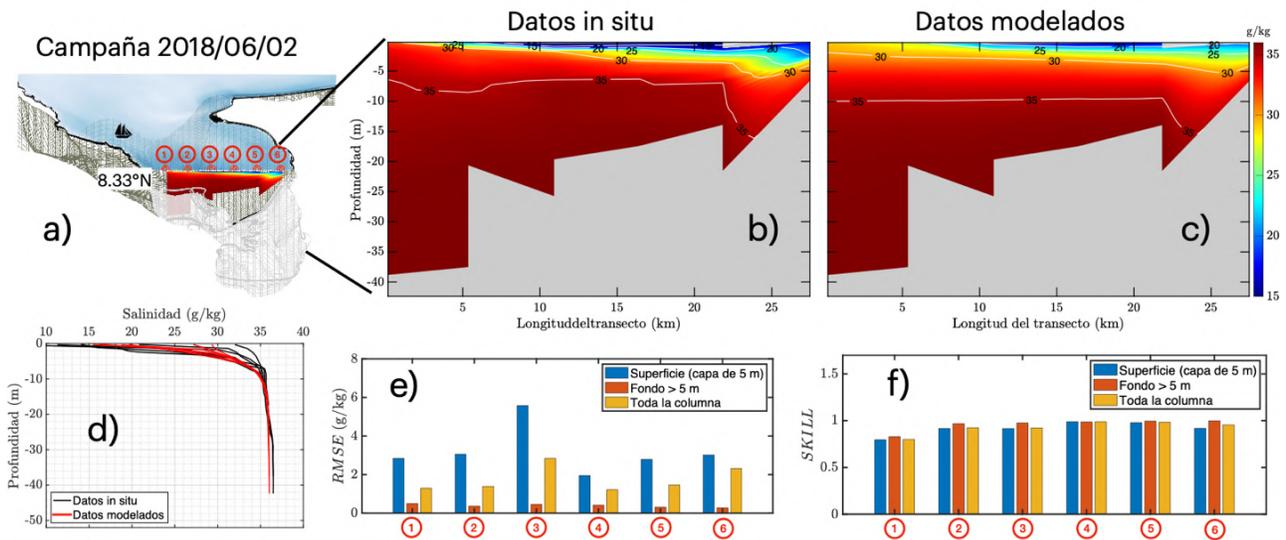
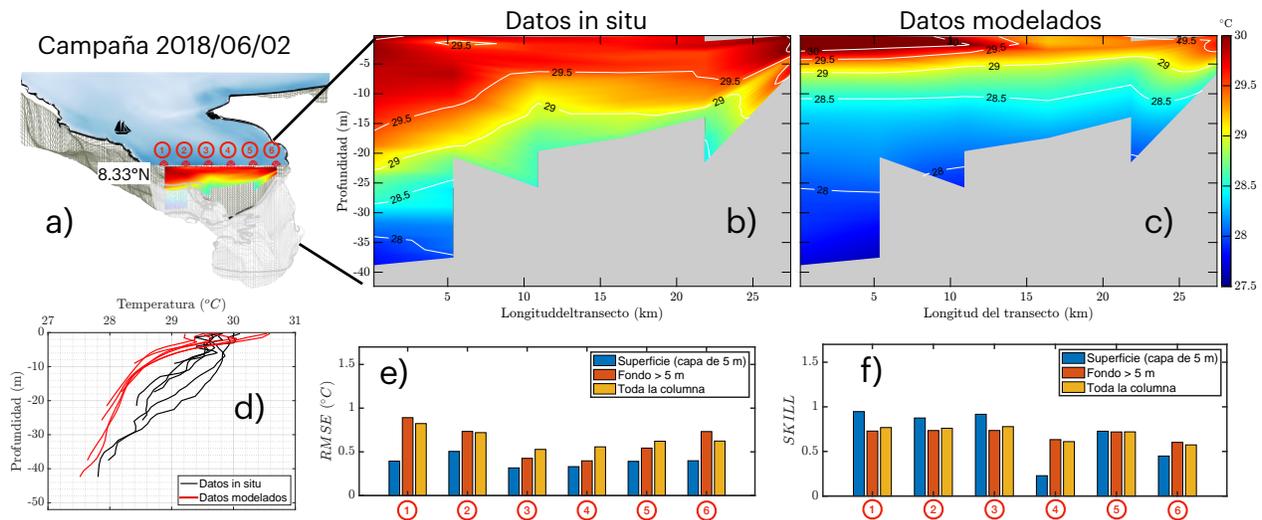


Figura 16. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de temperatura: **b)** *in situ*; **c)** modelados **d)** perfiles en cada punto de medición **e)** RMSE; **f)** SKILL



En el Anexo 3 y 4 se presentan los campos de salinidad y temperatura en profundidad para dos transectos más realizados a una latitud de 8.23°N y 8.17°N en 02/06/2018. Los resultados son similares a los mostrados hasta ahora.

En la figura 17, se presenta un transecto norte-sur de una campaña realizada el 2 de mayo de 2018. En la región sur de Bahía Colombia, se hace evidente en los datos *in situ* una fuerte estratificación, caracterizada por una capa superficial de 5 metros con salinidades inferiores a 15

g/kg. En el modelo no se observa esta estratificación lo que denota un desafío para el modelo a la hora de representar con precisión la salinidad de la superficie. Sin embargo, una vez superada la haloclina, la concordancia entre el modelo y las observaciones mejora considerablemente.

Figura 17. Campaña de medición 2018/05/02. Datos de salinidad: **a)** in situ; **b)** modelados; **c)** transecto; **d)** perfiles en cada punto de medición; **e)** RMSE; **f)** SKILL

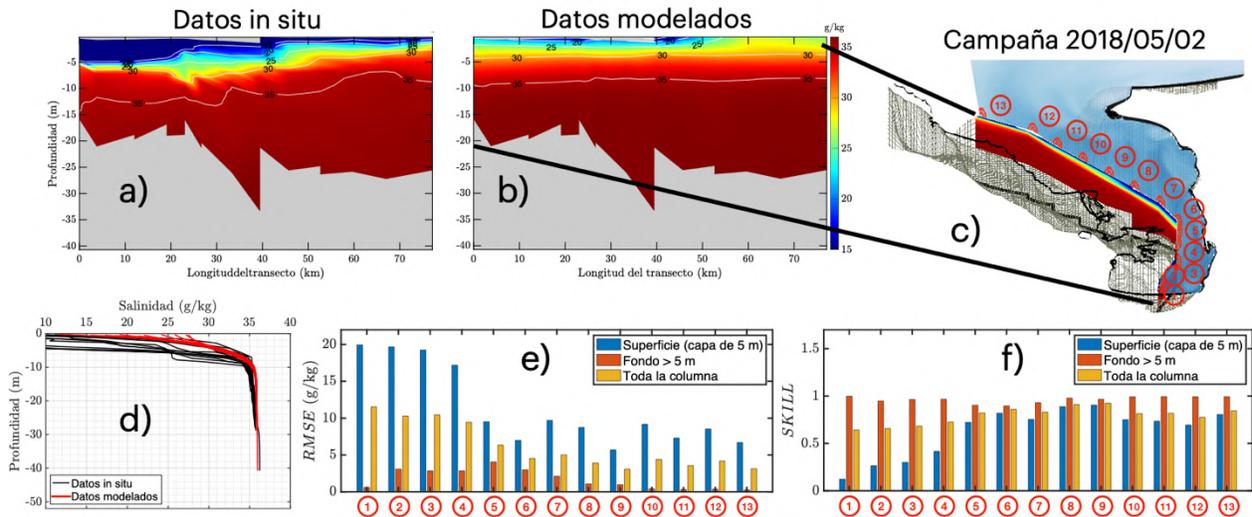
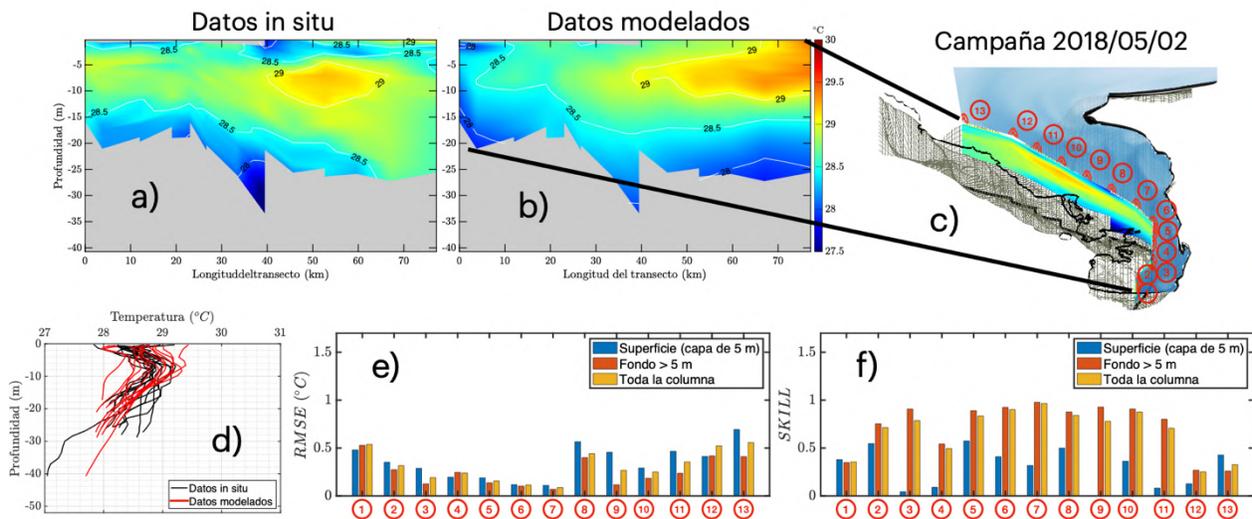


Figura 18. Campaña de medición 2018/05/02. Datos: **a)** in situ; **b)** modelados; **c)** transecto; **d)** perfiles en cada punto de medición; **e)** RMSE; **f)** SKILL



Respecto a la temperatura, el modelo muestra una capacidad más favorable para captar su variabilidad a lo largo de la sección norte-sur en comparación con la salinidad (Figura 18), donde

se observan valores de RMSE inferiores a $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vale la pena señalar que el modelo subestima ligeramente la temperatura dentro de la capa media en menos de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al norte del golfo.

Una característica de estas mediciones es la existencia de una masa de agua intermedia con temperaturas más altas respecto a la superficie y el fondo. Este atributo es evidente en los datos in situ (Figura 18 a) y en el modelo el cual lo reproduce con considerable detalle (Figura 18 b). Es de notar que en los promedios multianuales también se presentan esta característica, como se muestra más adelante.

Montoya (2010) llevó a cabo múltiples campañas de medición en la región del Golfo de Urabá entre 2004 y 2007 y mostró una variabilidad significativa tanto en la salinidad como en la temperatura de la superficie. La variación en la salinidad puede atribuirse a la estratificación inducida por los numerosos ríos que desembocan en el golfo. Mientras que las variaciones de temperatura se deben al calentamiento diferencial de las aguas superficiales durante el día. Los resultados del modelo, similares a las mediciones, indican que la salinidad oscila entre 0 g/kg cerca de las desembocaduras de los ríos y $36,7\text{ g/kg}$, mientras que las temperaturas varían entre $25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $32,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, podemos concluir que el modelo captura eficazmente la variabilidad espacial y temporal de la salinidad y la temperatura. Y que además sus valores están en intervalos similares a los registrados por investigadores que realizaron mediciones en diferentes años y épocas climáticas (Montoya, 2010). Esto sugiere que es posible utilizar las salidas del modelo para avanzar en el entendimiento de la hidrodinámica del golfo de Urabá.

3.3 Comparación de datos de la corriente en un transecto vertical

Se realizó una comparación de datos del modelo y medidos con el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de las componentes zonales (u) y meridional (v) en un transecto este-oeste del golfo de Urabá. Debido a que ambos datos, medidos y modelados, no coincidieron temporalmente como se mencionó anteriormente, la comparación se realizó a nivel horario utilizando las mediciones realizadas y los datos no promediados del modelo. Esto último se realizó por medio de simulaciones con salidas horarias. Los datos del ADCP se procesaron siguiendo el procedimiento descrito por Valle-Levinson y Atkinson (1999).

Figura 19. Marea en Turbo y fase lunar. (Figura superior) Junio de 2022. (Figura inferior) Junio 2011. Fuente. (<https://tides4fishing.com/co/antioquia/turbo>)



Para garantizar una comparación adecuada, se utilizaron los días del mismo mes simulados con la misma fase lunar que los días de la campaña. La figura 19 muestra el calendario lunar de la zona de Turbo de los días 23 y 24 de junio de 2022 (marcado en rojo), fecha de las mediciones de los datos. Se muestra el mes de junio de 2011, y es evidente que los días más similares en términos de posición lunar son el 25 y el 26 de junio de 2011. Por lo tanto, estos días de 2011 se utilizaron para fines de comparación.

En la Figura 20 se muestran en (a) y (b) los datos medidos y (c) y (d) los datos modelados de la componente norte-sur (v) de la velocidad. Solo se analiza esta componente debido a que sus valores son mucho mayores que la componente este-oeste y más representativos para la circulación del golfo.

Los resultados sugieren que tanto los datos medidos como los modelados muestran un patrón de flujo similar de tres capas en gran parte del transecto. La capa intermedia que se dirige hacia el sur se destaca por su mayor magnitud en comparación con las capas que se encuentran en la superficie y en el fondo. A pesar de la similitud en el patrón, es evidente que existen diferencias en la magnitud y la profundidad de la velocidad máxima.

En el modelo, el valor máximo fue de aproximadamente 24,8 cm/s a una profundidad de 10 metros, mientras que, en las mediciones, el valor máximo fue de 70,1 cm/s a una profundidad de aproximadamente 3 metros.

Los gráficos b) y d) de la figura 20 muestran una vista de norte a sur (Turbo a la izquierda y el río Atrato a la derecha) de cómo se distribuye espacialmente la magnitud y dirección de la componente meridional a lo largo del transecto. Como se aprecia en los datos medidos (panel b)), la capa intermedia que fluye hacia el sur, no abarca toda la sección sino que se extiende unos 4 km hacia el lado de Turbo, y posiblemente la influencia del río Atrato no permita el desarrollo completo de esta capa para ocupar toda la sección. Como se discute más adelante, el río y la forma batimétrica en esta constricción pueden estar actuando como “tapón” para el flujo dirigido hacia bahía Colombia. El panel d) de los datos modelados conserva la estructura de 3 capas, aunque la capa intermedia es un ligeramente más profunda y sus valores subestiman los datos medidos.

De manera similar a lo anterior se analizaron los datos de la componente norte-sur modelados y medidos del mes de septiembre. Se seleccionaron los datos modelados del 2011 con características de marea similares al 3 y el 4 de septiembre de 2022, de acuerdo con la Figura 21.

Figura 20. Campaña 23 y 24 de junio (2022). Componente norte-sur (v). Promedio de los datos medidos por el ADCP a lo largo del transecto este-oeste (línea punteada negra). **a)** y **b)** datos medidos por el ADCP; **c)** y **d)** datos modelados

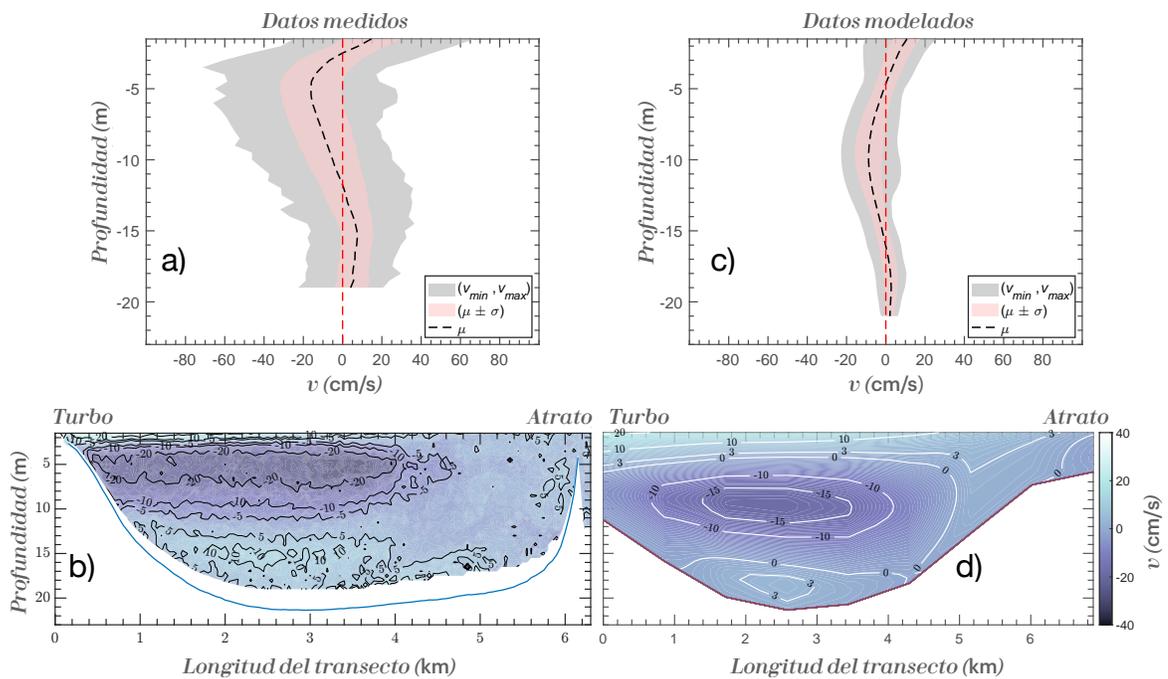


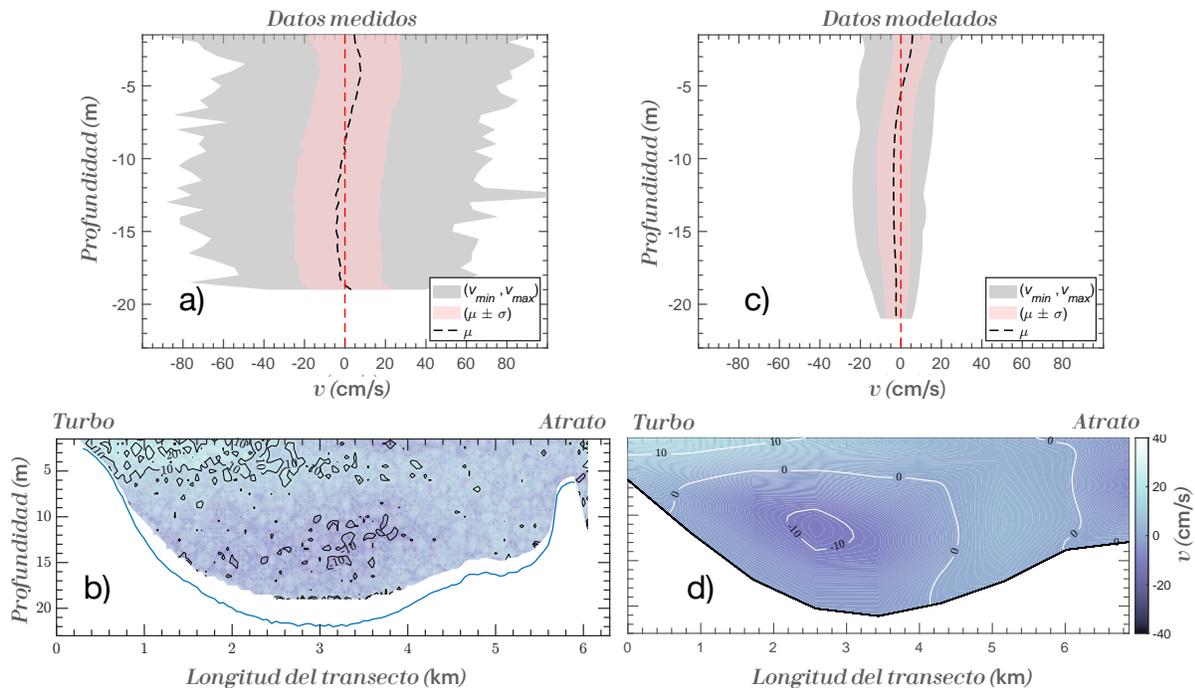
Figura 21. Marea en Turbo y fase lunar. (Figura superior) septiembre de 2022. (Figura inferior) septiembre 2011. Fuente. (<https://tides4fishing.com/co/antioquia/turbo>)



La figura 22 muestra el perfil promedio de las mediciones en el transecto y el campo de velocidades norte-sur durante la segunda campaña, así como los resultados del modelo. La estructura del flujo vertical durante esta época del año es diferente a la de la campaña anterior. Se observa la formación de dos capas, una dirigida hacia el sur, a una profundidad de aproximadamente 10 m y otra cerca de la superficie en dirección norte, con valores que oscilan entre 10 y 20 cm/s en promedio.

Lo anterior también lo confirman los gráficos b) y d) que ilustran la distribución de estas capas a lo largo del transecto. En este caso la similitud en los datos medidos (panel b)) y modelados (panel d)) mejora, ya que muestran una magnitud y escalas de profundidad de las capas más análogas a las medidas con el ADCP.

Figura 22. Campaña 3 y 4 de septiembre (2022). Componente norte-sur (v). Promedio de los datos medidos por el ADCP a lo largo del transecto este-oeste (línea punteada negra). **a)** y **b)** dato medidos por el ADCP; **c)** y **d)** datos modelados



En la tabla 9 se presentan los valores estadísticos al comparar los perfiles promedios de la componente norte-sur medidos y modelados de la primera y segunda campaña. Se observa cómo son ligeramente mejores los resultados de la segunda campaña.

