



**Variación espaciotemporal de la hidrodinámica en el sector playa La Martina, golfo de
Urabá.**

María José Castaño González

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafa

Director

Vladimir G. Toro

Doctor (PhD) en Oceanografía física

Asesor

Carlos A. Palacio

Doctor (PhD) en Ingeniería

Asesor

Daniel F. Valbuena

Ing. Oceanográfico

Universidad de Antioquia
Corporación Académica Ambiental
Oceanografía
Turbo, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Castaño González, 2024)
Referencia	Castaño González, M. J. (2024). <i>Variación espaciotemporal de la hidrodinámica en el sector playa La Martina, golfo de Urabá</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

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.

Dedicatoria

Esta investigación refleja los 5 años de dedicación a mi carrera profesional, los cuales han sido testigos de mis mayores alegrías y retos. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, quien me permitió emprender este vuelo y nunca dejó que mis alas se cortaran, haciendo posible la realización de este sueño hasta el último día.

A mi querida madre, Marlene Isabel Morales Macea, le dedico este logro con todo mi corazón. Sin su amor incondicional, su valentía, su fuerza y sus sabios consejos, nada de esto hubiera sido posible. Gracias, mami. Este logro es la manifestación de todos tus esfuerzos; es tuyo tanto como mío.

A mis padres, Claudia Andrea González y Carlos Mario Castaño, les dedico un especial reconocimiento. "Clau, fuiste mi fuente de inspiración para la elaboración de este trabajo. Observar tu ingenio, creatividad y emprendimiento a diario me proporcionaba la motivación necesaria para culminar este proyecto". "Papi, esto también es para ti, pues me ayudaste a alcanzar esta meta y siempre has estado presente para mí". Este logro lleva impreso el reflejo de su influencia positiva en mi vida.

Agradecimientos

Especial agradecimiento a mis asesores de trabajo de grado, los profesores Vladimir G. Toro, Carlos A. Palacio y Daniel F. Valbuena, por su dedicación en el desarrollo de este trabajo, su constante acompañamiento y valiosa asesoría.

A la Gobernación de Antioquia y al proyecto PIMECLA "*Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño*", liderado por el DAGRAN y la Universidad de Antioquia, por brindarme la oportunidad de adentrarme en el mundo de la modelación numérica y lograr estos excelentes resultados. También, agradezco al semillero de *Modelación Numérica del Océano y la Atmósfera* – SEMOCEA – por abrirme las puertas al conocimiento de programación y simulaciones de variables hidrodinámicas.

Un agradecimiento especial a mi compañero José Manuel Zapata Pico por su asesoría y disposición para compartir sus conocimientos, especialmente en la primera fase de mi investigación. A mis compañeros Manuela Rendón, Valentina Henao, Andrea Agudelo, Carmelina Lozano, Albeiro Escudero y a la cohorte 2019/1 por caminar a mi lado en estos últimos años y brindarme su apoyo incondicional en este camino profesional.

Contenido

Resumen	17
Abstract	18
1. Introducción	20
2. Objetivos	22
2.1. Objetivo general	22
2.2. Objetivos específicos.....	22
3. Área de estudio y métodos	23
3.1. Descripción del área de estudio.....	23
3.2. Modelación numérica.....	25
3.2.1. Mallas de cálculo.....	27
3.2.2. Batimetría y condiciones iniciales.....	28
3.2.3. Condiciones de frontera	31
3.3. Casos de estudio	33
3.3.1. Análisis mensual multianual de las corrientes	33
3.3.2. Análisis de los procesos zonales y meridionales a nivel general y local	34
3.3.3. Análisis del comportamiento hidrodinámico por medio de los niveles de mar	35
4. Resultados y discusiones.....	36
4.1. Análisis mensual multianual del campo de corrientes durante los años 2015 a 2019....	36
4.2. Análisis estacional de las corrientes durante los años 2015 a 2019.	39
4.2.1. Zona centro del golfo de Urabá.....	39
4.2.2. Procesos hidrodinámicos en la playa La Martina.....	43
4.2.3. Análisis de los niveles del mar en la serie temporal 2015 – 2019	50
4.3. Identificación de los aportes del flujo del río Atrato a la corriente total estimada de la zona de estudio durante el año 2019.	54

4.3.1.	Análisis de niveles de mar con y sin influencia del rio	63
5.	Conclusiones	69
6.	Recomendaciones	71
8.	Anexos	76
	Anexo 1. Calibración del modelo numérico Delft3D: Rugosidad del fondo tipo Chezy.....	76
	Anexo 2. Validación del modelo hidrodinámico Delft3D.	79
	Anexo 3. Promedio mensual multianual para la zona centro del golfo de Urabá.	82
	Anexo 4. Promedio mensual multianual para playa La Martina.	83

Lista de tablas

Tabla 1. Bases de datos en las que se forzó inicialmente el modelo	29
Tabla 2. Análisis estadístico de las simulaciones con todos los forzantes y las simulaciones de los casos sin río para época seca (enero y febrero) y época húmeda (septiembre y octubre).....	68
Tabla 3. Análisis estadístico de las simulaciones del modelo.....	78
Tabla 4. Análisis estadístico de las simulaciones del modelo para la fase de validación	81

Lista de figuras

Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 2. Mallas de cálculo: a) gruesa y b) fina. (c) Corte transversal con niveles sigma. Fuente: Elaboración propia (2024).....	27
Figura 3. Batimetrías utilizadas. a) malla general y b) malla anidada c) dominio de estudio. Fuente: Elaboración propia (2024).....	30
Figura 4. Datos de la estación Bellavista para el caudal del río Atrato. (Años 2015 – 2019). Fuente: Elaboración propia (2024).....	31
Figura 5. Cortes zonales (norte – sur) y meridionales (este – oeste) en la malla anidada (izq) y en el dominio de estudio (der).....	34
Figura 6. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual intercalado en la zona centro del golfo de Urabá para el periodo 2015 - 2019.....	37
Figura 7. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual intercalado en la playa La Martina para el periodo 2015 - 2019.....	39
Figura 8. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 en la malla anidada con todos los forzantes para: a) época seca (Enero – Febrero), b) época de transición (Junio – Julio) y c) época húmeda (Septiembre – Octubre).....	40
Figura 9. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época seca (Enero – Febrero) en playa La Martina.	43
Figura 10. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época de transición (Junio – Julio) en playa La Martina.	44
Figura 11. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época húmeda (Septiembre – Octubre) en playa La Martina.	45
Figura 12. Serie temporal de la corriente superficial en una boya virtual ubicada en playa La Martina ((2015 – 2019). a) Magnitud de la velocidad; b) componente u; c) componente v.....	47
Figura 13. Perfil vertical de velocidades en la boya virtual para los años 2015 a 2019 con media móvil diaria: a) componente u; b) componente v (coordenadas Latitud: 8° 9' 59.76 Longitud 76° 44' 55).	48