Tabla 9. Estadísticos de la comparación entre los perfiles promedio medidos y modelados (figuras 20 y 22) de la componente norte-sur en la campañas 1 y 2

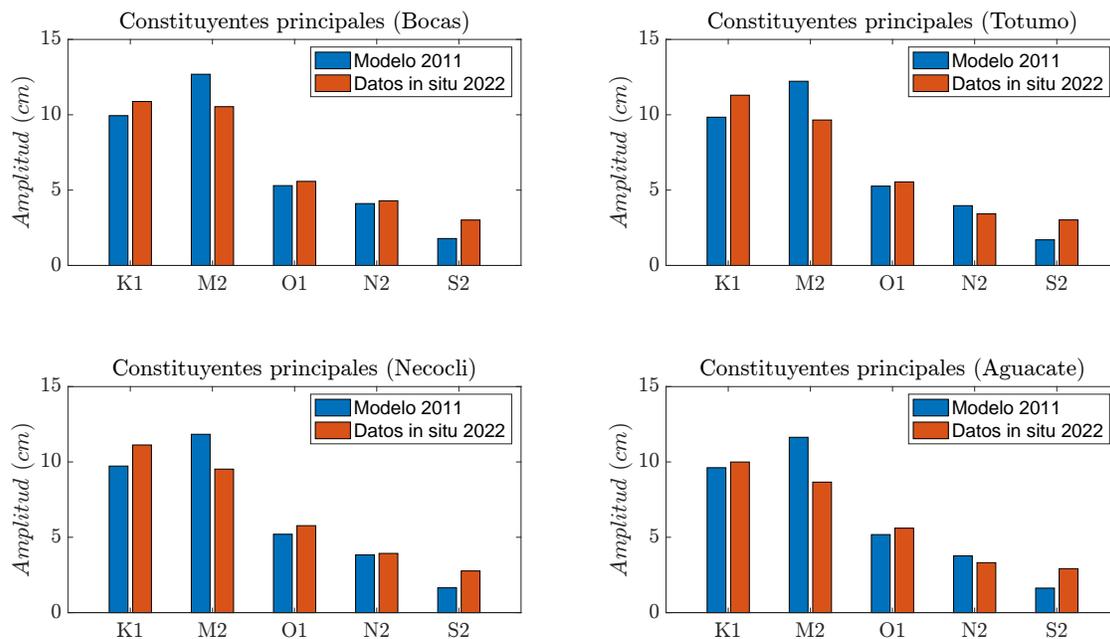
	RMSE (cm/s)	MAE (cm/s)	SKILL
Campaña 1	7.80	7.08	0.58
Campaña 2	2.82	2.32	0.82

De acuerdo con los resultados anteriores, durante ambas campañas, el modelo subestima los valores de la componente norte-sur de la velocidad. Es importante destacar el excelente desempeño del modelo en una región tan poco profunda con dinámicas complejas hecho destaque por otros autores (Grifoll *et al.*, 2016; Ricaurte-Villota y Bastidas, 2017). Se sugiere que en futuros

trabajos se realicen modelaciones en las mismas épocas de los datos medidos. Sin embargo, los hallazgos sugieren que el modelo es capaz de reproducir de manera adecuada el comportamiento del flujo de agua en el golfo de Urabá.

3.4 Comparación de datos in situ de nivel del mar con datos modelados de onda de marea

Figura 23. *Los 5 constituyentes principales de la marea en los diferentes puntos de instalación de los sensores*



El análisis armónico del nivel del mar, permite representarlo como una combinación lineal de funciones armónicas con frecuencias, fases y amplitudes correspondientes de cada armónico. Barranco *et al.* (2022) utilizando una serie de marea ubicada en el muelle de Guardacostas de Turbo de más de un año de duración y resolución temporal de 1 min identificó las amplitudes de los armónicos que más contribuyen al régimen mareal. Estos autores encontraron que los armónicos asociados a K_1 , M_2 , K_2 , N_2 , Q_1 , S_2 , O_1 con amplitudes de 12.2 cm, 8.41 cm, 6.04 cm, 4.28 cm, 4.03 cm, 2.59 cm y 2.40 cm, respectivamente son los más importantes. Con los datos medidos en 2022 y los datos del modelo, fueron calculados los principales armónicos de la marea. La figura 23 muestra la comparación de los 5 armónicos principales obtenidos en este trabajo con datos medidos y modelados: Es de notar que estos resultados son similares a los reportados por los autores mencionados. Es de notar que a partir de los armónicos de marea es posible obtener la marea

astronómica y a partir de la diferencia entre la onda original y la marea astronómica obtener la marea meteorológica.

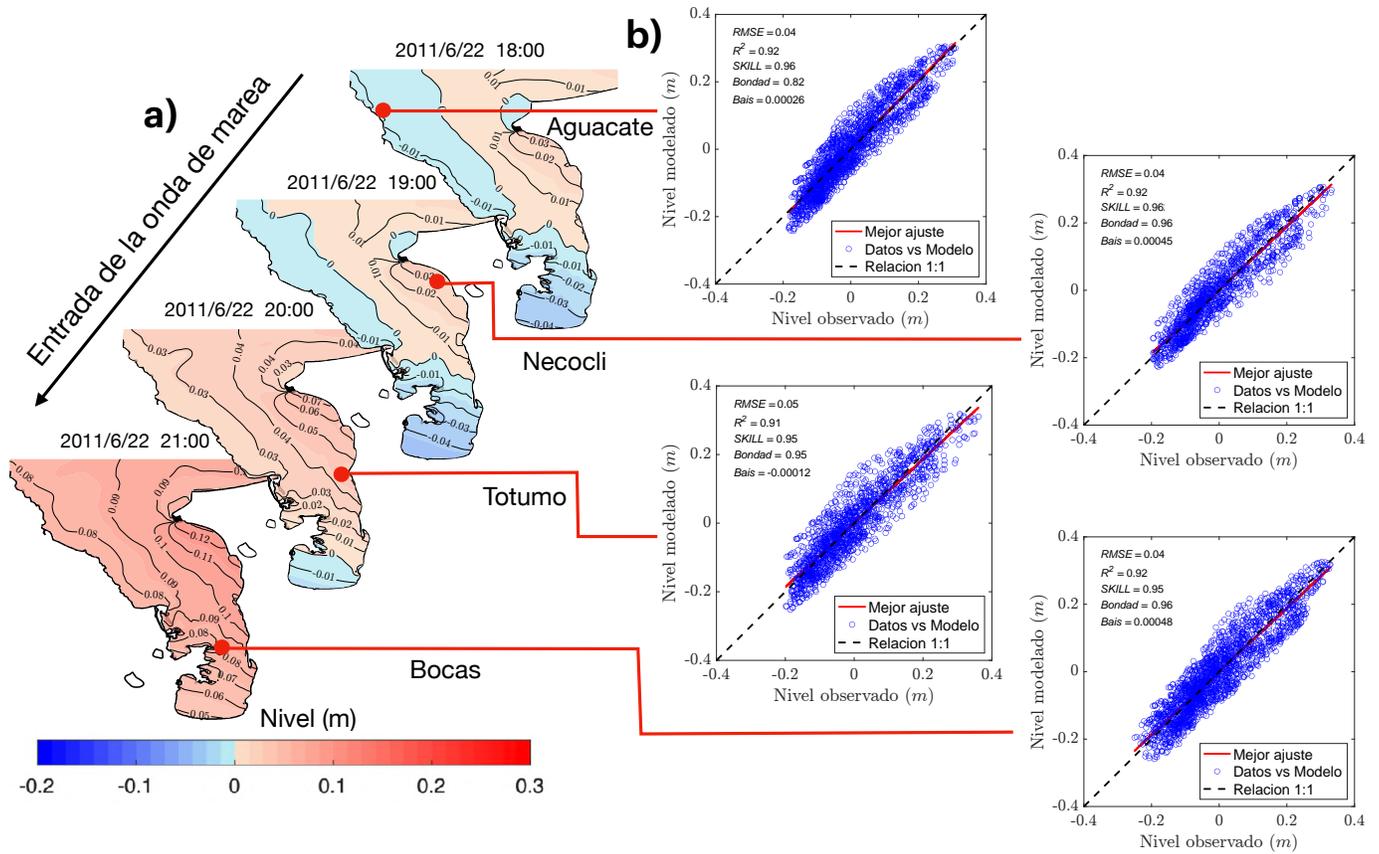
Por otro lado, la onda de marea se clasifican en marea semidiurna, diurna o mixta según sus características (SHOA, 2013). El factor de forma de Courier (factor F), permite determinar su clasificación mediante una relación adimensional entre de algunos armónicos de la siguiente manera:

$$F = (K_1 + O_1) / (M_2 + S_2) \quad (\text{ecuación 2})$$

Con base en lo anterior, para valores de $F < 0.25$ la marea es semi-diurna, $0.25 < F < 1.5$ es mixta principalmente semi-diurna, $1.5 < F < 3$ mixta principalmente diurna, $F > 3$ es diurna (Artal, Pizarro & Sepúlveda, 2019). De acuerdo con los datos medidos y modelados, los valores de F son 1.39 y 1.12, con lo cual se puede decir que la marea en el golfo de Urabá es mixta semidiurna, de nuevo coincidiendo con los resultados de Barranco *et al.* (2022).

Con el fin de analizar el desempeño del modelo en diferentes sitios del golfo, se utilizaron los datos de la marea astronómica medida entre 14 de junio y 9 de septiembre de 2022 y los datos del modelo de 2011, según lo discutido anteriormente (Tabla 2). En la Figura 24 a), se observan las líneas cotidales calculadas a partir de los datos medidos en cuatro horas consecutivas, lo que sugiere que la entrada de la onda de marea al interior del Golfo es de noreste al suroeste. La figura 24 b) muestra la comparación de la marea astronómica medida y modelada (puntos azules) en varios sitios (Bocas, Totumo, Necoclí, Aguacate, puntos rojos. Figura 24 a) donde se ubicaron sensores de presión durante aproximadamente tres meses (Tabla 2). La amplitud de la marea, tanto simulada como observada, no supera los 40 cm, lo que coincide con varios autores (Correa y Vernete, 2004; Barranco *et al.*, 2022). Las principales diferencias entre las dos series se observan en las fechas donde se presenta la cuadratura, en la cual el modelo sobreestima ligeramente la amplitud de la onda medida. Además, en los momentos de las mareas más bajas, el modelo sobreestima los datos observados en algunas fechas. Sin embargo, los estadísticos asociados a la comparación para cada punto de medición (ver gráficos de dispersión b)), sugieren que el modelo representa adecuadamente la marea en el área de estudio a pesar de su complejo sistema hidrodinámico.

Figura 24. Onda de marea en el golfo de Urabá. a) Líneas cotidianas de la onda de marea. b) Gráficos de dispersión, marea astronómica modelada vs observada



4. Resultados y discusiones

Mediante la implementación del modelo CROCO, se logró caracterizar los patrones de circulación multianual, revelando complejas interacciones entre los forzamientos atmosféricos, los aportes fluviales y las condiciones batimétricas. Los hallazgos contribuyen significativamente a la comprensión de los procesos físicos que gobiernan el transporte y la renovación de masas de agua en este ecosistema costero. Asimismo, los análisis realizados brindan información valiosa para abordar desafíos locales y regionales relacionados con la gestión integral de zonas costeras, la conservación de hábitats marinos y el desarrollo sostenible de actividades económicas dependientes de los recursos estuarinos. Estos aportes fundamentales sientan las bases para futuras investigaciones y acciones encaminadas a preservar la integridad ecológica del Golfo de Urabá, así como para optimizar el aprovechamiento racional de sus servicios ecosistémicos en beneficio de las comunidades locales y la región en general.

Adicionalmente, se analizan escenarios en los que se excluyó de forma individual cada uno de los principales forzamientos (viento, descarga de ríos y marea), con el objetivo de evaluar su impacto en los patrones de circulación oceánica dentro del golfo. Cabe resaltar que todas las modelaciones se realizaron considerando la variabilidad temporal de estos forzamientos.

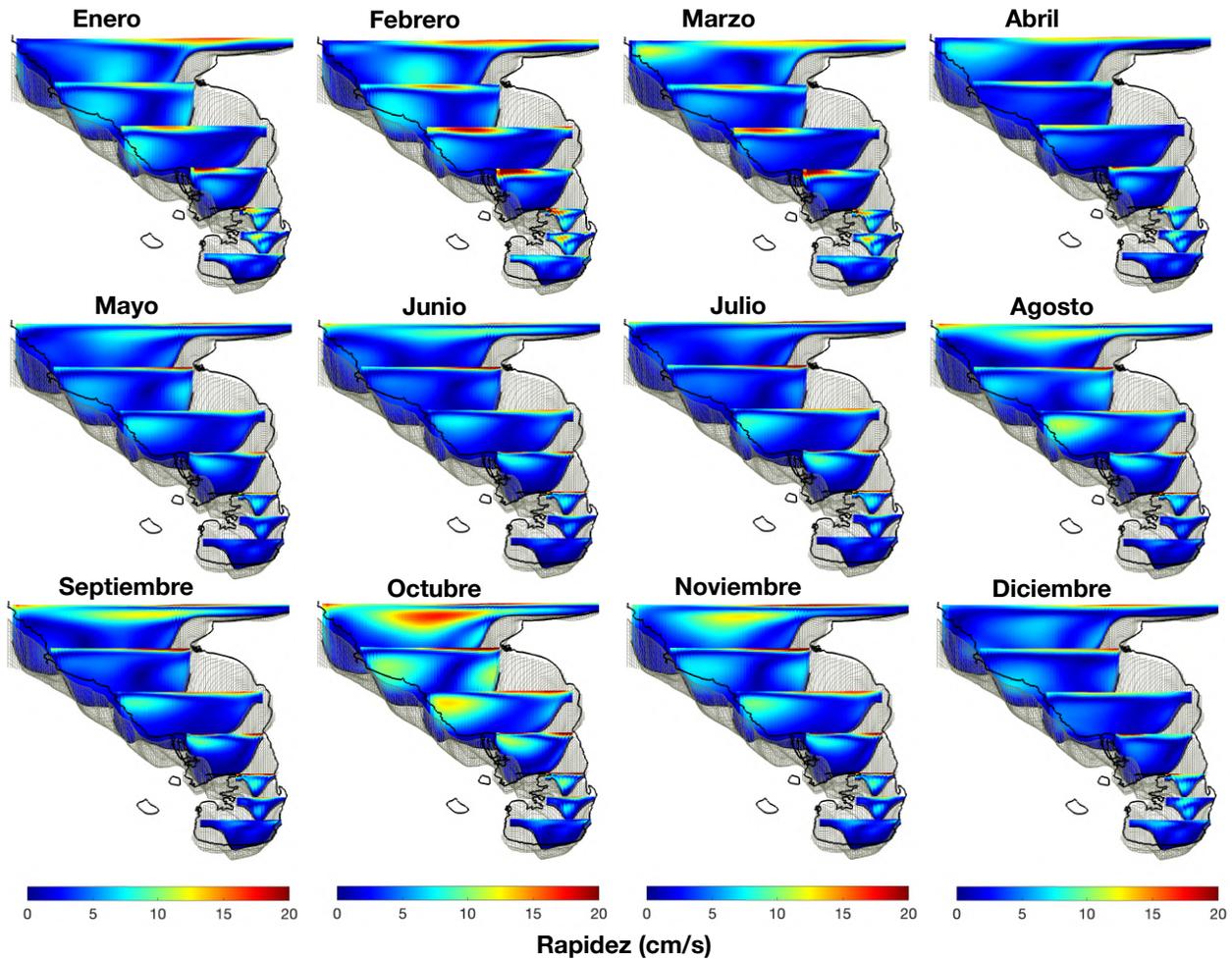
4.1 Patrones de circulación mensual multianual

La Figura 25 muestra la magnitud de la velocidad de las corrientes en la columna de agua al interior del golfo de Urabá en un promedio mensual multianual. Se puede observar el comportamiento espacial y temporal promedio para cada uno de los meses del año. Durante la estación climática seca (diciembre a abril), se observa un comportamiento similar en la magnitud de las corrientes, bajas magnitudes en profundidad y registrando mayores velocidades en la capa superficial. En particular, los meses de febrero y marzo muestran una intensificación en la superficie, mientras que los meses de diciembre y abril presentan corrientes más débiles, probablemente debido a la dirección del viento (norte a sur).

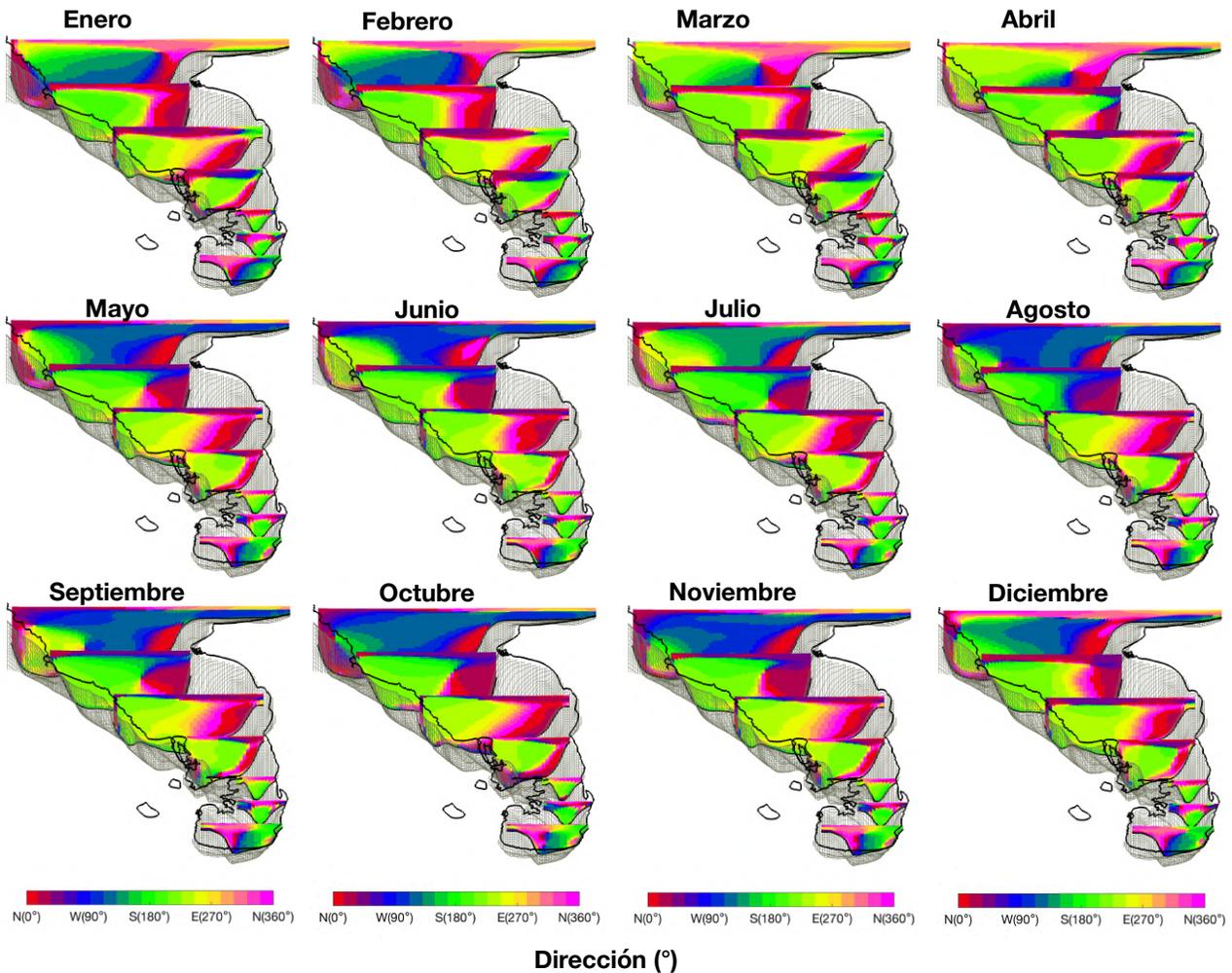
La en la época húmeda, que comprende de mayo a noviembre, persiste un comportamiento similar en toda la extensión del golfo. Durante los meses de mayo, junio y julio, se observa una pequeña capa en superficie más energética, y el resto de la columna con menor energía. De agosto a noviembre, se destaca la zona central y norte del golfo por el aumento de la corriente en la capa

intermedia. En octubre, en particular, se registra una velocidad media de 15 a 20 cm/s dentro de una capa de aproximadamente 20 m de profundidad.

Figura 25. *Transectos verticales de la magnitud de las corrientes mensuales multianuales*



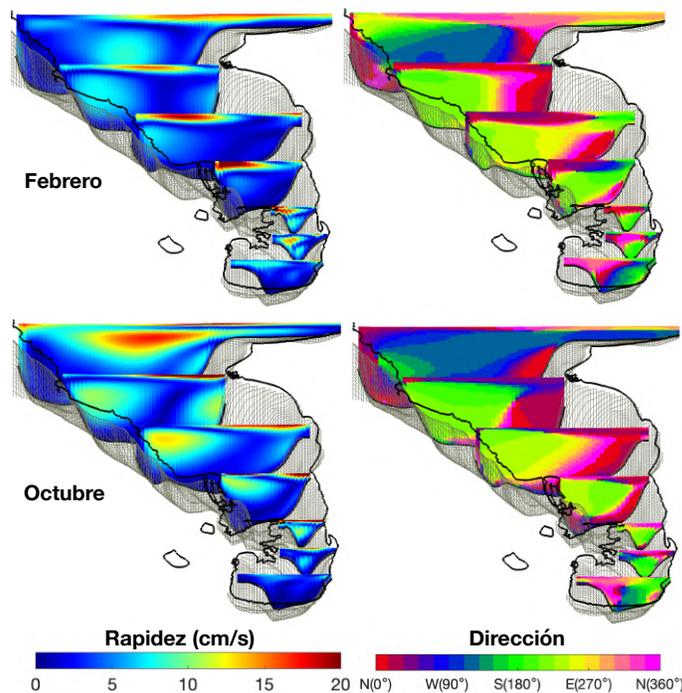
En la Figura 26 se presentan las direcciones mensuales multianuales de la corriente en los mismo transectos verticales de la Figura 25. Los colores verdes indican que el flujo se dirige hacia el sur, mientras que los colores rojos y magenta indican una dirección hacia el norte del golfo. Se observa como el flujo entra por el costado oeste en profundidad y sale por el costado este y por la superficie. En general, las direcciones en cada mes muestran un patrón similar de circulación en el tiempo. Al igual que con la magnitud, las dos épocas climáticas que se presentan en el golfo, tienen un comportamiento similar.

Figura 26. *Transectos verticales de la dirección de las corrientes mensuales multianuales*

Con el fin de contrastar las dos épocas climáticas de la zona de estudio, se seleccionaron los meses de febrero y octubre como representativos de la estación seca y la estación húmeda, respectivamente. Esta elección se hizo con base en los comportamientos similares observados anteriormente. La Figura 27 muestra los transectos verticales multianuales distribuidos a lo largo del golfo, tanto de la magnitud como la dirección de la corriente en la vertical. En febrero, se observa una capa superficial con un espesor aproximado de 5 m, con una magnitud que oscila entre 5 y 25 cm/s que fluye del sur al norte del golfo y, finalmente, se desvía hacia el oeste. La capa que se extiende desde 5 m hasta el fondo muestra velocidades promedio relativamente bajas (menores a 10 cm/s), con un ligero aumento en la capa intermedia situada en el lado occidental, y la zona más estrecha del golfo. Por otro lado, la dirección del flujo en la superficie es predominante hacia el norte, mientras que la dirección hacia el sur se observa en el lado este, aunque con un rango de

variación menor en la magnitud (0-20 cm/s). En profundidades superiores a aproximadamente 5 m, el flujo se divide en cada zona en una parte entrando al interior del golfo y otro saliendo. En Bahía Colombia el flujo se divide en dos capas verticales, una derecha dirigida al sur y otra izquierda dirigida al norte. En la zona del delta del río Atrato se tiene una capa horizontal de unos 5 m de grosor saliendo del golfo y una capa en profundidad entrando. Las secciones centrales muestran una estructura de hasta tres capas, una capa media hacia el sur rodeada de dos capas que salen hacia el norte. En el norte del golfo, la división del flujo vuelve a ser vertical, con una dirección hacia el sur a lo largo de la vertical en el lado occidental y una hacia el norte en el lado este.

Figura 27. Transectos verticales de la magnitud y dirección de las corrientes mensuales multianuales para los meses de febrero (primera fila) y octubre (segunda fila). Columna izquierda rapidez (cm/s) y columna derecha dirección



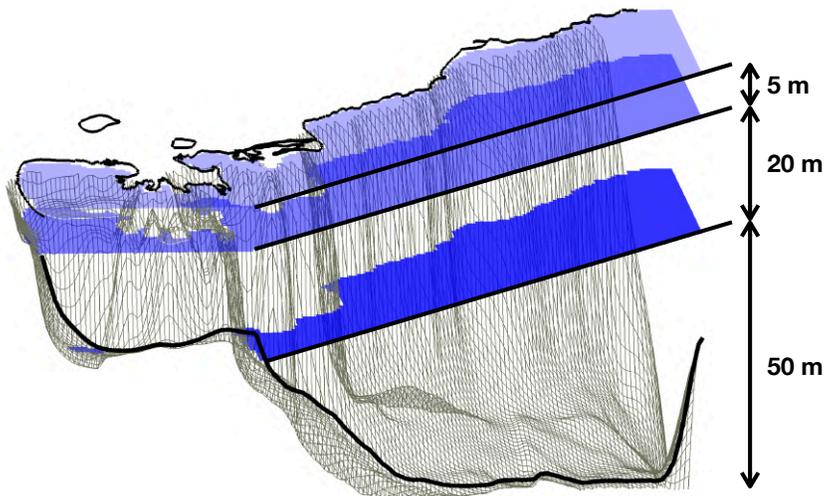
Además, se observa como en el mes de octubre, la capa superficial con mayor intensidad es ligeramente más gruesa que en el mes de febrero y se encuentra en el este con dirección suroeste. En el lado occidental, la capa intermedia presenta una mayor magnitud en el flujo que entra y sale del estuario, y los patrones de circulación en Bahía Colombia son similares a los del mes de febrero. En el área central, la estructura de tres capas no es tan clara, con una salida predominante hacia el

este y una entrada hacia el oeste. La zona norte también sufre cambios de magnitud y dirección, especialmente notables en la capa intermedia.

Con respecto a los patrones de circulación, Escobar *et al.* (2015) realizaron mediciones *in situ* y usaron modelos numéricos. Estos autores afirman que el Golfo de Urabá presenta un sistema de circulación complejo caracterizado por varios patrones de flujo. Sus resultados permitieron identificar una circulación estuarina típica de dos capas en la parte central, flujos de tres capas en Bahía Colombia y una circulación inversa hacia el norte de las bocas principales, resultados similares a lo presentado hasta ahora.

Los patrones encontrados en la sección anterior, nos permiten sugerir que el flujo del golfo se puede dividir en profundidad en función de la dirección del flujo de agua. Por lo tanto, se propone dividir el golfo en tres capas para análisis posteriores en este estudio: una capa superficial que va desde la superficie hasta una profundidad de 5 m, una capa intermedia que va de 5 m a 25 m y una capa profunda desde los 25 m hasta el fondo (Figura 28).

Figura 28. División en profundidad del golfo en capas. Los planos en azul muestran la separación de las capas y el grosor de cada una de estas (vista desde el costado este del golfo)

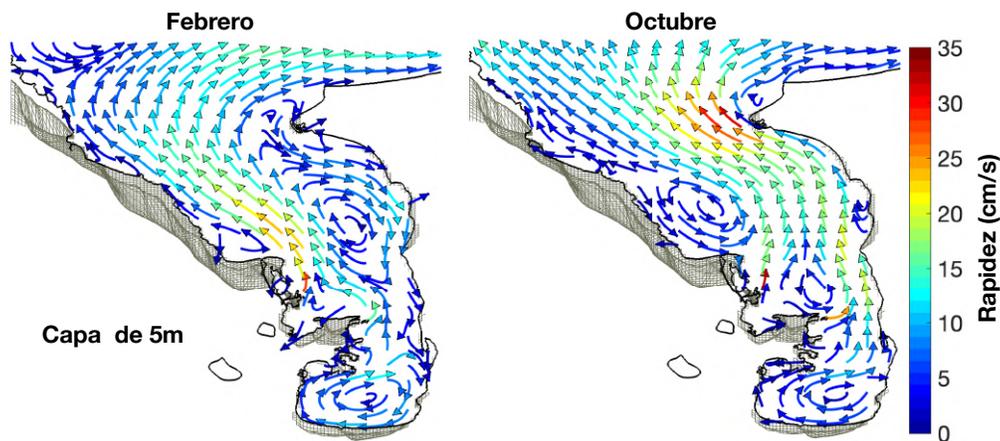


La integración de los campos de corriente dentro de la capa superficial para los meses de febrero y octubre, se observa en la Figura 29. Se observan de manera más clara las diferencias entre los meses en la magnitud y la dirección de la corriente. En general, el flujo neto está orientado hacia el norte, lo que provoca una salida efectiva de las aguas con menor salinidad.

En el mes de febrero, el flujo de agua tiene una dirección hacia el noroeste, mientras que las corrientes más intensas se observan cerca de la desembocadura del Roto y disminuyen gradualmente a medida que salen del golfo. En el mismo mes, el flujo se desvía hacia el lado este, luego gira en la zona central y se dirige hacia Bahía Colombia, donde se observa un giro anticiclónico que también se presenta en el mes de octubre.

En el mes de octubre, las corrientes más intensas se observan en el noreste del Golfo, donde el flujo hacia el norte se encuentra ahora en el flanco oriental, abarcando una parte importante de la zona norte. Esto al parecer puede inducir un giro ciclónico que se observa en la parte central del Golfo. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Montoya y Toro (2006), quienes encontraron que en la época húmeda el flujo sale del golfo por el flanco noreste, mientras que en la época seca se presenta una inversión del flujo en el costado este con dirección hacia el sur.

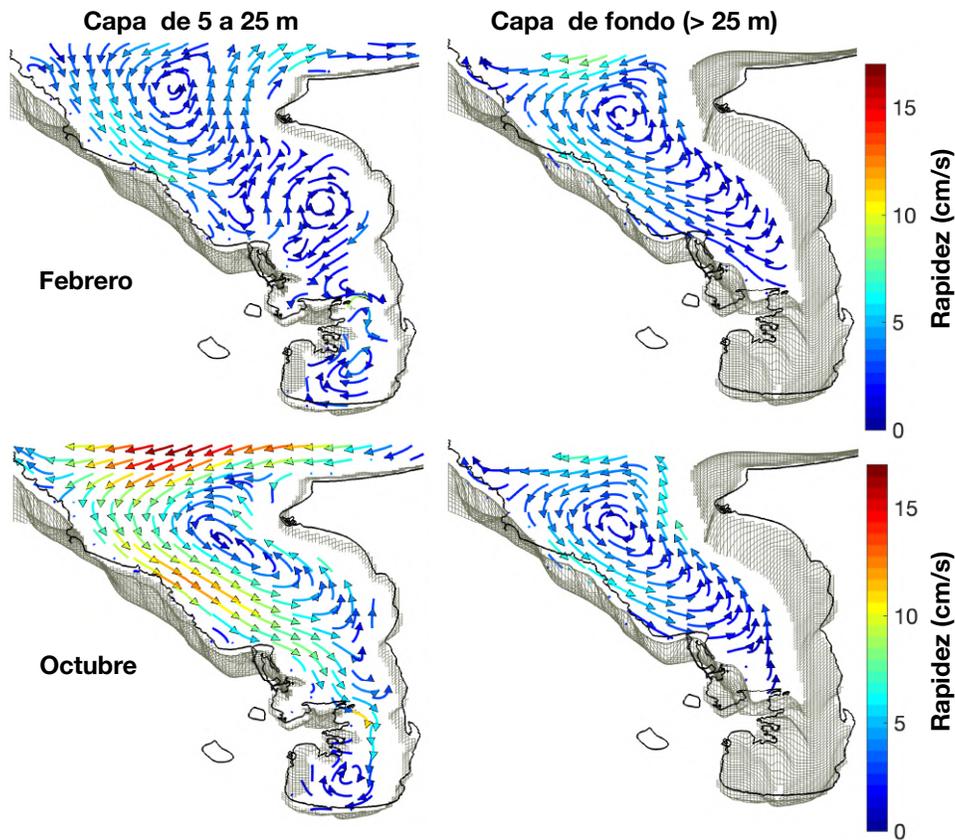
Figura 29. Corriente promedio multianual de la capa superficial en los meses de febrero y octubre



El flujo superficial se equilibra con la entrada de agua a través de las capas inferiores, como se muestra en la Figura 30. La capa intermedia muestra características diferentes durante los dos meses considerados. En el mes de febrero se observan tres giros: dos giros anticiclónicos en Bahía Colombia y en la zona central y un giro ciclónico en el norte, aunque en general las corrientes son de menor intensidad en comparación con octubre (velocidades de hasta 17 cm/s). En este mes el flujo entra por el noreste y gira hacia el sureste probablemente debido a restricciones batimétricas. Posteriormente, parte del flujo regresa hacia el norte, mientras que el resto continúa hasta llegar a la parte sur del golfo, donde gira de forma anticiclónica.

Por otro lado, la capa inferior, presenta una variación mínima en los campos de corrientes entre las dos estaciones, con una circulación definida por un gran giro ciclónico. Esto coincide con la donde se observa una circulación ciclónica, en la que el agua entra por el oeste y sale por el este en esta capa de fondo.

Figura 30. Corriente promedio multianual de la capa intermedia (izq.) y la capa de fondo (der.) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo)



4.2 Caracterización de la circulación media usando la función corriente.

La función corriente (ψ) se define en términos de las componentes zonal (u) y meridional (v) de la velocidad como:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \tag{ecuación 3}$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{ecuación 4}$$

Esta herramienta matemática permite representar gráficamente líneas de corriente donde los vectores velocidad $\vec{v} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \hat{i} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \hat{j}$ son tangentes en cada punto a dichas líneas y permite

entender la dinámica del océano, en regiones donde el agua gira en sentido horario (anticiclónico) o en sentido antihorario (ciclónico).

Con el fin de calcular la función corriente, se promediaron los campos de las componentes zonal y meridional de cada una de las tres capas (superficial, intermedia y fondo) para determinar su circulación media. La Figura 31 muestra los campos de la función corriente de la capa superficial. Se observa un comportamiento de circulación diferente en las dos estaciones climáticas. De diciembre a abril, la zona central y una parte importante del norte presentan predominantemente una circulación anticiclónica. Es de notar que la zona central del golfo experimenta giros intensos en febrero y marzo, y otros más débiles durante los meses de diciembre y abril. Cerca de la boca Tarena el flujo que viene del norte forma un giro ciclónico inducido probablemente por la forma del delta y la batimetría. En los primeros meses es muy débil y se incrementa en tamaño e intensidad a medida que avanza el año.

En Bahía Colombia, al igual que en la zona central es dominada por un giro anticiclónico con valores más altos en el centro de la bahía y con una distribución de líneas de corriente debidas probablemente a la batimetría de la zona. En el norte, la entrada de agua al estuario en superficie forma un giro ciclónico que se encuentra con el flujo central de salida y desvían el agua hacia el noreste.

Al analizar la temporada húmeda (mayo-noviembre), la circulación muestra inicialmente un pequeño giro ciclónico en Tarena que se intensifica y se divide en dos giros, uno restringido a la altura de la desembocadura el Roto, y otro al norte que se une con el giro ciclónico de la época seca y se convierte en anticiclónico y saliendo del golfo. A la altura de la boca Matuntugo también emerge un pequeño giro ciclónico que queda atrapado entre las circulaciones anticiclónicas central y de Bahía Colombia la cual es permanente en todos los meses del año.

Cabe destacar que en la zona de la desembocadura de El Roto, por la que el río Atrato descarga gran parte de su caudal (mayor al 60%), la salida del río induce la circulación anticiclónica e impide la fusión de los dos giros ciclónicos centrales (color azul). Estos giros experimentan su mayor intensificación en octubre, mientras que el giro inducido por el Roto se debilita. Esto sugiere que el Roto restringe en la mayor parte del año la entrada superficial de agua desde la zona central del golfo.

Figura 31. Capa superficial. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica

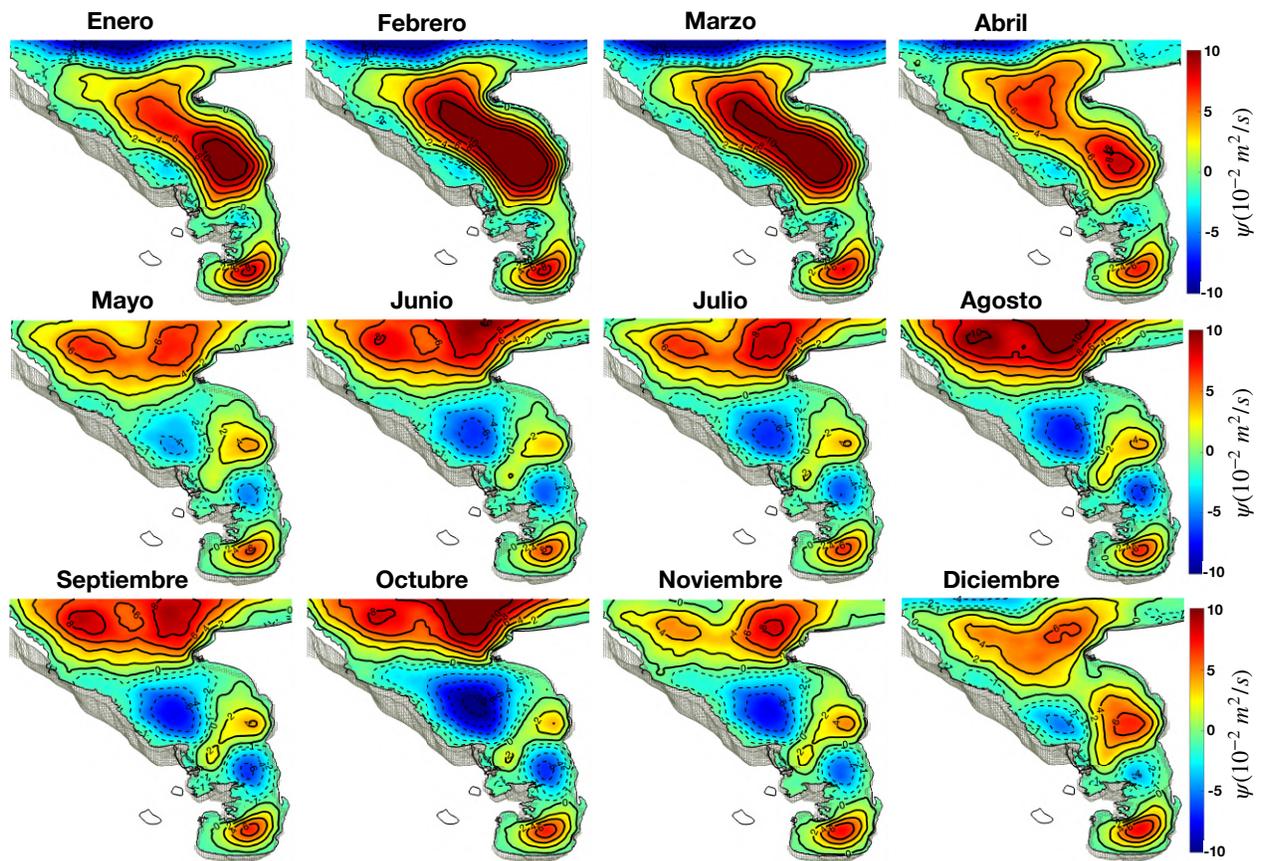
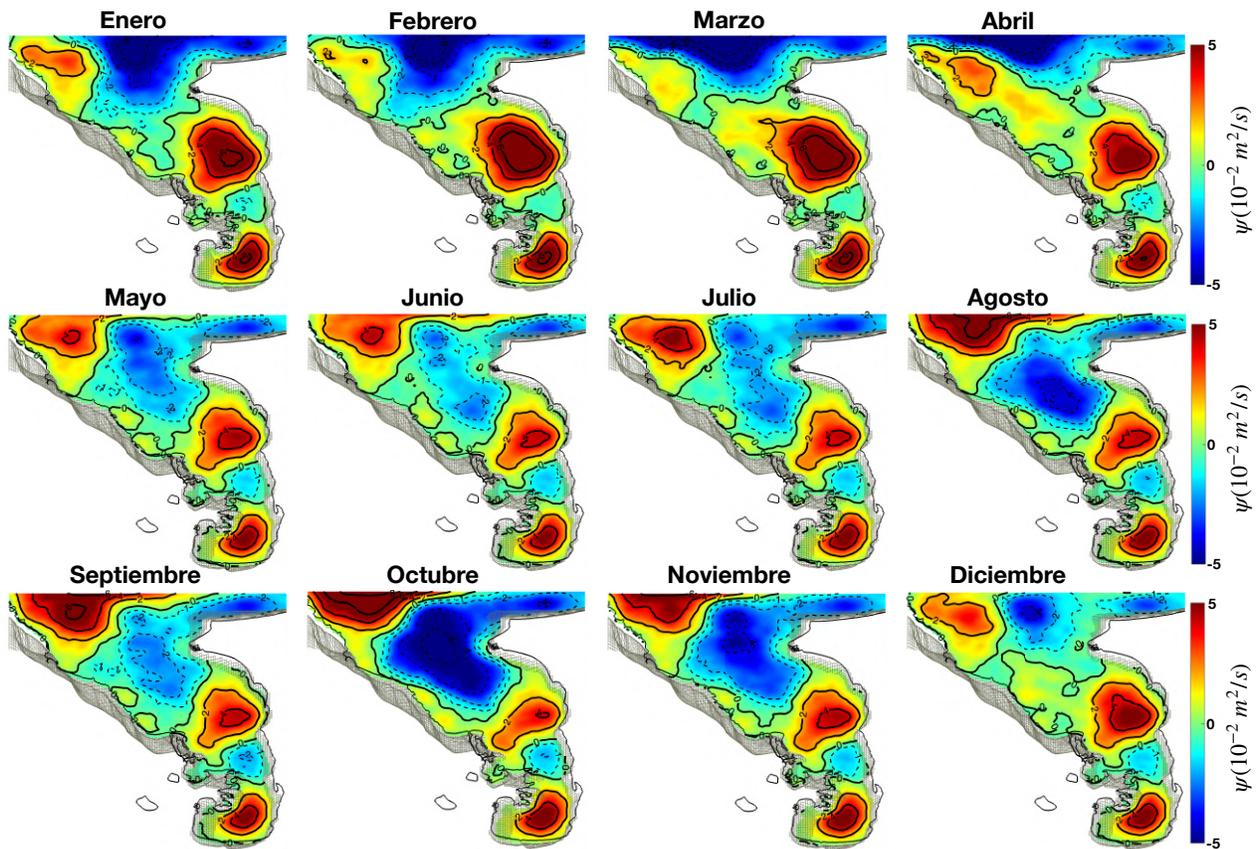


Figura 32 presenta a lo largo del año un patrón general, separando el golfo meridionalmente en 5 giros, tres de ellos anticiclónicos. Estos giros están situados en las partes sur, centro y norte del golfo (color rojo), mientras que los dos giros restantes son ciclónicos y se encuentran en la región norte y central del golfo (color azul). Durante los primeros cuatro meses del año, en la parte norte del golfo se observa una rotación ciclónica que establece una conexión con el Mar Caribe en gran parte de la sección transversal norte. Este giro puede facilitar el transporte de un volumen significativo de agua hacia el interior del golfo. Durante este período, el giro anticiclónico central es más pronunciado y de mayor dimensión en comparación con otros meses. Por el contrario, la circulación a la altura de la boca Matuntugo es relativamente débil y por lo tanto la circulación se mantiene constante a lo largo del año.

En la estación climática seca, al inicio el agua del Caribe ingresa de manera más efectiva al interior del golfo y ocupa gran parte de la zona central debilitando el giro central. Hacia el final de

la estación disminuye su flujo en la región norte, donde el giro anticiclónico del oeste se intensifica y ocupa gran parte de esa área por donde ahora sale el agua del golfo. Además, el giro ubicado a la altura de la boca Matuntugo se intensifica, lo que limita aún más el giro central. En general, los cambios dentro de esta capa en particular son mínimos, lo que resulta en un mayor grado de estabilidad a lo largo de las dos estaciones climáticas.

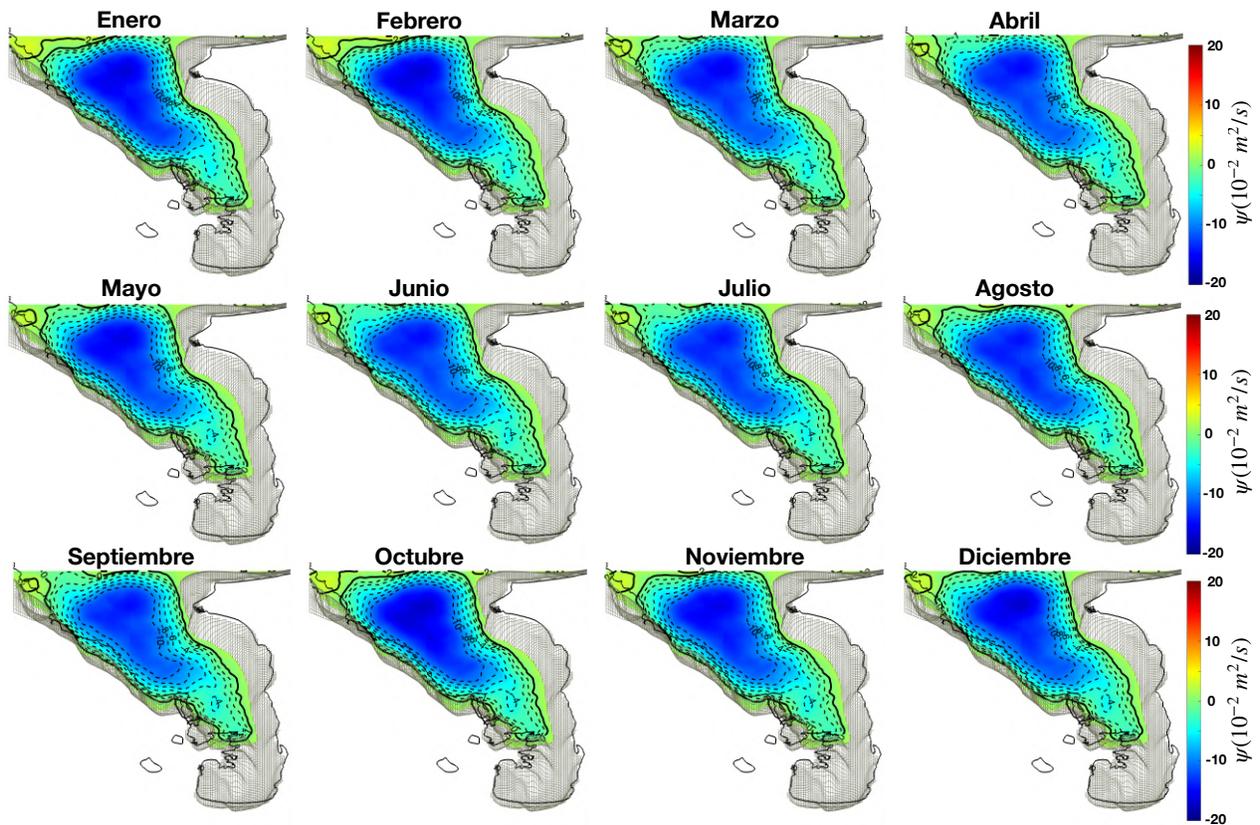
Figura 32. *Capa intermedia. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica*



Los resultados anteriores, sugieren que el impacto del río Atrato, y los otros ríos que desembocan en el golfo, en la capa intermedia es mínimo, lo que sugiere que la ubicación y forma de los giros que se encuentran dentro del golfo probablemente se deban a las restricciones de la línea de costa y batimétricas de la zona. Esta hipótesis se analizará con más detalle en la siguiente sección, en la que se realizará una simulación sin incluir el forzamiento de los ríos.