Figura 14. Promedios mensuales multianuales del perfil vertical de la velocidad de las corrientes de la componente u para época seca (Enero – Febrero), de transición (Junio – Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre). Coordenadas Latitud: 8° 9' 59.76 Longitud 76° 44' 55	49
Figura 15. Promedios mensuales multianuales del perfil vertical de la velocidad de las corrientes de la componente v para época seca (Enero – Febrero), de transición (Junio – Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre). Coordenadas Latitud: 8° 9' 59.76 Longitud 76° 44' 55	50
Figura 16. Niveles de mar de promedios mensuales de la serie temporal 2015 –2019 para el sitio de la boya virtual ubicada.....	51
Figura 17. Anomalía del nivel del mar de promedios mensuales de la serie temporal 2015 –2019 para el sitio de la boya virtual ubicada.	52
Figura 18. Niveles de mar para la boya virtual ubicada con resultados cada 12 h de la serie temporal 2015 –2019 por épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).	53
Figura 19. Campo vectorial de corrientes promedios mensuales para el año 2019 en la zona centro del golfo de Urabá. Escenario con todos los forzantes (panel superior), simulaciones sin el caudal de los ríos (panel inferior). Épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre)	55
Figura 20. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial en la zona centro del golfo de Urabá en los escenarios con y sin aporte del río para la época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre) del año 2019 en la malla anidada.	56
Figura 21. Campo vectorial de corrientes promedios mensuales para el año 2019 en la zona de la playa La Martina. Escenario con todos los forzantes (panel superior), simulaciones sin el caudal de los ríos (panel inferior). Épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre)	58
Figura 22. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial en la zona de Playa La Martina en los escenarios con y sin aporte del río para la época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre) del año 2019 en la malla anidada.....	59
Figura 23. Evolución temporal del perfil vertical de velocidades con media móvil diaria (componente u – arriba- y v -abajo-) en el sitio de la boya virtual para el año 2019. Simulaciones con río (izquierda) y sin río (derecha). Coordenadas Latitud: 8° 9' 59.76 Longitud 76° 44' 55	61
Figura 24. Perfil vertical de la componente u de la velocidad para las simulaciones con y sin aporte del río en el lugar de la boya virtual para el año 2019 en la época seca (Enero – Febrero), transición (Junio – Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).....	62
Figura 25. Perfil vertical de la componente v de la velocidad para las simulaciones con y sin aporte del río en el lugar de la boya virtual para el año 2019 en la época seca (Enero – Febrero), transición (Junio – Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).....	63

Figura 26. Promedios mensuales del nivel de mar para un punto en playa la Martina en el año 2019. Escenarios con y sin río.....	64
Figura 27. Cálculo de la diferencia relativa (Pdr) de la magnitud total de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.	65
Figura 28. Cálculo de la diferencia relativa (Pdr) de la componente u de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.	66
Figura 29. Cálculo de la diferencia relativa (Pdr) de la componente v de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.	67
Figura 30. Niveles de mar obtenidos de las salidas del modelo numérico Delft3D en función de los datos in situ ADCP01.	77
Figura 31. A) Niveles de mar obtenidos de las salidas del modelo numérico Delft3D durante los meses de enero, febrero y marzo de 2019. B) Comparación de las salidas del modelo con los datos tomados en campo para la validación.	80
Figura 32. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual en la zona centro del golfo de Urabá para el periodo 2015 - 2019.	82
Figura 33. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual en la Playa La Martina para el periodo 2015 - 2019.....	83

Resumen

En sistemas estuarinos y deltaicos la hidrodinámica local tiene un gran impacto en el transporte de sedimentos costeros que puede afectar la morfología litoral. En el estuario del golfo de Urabá, el campo de corrientes en 2D y 3D es complejo debido a la influencia de las descargas de ríos (Atrato, León y Turbo), la intensidad del viento y la marea. En particular, la playa La Martina (Turbo) en los últimos años ha experimentado problemas de erosión e inundación. En este sentido, es importante comprender las variaciones espaciales de la hidrodinámica y su influencia en las comunidades litorales y proyectos turísticos asentados allí. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad espacio temporal de los procesos hidrodinámicos en la playa La Martina entre los años 2015 y 2019. Con este fin se empleó el módulo FLOW del modelo Delft3D, el cual fue calibrado y validado con datos medidos *in situ* en febrero de 2019. Se utilizaron dos mallas de discretización: una externa (123 m * 123 m) del golfo de urabá y otra anidada (40 m * 40 m) con enfoque en la playa La Martina. Con los campos de corrientes fueron analizados procesos zonales y meridionales (este-oeste, norte-sur, respectivamente). Los resultados sugieren que en época seca (enero – febrero) los valores de la magnitud de las corrientes son menores que en época de transición (junio – julio) y húmeda (septiembre – octubre). Los resultados sugieren que en época seca (enero – febrero) los valores en la magnitud de las corrientes son menores que en época de transición (junio – julio) y húmeda (septiembre – octubre) esto probablemente a las bajas precipitaciones que se dan en esta época y que es un periodo fuertemente dominado por los vientos alisios que vienen del norte. En general, los cortes este – oeste muestran un flujo que se dirige hacia la costa en superficie y que al llegar a la costa se regresa en profundidad hacia el oeste y un flujo en dirección norte – sur. Los valores máximos de magnitud estuvieron entre 0.1 m/s y 0.2 m/s en todo el dominio de estudio. En época húmeda en los cortes norte – sur se observó un ligero apilamiento de agua en la costa que podría ser atribuido a un bombeo de Ekman debido a los vientos del sur, estos resultados se corroboraron con los análisis del nivel de mar en época húmeda (septiembre – octubre), en el que se evidenció un aumento del nivel del mar en toda la serie temporal los resultados de estas simulaciones podrían las inundaciones que se presentan debido al aumento del nivel del mar y en su efecto la erosión de las playas. Se analizó la sensibilidad del modelo con y sin la presencia del río para el año 2019. Se analizó la sensibilidad del modelo con y sin la presencia del río para el año 2019 y se halló que al desactivar la descarga de los ríos la magnitud de las velocidades disminuye y en

conjunto los niveles de mar. Finalmente, una diferencia relativa del 80% entre el escenario con y sin río destaca que toda la zona de playa La Martina se ve influenciada por el aporte de los ríos.

Palabras clave: hidrodinámica; DELFT 3D; golfo de Urabá; playa La Martina.