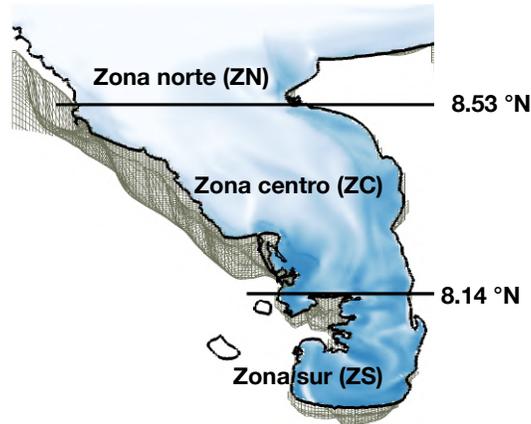
Finalmente, la capa profunda, en la cual por su batimetría somera se excluye a Bahía Colombia, permanece relativamente estable y no cambia de forma apreciable su estructura (giro ciclónico) a lo largo del año (Figura 33). En esta capa, la circulación se rige predominantemente por la batimetría, como lo indica la distribución de las líneas de corriente que siguen las isóbatas.

Figura 33. Capa de fondo. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual. Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica



Teniendo en cuenta los análisis realizados a la circulación a partir de la función corriente, se propone dividir espacialmente el golfo en tres zonas para los análisis posteriores (Figura 34). A estas zonas se denominarán Zona Norte (ZN), Zona Central (ZC) y Zona Sur (ZS). Esta división también tiene sentido considerando procesos físicos hasta ahora encontrados en el golfo. En este sentido, Toro *et al.* (2019), dividieron el golfo de Urabá en tres zonas (norte, centro y sur), con base en el análisis de series de tiempo y patrones espaciales de la magnitud y dirección del viento. Estos autores encontraron diferencias claras entre el comportamiento latitudinal del viento, lo que sugiere una modulación diferencial a la circulación oceánica en cada zona.

Figura 34. División del golfo en tres zonas: norte (ZN), central (ZC) y sur (ZS) de acuerdo a los análisis con la función corriente



4.3 Transporte promedio por capas

En estudios oceánicos, el transporte se considera como el volumen de agua que se mueve a través de un área específica dentro de un período de tiempo determinado. El transporte tiene unidades Sverdrup (Sv), lo que equivale a un millón de metros cúbicos por segundo ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). El objetivo es cuantificar el movimiento neto del agua que entra y sale del golfo en cada una de las capas representadas en la Figura 28.

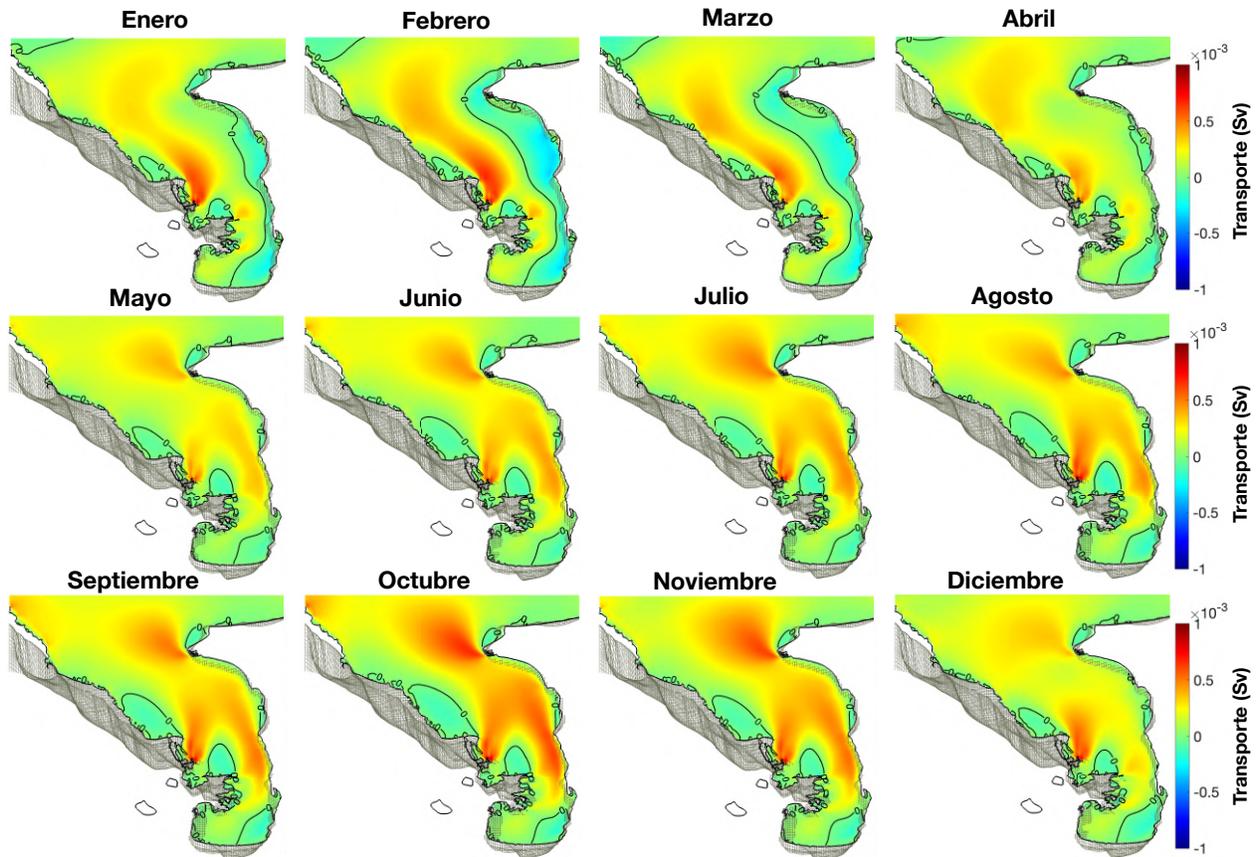
Para determinar el transporte en cada capa, calculamos los vectores de transporte ($h\vec{v}$). Estos vectores se definen como el producto del espesor de la capa (h) y la velocidad integrada sobre el espesor de la capa (\vec{v}). Posteriormente, se calcula la función de transporte promedio para cada mes del año utilizando este campo de vectores.

La figura 35 muestra el flujo de agua en dirección norte-sur para la capa superficial. Los resultados sugieren que el flujo de salida excede el flujo de entrada en toda el área del golfo. En concreto, durante los meses de octubre y noviembre, el transporte neto de agua hacia el norte supera los 2,0 Sv, mientras que los valores mínimos se observan en marzo y abril con 1,2 Sv y 1,4 Sv, respectivamente. Los transportes más altos hacia el sur se producen en febrero y marzo, alcanzando valores de 0,3 Sv y 0,2 Sv, respectivamente. Estos flujos entran predominantemente al golfo por el lado este.

La boca del Roto induce una cantidad importante de flujo, ya que su descarga en dirección noreste domina todo el flanco oeste durante la estación seca. Esto se traduce en importantes picos que varían a lo largo del año. De mayo a noviembre, la descarga del Atrato cubre casi todo el dominio del golfo, lo cual también puede estar influenciado por la dirección del viento. El

transporte se intensifica en octubre probablemente debido a la descarga de los ríos y a la dirección del viento. Por el contrario, de enero a marzo, el agua entra en el golfo por la costa este, donde la batimetría es poco profunda y el flujo de la capa superficial se alinea con la dirección del viento (norte-sur).

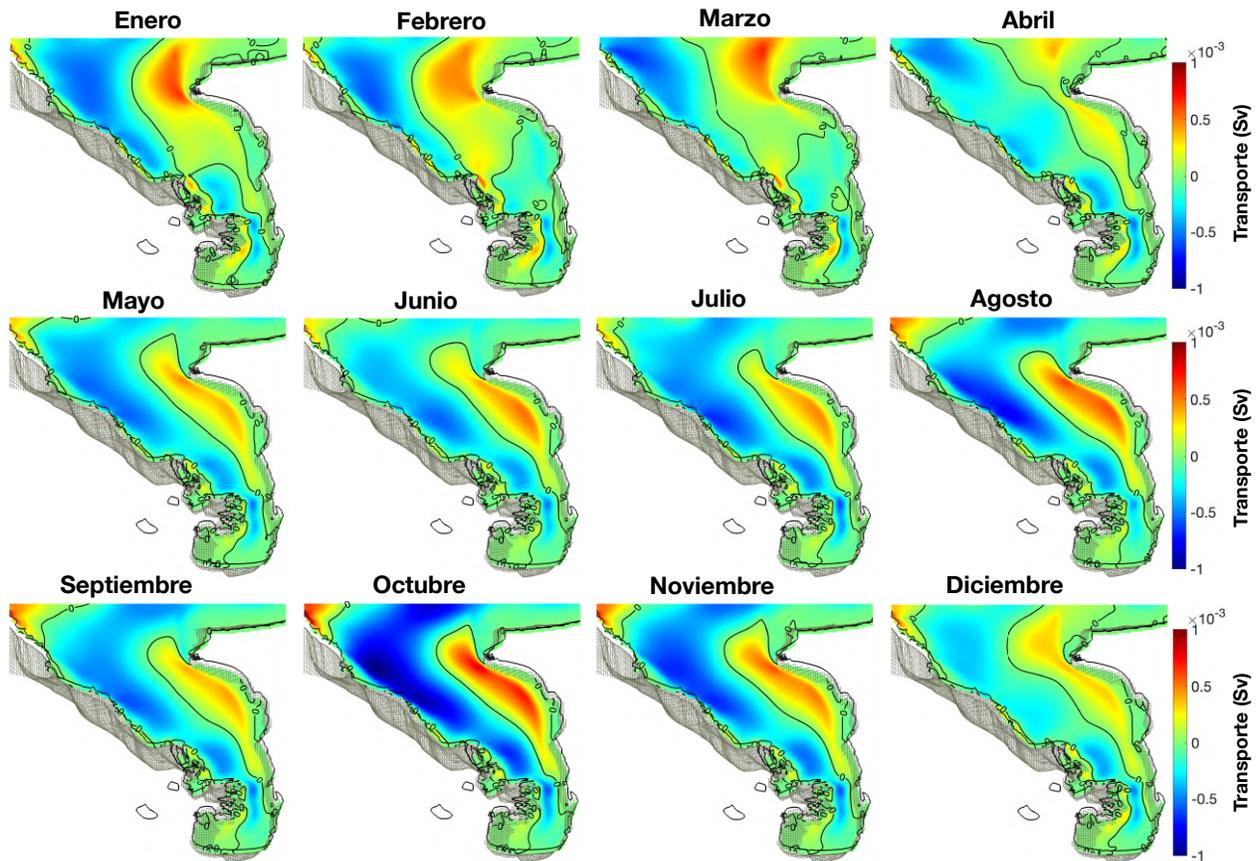
Figura 35. Capa superficial. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte)



En la capa intermedia, la entrada de agua al golfo se caracteriza por una circulación ciclónica que gira hacia el norte y que conecta con el Mar Caribe (Figura 36). Este patrón de circulación se traduce en transportes máximos de 2,4 Sv en todo el dominio del golfo para el mes octubre. Mientras que los transportes más bajos (0,8 Sv), se producen en el mes de diciembre, teniendo en cuenta que este es un mes de transición respecto a la dirección del viento. El máximo transporte de salida se produce en el mes de febrero, alcanzando los 0,7 Sv. En la estación seca, la zona de salida es mayor en comparación con la estación húmeda la cual está restringida a una pequeña sección en el este. Por último, el transporte hacia Bahía Colombia, se realiza

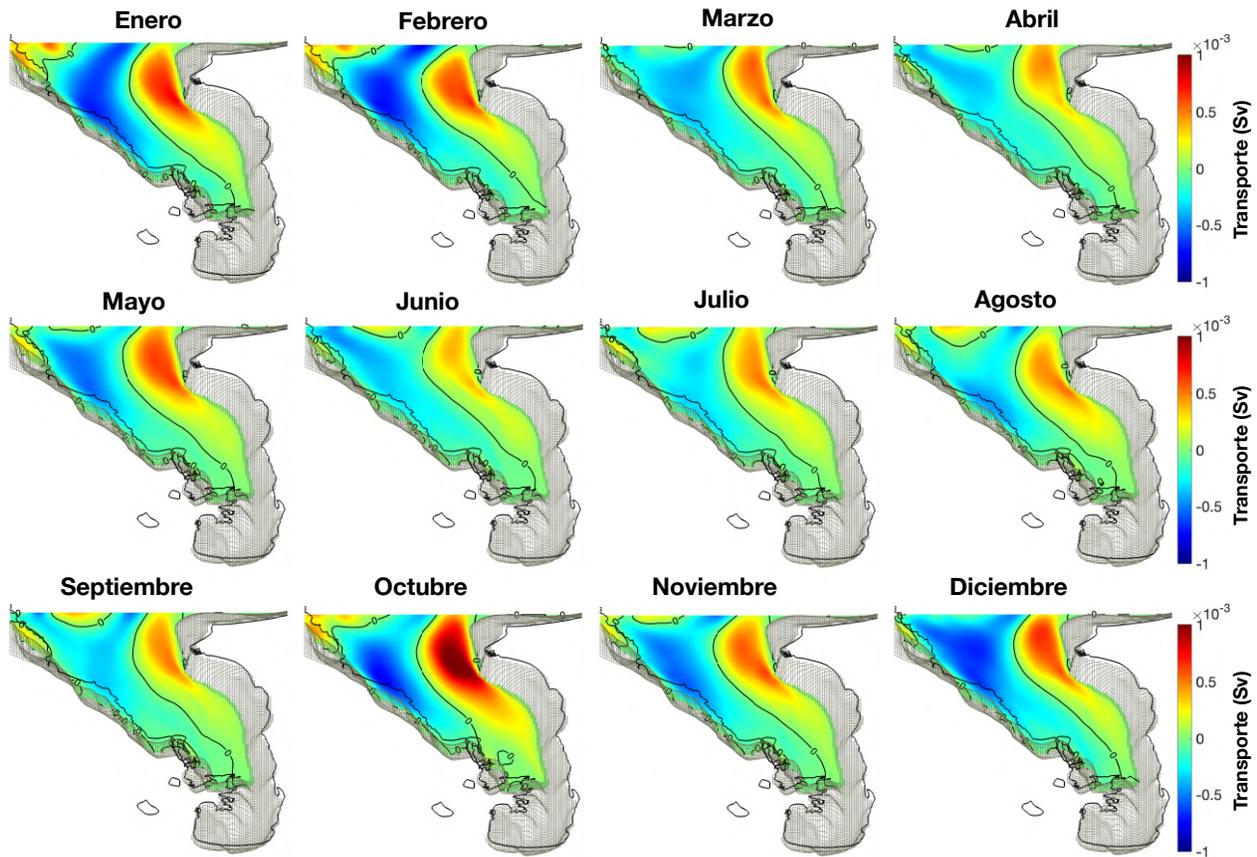
predominantemente a través de esta capa sobre el lado oeste, intensificándose en octubre y debilitándose en agosto.

Figura 36. Capa intermedia. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte)



El transporte en la capa profunda presenta una estructura consistente a lo largo de todo el año. La Figura 37 muestra que el agua entra principalmente por el noroeste y sale del golfo por el lado este. Esto es impulsado probablemente por el giro ciclónico antes descrito e influenciado por la batimetría. El movimiento neto máximo del agua hacia el sur en el mes de diciembre es 1,1 Sv, seguido de enero y febrero con valores máximos de 0,9 Sv. En octubre, todo el dominio experimenta el mayor flujo neto, con 1,0 Sv.

Figura 37. Capa de fondo. Transporte promedio mensual multianual. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte)



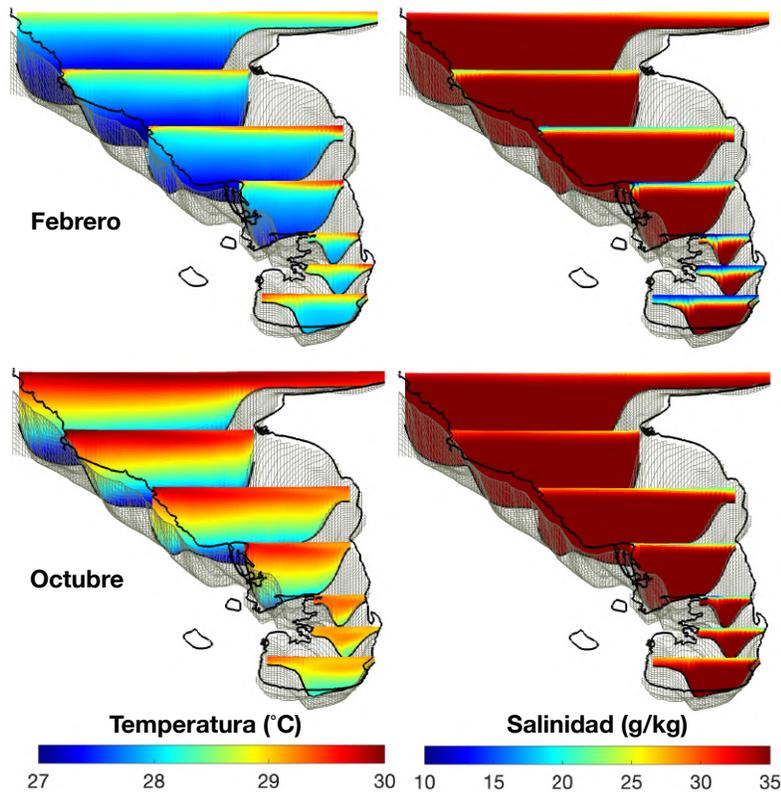
En términos del transporte Lonin y Vásquez (2005) a partir de resultados de modelos numéricos, sugieren que el flujo en las capas intermedia y profunda dependen de la corriente Panamá-Colombia. Esto coincide con lo encontrado en este estudio donde se observó como el giro del norte influencia de manera importante el intercambio con el mar Caribe.

El transporte de agua en diferentes capas del Golfo de Urabá, representa un avance significativo en la comprensión de los procesos de intercambio de agua entre este sistema costero complejo y el mar Caribe adyacente. Se logró revelar patrones detallados de transporte vertical y horizontal, así como su variabilidad estacional. La identificación de capas características con estructuras de circulación únicas, incluyendo giros ciclónicos y anticiclónicos. La simulación permitió cuantificar los flujos netos de entrada y salida de agua en cada nivel. Estos resultados sientan las bases para comprender los complejos procesos de renovación de masas de agua y el balance de masa en el GU, superando las limitaciones de estudios previos basados en mediciones in situ. La caracterización del transporte sienta las bases para futuras investigaciones en áreas

cruciales como el transporte de sedimentos, la dispersión de contaminantes y los estudios de calidad de agua en este sistema costero.

4.4 Patrones superficiales y verticales de salinidad y temperatura

Figura 38. Estructura vertical de temperatura (izq) y la salinidad (der) en los meses de febrero (primera fila) y octubre (segunda fila)



La Figura 38 muestra los patrones de salinidad y temperatura en la columna de agua en varias secciones transversales para los dos meses representativos de las dos épocas climáticas. La diferencia de temperatura para los meses es notoria, ya que durante la estación seca, la capa superficial, tiene temperaturas más altas en comparación con el resto de la columna de agua. Por el contrario, en la estación húmeda, la capa superficial tiene una temperatura más alta en un intervalo de profundidad mayor. De acuerdo con Montoya (2010), la temperatura media del mar oscila entre 26,5 °C y 31,5 °C, la radiación solar media ronda los 800 W/m² y los valores de humedad fluctúan entre el 70% y el 95%. De acuerdo con estos autores, el aumento del vapor de agua impide el escape del calor irradiado desde la superficie del mar, lo que provoca una

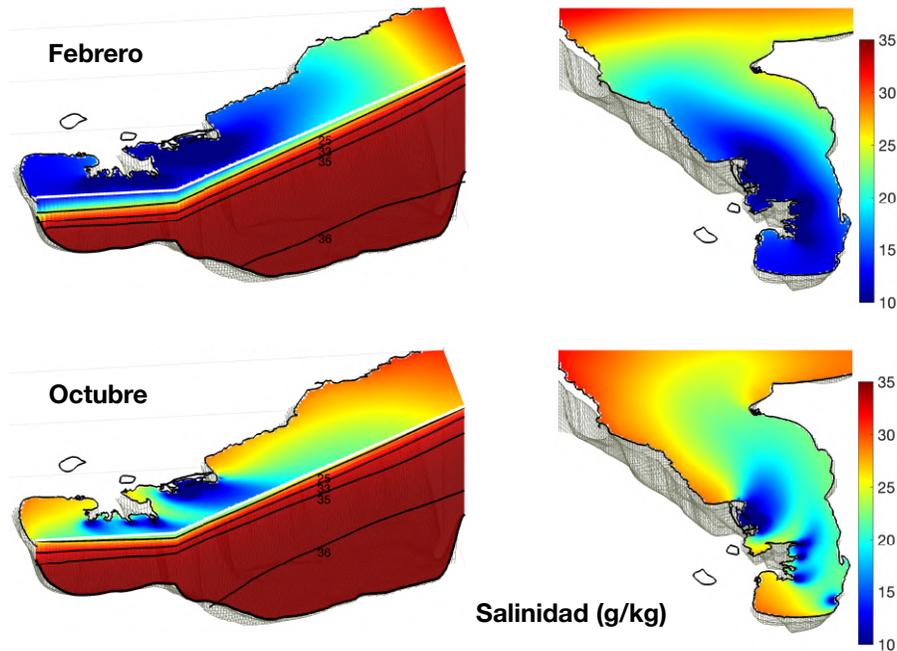
acumulación de calor. Por el contrario, el intercambio de calor se ve facilitado por la turbulencia y la mezcla inducidas por la acción del viento, la advección horizontal y la mezcla vertical. Estos mecanismos permiten que exista una mezcla más efectiva de la capa superficial del océano, lo que garantiza una distribución más uniforme del calor en todo el interior del golfo. Por lo tanto estos mecanismos explican porque las temperaturas superficiales son más bajas en febrero que en octubre.

En la Figura 38, también se muestra el patrón de salinidad vertical (columna derecha). Cabe destacar que en el mes de febrero se puede observar una capa gruesa de agua dulce en la superficie, particularmente en la zona sur entre el delta y Bahía Colombia. Chevillot *et al.* (1993) y Lonin y Vásquez (2005) explican que este fenómeno ocurre debido al confinamiento de las aguas dulces al interior del golfo debido a la dirección de los vientos alisios del norte, los cuales se alinean con el patrón de corriente superficial (Figura 29). Montoya (2010), basándose en los datos medidos en varias campañas, informó de salinidades entre 0 y 36 g/kg, con una estratificación significativa hasta una profundidad de 2 a 4 m.

De acuerdo con los resultados, el comportamiento de la termoclina podría estar controlado por la haloclina, que atrapa el calentamiento de la radiación solar en las capas superficiales. Este mecanismo podría explicar la disparidad en las temperaturas verticales observada durante las diferentes estaciones climáticas. En este sentido y de acuerdo con Montoya (2010), en el golfo es fundamental el papel de la estratificación salina en la formación de los gradientes térmicos y la dinámica térmica del golfo, ya que dificulta su mezcla vertical.

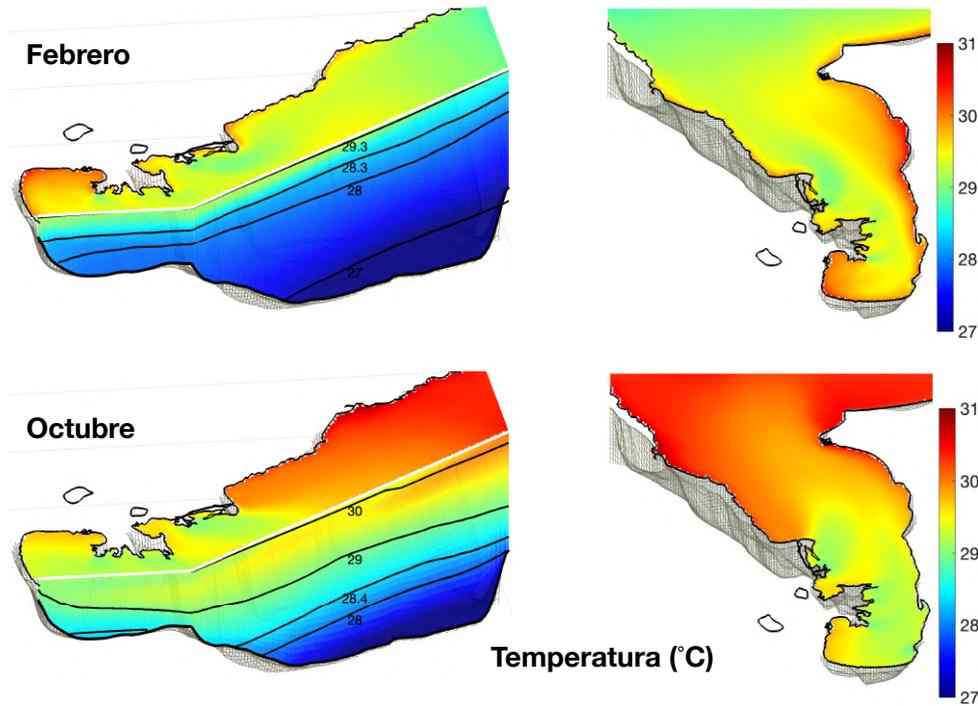
La Figura 39 presenta, desde otra perspectiva, el campo multianual de la salinidad en la superficie y a lo largo de un transecto vertical sur-norte. A nivel espacial durante el mes de febrero, se observan gradientes horizontales significativos en la región norte del golfo, mientras que la parte sur, que presentan valores similares y bajos (menores a 10 g/kg) en la superficie durante la estación seca. Además, el agua dulce queda confinado a la zona sur y es dispersada como consecuencia de los efectos inducidos por el viento. En la sección del norte, los valores de salinidad oscilan entre 25 y 35 g/kg. Por el contrario, en octubre, los valores bajos de salinidad se concentran en las desembocaduras de los ríos, y con la dirección del viento en dirección sur-norte provoca un aumento de la salinidad en una parte considerable del golfo.

Figura 39. Salinidad. Estructura vertical (izq). Campo superficial promedio (der) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo)



La temperatura, representada en la Figura 40, tiene un intervalo limitado en la superficie, ya que varía entre 29 °C y 31 °C. En febrero, hay un mayor aumento de la temperatura en las regiones costeras, mientras que, en octubre, se observa un gradiente uniforme que supera los 29,5 °C en la parte central y norte del golfo. Por el contrario, en la zona sur, la temperatura es un poco menor y al parecer está regulada por la descarga de los ríos. En la columna de agua, la temperatura oscila entre 26,5 °C y 31 °C en ambas estaciones, y la termoclina más profunda se produce en octubre. Esto coincide con lo presentado por Montoya (2010), el cual mostró que la variabilidad de la temperatura está influenciada principalmente por el calentamiento diurno en la capa superficial (en profundidades inferiores a 2 m), mientras que a mayores profundidades se detectan fluctuaciones mínimas, con valores casi homogéneos que oscilan entre 27 °C y 30 °C. Durante la temporada de lluvias, este autor muestra un mayor intervalo de temperatura, lo cual coincide con lo encontrado en esta simulación.

Figura 40. Temperatura. Estructura vertical (izq). Campo superficial promedio (der) en los meses de febrero (arriba) y octubre (abajo)



La variabilidad estacional observada en la distribución de la salinidad y la temperatura puede tener implicaciones para la gestión de actividades como la acuicultura, la pesca y el turismo. Las fluctuaciones en estas variables ambientales pueden afectar el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de las especies cultivadas o explotadas, así como la calidad del agua para fines recreativos. Esto puede tener un impacto en la biodiversidad y la estructura de las comunidades biológicas en el golfo. Además, la estratificación salina puede influir en los patrones de circulación y mezcla vertical, lo que a su vez puede afectar el transporte y la disponibilidad de nutrientes y oxígeno en la columna de agua (Okolodkov, Yuri B., *et al.* 2014).

Adicionalmente, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para calibrar y validar modelos numéricos más complejos, que incorporen procesos biogeoquímicos y ecológicos. Estos modelos serían herramientas valiosas para evaluar escenarios futuros, incluyendo los efectos del cambio climático y las actividades antrópicas, y así informar la toma de decisiones sobre estrategias de adaptación y mitigación.

5. Comparación de un escenario referencia y escenarios con diferentes forzamientos

Las siguientes secciones presentan un análisis comparativo de la influencia relativa de los principales forzamientos físicos que controlan la hidrodinámica del GU. Se evaluaron escenarios numéricos en los que cada uno de estos forzamientos fue desactivado individualmente, permitiendo cuantificar su impacto respecto a un escenario de referencia que incluye todos los forzamientos. Este enfoque brinda una visión integral de los mecanismos dominantes que modulan los patrones de circulación en este complejo sistema estuarino. Adicionalmente, se examinan los efectos de la variabilidad climática interanual (años Niño, Niña y neutros) sobre la dinámica del golfo, revelando cómo los fenómenos climáticos de gran escala influyen en los procesos hidrodinámicos locales de este importante sistema costero del Caribe suroccidental.

A continuación, la descripción de los escenarios:

1. **Escenario de referencia:** Este escenario corresponde a la simulación con las condiciones atmosféricas (vientos, precipitación, humedad), la radiación solar, onda de marea y la descarga de los ríos Atrato y León.
2. **Escenario sin forzamiento de marea:** se aplicaron los mismos factores de forzamiento que en el escenario de referencia, excepto el forzamiento por onda de marea.
3. **Escenario sin forzamiento del viento:** se utilizaron los mismos forzadores que en el escenario de referencia, excepto el forzamiento por viento. Con este fin se multiplico el estrés sobre la superficie del océano por un factor de 10^{-9} . No se hizo cero para evitar divergencias en los cálculos numéricos.
4. **Escenario sin forzamiento de descarga de los ríos:** se emplearon los mismos factores de forzamiento que en el escenario de referencia, con la excepción de la descarga de los ríos Atrato y León.

En adelante, seguiremos considerando los meses de febrero y octubre como representativos de las dos estaciones climáticas predominantes en el golfo de Urabá.

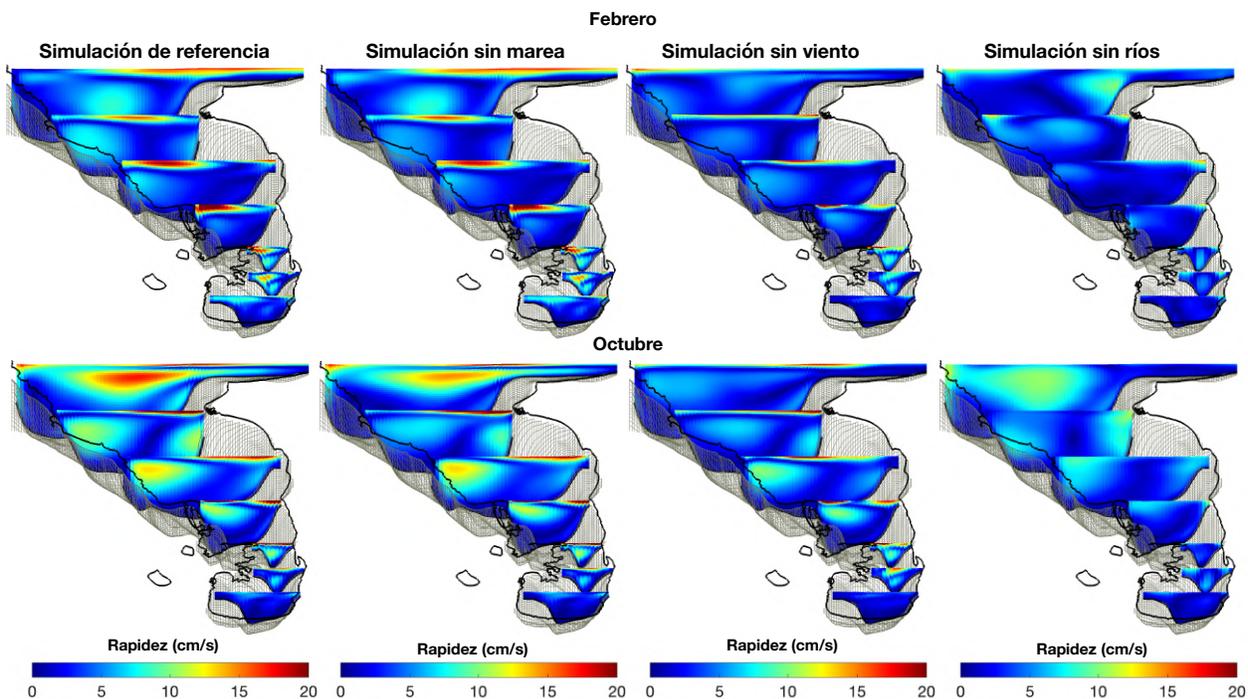
5.1 Comparación de la magnitud y dirección de la corriente con los diferentes escenarios

La Figura 41 presenta cortes verticales a lo largo del golfo en donde se representa la magnitud de la velocidad media multianual de la corriente para los meses de febrero y octubre en los diferentes escenarios mencionados. Los resultados sugieren que al comparar la simulación de

referencia y sin marea, existe una diferencia mínima. La única diferencia notable es una ligera reducción de la magnitud de la corriente en los transectos del norte del golfo durante ambos meses, mientras que la zona sur permanece relativamente inalterada.

La tercera columna, correspondiente a la simulación sin viento, muestra un contraste más evidente con el escenario de referencia. En febrero, la capa superficial presenta un espesor reducido y magnitudes más bajas en la zona sur a lo largo de una gran parte de la columna de agua. Además, desde la desembocadura de la boca El Roto hacia el norte, las corrientes se reducen considerablemente y llegan a valores menores a 10 cm/s. Por el contrario, en octubre, no se observa ningún cambio significativo en la región sur. Sin embargo, se observa una alteración notable en los tres últimos transectos del norte, particularmente en las capas profundas de los lados este y oeste. Además, en esta zona, desaparece la capa intermedia que era altamente energética en la simulación de referencia.

Figura 41. Magnitud de las corrientes mensual multianual al interior del golfo de Urabá. Meses de febrero (arriba) y octubre (abajo). Escenarios simulados de izquierda a derecha: Referencia, sin marea, sin viento, sin ríos



En la cuarta columna, que representa el escenario sin ríos, los cambios se hacen aún más pronunciados en comparación con la simulación estándar. La capa superficial de agua dulce que

presenta las mayores velocidades desaparece por completo durante ambos meses. Además, la capa intermedia experimenta una disminución en la magnitud de la corriente. En febrero, se alcanzan velocidades superiores a 10 cm/s cerca de la costa dentro de una capa muy delgada, mientras que, en octubre, solo la zona norte alcanza valores cercanos a los 10 cm/s.

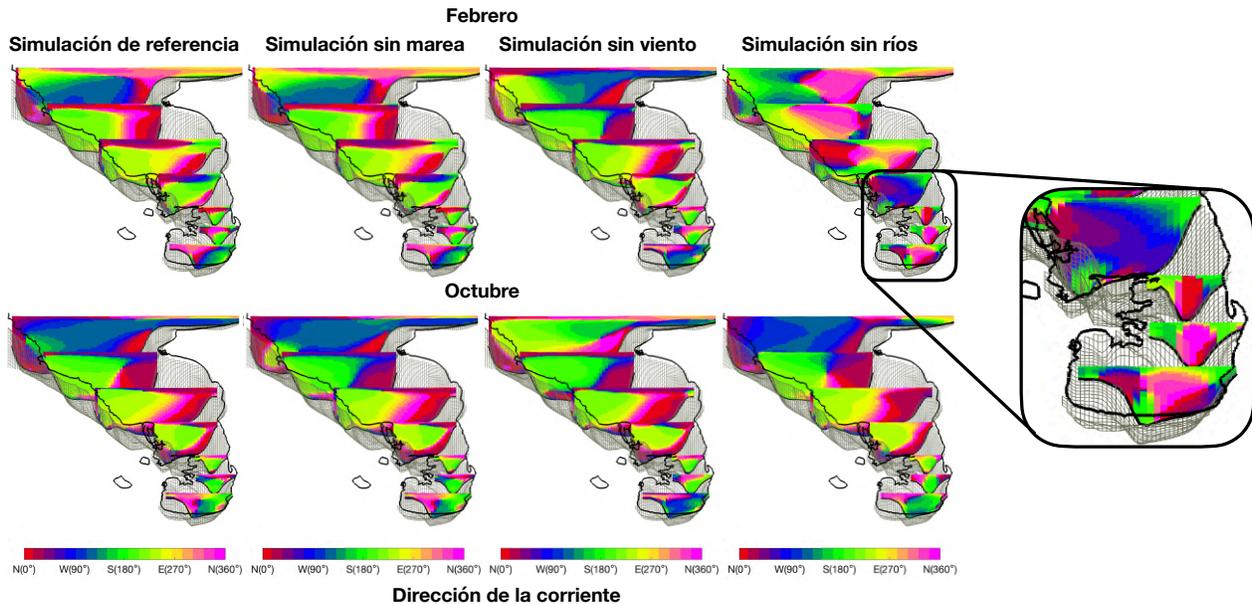
Según García *et al.* (2010), existe una notable disparidad en la magnitud superficial de la corriente en los dos períodos climáticos del golfo debido a la intensidad del viento. Por ejemplo, durante la estación húmeda la pluma del río Atrato fluye al norte del Golfo por el lado este, lo que coincide con la dirección del viento predominante. Esto contribuye a aumentar el valor de la magnitud de la corriente en ese sector (lo cual coincide con la Figura 41 para el mes de octubre). Por el contrario, durante la estación seca, el lado oeste presenta las velocidades superficiales más altas (tal como se registra en la misma figura para el mes de febrero).

La Figura 42 muestra una representación de las direcciones de corriente en el golfo de Urabá a lo largo de varios transectos este-oeste. Al igual que en los análisis anteriores, la simulación sin la onda de marea para ambas estaciones muestran cambios mínimos respecto al escenario de referencia, que solo se notan ligeramente en la zona norte.

Por otro lado, cuando se suprime el viento, durante la estación seca la capa superficial que había sido empujada hacia la parte sur del golfo por el lado oriental desaparece, lo que provoca la aparición de un flujo superficial hacia el norte. En la región norte, el área transversal del flujo de entrada (color verde) se amplía, y esto se contrarresta con un aumento en el área central del flujo de salida (colores rojo y magenta). En la estación húmeda, los patrones de entrada y salida del agua en el golfo siguen siendo muy similares a los del caso de referencia, con la única diferencia de que se produce un cambio de dirección de la corriente de aproximadamente 90° (de oeste a sur) en la zona norte del golfo.

Los resultados muestran como el viento ejerce un forzamiento sustancial sobre la circulación del golfo. Es evidente que, en su ausencia, la magnitud y la dirección de la capa superficial se reducen y cambian. De acuerdo con Chevillot *et al.* (1993), durante la estación seca los vientos del norte y/o noreste son particularmente intensos y confinan las aguas del río en el interior del golfo. Esto podría explicar el patrón observado en el escenario sin ríos, donde el viento se convierte en el forzamiento dominante y aumenta el nivel del mar en el sur.

Figura 42. Dirección de las corrientes mensual multianual al interior del golfo de Urabá. Meses de febrero (arriba) y octubre (abajo). Escenarios simulados de izquierda a derecha: Referencia, sin marea, sin viento, sin ríos



El escenario final, que excluye el caudal de los ríos, modifica significativamente toda la estructura de circulación del golfo durante la estación seca. En particular, hay una inversión del flujo en la zona sur (sección ampliada, Figura 42). En todos los demás escenarios, el flujo entra por la parte profunda y más estrecha del golfo y fluye hacia el norte por superficie. Sin embargo, en ausencia de ríos, la salida de agua en bahía Colombia se desplaza de manera vertical a través de la parte central de la sección y entra por los lados este y oeste. Esto sugiere que el río actúa como un «tapón» para la zona de bahía Colombia que mantiene una circulación relativamente estable entrando por las capas inferiores y saliendo por la capa superficial. Además, en ausencia del «tapón» que proporciona el río, los demás forzamientos hacen que el agua fluya hacia afuera (Figura 42). Este cambio de dirección de la corriente en la zona sur coincide con el cambio de dirección del viento que se produce en los meses de abril y diciembre.

En este mismo escenario, las zonas del centro y del norte también muestran alteraciones en la inversión de dirección en la superficie y la capa intermedia, mientras que la capa de fondo experimenta cambios mínimos. Un ejemplo de ello puede verse en la capa intermedia del lado occidental, donde el agua sale hacia el norte (color rojo). Por el contrario, la simulación de referencia muestra una dirección hacia el sur. En la estación húmeda la dirección de la corriente en la capa de fondo sigue siendo relativamente uniforme en comparación con el escenario de

referencia. Sin embargo, la capa superficial muestra un flujo de salida dirigido a lo largo de la columna de agua en la parte occidental, mientras que se observa otro flujo de entrada a través de la sección oriental. Varios autores han investigado la influencia de las descargas fluviales en el mar y han mostrado como estas descargas afectan a los patrones de circulación local (Usles *et al.*, 2005, Simionato *et al.*, 2004). Es de notar que, en nuestro caso, el escenario sin la presencia de los ríos indican que los efectos no se limitan a las áreas locales, sino que se extienden por todo el golfo, afectando la circulación tanto en la superficie como en las capas más profundas. Además, cuando el río está presente, actúa como una barrera que impide la inversión de la corriente en la región sur durante la estación seca.

Finalmente, y con base en las observaciones antes analizadas, los resultados sugieren que la marea tiene un impacto limitado en los campos de las corrientes del interior del golfo, particularmente en la región sur. Sin embargo, en el norte, el efecto de la marea se hace un poco más pronunciado. Este hallazgo concuerda con los informes de Barranco *et al.* (2021) y Montoya (2010), que sugieren que la marea induce oscilaciones en la posición del frente de agua dulce, como lo indican las mediciones de salinidad realizadas a diferentes horas.

5.2 Comparación de la circulación en los diferentes escenarios por medio de la función corriente

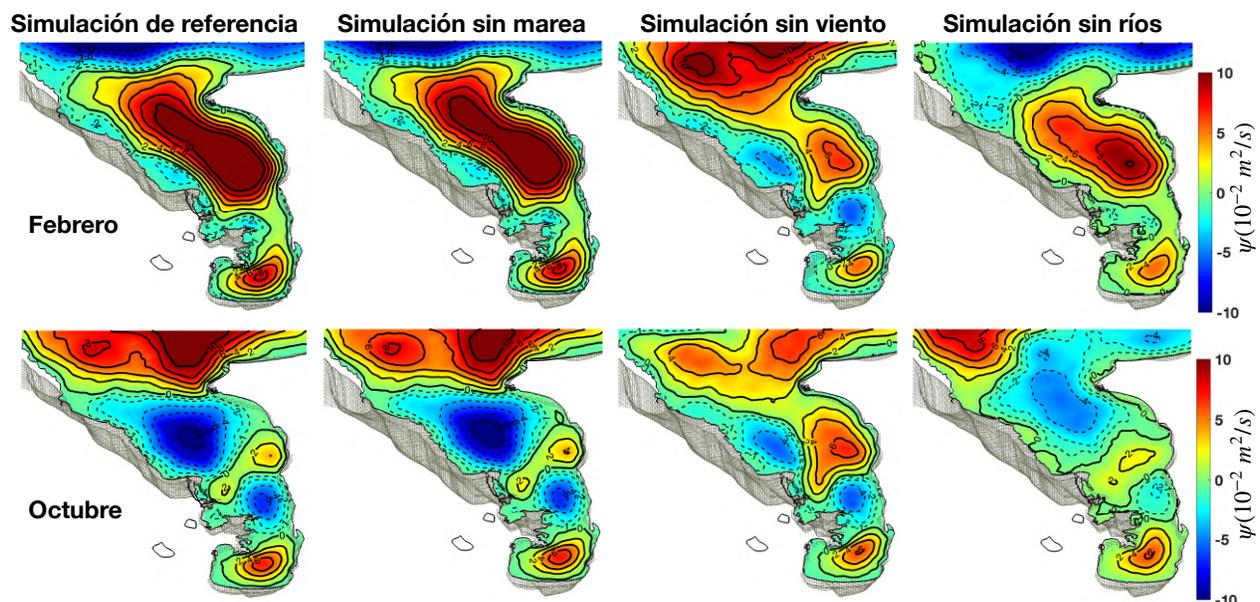
Con el fin de realizar un análisis de las estructuras de circulación en los diferentes escenarios y determinar las diferencias entre cada uno de ellos, se usó la función de corriente. En estos análisis se conservan los valores batimétricos iniciales, excluyendo así posibles diferencias atribuibles a la forma del fondo en los escenarios antes mencionados.