Abstract

In estuarine and deltaic systems, local hydrodynamics have a significant impact on coastal sediment transport that can affect coastal morphology. In the estuary of the Gulf of Urabá, the 2D and 3D current field is complex due to the influence of river discharges (Atrato, León and Turbo), wind intensity and tide. La Martina beach (Turbo) in recent years has experienced erosion and flooding problems. In this sense, it is important to understand the spatial variations of hydrodynamics and their influence on the coastal communities and tourism projects located there. The objective of this work was to analyze the spatiotemporal variability of hydrodynamic processes in La Martina beach between 2015 and 2019. For this purpose, the FLOW module of the Delft3D model was used, which was calibrated and validated with data measured in situ in February 2019. Two discretization grids were used: an external one (123 m * 123 m) of the Gulf of Urabá and a nested one (40 m * 40 m) with focus on La Martina beach. Zonal and meridional processes (east-west, north-south, respectively) were analyzed with the current fields. The results suggest that in the dry season (January - February) the values of the magnitude of the currents are lower than in the transition (June - July) and wet season (September - October). The results suggest that in the dry season (January - February) the values in the magnitude of the currents are lower than in the transition season (June - July) and wet season (September - October), probably due to the low rainfall during this period, which is strongly dominated by the trade winds coming from the north. In general, the east-west slices show a flow that is directed towards the coast at the surface and that upon reaching the coast returns in depth towards the west and a flow in a north-south direction. The maximum magnitude values were between 0.1 m/s and 0.2 m/s throughout the study domain. During the wet season in the north-south cuts, a slight pile-up of water on the coast was observed, which could be attributed to Ekman pumping due to the southerly winds. These results were corroborated with the analysis of sea level during the wet season (September-October), which showed an increase in sea level throughout the time series, the results of these simulations could indicate the flooding that occurs due to the increase in sea

level and its effect on beach erosion. The sensitivity of the model with and without the presence of the river for the year 2019 was analyzed. The sensitivity of the model with and without the presence of the river for the year 2019 was analyzed and it was found that by deactivating the river discharge the magnitude of the velocities decreases and the sea levels. Finally, a relative difference of 80% between the with and without river scenario highlights that the entire La Martina beach area is influenced by river input.

Keywords: hydrodynamics; DELFT 3D; Gulf of Urabá; La Martina beach.

1. Introducción

Las características hidrodinámicas locales en sistemas estuarinos y deltaicos pueden condicionar procesos físicos como los cambios en la morfología, la propagación del oleaje y el transporte de sedimentos o de sustancias biogeoquímicas en las zonas costeras y litorales. Son precisamente las zonas litorales lugares de gran relevancia científica marino-costeras debido a su vulnerabilidad frente al cambio climático global ya que es el lugar donde se realiza la transferencia de agua, sedimentos y nutrientes desde las cuencas fluviales (Restrepo, 2014).

En general, la circulación marina en el golfo de Urabá es modulada por la descarga de los ríos y el esfuerzo del viento (Roldán, 2008). Los efectos de la descarga de ríos caudalosos (Atrato, León, entre otros), sumados a condiciones atmosféricas intra-anales (vientos Alisios a fin e inicio de año y vientos del sur desde mediados de año), modulan de manera compleja dinámica del golfo y su interacción con el litoral.

En los últimos años la franja litoral del golfo de Urabá y del departamento de Antioquia ha sufrido de fuertes eventos erosivos los cuales han sido objeto de numerosas investigaciones (Aristizábal *et al.*, 1990; Gonzales, 1992; Franco & Gómez, 1996; Posada, 2002; Gonzáles & Guarín, 2003; Correa & Vernet, 2004; Macorra, 2004; Posada P & Henao, 2008; Paniagua, 2013; Caicedo *et al.*, 2017; Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia, 2018). Estos estudios reportan retrocesos de la línea de costa entre 50 m y 100 m en los últimos 40 años, siendo los lugares con mayores retrocesos, Punta Las Vacas y La Martina (Turbo), Zapata (Necoclí), Damaquiel y Uveros (San Juan de Urabá) y río Hobo (Arboletes) con valores promedios de 4 m/año y un máximo de 40 m/año en la zona de Puerto Rey (Arboletes).

De manera particular, la playa de La Martina a lo largo de los años ha reportado tasas de erosión entre 0.6 m/año y 4.5 m/año (Thomas, *et al.*, 2007; Paniagua, 2013). Por otro lado, el cambio de los caudales de los ríos Cope y Turbo (sur de la playa) y la existencia de una corriente semi permanente de norte – sur ha sido evidenciado por Robledo-Posada (2019) y Valbuena (2021). Con base en esta dinámica se han presentado problemas de inundaciones y erosión que han llevado a la comunidad y al gobierno municipal a construir obras costeras como espolones con pocos criterios técnicos (Nieto-Oliveros, 2011).

Sin embargo, existen pocos estudios espaciales de la hidrodinámica local del sector de La Martina, así como la influencia de sus afluentes cercanos. En este sentido, Alcántara-Carrió *et al.*

(2019) sugirieron realizar estudios hidrodinámicos en el área del delta del río Turbo, zona que tiene influencia en la parte sur de la playa La Martina. A través de la modelación numérica se han llevado a cabo estudios espaciales de variables hidrodinámicas en el área del golfo de Urabá. En particular, se han utilizado modelos como ELCOM, CAEDYM, ECOMSED y Delft3D validados con mediciones puntuales *in situ* (Montoya & Toro, 2006; Álvarez & Bernal, 2007; Montoya, 2010; Escobar, 2011; Escobar et al., 2015). Los resultados de estas investigaciones han permitido obtener modelos capaces de reproducir la variabilidad espacial y temporal de la circulación en el golfo, incluyendo la influencia del viento, las mareas y el río Atrato. Así mismo, en la zona de La Martina Robledo-Posada (2019) y Valbuena (2021) mostraron como resultados más relevantes que la dirección predominante de las corrientes superficiales es hacia el sur, con velocidades máximas de hasta 27.5 cm/s y que los niveles de mar presentan una variación diaria de aproximadamente 0.2 m.

Por lo tanto, conocer los patrones de la circulación costera permite identificar áreas de mayor vulnerabilidad frente a procesos erosivos, así como aquellas áreas propicias para la acumulación de sedimentos (Ramos-Reyes *et al.*, 2016). Lo anterior resulta fundamental en el diseño y construcción de intervenciones orientadas a proteger y conservar la infraestructura y los ecosistemas costeros. Así mismo, información hidrodinámica adecuada puede permitir una gestión adecuada del turismo y la prevención de desastres naturales.

Teniendo en cuenta lo anterior y tratando entender de una mejor manera la evolución de esta playa surge como motivación principal la necesidad de avanzar en el conocimiento de las condiciones hidrodinámicas, de tal manera que se pueda contribuir a la caracterización de los forzadores que producen la modificación del litoral. Esto teniendo en cuenta el asentamiento de comunidades y desarrollos turísticos en este lugar.