La primera columna de la Figura 43 presenta la función corriente en la capa superficial para los meses de febrero y octubre, específicamente para el caso de referencia. La segunda columna, corresponde a un escenario sin marea y se puede observar como las diferencias con la simulación de referencia son pocas, de hecho, sus comportamientos hidrodinámicos parecen similares. Por otro lado, cuando no hay viento, el comportamiento de la circulación en ambas estaciones meteorológicas solo es diferente en la zona norte. Es así, como en el mes de febrero, el giro ciclónico hacia el norte que conecta con el Mar Caribe desaparece y, en cambio, se une con el giro anticiclónico en la zona central del golfo. Sin embargo, esa fusión se reduce en octubre. Este resultado puede explicarse con la ausencia del esfuerzo del viento, ya que en el segundo mes del

año se ve contrarrestada por la descarga del río Atrato. Es así como el flujo del río se extiende hasta la parte norte, donde se conecta con el mar abierto.

Por otro lado, el giro en bahía Colombia se debilita, mientras que los dos giros ciclónicos se intensifican en las cercanías de las desembocaduras de las bocas Matuntugo y Tarena. En cuanto al mes de octubre, se observa un comportamiento similar al de febrero. De hecho, este sería el patrón general para todos los meses en los que no se tenga en cuenta el viento. Esto es de esperar ya que el viento es el forzamiento que determina las mayores diferencias en la circulación superficial en las dos estaciones climáticas.

Figura 43. Capa superficial. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual para los diferentes escenarios simulados en los meses de febrero (fila 1) y octubre (fila 2). Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica



El escenario sin los ríos (Figura 43, columna derecha) en el mes de febrero muestra que la circulación en la parte central se reduce tanto en su tamaño como en su intensidad. Este fenómeno puede atribuirse a la ausencia de ríos, ya que el agua de bahía Colombia fluye por la parte central y de manera vertical (Figura 42). En consecuencia, este flujo permite que el agua fluya hacia el norte y el oeste, mientras que el viento fuerza el agua superficial hacia el sur. La convergencia de estos dos cuerpos de agua opuestos provoca la rotación observada. Otro factor que contribuye a este fenómeno es la constricción que sufre el Golfo en su región central. Como resultado, parte del

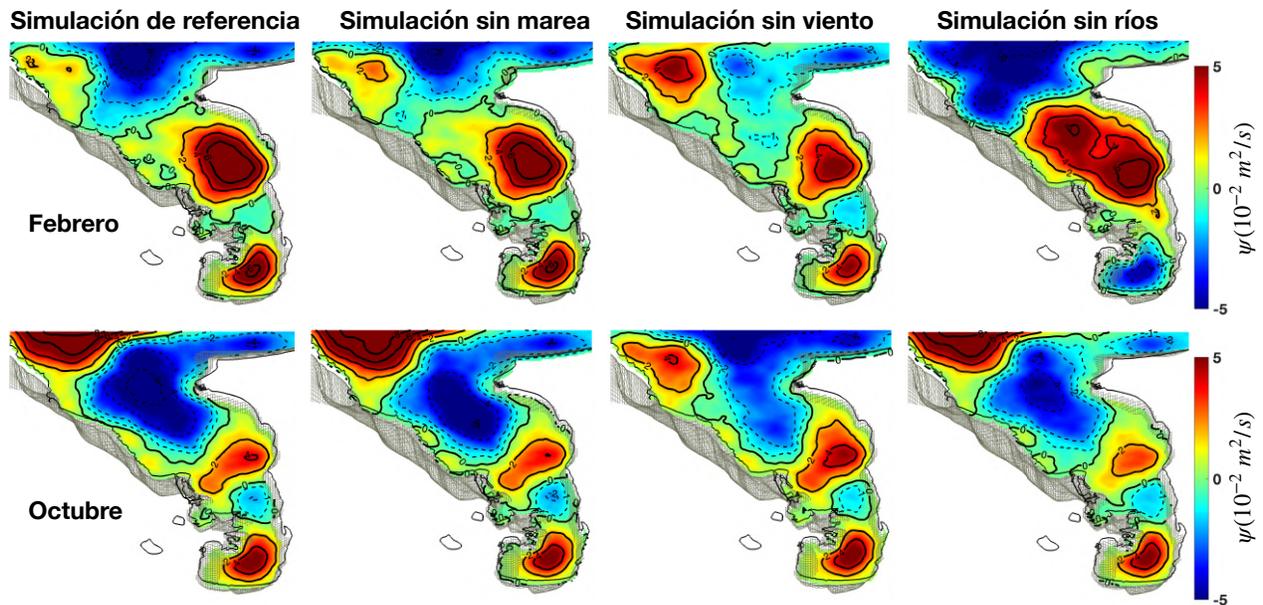
agua de la zona central fluye hacia el sur, mientras que el resto se ve obligada a desviarse hacia el noroeste. Por lo tanto, el giro contribuye con la salida de agua superficial del golfo. El cambio de la circulación en el mes de octubre es más notoria en la zona centro-norte. En esta región, el giro ciclónico central que se muestra en la simulación de referencia, en el escenario sin ríos se expande y establece una conexión con la zona norte y el mar Caribe, lo que facilitaría el intercambio de agua. Por otro lado, el dipolo en la zona sur permanece inalterado, aunque su intensidad disminuye.

La Figura 44 muestra la función de corriente para la capa intermedia. En ausencia de la marea (columna 2), los cambios son mínimos y se observan diferencias ligeras principalmente a la zona centro-norte. El comportamiento en ambos escenarios y épocas pueden atribuirse a la interacción entre la onda de marea y la batimetría, que da lugar a corrientes y rotaciones residuales (Park y Wang, 1994). Estos giros residuales podrían contrarrestar o reforzar las rotaciones inducidas por el viento o la descarga de los ríos.

Al considerar el escenario sin el viento (columna 3), se puede observar en el mes de febrero que el giro central anticiclónico se reduce espacialmente y disminuye su intensidad. Al mismo tiempo, se intensifica el giro anticiclónico en el extremo noroeste, lo que al parecer desplaza el giro ciclónico hacia el norte. Por el contrario, durante el mes de octubre, el giro central anticiclónico se intensifica y aumenta sus dimensiones, mientras que el giro al noroccidente se debilita. En consecuencia, el giro ciclónico septentrional, que está en el lado noreste, ahora abarca toda la entrada norte. Una vez más, el comportamiento del golfo en esta capa, sin tener en cuenta el esfuerzo del viento, se mantiene idéntica a la capa superficial. En ambos meses, el principal forzamiento que afecta la magnitud de la corriente es la descarga de los ríos.

Al considerar el escenario sin ríos (columna 4) durante la estación seca, se muestra un cambio significativo. En concreto, se observa que el golfo se divide en tres giros. Dos de estos giros ciclónicos, uno situado al sur y el otro al norte y un giro anticiclónico que abarca la región central del golfo. Este caso en particular pone de relieve el hecho de que la presencia de los ríos no garantizan la presencia de la circulación ciclónica dentro de esta zona. Al parecer, la influencia que ejercen la descarga de los ríos se manifiestan por la fricción que generan entre las capas, lo que permite controlar el espesor del giro de manera que no sobrepase la desembocadura de la boca Matuntugo. Sin embargo, se nota que, en este caso, el giro se extiende hacia abajo, hasta alcanzar el punto de constricción.

Figura 44. Capa intermedia. Función corriente calculada a partir de los campos de velocidad promedio multianual para los diferentes escenarios simulados en los meses de febrero (fila 1) y octubre (fila 2). Líneas continuas indica circulación anticiclónica y líneas punteadas circulación ciclónica



En el mismo escenario, sin ríos, la alteración que sufre la rotación en bahía Colombia durante el mes de febrero se puede atribuir a la presencia de agua que se acumula gradualmente en la región sur del golfo, específicamente en la superficie. Esta acumulación de agua forma un gradiente de presión barotrópico, que está directamente asociado al desnivel del mar provocado por la influencia del viento. Como resultado, este gradiente de presión ejerce una fuerza que afecta el flujo de agua dentro de la bahía de Colombia, lo que provoca que se invierta su dirección en la capa intermedia. Esta inversión sirve como mecanismo para compensar o equilibrar la entrada y salida de agua al golfo. En consecuencia, el efecto general de estos procesos dinámicos es que el resultado neto del flujo dentro de la bahía es aproximadamente cero.

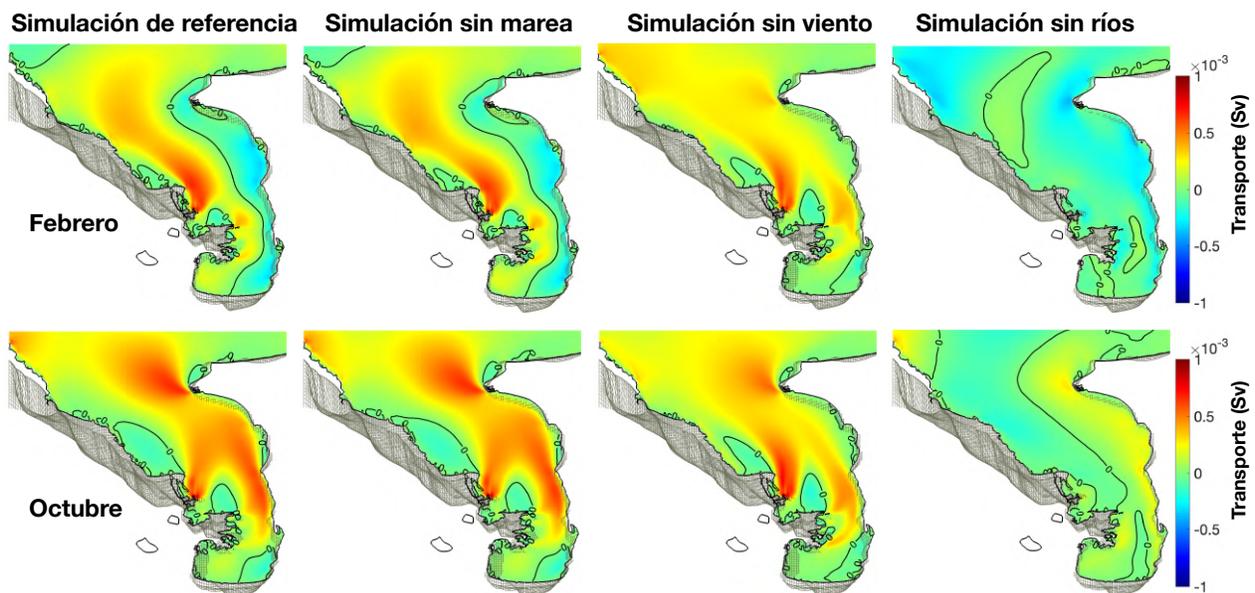
En estos escenarios, es evidente que la circulación se puede explicar por la forma de la batimetría, lo cual concuerda con lo hallado por Tonini y Palma (2009). Estos autores indican que la interacción no lineal entre la batimetría y la corriente, es un mecanismo fundamental en la formación de los giros y la circulación residual. Además, que las áreas de constricción batimétrica contribuyen a la variabilidad hidrodinámica general. Estudios anteriores realizados por Valle-Levinson *et al.* (2003) han demostrado los efectos de la batimetría, la fricción y la rotación en el

intercambio estuario-océano y su papel en la modificación de la circulación longitudinal y transversal.

5.3 Comparación del transporte en los diferentes escenarios

La Figura 45 muestra el transporte que se produce en la capa superficial del golfo para cada uno de los escenarios mencionados. Vale la pena señalar que la influencia de la marea en la circulación es mínima en este contexto, por lo que nos centraremos en el análisis de los dos últimos escenarios. Una vez más, al considerar la ausencia de viento (columna 3), observamos patrones similares en el transporte en ambas estaciones. Se observa como la salida del caudal del río por superficie abarca una parte importante del dominio, acompañada de un ingreso limitado de agua hacia el sur del golfo. Sin embargo, es importante destacar que durante el mes de febrero desaparece el flujo de la margen derecha, lugar por el cual entra el flujo en condiciones normales. Este resultado sugiere que la dinámica de esta zona durante esta época del año está dominada por el viento.

Figura 45. Capa superficial. Transporte promedio mensual multianual para los meses de febrero y octubre. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte)

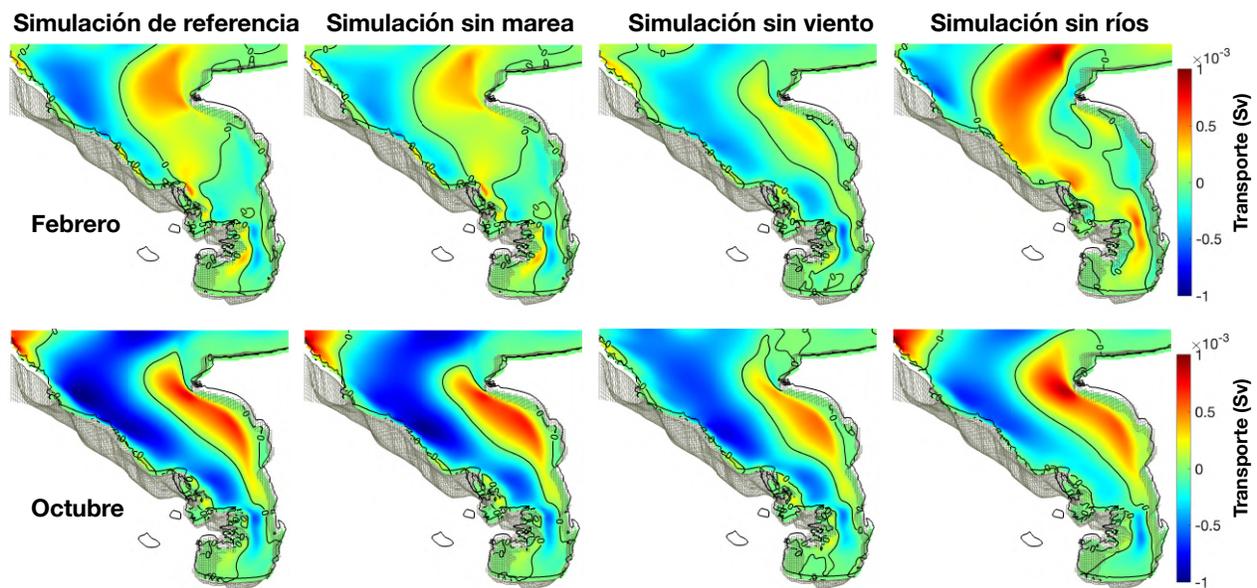


En ausencia del caudal de los ríos (columna 4), el transporte en esta capa es notablemente bajo. Este resultado era de esperarse debido al balance de masa que debe darse en el estuario. En

este escenario, el suministro de agua dulce proviene de las precipitaciones, que son limitadas en comparación con la descarga de los ríos. La fuerza del viento durante el mes de febrero provoca una entrada relativamente débil por los lados este y noroeste, así como una pequeña corriente de salida por la parte central. Por el contrario, en octubre, hay una salida desde el este y una entrada desde el oeste. En consecuencia, el proceso de renovación del agua en bahía Colombia y en general del golfo, es más lento.

Las capas media e inferior del Golfo se caracterizan por ser más dinámicas, ya que en estas se produce el intercambio de aguas con el mar Caribe. La Figura 46 muestra el transporte que se produce en la capa intermedia a través de los diversos escenarios. En particular, en el escenario sin marea, la mayor diferencia se observa en el extremo abierto del dominio durante el mes de febrero. Se observa una disminución de la intensidad del flujo, tanto hacia el interior como hacia el exterior del golfo. En el mes de octubre, los cambios son relativamente menores, y solo se observa una ligera expansión de la sección transversal del flujo saliente por el lado este. Además, no se observan cambios sustanciales en la bahía Colombia durante ninguna de las estaciones.

Figura 46. Capa intermedia. Transporte promedio mensual multianual para los meses de febrero y octubre. Valores negativos indica flujo entrante al golfo (dirección sur) y positivos flujo saliente (dirección norte)



En el escenario donde no se incluye la influencia del viento, la Figura 46 muestra una similitud entre los dos meses. El campo del transporte de ida y vuelta sigue siendo la misma, aunque

varía en intensidad. El transporte es más intenso en octubre, posiblemente debido a la influencia de la contracorriente Panamá-Colombia. Esto coincide con lo mencionado por Andrade (2015), quien asegura que esta contra-corriente tiene una mayor intensidad durante la temporada de lluvias en el suroeste del Caribe. En consecuencia, esta intensificación podría producir un aumento en la intensidad de las corrientes subsuperficiales en el interior del golfo.

El escenario en el que no hay flujo de los ríos (columna 4) para el mes de febrero. muestra como el transporte de agua hacia el norte es la mayor (1,43 Sv) en todo el dominio. Este valor es aproximadamente el doble de la magnitud obtenida en el caso de referencia (0,73 Sv). Además, la entrada de agua es 0,49 Sv, lo que sugiere una falta de equilibrio en el transporte en esta capa.

Esta falta de equilibrio se debe a que, en la capa superficial, la entrada de agua es de 1,08 Sv y la salida es 0,04 Sv. En consecuencia, el agua se acumula superficialmente en la parte sur del golfo, creando un gradiente de presión barotrópico. Este gradiente produce una diferencia en el nivel del mar debido al transporte por viento, que a su vez hace que el flujo se invierta en la bahía Colombia, en la capa media. Esta inversión es necesaria para compensar la entrada y salida de agua al golfo. Como resultado, el transporte neto de agua en esta capa es aproximadamente cero.

Resultados similares fueron encontrados por Valle-Levinson *et al.* (2002a) en su estudio de la desembocadura del fiordo de Aysén en el sur de Chile. Estos autores atribuyeron el intercambio de agua al efecto del viento, con intercambios más intenso durante los períodos de vientos débiles. Mientras que en la época de vientos intensos los flujos se invirtieron o se debilitaron, profundizando así la interfaz entre los dos flujos.

Por otro lado, en el mes de octubre, la estructura observada es similar al escenario de referencia. Sin embargo, en el escenario sin ríos, tanto los transportes entrantes como los salientes muestran una ligera disminución. En concreto, en escenario de referencia el flujo de salida es 2,43 Sv, mientras que en el escenario sin ríos es 0,31 Sv. Del mismo modo, la salida del flujo en el primer caso es 0,66 Sv, mientras que en el segundo caso es 0,48 Sv. En esta situación particular, en la capa intermedia, el viento, que viene del sur, crea un flujo de agua hacia el norte y no presenta un gradiente barotrópico en bahía Colombia.

En general, estos resultados sugieren una dinámica e interacción compleja que se producen al interior del golfo. Particularmente en donde hay presencia de caudal de ríos y patrones variables de viento.

5.4 Análisis de los campos de corrientes entre los diferentes escenarios simulados

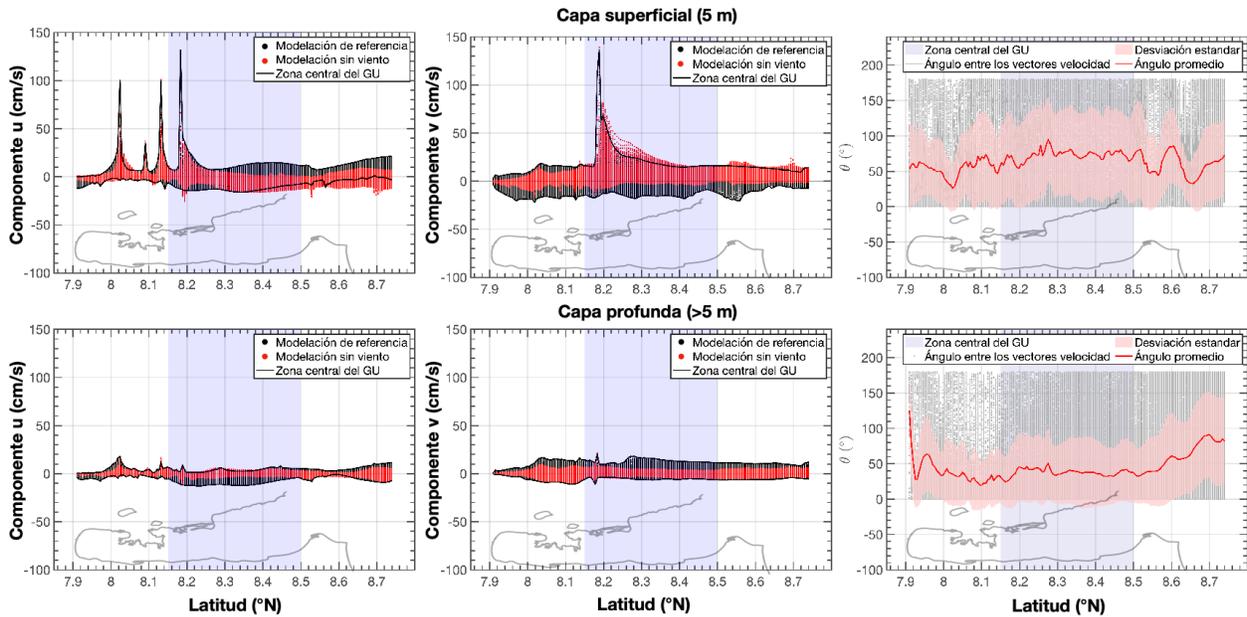
En este análisis solo se van a comparar los escenarios de forzamiento con viento y con caudales de los ríos con el escenario de referencia, los cuales se ha demostrado tienen un impacto considerable en la hidrodinámica del golfo. Se analizan los meses representativos de las épocas climáticas, así como los resultados para los años 2011 (año Niña), 2013 (año neutral) y 2015 (año del Niño) y el promedio multianual.

La Figura 47 muestra los valores de las componentes zonal (u) y meridional (v) de la corriente en transectos latitudinales a lo largo del golfo tanto para la capa superficial como para la capa de fondo. Además, muestra el ángulo formado por los vectores de velocidad en cada una de las celdas de la malla de cálculo. Específicamente, la componente u superficial dentro de bahía Colombia presenta una alta magnitud y mantiene una dirección predominantemente hacia el oeste ($u < 0$). En la zona del delta del río Atrato, se muestran de forma destacada picos de la magnitud relacionadas con la desembocadura del río. Sin embargo el intervalo de velocidades sin viento es similar al de la simulación de referencia hasta una latitud de $8,2^\circ$ N. En este punto, la boca del Roto produce velocidades de $u \approx 130$ cm/s. Al norte de la latitud de $8,4^\circ$ N, hay un cambio notorio en el intervalo de u hacia valores negativos, lo que indica una dirección predominante hacia el oeste de las corrientes. Esto contrasta marcadamente con la componente u del escenario de referencia, que muestra una mayor tendencia hacia el este (valores positivos). En la capa profunda, la componente u muestra una disminución significativa en el área central (franja morada, Figura 47), mientras que sufre un cambio mínimo en el resto del dominio.

El componente v (columna 2) presenta cambios notables en todo el dominio del golfo, tanto en la capa superficial como en la capa profunda. Se observa una disminución de los valores negativos, lo que produce valores positivos ($v > 0$) a medida que las aguas salen del golfo. Esta condición se puede explicar por la ausencia del forzamiento de viento, que suelen soplar desde el norte durante este período, confinando así las aguas a la región sur del golfo. Si no se ejerce este forzamiento, la influencia dominante es el caudal de los ríos, que dirige las aguas superficiales hacia el norte. Vale la pena señalar que esta componente se intensifica cerca de la boca del Roto (latitud de $8,2^\circ$ N) y se extiende hasta una latitud de $8,4^\circ$ N, donde los puntos rojos sobrepasan la envolvente formada por los puntos negros (escenario de referencia). En la capa de fondo, la magnitud del componente v con valores positivos disminuye, lo que muestra una reducción en el transporte a través de esta capa en comparación con el escenario de referencia. los resultados

sugieren que a medida que se disminuye la entrada de agua desde la superficie, también disminuye la salida a través de la capa inferior.

Figura 47. Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin viento para el mes de febrero. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo

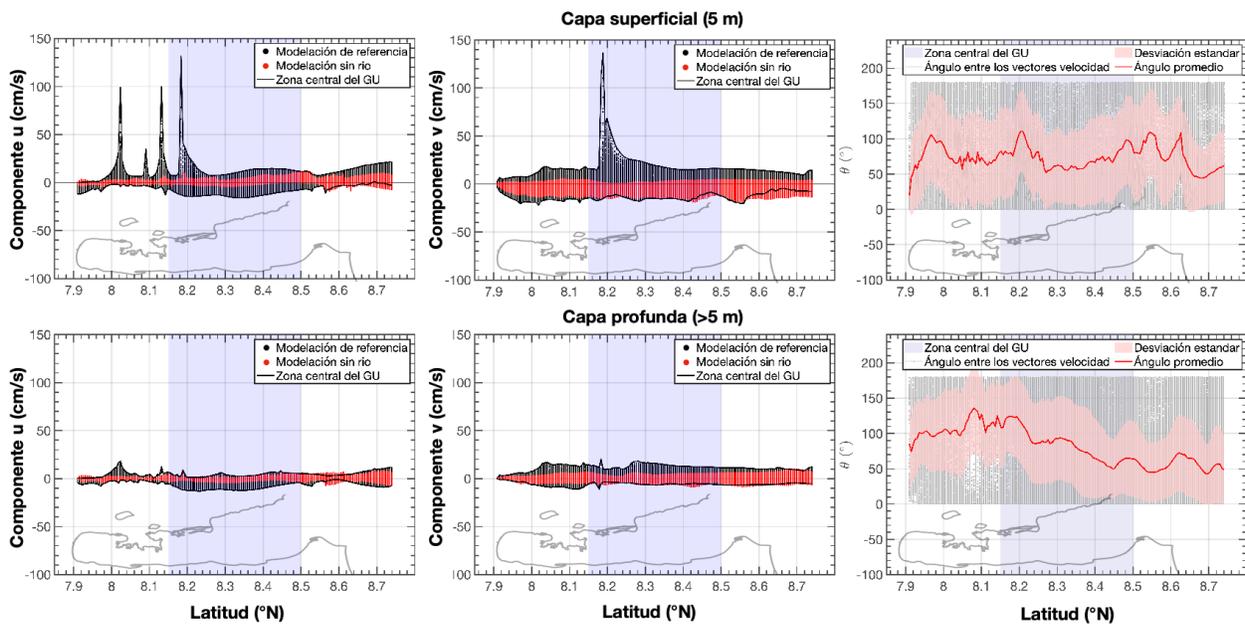


Por otro lado, el ángulo formado por las velocidades de ambas simulaciones presenta su variación importante en la superficie, con valores alrededor de 50° y desviaciones estándar máximas en la zona central. En el fondo, el ángulo fluctúa entre 30° y 40° con desviaciones estándar menores.

En este mismo mes (febrero), en la Figura 48 se presenta el comportamiento de las componentes de la corriente sin el caudal de los ríos. En la dirección zonal, las corrientes se reducen de manera sustancial debido a la no descarga de agua dulce en esta dirección. Esto explica la reducción de la componente este. Solo en la zona norte y en profundidad se conservan valores similares al escenario de referencia. La componente v muestra la ausencia de ríos, con valores negativos (corrientes hacia el sur) en todo el dominio del golfo, en correlación directa con la dirección del viento. La zona más profunda representa una reducción de la magnitud de las corrientes hacia el sur y el centro, mientras que el ancho del intervalo se mantiene en una parte

importante de la zona norte. El ángulo presentado en la columna 3 es más pronunciado en este caso. En superficie, el valor promedio es de 70° , mientras que en la capa de fondo es mayor en el sur, donde es evidente la ya mencionada inversión del flujo, y en la zona central. Hacia el norte, la desviación de la corriente disminuye y su valor promedio es de 50° aproximadamente.

Figura 48. Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin río para el mes de febrero. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo



Se calcularon los coeficientes de correlación y varianza para cada uno de los componentes u y v de febrero, los cuales se presentan en la Tabla 10. El escenario donde no se tuvo en cuenta la marea explica más del 99% de las corrientes en el interior del golfo, lo que demuestra una alta correlación con el escenario de referencia. Por otro lado, el escenario sin viento representa el 18% y el 27% de la varianza total en las componentes zonal y meridional de la corriente, respectivamente. Estos porcentajes sugieren la importancia de este forzamiento en la hidrodinámica del golfo durante esta época del año, en la que existe una clara confrontación entre el caudal de los ríos y la fuerza ejercida por el viento sobre la superficie del océano. Este escenario muestra la gran influencia del río que fluye hacia el norte y altera la circulación en el interior del golfo cuando no encuentra resistencia al viento.

Tabla 10. *Análisis de la varianza y correlación de las componentes u y v de la corriente en los diferentes escenarios simulados para el mes de febrero*

Escenario	Componente	Varianza explicada (R ²)	Correlación (r)
Sin marea	u	0.98	0.99
	v	0.99	0.99
Sin viento	u	0.18	0.43
	v	0.27	0.53
Sin rio	u	0.20	0.45
	v	0.04	0.19

En la componente v cuando no hay caudal de los ríos se observa el cambio más significativo, con una varianza del 4% y un coeficiente de correlación de 0,19. Esto se puede atribuir al cambio de la dirección del flujo que se produce en una parte sustancial del dominio, como se mencionó anteriormente, y a la reducción de la magnitud de la corriente. En ausencia de este forzamiento, el patrón de circulación experimenta velocidades más bajas y direcciones significativamente diferentes. Este comportamiento predomina durante la estación seca del año, como se muestra en la Figura 51. Los resultados anteriores sugieren que los forzamiento del viento o del caudal de los ríos, desempeñan un papel destacado durante esta estación climática en la que ambas fuerzas se enfrentan y producen una dinámica particular en el estuario.

En la Figura 49 y Figura 50 se presenta la comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) para el mes de octubre en las capas superficial y de fondo entre el escenario de referencia y el escenario sin viento y sin rio, respectivamente. El intervalo de velocidades que se muestra en la columna 2 de ambas Figuras, muestran valores v positivos predominantemente en la superficie. En consecuencia, la desactivación de una de estas fuerzas debilita ligeramente la magnitud de la corriente, pero tiene un efecto menor en la dirección (Figura 49 y Figura 50, columna 3).

Figura 49. Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin viento para el mes de octubre. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo

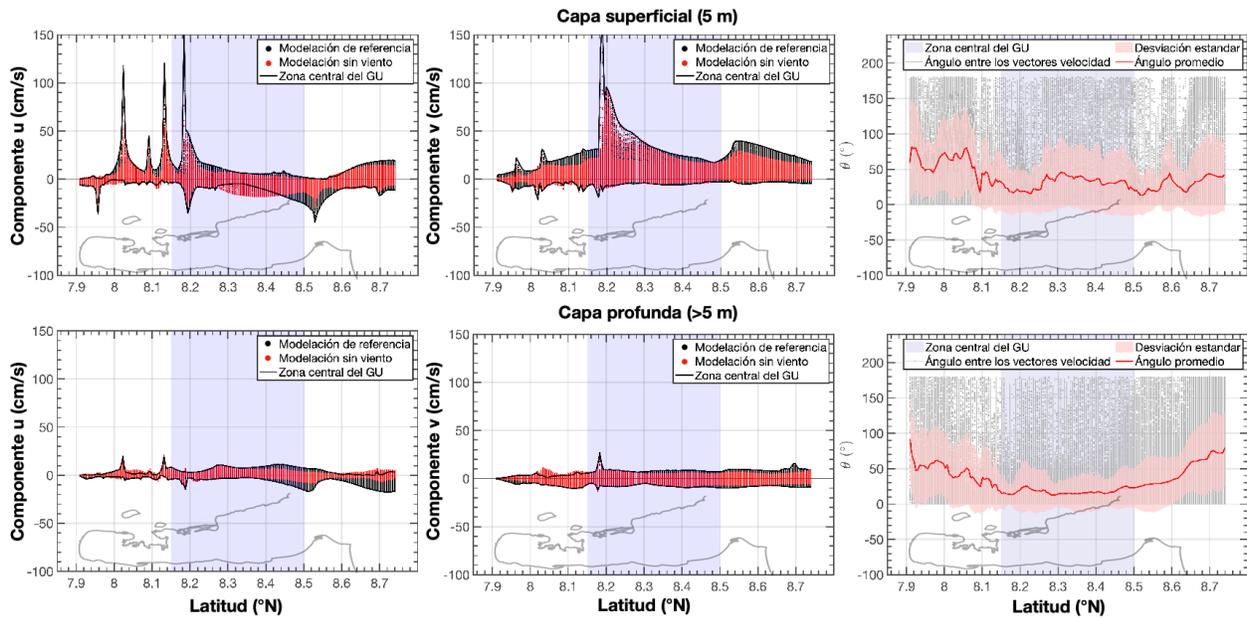
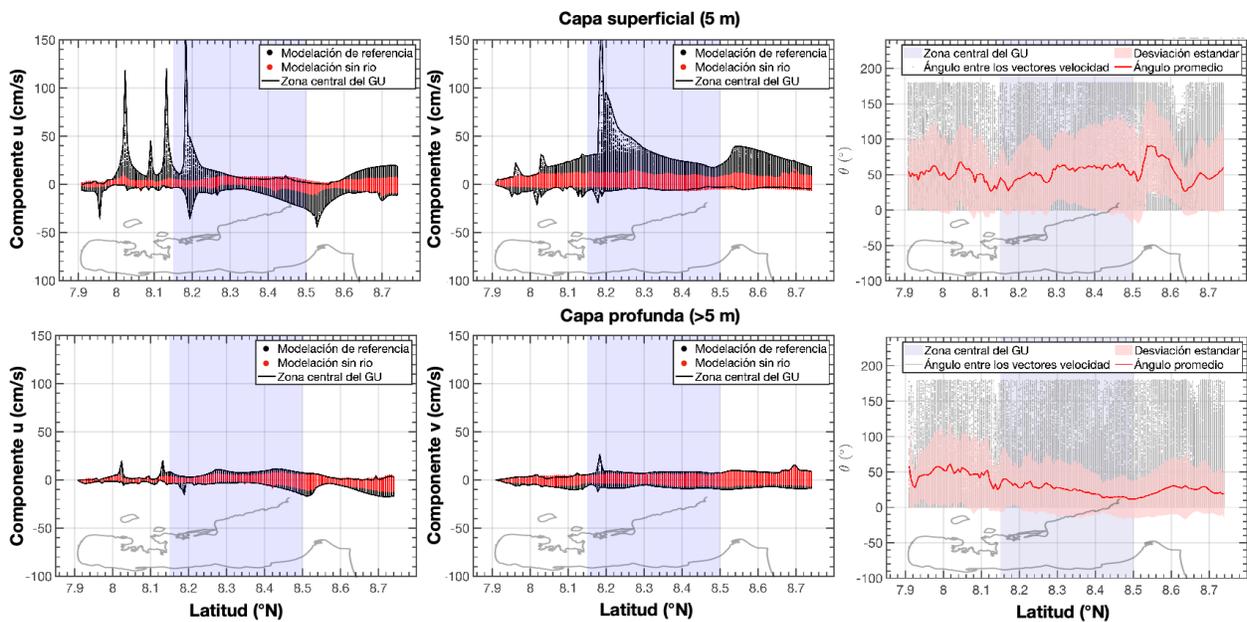


Figura 50. Comparación de las componentes de velocidad u (primera columna) y v (segunda columna) entre el escenario de referencia y el escenario sin río para el mes de octubre. Capa superficial (fila 1) y capa de fondo (fila 2). Puntos negros valores de la simulación de referencia y puntos rojos simulación sin viento. La columna 3 muestra el ángulo que forman los vectores de corriente en cada punto de la malla de cálculo



Los datos de la Tabla 11 muestran la varianza y el coeficiente de correlación para el mes de octubre en los escenarios representados de las Figura 49 y Figura 50. Cabe destacar que la correlación entre las corrientes durante este período es generalmente mayor, ya que el viento del sur o el suroeste ya no impone resistencia al flujo del río, por el contrario, se refuerzan e impulsan la capa superficial hacia el norte del golfo.

Tabla 11. Análisis de la varianza y correlación de las componentes u y v de la corriente en los diferentes escenarios simulados para el mes de octubre

Escenario	Componente	Varianza explicada (R^2)	Correlación (r)
Sin marea	u	0.97	0.98
	v	0.98	0.99
Sin viento	u	0.47	0.69
	v	0.80	0.90
Sin río	u	0.54	0.73
	v	0.40	0.63

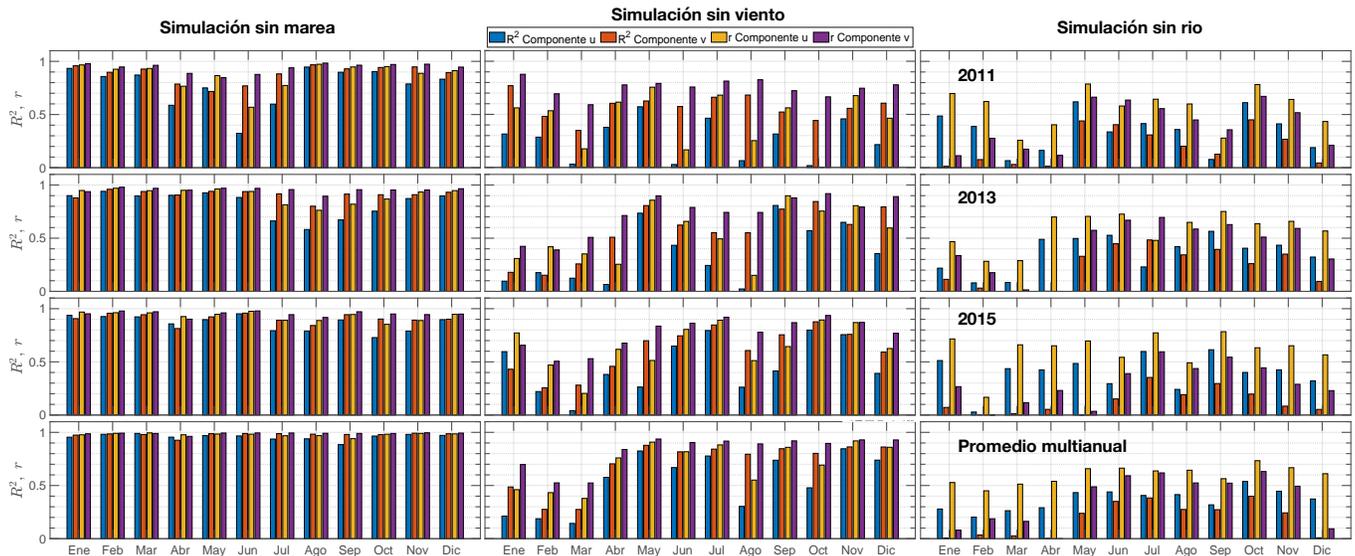
Los patrones de circulación hidrodinámica, excluyendo la influencia de la marea, pueden explicar hasta el 97% de la variabilidad observada durante el mes de octubre. La componente zonal (u) explica un 47% de la varianza sin la presencia de viento, 2.6 veces mayor que en la estación seca. Mientras que la componente meridional (80%) se explica casi tres veces más que en el mismo período. El impacto de los caudales de los ríos en la variabilidad de las corrientes sigue siendo el factor más importante que contribuye a los cambios observados. Por ejemplo, la baja correlación (0,63) y la varianza explicada (40%) de la componente v (última fila, Tabla 11) ponen de relieve la influencia de los ríos en el movimiento del agua dentro del golfo, en comparación con el escenario de referencia. No obstante, este componente logra explicar diez veces más la variabilidad que en la época anterior. La inversión de la capa inferior en la zona sur vuelve a un estado medio en ausencia de ríos, lo que indica que el viento modula este mecanismo de inversión, tal y como explican Cáceres y Valle-Levinson (2002a).

La Figura 51 proporciona una visión general de la varianza explicada y la correlación entre los componentes zonal y meridional con la simulación de referencia en años categorizados como

Niña, Niño, Neutro y el promedio multianual. Las Tabla 10 y Tabla 11 y las Figura 47 a Figura 50 presentan los resultados multianuales, que representan la tendencia media de los nueve años simulados. Sin embargo, debido al promedio multianual, los resultados pueden enmascarar algunos efectos significativos de estas épocas en la circulación estuarina del golfo de Urabá.

De acuerdo con los resultados Arroyo-Quinto *et al.* (2022) sobre la variabilidad climática en la región del Urabá Antioqueño. En este trabajo se realizó una modelación con WRF y se usaron datos procedentes de ERA5. Es importante señalar que esta base de datos es la misma que se usó para forzar el modelo CROCO. Teniendo esto en cuenta, podemos analizar la variabilidad significativa de las variables atmosféricas, como el viento y la humedad, tanto en términos de espacio como de tiempo.

Figura 51. Análisis de la varianza y correlación de las componentes *u* y *v* de la corriente en los diferentes casos simulados para cada mes del año en escenarios Niña (2011, fila 1), Neutro (2013, fila 2), Niño (2015, fila 3) y promedio multianual (fila 4)



En la Figura 51 se observan los escenarios sin marea, sin viento y sin río en los años Niño, Niña, Netro y Multianual. Se observa como la variabilidad tiene un impacto simultáneo en el flujo de los afluentes que descargan sus aguas al interior del golfo. Este fenómeno podría explicar las variaciones y correlaciones observadas entre las corrientes de los distintos escenarios simulados en los años 2011 (Niña), 2013 (neutral) y 2015 (del Niño). En términos generales, es evidente que la estación seca es la que experimenta los efectos más pronunciados. En concreto, esto es válido para

las simulaciones realizadas sin tener en cuenta las influencias del viento y los ríos, en las que la dirección del viento y el flujo de la desembocadura principal del Atrato son opuestas.

La componente u , en todos los años del escenario sin viento, presenta la menor varianza explicada y la menor correlación en comparación con el componente v , excepto en los meses de febrero, septiembre y noviembre de 2013 y enero de 2015, donde el componente u supera ligeramente al componente v . Durante los meses de marzo, junio, agosto y octubre del año de La Niña (2011), este componente se ve afectado de manera significativa, con una varianza explicada muy inferior al 10%. Mientras tanto, el componente norte (v) supera más del 50% de la varianza explicada y más del 70% de la correlación con el escenario de referencia en la mayoría de los meses. En condiciones normales (año 2013), el componente u presenta los valores más bajos en ambos coeficientes, particularmente en los primeros 4 meses y en agosto (inferiores al 20% en R^2 y al 50% en r). Por otro lado, la componente meridional v tiene un R^2 por debajo del 30% y un r entre el 40% y 50% en los primeros 3 meses del año. En el año de El Niño, el componente u tiene una varianza explicada inferior al 30% en los meses de febrero, marzo, mayo y agosto, mientras que el componente v solo tiene una varianza explicada inferior al 30% en febrero y marzo, superando este valor en los meses restantes.

Es importante resaltar que la ausencia de estrés por viento en la superficie del océano altera significativamente la componente sur (v), y más aún la componente zonal (u) en los primeros meses del año (estación seca), cuando la dirección del flujo desde la desembocadura principal del río Atrato se opone al viento. Sin embargo, el componente v no se vio tan afectado en 2011, probablemente debido a la debilidad de los vientos durante los años en que se produjo este evento, lo que se tradujo en una menor resistencia al flujo en esta dirección y en una mejor correlación con la simulación de referencia. Arroyo-Quinto *et al.* (2022) descubrieron que en los años de La Niña (2009 y 2011), se observaron reducciones en la velocidad del viento de hasta 3 m/s en el Golfo y en la región en general, con una dirección de entrada predominante por el sur.

Las diferencias adicionales observadas en cada año, pueden atribuirse a las características únicas relacionadas con la magnitud y la dirección del viento durante esos años específicos.

En relación al escenario con ausencia de los ríos, en contraste con el escenario anterior, la componente sur (v) es la más afectada. Esto es particularmente evidente en los primeros cuatro meses del año, como se demuestra, por ejemplo, en la figura 48, donde el viento predominante dirige el agua hacia la parte sur del golfo ($v < 0$). Los valores de varianza explicados están por

debajo del 5% en la mayoría de los años, incluso en el promedio multianual, y casi llegan a cero durante este período. Durante la temporada de lluvias, de mayo a noviembre, los valores del R2 no superan el 50% y la correlación no supera el 70% en todos los años analizados. El componente u se explica mejor en este escenario sin ríos, aunque sigue siendo inferior al de la simulación sin viento. En otras palabras, la ausencia de ríos afecta en mayor medida a la componente norte, así como a la componente este en comparación con el escenario que no considera el viento. Arroyo-Quinto *et al.* (2022) también comprobaron que durante el año 2010, la velocidad del viento aumentó hasta 4 m/s. Además, durante el año de El Niño, el viento se desplazó del noreste sobre el golfo. Esta circunstancia puede explicar por qué el año de El Niño de 2015 presenta los valores más bajos de R2 y r de mayo a noviembre. Además, los niveles de precipitación podrían contribuir a la amplificación de los caudales de los ríos y, en consecuencia, a intensificar las corrientes. Esto es especialmente evidente en el caso de 2011, cuando los caudales alcanzaron su máximo (figura 4). Estos hallazgos concuerdan con las observaciones de Arroyo-Quinto *et al.* (2022) sobre el aumento de las precipitaciones en el Golfo y la zona sur, con valores de anomalía positivos de hasta 4 mm/3h. Por el contrario, durante el año de El Niño, no se observaron anomalías positivas tan pronunciadas, con valores que oscilaron entre 0 y -1,5 mm/3h. Además, la precipitación acumulada reveló que los valores más altos se registraron durante los años de La Niña, mientras que el año de El Niño mostró los valores más bajos tanto en el norte como en el sur de Urabá.

De acuerdo con los resultados modelados, se puede inferir que los ríos desempeñan un papel importante en la dinámica del Golfo de Urabá. En particular, el río Atrato actúa como una barrera, impidiendo la inversión del caudal en Bahía, Colombia, a la vez que ejerce su influencia en las capas inferiores. Por el contrario, el viento ejerce un mayor control sobre los flujos superficiales y tiene un impacto más pronunciado en el componente zonal.