Por lo tanto, en la presente investigación se utilizó el modelo Delft3D, con el cual se realizó una modelación hidrodinámica en tres dimensiones en régimen no permanente del flujo. En esta investigación se incorporaron los efectos de las mareas, los vientos, las diferencias de densidad (debidos a la salinidad y temperatura), teniendo en cuenta morfología variable o fija. Con este modelo se generaron dos dominios de cálculo con tamaños de mallas de 40*40 m y 120*120 m. Haciendo uso de esta herramienta, se desarrolló como objetivo principal el análisis de la variabilidad espacio temporal de los principales procesos hidrodinámicos en la playa La Martina.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad espacio temporal de los procesos hidrodinámicos en la zona de la playa La Martina durante los años 2015 a 2019 por medio de modelación numérica.

2.2. Objetivos específicos

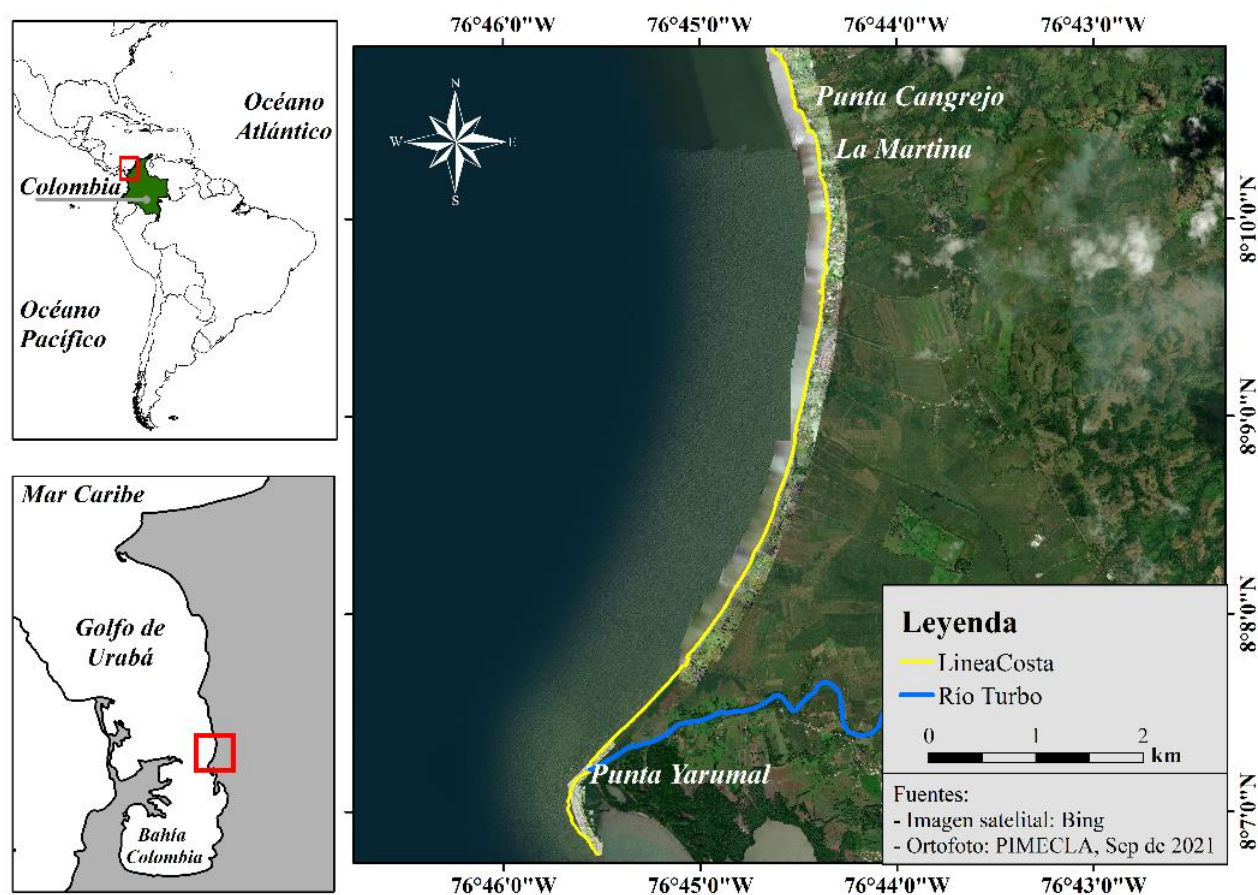
- Caracterizar los procesos hidrodinámicos mensuales multianuales en la zona playa La Martina.
- Identificar los principales procesos hidrodinámicos paralelos y perpendiculares a la línea de costa en la zona de estudio.
- Analizar la influencia del caudal del río Atrato en el campo de corrientes durante el año 2019 en la zona de estudio.

3. Área de estudio y métodos

3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra al interior del golfo de Urabá, delimitada entre Punta Yarumal y Punta Cangrejo (Figura 1), zona conocida como Playa La Martina. Esta playa está ubicada al norte de la cabecera municipal del distrito de Turbo, a 6.5 km del delta del río Turbo y tiene una extensión aproximada de 2 km (Valbuena, 2021).

Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia.



Esta playa es reconocida por su desarrollo turístico, ofreciendo una diversidad de locales y restaurantes para visitantes y residentes. Sin embargo, este lugar turístico ha sufrido históricamente de problemas de erosión e inundación (Ramírez-Guerrero, 2020). Además del uso turístico, también es un área que se caracteriza por la presencia de zonas con mangle y por la

actividad agrícola. Se puede observar además que los aportes hídricos están ubicados en la zona sur relacionados con la presencia de los ríos Cope y Turbo. Esta investigación busca evidenciar la influencia de estos ríos no sólo por sus aportes de agua dulce, sino también por la disposición de material granular y en suspensión (Ramírez-Guerrero, 2020).

Las condiciones climáticas y oceanográficas que modulan los procesos de la playa La Martina están relacionadas principalmente por los procesos que ocurren dentro del golfo de Urabá. Los patrones de circulación dentro del golfo de Urabá son el resultado de moduladores como los aportes fluviales de los ríos, el campo de vientos y la marea (Bedoya, 2024).

Por su parte, las corrientes pueden originarse por varios fenómenos como la descarga de los ríos, la marea, la dirección del viento o el rompimiento/dirección del oleaje. Los aportes de los ríos Atrato y León generan corrientes sur-norte, dependiendo del régimen climático (Jaramillo et al., 2010). En el caso de las mareas, las corrientes están orientadas en sentido norte-sur durante su ascenso y sur-norte en el período de descenso (Barranco *et al.*, 2021). En el caso del viento local debido a la poca profundidad de la zona este puede controlar las velocidades de las corrientes litorales. La dirección y rompimiento del oleaje en la playa La Martina puede generar corrientes paralelas a la costa, que son posiblemente las responsables de los movimientos de arenas y variaciones de las líneas de costa (Robledo-Posada, 2019).

La playa La Martina está ubicada al nor-este del delta del río Turbo y por lo tanto los cambios naturales y antrópicos que se presentan en la parte media y alta de la cuenca se ven reflejado en la cantidad de sedimentos que llegan al litoral. Estos sedimentos tienen un área reducida de acumulación en la planicie costera y, por lo tanto, algunos de ellos viajan hacia el este (centro del golfo) o en dirección hacia el sur donde son depositados en zonas de manglar (Nieto-Oliveros, 2011).

La variabilidad climática de La Martina está modulada por el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este movimiento produce dos estaciones climáticas contrastantes en términos de patrones de lluvia y viento. La estación seca (pocas lluvias) ocurre entre diciembre y abril, con precipitaciones promedio entre 40 y 100 mm/mes. Durante esta temporada dominan los vientos alisios del norte y noreste. La temporada de lluvias va de mayo a noviembre, la precipitación es de 200 a 300 mm/mes, y la dirección promedio del viento es del sur (Barrientos y Mosquera, 2018; Mercado y Hernández, 2020). Durante los meses de junio y julio se presentan ligeros incrementos en la intensidad de los vientos alisios, y, por lo

tanto, este periodo es considerado una época de transición (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH, 2021).

Por otro lado, el oleaje tipo *swell* llega desde la parte nor-este del mar Caribe con valores más energéticos durante la época seca y menos energéticos durante la época húmeda (Valbuena, 2021). Mientras que el oleaje local (*wind sea*), proviene principalmente del sur en temporada de lluvias (Padilla, 2018), con valores de Hs de 0,4 m y periodo pico (Tp) de 4 s (Molina-Florez, 2014; Alcántara-Carrió et al. 2019). En este lugar la marea tiene un régimen semidiurno mixto con amplitudes máximas de $\pm 0,4$ m (Higuita y Quintana, 2020).

3.2. Modelación numérica

En esta investigación se empleó como principal herramienta el modelo hidrodinámico Delft3D. Se llevó a cabo la implementación de dos mallas, el proceso de calibración y validación del modelo, y se realizaron simulaciones para el periodo 2015-2019.

El modelo Delft3D fue desarrollado por WL/Delft Hydraulics y se ha perfeccionado a través de una serie de versiones evolutivas a lo largo de los últimos 20 años (WL Delft Hydraulics, 2023). Es un modelo que incorpora procesos morfodinámicos (a través del transporte de sedimentos) dinámica de contaminantes e hidrodinámicos en costas, estuarios y cuerpos fluviales. Tiene una interfaz gráfica con diferentes módulos que permiten modificar la batimetría, diseñar mallas estructuradas y no estructuradas y ejecutar de manera simultánea varios módulos.

En este trabajo se empleó el módulo Flow, con el cual se simularon las condiciones hidrodinámicas del flujo (campo de corrientes) de formar no estacionaria, así como el transporte de sedimento y se incluyeron como forzantes la salinidad, el campo de viento y la descarga de ríos.

A continuación, se presenta una breve descripción de las ecuaciones que resuelve el módulo FLOW. En primer lugar, se presenta la ecuación de continuidad (ecuación 1):

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d + \xi)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d + \xi)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) + P + E \quad (1)$$

donde u , v y w corresponden a las componentes de la velocidad en direcciones ξ , η , σ respectivamente, q es la fuente/sumidero de agua por unidad de volumen [m^3/s], $G_{\eta\eta}$ y $G_{\xi\xi}$ son coeficientes de conversión entre coordenadas curvilíneas y ortogonales, P y E son términos asociados a la precipitación y evaporación. Este modelo permite calcular la dirección y velocidad

de las corrientes superficiales, los parámetros integrales del oleaje y los niveles de las mareas entre otros (Posada-Jaramillo, 2019).

En las ecuaciones (2) y (3) se presentan las expresiones para las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (3)$$

donde P_ξ y P_η son los gradientes de presión, $\partial\tau_{\xi\xi}$, $\partial\tau_{\xi\eta}$, $\partial\tau_{\eta\xi}$ son las tensiones de Reynolds, M_ξ y M_η son las fuentes y sumideros de la cantidad de movimientos externos (fuerzas externas sobre estructuras hidráulicas, descargas y escapes de aguas, tensiones en el fondo, tensiones en la superficie libre, entre otros), f es el parámetro de Coriolis y vv es la viscosidad turbulenta vertical.

En la ecuación (4) se presenta la ecuación de transporte en la coordenada sigma (σ). En este caso se tiene en cuenta el transporte de materia y calor mediante la ecuación de advección-difusión en 3D. Los conceptos fuente y sumidero están incluidos en esta expresión. La ecuación se presenta en forma conservativa y en coordenadas curvilíneas ortogonales en la dirección horizontal y coordenadas σ en la dirección vertical:

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\xi)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\xi)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial\omega c}{\partial \sigma} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{G_{\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{G_{\eta\eta}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d(d+\zeta)c + s \quad (4)$$

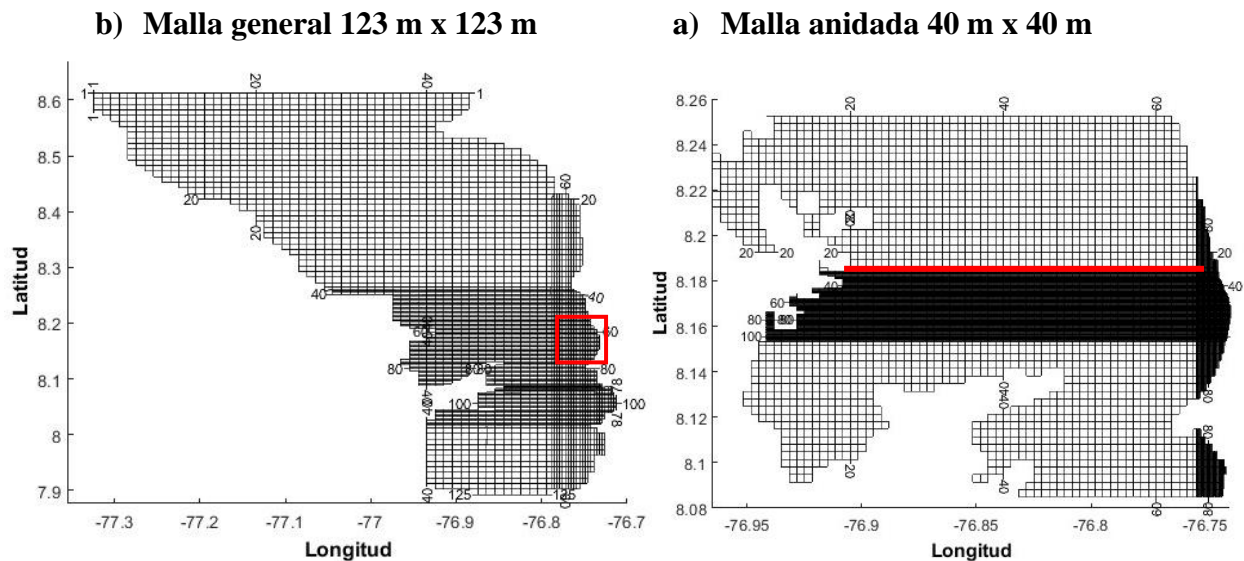
donde D_H representa el coeficiente de turbulencia horizontal y D_v de turbulencia vertical. λ_d está relacionado con el proceso de decaimiento en primer orden, S es la fuente/sumidero por unidad

de área debido a la entrada o salida (q_{in} o q_{out}) del agua, y/o al intercambio de calor a través de la superficie libre Q_{tot} .