6. Conclusiones

La circulación en el golfo de Urabá es modulada principalmente por la descarga de los ríos Atrato y León y el régimen de vientos. Estos dos forzamientos producen patrones particulares de circulación dependiendo de la época climática del año. Durante la época seca (diciembre a abril), los vientos alisios del norte confinan las aguas dulces al sur del golfo y se genera una circulación de dos capas. En la época húmeda (mayo a noviembre), con vientos más débiles predominantes del sur, se facilita un mayor intercambio entre las aguas del golfo y el mar Caribe.

La marea tiene un impacto limitado en la modulación de la circulación del golfo, particularmente en la región sur donde las amplitudes de marea no superan los 40 cm. Hacia la zona norte del golfo su efecto es un poco más pronunciado, induciendo oscilaciones en la posición de frentes y afectando levemente la magnitud de las corrientes. De hecho, durante la mayoría de los meses de los años simulados, cuando no se tiene en cuenta el forzamiento de la onda de marea, la correlación y la varianza explicada en las corrientes superan el 90%. En este escenario, cabe mencionar que la componente zonal de las corrientes se ve afectada de manera más significativa que la componente norte, lo que puede atribuirse, con gran probabilidad, a las características específicas de la forma de entrada de la onda de marea.

La eliminación del forzamiento del viento o de los ríos en las simulaciones produjo transformaciones notorias en la dinámica del golfo de Urabá, especialmente cuando no se incluyeron los caudales de los ríos Atrato y León. Sin el caudal de los ríos, se alteran significativamente la circulación y el transporte en el golfo tanto en superficie como en profundidad. Esto demuestra la importancia de la descarga fluvial como forzador principal del sistema hidrodinámico del golfo de Urabá. En cuanto a la estación seca, la componente sur de la dinámica del golfo experimentó una disminución sustancial de su influencia, con valores que cayeron por debajo del 10% e incluso se acercaron a cero en la varianza explicada durante los primeros meses del año. Esto indica que el impacto de los ríos en este componente es aproximadamente del 90% durante la estación seca, aunque ligeramente menor durante la estación húmeda. Los resultados sugieren que la descarga de los ríos desempeñan un papel dominante en la configuración de la dinámica del golfo de Urabá, particularmente durante los períodos de escasas precipitaciones.

La supresión del viento produce alteraciones significativas en la dinámica al interior del golfo, particularmente durante la estación seca. La componente zonal experimenta el mayor impacto a lo largo del año, y los efectos más pronunciados se producen en los primeros meses. Para este escenario y durante el año de La Niña (2011) y el año neutral (2013), se observan valores inferiores al 10% de la varianza explicada durante una parte importante del año.

Los resultados del modelo sugieren que los giros ciclónicos y anticiclónicos que se generan en las capas medias e inferiores depende principalmente de las restricciones batimétricas impuestas por la forma irregular del fondo y la línea de costa y no tanto de la descarga fluvial o el forzamiento atmosférico. La batimetría genera giros residuales e induce zonas de aceleración/deceleración del flujo que determinan el patrón de circulación en profundidad. Por el contrario, la superficie es controlada por el viento y el aporte de agua dulce.

El modelo numérico CROCO fue capaz de representar adecuadamente la circulación en el golfo al ser validado con datos de campo de corrientes, temperatura y salinidad. El modelo pudo reproducir adecuadamente los patrones característicos en cada época climática al ser forzado con los caudales de los ríos Atrato, León y los vientos. Este modelo reproduce patrones como la circulación estuarina de dos capas verticales, flujos de tres capas en algunas zonas y circulación inversa hacia el norte después de las bocas principales. Estos patrones coinciden con estudios previos basados en observaciones *in situ* y otras simulaciones numéricas. La validación cuantitativa también mostró buenos resultados en términos de errores y correlaciones entre los datos modelados y medidos.

Los resultados obtenidos en este estudio ofrecen una comprensión detallada de la dinámica de las corrientes oceánicas en el GU y su modulación por factores como los caudales de los ríos Atrato y León, los regímenes de vientos y el forzamiento de las mareas. Esta comprensión integral de los patrones de circulación sienta las bases para futuras investigaciones centradas en evaluar el impacto de estas corrientes en la calidad del agua, los tiempos de residencia y otros fenómenos relacionados, particularmente en zonas costeras vulnerables a descargas de aguas residuales y asentamientos humanos sin una adecuada gestión. Los resultados de este trabajo constituyen un punto de partida sólido para abordar estudios adicionales enfocados en la conservación y manejo sostenible de los recursos marinos en el Golfo de Urabá.

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.
- Andrade, C.A. (2015). *Oceanografía Dinámica de la Cuenca de Colombia*. Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”.
- Arroyo Quinto, L.M. (2022). Estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, el viento y la humedad en la región del Urabá Antioqueño a través de resultados de WRF [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18408>
- Artal, O., Pizarro, O., & Sepúlveda, H. H. (2019). The impact of spring-neap tidal-stream cycles in tidal energy assessments in the Chilean Inland Sea. *Renewable Energy*, 143, 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.092>
- Barranco, R. (2022). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 40, 45-53. <https://doi.org/10.26640/22159045.2021.574>
- Barrientos Porras, N. S. Y Mosquera Ardila W. A. (2019). *Modulación a la circulación oceánica en el golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia* [Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Oceanográfico]. Universidad de Antioquia.
- Beckmann, A., & Haidvogel, D. B. (1993). Numerical simulation of flow around a tall isolated seamount. Part I: Problem formulation and model accuracy. *Journal of Physical Oceanography*, 23(8), 1736-1753. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<1736:NSOFAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<1736:NSOFAA>2.0.CO;2)
- Caicedo-Herrera, L. C., Carvajal-Escobar, Y., & Céspedes-Sánchez, G. M. (2012). Régimen de caudal ambiental en la cuenca media del río Tuluá, Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 14(1), 39-50.
- Cáceres M, A Valle-Levinson, J Fierro, C Valenzuela & M Castillo. 2002. Variabilidad transversal del flujo y de la densidad en la boca del Seno Aysén. En: Libro de Resúmenes, Taller Sobre los Resultados del Crucero CIMAR 7 Fiordos, pp. 45-47. CONA, Valparaíso.
- Chevillot, P., Giraldo, A. M., & Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, (14), 79-89.
- Egbert, G.D.; Erofeeva, S.Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)

- Escobar, C.A.; Velásquez, L., & Posada, F. (2015). Marine currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1363–1374. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00073.1>
- Escobar, S. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40(2), 327-346.
- García, A., Restrepo, J. D., & Otero, L. J. (2009). Estudio de la pluma del río Atrato en un estuario en el trópico: Efectos del viento y del régimen de mareas en el Golfo de Urabá, Colombia. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(2), 425-438. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572009000200020>
- García, C. (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia.
- González Day, L. (2017). Trazado químico de producción de gas, petróleo y agua en estimulaciones hidráulicas de yacimientos shale. Y-TEC. <https://www.y-tec.com.ar/wp-content/uploads/2017/12/Trazado-quimico-de-produccion-de-gas-petroleo-y-agua-en-estimulaciones-hidraulicas-de-yacimientos-shale.pdf>
- Grifoll, M., Aretxabaleta, A. L., Pelegrí, J. L., & Espino, M. (2016). Temporal evolution of the momentum balance terms and frictional adjustment during a storm. *Ocean Science*, 12(1), 137-151. <https://doi.org/10.5194/os-12-137-2016>
- Guerrero, J. J. (2016). Modelación de los patrones de circulación oceánica a niveles de submesoescala en el Mar Caribe Colombiano [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Hernández Morales, D. P., Romaña Torres, Y., Jaramillo-Vélez, A., Pelegrí, J. L., & Toro, V. G. (2021). Patrones de circulación superficial sobre la plataforma interna entre bahía El Uno y Punta de Las Vacas, Golfo de Urabá, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 9-30. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.993>
- Latandret-Solana, S. (2021). Estudio de la marea y su pronóstico en la cuenca Colombia—Mar Caribe. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30919.83364>
- Lonin, S., y Vásquez, A. J. G. (2005). Hidrodinámica y distribución en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, (23), 76–89.
- Málikov, I. (2010). Régimen de la marea en diferentes puntos de las costas colombianas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá, D.C.
- Montoya, L. J., y 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.

- Montoya, L. J., Toro-Botero, F. M., & Gomez-Giraldo, A. (2017). Study of Atrato river plume in a tropical estuary: Effects of the wind and tidal regime on the Gulf of Uraba, Colombia. *Dyna*, 84(200), 367-375. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.60944>
- Montoya, L. J. (2010). Dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión en contaminantes y sedimentos [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia].
- Murte Gallo, L. (2013). Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de trazadores [Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <http://hdl.handle.net/10654/11123>
- Okolodkov, Y. B., del Carmen Merino-Virgilio, F., Aké-Castillo, J. A., Aguilar-Trujillo, A. C., Espinosa-Matías, S., & Herrera-Silveira, J. A. (2014). Cambios estacionales en conjuntos de dinoflagelados epifíticos cerca de la costa norte de la Península de Yucatán, Golfo de México. *Acta Botanica Mexicana*, 107, 121–151. <https://doi.org/10.21829/abm107.2014.204>
- OpenDrift (Versión 1.0). OpenDrift Developers. <https://github.com/OpenDrift>
- Pawlowicz, R. (2020). M_Map: A mapping package for MATLAB, version 1.4m, [Computer software]. <https://www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(9), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Restrepo, J., y Correa, I. (2002). Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral pacífico Colombiano. Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.07.005>
- Ricaurte-Villota, C. y M.L. Bastidas Salamanca. (2017). Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe. Serie Publicación Especial, (14).
- 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, Universidad Nacional de Colombia].
- Rueda Bayona, J. G., Otero Díaz, L. J., & Pierini, J. O. (2013). Caracterización hidrodinámica en un estuario tropical de América del Sur con régimen micro-mareal mixto (Bahía de Cartagena, Colombia). *Boletín Científico CIOH*, 31, 159-174.
- Savenije, H. H. G. (2012). *Salinity and tides in alluvial estuaries*. Elsevier.

- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). (2013). *Manual de Hidrografía* (8a edición). Chile.
- Solano, M. (2020). Barotropic boundary conditions and tide forcing in split-explicit high resolution coastal ocean models. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(3), 249–260. <https://doi.org/10.1016/J.JOES.2019.12.002>
- Stoklas, C.I., Cortínez, V.H., & Dominguez, P.N. (2017). Contaminación en Cuerpos de Agua Dominados por Mareas: Aplicación del Método Espectral en la Ecuación Adjunta del Problema de Transporte de Sustancias.
- Thomas, L.P., Marino, B.M., Estela, M., & Mandrini, M. (2005). Medición de la concentración de trazadores pasivos: Aplicación a las corrientes de gravedad. Instituto de Física Arroyo Seco, Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional del Centro, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina.
- Tonini, M.H. y Palma, E.D. (2009). Circulación residual y vorticidad mareal en los golfos norpatagónicos. *Mecánica Computacional*, 28, 2851-2867.
- Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos, N., & Bedoya, Y. (2019). CIRCULACIÓN OCEÁNICA DEL GOLFO DE URABÁ USANDO CAMPOS DE VIENTO DE ALTA RESOLUCIÓN TEMPORAL. *Boletín Científico CIOH*, 38(2), 26-35. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.516>
- Trucano, T., Swiler, L., Igusa, T., Oberkampf, W. y Pilch, M. (2006). Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's what. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 1331–1357. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.11.035>
- Uncles, R. J. (2010). Physical properties and processes in the Bristol Channel and Severn Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 61(1), 5–20. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2009.12.010>
- United Nations News. (2021, October 22). El plástico, que ya ha atragantado nuestros océanos, terminará por asfixiarnos a todos si no actuamos rápidamente. <https://news.un.org/es/story/2021/10/1498752>
- Valencia, V. G. T., Jaramillo-Vélez, A., Pelegrí, J. L., Morales, D. P. H., & Torres, Y. R. (2021). Patrones de circulación superficial sobre la plataforma interna entre bahía El Uno y Punta de Las Vacas, Golfo de Urabá, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 9-30. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.929>
- Valle-Levinson, A., & Atkinson, L.P. (1999). Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. *Estuaries*, 22(2), 179-193. <https://doi.org/10.2307/1352927>
- Velasquez, L. (2013). Modelación del Transporte de Sedimentos en el Golfo de Urabá, Colombia [Tesis de maestría, Universidad EAFIT].

-
- Velez, J., Poveda, G. y Mesa, O. (2000). Balances hidrológicos de Colombia. Medellín: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
- Willmott C.J. & K. Matsuura. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing model performance. *Climate Research*. 30. 79-82

Anexos

Anexo 1.

Tabla. Opciones de configuración para el modelo CROCO incluidas en el archivo cppdef.h

Opción de configuración	Descripción
# define MPI	Habilita el uso de la biblioteca de comunicación MPI para permitir la ejecución paralela del modelo en múltiples procesadores.
# define AGRIF	Habilita el uso de la biblioteca AGRIF para permitir la adaptación dinámica de la resolución de la malla en áreas específicas del dominio.
# define AGRIF_2WAY	Habilita la adaptación bidireccional de la resolución de la malla, permitiendo la creación de áreas de alta resolución dentro de áreas de baja resolución y viceversa.
# define TIDES	Habilita el uso de condiciones de borde de marea.
# define OBC_EAST	Habilita el uso de condiciones de borde abiertas en el lado este del dominio.
# define OBC_NORTH	Habilita el uso de condiciones de borde abiertas en el lado norte del dominio.
# define CURVGRID	Habilita el uso de una malla curvilínea para representar el dominio.
# define SPHERICAL	Habilita el uso de coordenadas esféricas para representar el dominio.
# define MASKING	Habilita el uso de una máscara para excluir áreas específicas del dominio.
# define SOLVE3D	Habilita la resolución tridimensional del modelo.
# define UV_COR	Habilita la corrección de la velocidad del viento en la superficie del océano.
# define UV_ADV	Habilita la advección de la velocidad del viento en la superficie del océano.
# define SALINITY	Habilita la simulación de la salinidad del agua.
# define NONLIN_EOS	Habilita el uso de una ecuación de estado no lineal para representar la densidad del agua.
# define UV_HADV_WENO5	Habilita la advección lateral de la velocidad del agua utilizando el esquema de advección WENO5.
# define UV_VADV_SPLINES	Habilita la advección vertical de la cantidad de movimiento utilizando el esquema de advección de splines.
# define TS_HADV_UP3	Habilita la advección lateral de trazadores utilizando el esquema de advección UP3.
# define TS_VADV_SPLINES	Habilita la advección vertical de trazadores utilizando el esquema de advección de splines.
# define SPONGE	Habilita la creación de capas de esponja para amortiguar las ondas en la superficie del océano y reducir la reflexión de las ondas en las paredes del dominio.

Anexo 2.**Tabla.** Principales constituyentes de la marea para la estación guardacostas

Armónico	Descripción	Periodo (h)	Amplitud (cm)	Fase(grados)
K1	Constituyente Principal, Solar-lunar.	23.94	12.20	-36.88
M2	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido a la Luna	12.42	8.41	62.89
K2	Constituyente Principal ,Debido a los cambios de declinación del Sol y la Luna	11.97	6.04	34.98
N2	Constituyente Principal ,Debido a la variación de la distancia entre la Tierra y la Luna	12.66	6.04	70.75
Q1	Componente lunar elíptica mayor diurna, de carácter diurno	26.87	4.28	-116.23
S2	Constituyente Principal	12	2.59	-92.89
O1	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna	25.8	2.40	-116.44
Mf	Componente lunar quincenal	328	0.67	-3.57
Mm	Componente lunar mensual	661	0.60	-5.09
P1	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna	24.07	0.10	-111.03

Fuente. (Barranco, Q. *et al*, 2022).

Anexo 3.

Figura. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de salinidad: **b)** in situ; **c)** modelados; **d)** perfiles; en cada punto de medición: **e)** RMSE; **f)** SKILL.

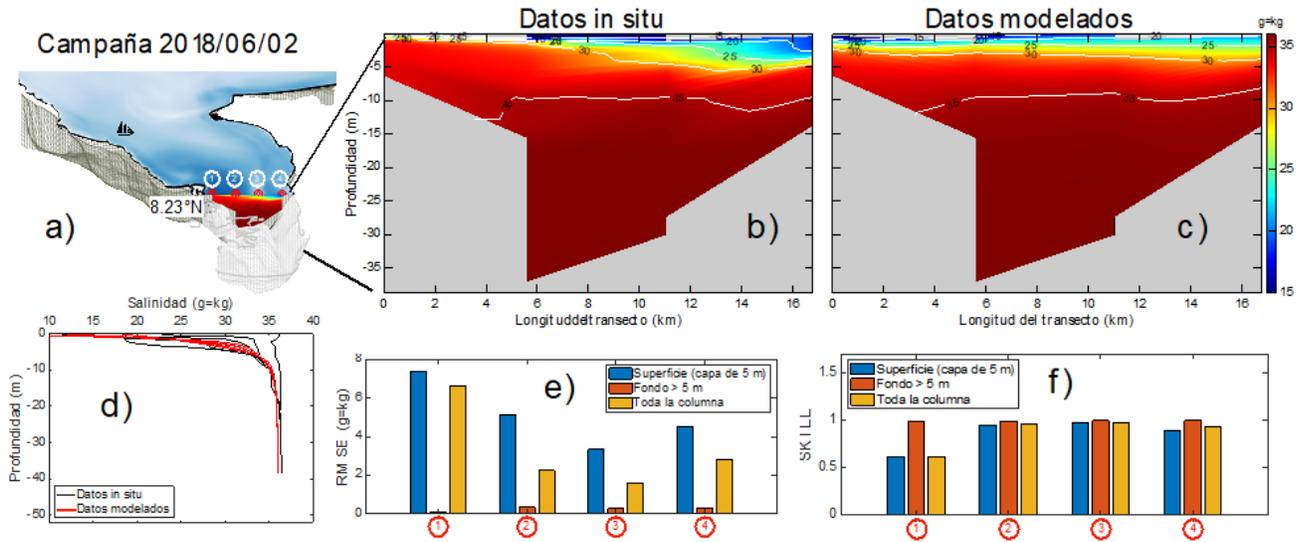
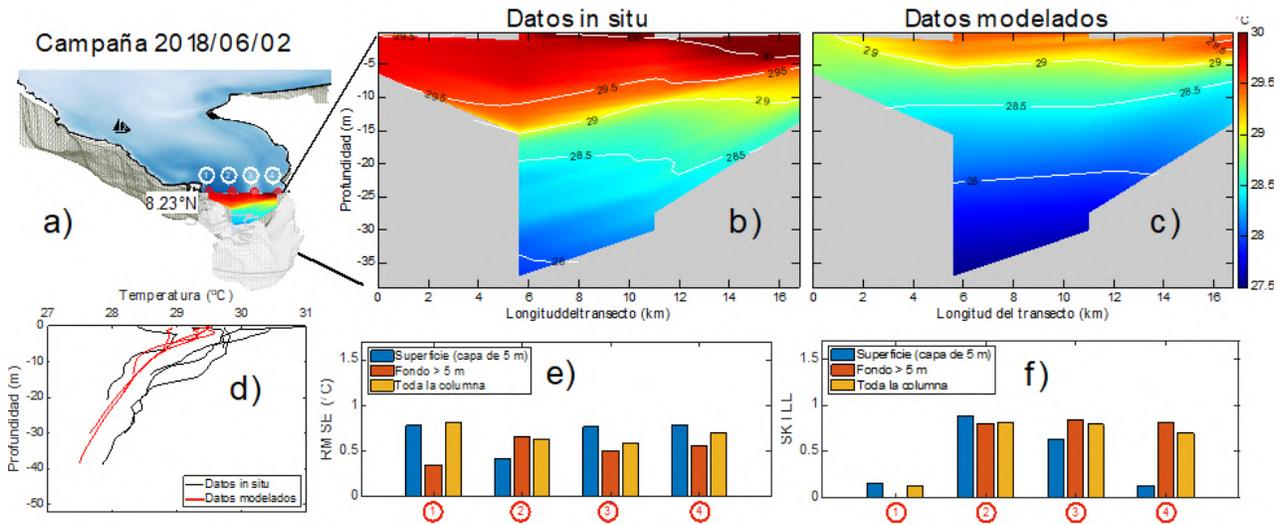


Figura. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de temperatura: **b)** in situ; **c)** modelados; **d)** perfiles; en cada punto de medición: **e)** RMSE; **f)** SKILL.



Anexo 4.

Figura. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de salinidad; **c)** modelados; **d)** perfiles; en cada punto de medición: **e)** RMSE; **f)** SKILL.

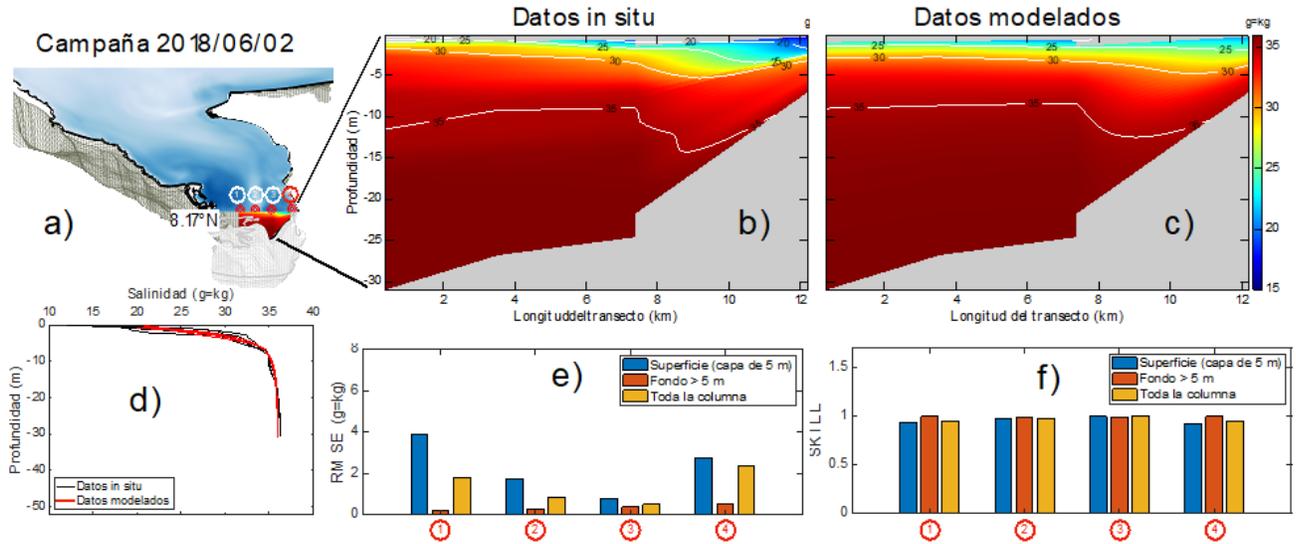


Figura. Campaña de medición de 02/06/2018. **a)** transecto; **b)** datos de temperatura; **c)** modelados; **d)** perfiles; en cada punto de medición: **e)** RMSE; **f)** SKILL.