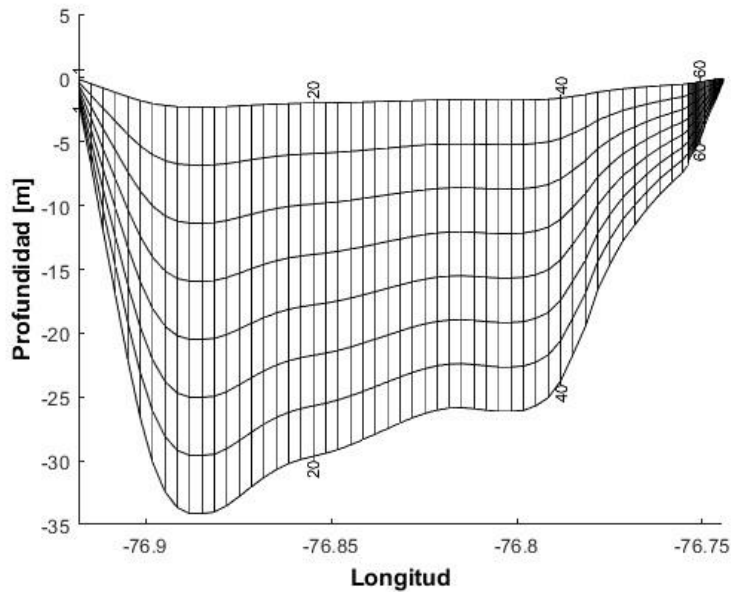
3.2.1. Mallas de cálculo

En la implementación del modelo se usaron dos mallas, una gruesa y una anidada. La malla de cálculo externa llegó hasta la frontera norte del golfo de Urabá con el fin de tener en cuenta la modulación del mar Caribe. Esta malla tuvo una resolución de 123 m x 123 m. La malla de cálculo anidada (fina), estuvo ubicada en la zona centro del golfo de Urabá y específicamente en el área de playa La Martina. La malla fina tuvo una resolución de 40 m x 40 m (Figura 2).

Figura 2. Mallas de cálculo: a) gruesa y b) fina. (c) Corte transversal con niveles sigma. Fuente: Elaboración propia (2024).



c) Corte transversal mostrando los niveles sigma



El modelo DELFT 3D utiliza coordenadas sigma, las cuales dividen la capa de agua en niveles que siguen el contorno de la batimetría y la línea de costa. Con el fin de tener una resolución detallada en la vertical, en este estudio se utilizaron 8 niveles sigma (Figura 2).

3.2.2. Batimetría y condiciones iniciales

Se empleó la batimetría de la carta náutica 412 (<https://www.cioh.org.co/index.php/cartas-nauticas.html>) la cual tiene una resolución promedio de 0.06 arc minutos (Figura 3). Además, se incorporó información batimétrica medida en la zona de estudio en el año 2019, la cual fue obtenida a través de la componente de topo batimetría del proyecto "*Investigación para revertir el proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*" (Gob.ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE (2021)). En la Tabla 1 se presentan las bases de datos que se usaron para configurar las condiciones iniciales del modelo numérico.

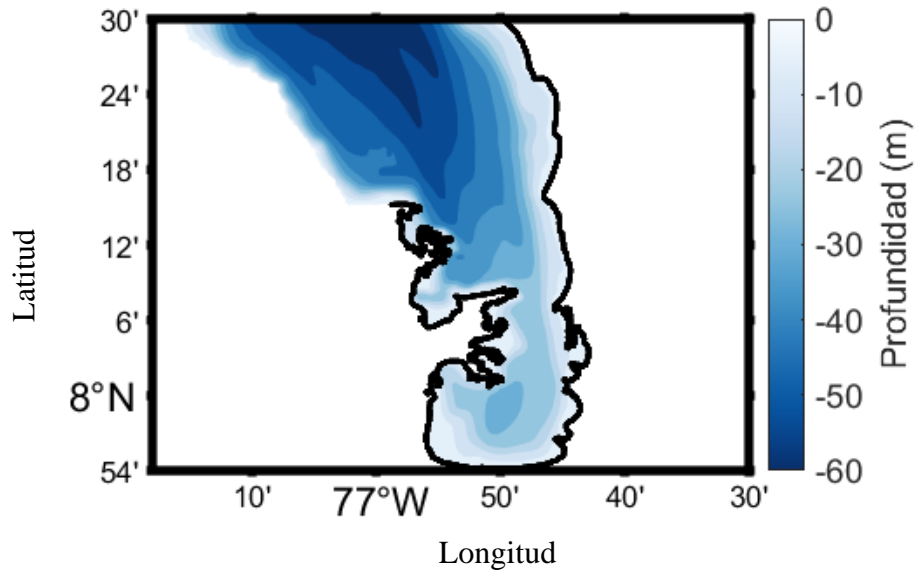
Tabla 1. Bases de datos en las que se forzó inicialmente el modelo

<i>Bases de datos</i>	<i>Periodo</i>	<i>Resolución espacial</i>	<i>Resolución temporal</i>	<i>Variables extraídas</i>
Carta Náutica N° 412	2006	0,001° (aproximadamente 6.3 metros)	N.A.	Batimetría
Batimetría medida. Proyecto “Investigación para revertir el proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”	2019	N.A.	N.A.	Batimetría
HYCOM	2015 - 2019	0,08° (aproximadamente 10 kilómetros)	Cada 6 horas	Componente de la velocidad a 10 m de altura: zonal (U_{10}) y meridional (V_{10}); radiación de onda corta; radiación de onda larga; precipitación; temperatura y humedad medidas a 2 m de altura, vientos frontera norte

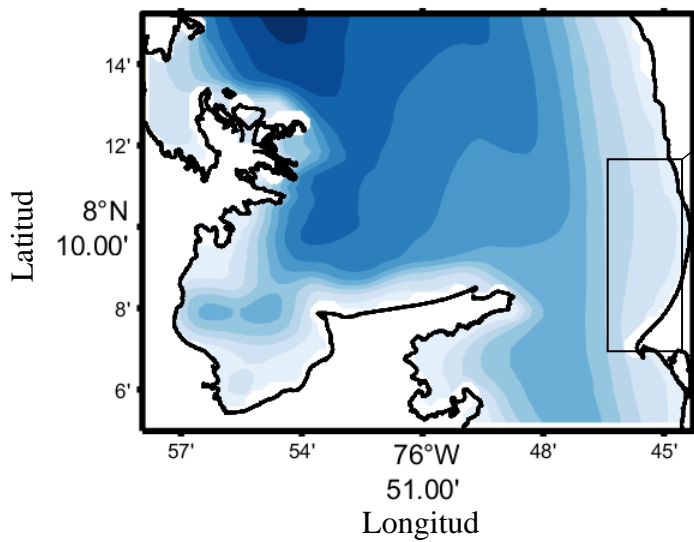
Tanto la información de la carta náutica como la batimetría fueron mezcladas conservado el nivel de referencia de la primera. En la Figura 3 se observa la batimetría del golfo, en la zona frente al delta del Atrato y en la playa La Martina.

Figura 3. Batimetrías utilizadas. a) malla general y b) malla anidada c) dominio de estudio.
Fuente: Elaboración propia (2024).

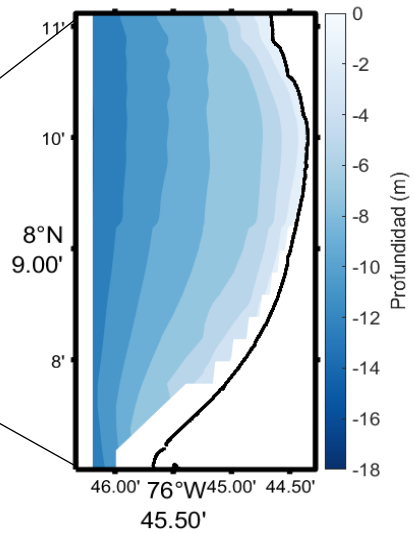
a) Malla general



b) Malla anidada



c) Dominio de estudio



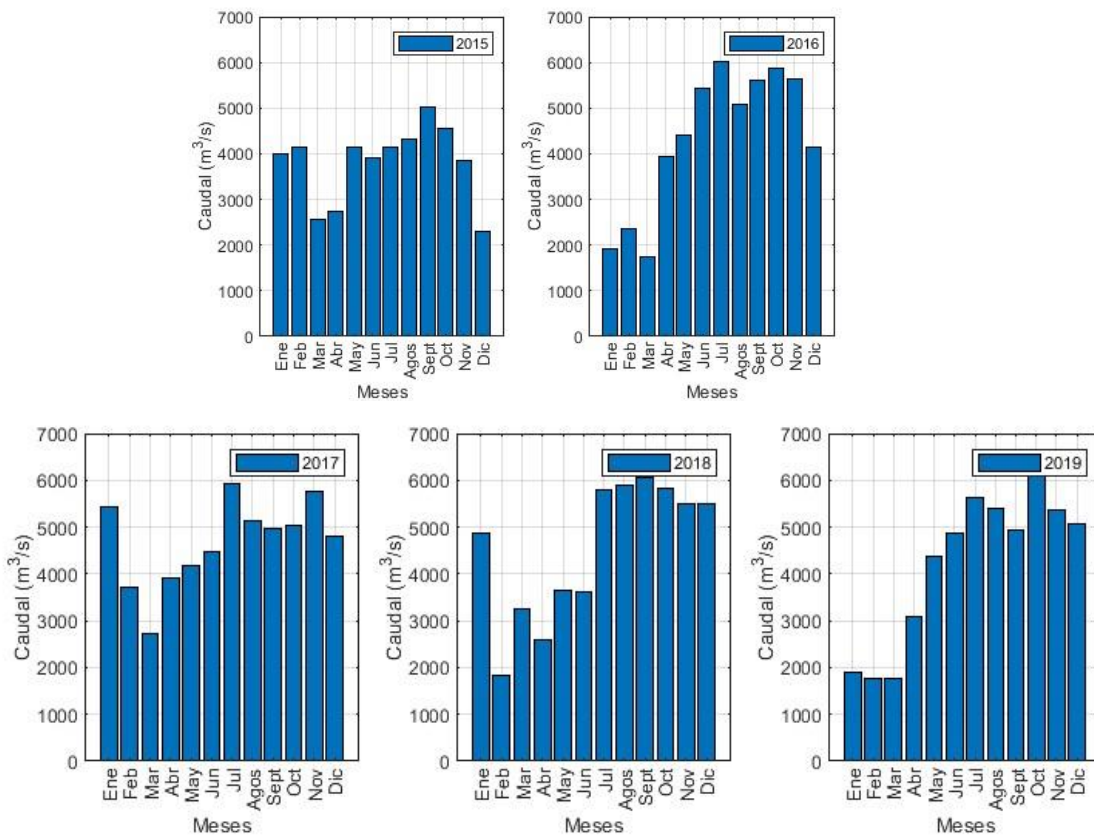
3.2.3. Condiciones de frontera

3.2.3.1. Descargas de ríos

En el golfo de Urabá, las descargas fluviales proporcionan una fuente de agua dulce y sedimentos que se mezclan con el agua salada del Caribe. Numerosos autores han investigado el impacto de los flujos de agua dulce en los estuarios (Usles et al., 2005; Simionato et al., 2004). En nuestro caso, el río más caudaloso que desemboca en el golfo de Urabá es el río Atrato, con un promedio mensual multianual de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Barrientos & Mosquera, 2019).

En este trabajo se tuvo en cuenta el trabajo de Roldan (2008), que menciona que el valor del total del caudal del Atrato se distribuye en cuatro bocas: El Roto, Matuntugo, Coco Grande y Leoncito. Los porcentajes de los valores de los caudales de cada una de las bocas son 65%, 15%, 5% y 15%, respectivamente. Se usaron los caudales diarios de la estación Bellavista (IDEAM 11077010) (Barrientos & Mosquera, 2019) entre los años 2015 a 2019 y se corrigieron con el factor de ajuste propuesto por Bedoya (2023) teniendo en cuenta que esta estación se encuentra a más de 100 km arriba de la desembocadura (Figura 4). Con el fin de representar la entrada del río en el dominio de estudio, se usaron nueve nodos en la malla anidada en donde se ubicó la descarga del caudal de las cuatro bocas principales consideradas en este estudio. En el modelo también se incluyeron caudales mensuales multianuales del río Turbo medidos en la estación El Dos por Aguas Regionales de Urabá.

Figura 4. Datos de la estación Bellavista para el caudal del río Atrato. (Años 2015 – 2019).
 Fuente: Elaboración propia (2024)



3.2.3.2. Vientos

En el golfo de Urabá los vientos exhiben un régimen unimodal influenciada por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), y los vientos alisios que vienen del este del mar Caribe, dando lugar a dos épocas climáticas bien marcadas y que presentaran variabilidad según los eventos del Niño y la Niña (Urrea et al., 2019). Según Chevillot y Molina (1993), Roldán (2008) y Restrepo y López (2008), la temporada seca abarca los meses de diciembre a abril, caracterizándose por los vientos alisios del norte con una velocidad promedio de 5 m/s. En contraste, la época lluviosa, se extiende de mayo a noviembre y se caracteriza por variaciones en la dirección del viento, predominando los vientos del sur con velocidades máximas de hasta 2 m/s.

El modelo DELFT 3D fue forzado con datos de la base Hycom. Los datos de magnitud y dirección se integraron en la malla externa y modularon la zona centro del golfo de Urabá, específicamente la playa La Martina.

3.2.3.3. Marea

Las constituyentes de los armónicos de marea y sus los valores de amplitud y fase fueron obtenidas por medio de DelftDashboard. Para esto se definió un punto en la frontera norte de la malla general en donde los valores de las constituyentes fueron convertidos en valores de niveles de agua.

3.3. Casos de estudio

A continuación, se presentan los casos analizados de los ejercicios de modelación entre 2015 y 2019. Se propusieron estos como casos representativos de los procesos físicos.

3.3.1. *Análisis mensual multianual de las corrientes*

Siguiendo la metodología propuesta por Toro et al. (2019) se analizaron los procesos hidrodinámicos a nivel multianual durante las tres épocas climáticas: seca que va desde diciembre hasta abril, húmeda que va de mayo a noviembre y transición en junio y julio (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH, 2021). En este caso se analizaron los meses más representativos de las épocas (EF, JJ, SO) y se hizo un análisis multianual.

Con el propósito de identificar los procesos hidrodinámicos tanto paralelos como perpendiculares en la región de estudio, así como analizar las contribuciones de los ríos Atrato y Turbo y su influencia en la corriente total, se llevaron a cabo simulaciones numéricas. Inicialmente, se realizó una simulación durante el periodo 2015 a 2019 en donde se forzó el modelo con todas las variables mencionadas (caudales, viento y marea). En estas modelaciones se hizo un análisis de sensibilidad del modelo a diferentes valores de la rugosidad de Chezy las cuales sirvieron para realizar el proceso de validación con mediciones *in situ* del área de playa La Martina. Posteriormente, se realizó un segundo experimento en donde se excluyó el caudal de los ríos para el año 2019. Este permitió una compararon de los resultados de las simulaciones en escenarios con y sin río. Con el fin de cuantificar el efecto del caudal del río Atrato en la

hidrodinámica en el área de estudio, se usó el porcentaje de diferencia relativa (Pdr), entre la magnitud de la velocidad de las corrientes con y sin río (Orejuela Moreno, 2020).

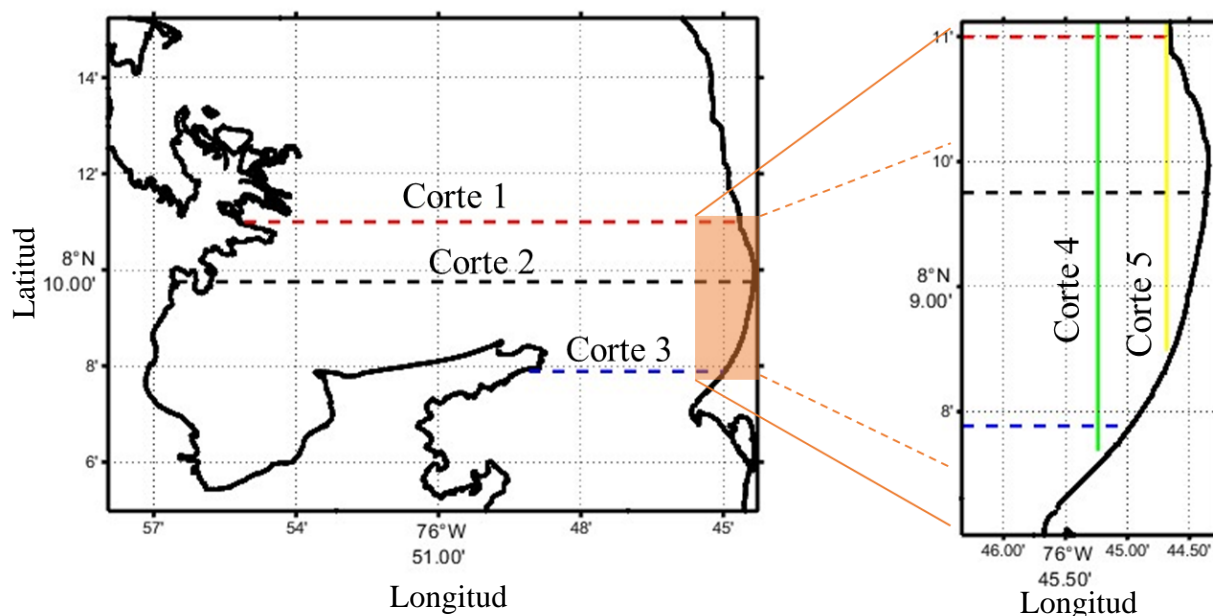
$$Pdr = \frac{V_f - V}{V_f} \times 100$$

donde V_f son los valores de la magnitud total de la velocidad y V son los valores de la magnitud de la velocidad en donde se excluyó el caudal del río. El Pdr permite es el porcentaje de la modulación que producen las descargas de los ríos sobre las corrientes totales.

3.3.2. Análisis de los procesos zonales y meridionales a nivel general y local

Con el objetivo de analizar el comportamiento espacial y temporal de las corrientes se usaron salidas de 5 cortes para examinar los procesos zonales (u) y meridionales (v) en la zona de estudio. En estos cortes se evaluó la magnitud de las corrientes y su campo vectorial en las 8 capas sigma. De esta manera se buscó evaluar la influencia de los principales ríos en la playa La Martina (Figura 5).

Figura 5. Cortes zonales (norte – sur) y meridionales (este – oeste) en la malla anidada (izq) y en el dominio de estudio (der).



3.3.3. Análisis del comportamiento hidrodinámico por medio de los niveles de mar

Con el fin de avanzar en el entendimiento del comportamiento hidrodinámico de la playa La Martina se usaron datos de nivel del mar. Este nivel desempeña un papel importante en variables como la altura del oleaje, la intensidad de las corrientes y la cantidad de sedimento transportado. Con este fin se obtuvieron resultados en un punto de la playa La Martina (boya virtual). Con esta información se hizo el análisis de los cambios en el nivel del mar de todo el periodo de estudio (2015 a 2019). Los valores de la anomalía del nivel del mar fueron analizados estacionalmente (épocas secas, de transición y húmeda).

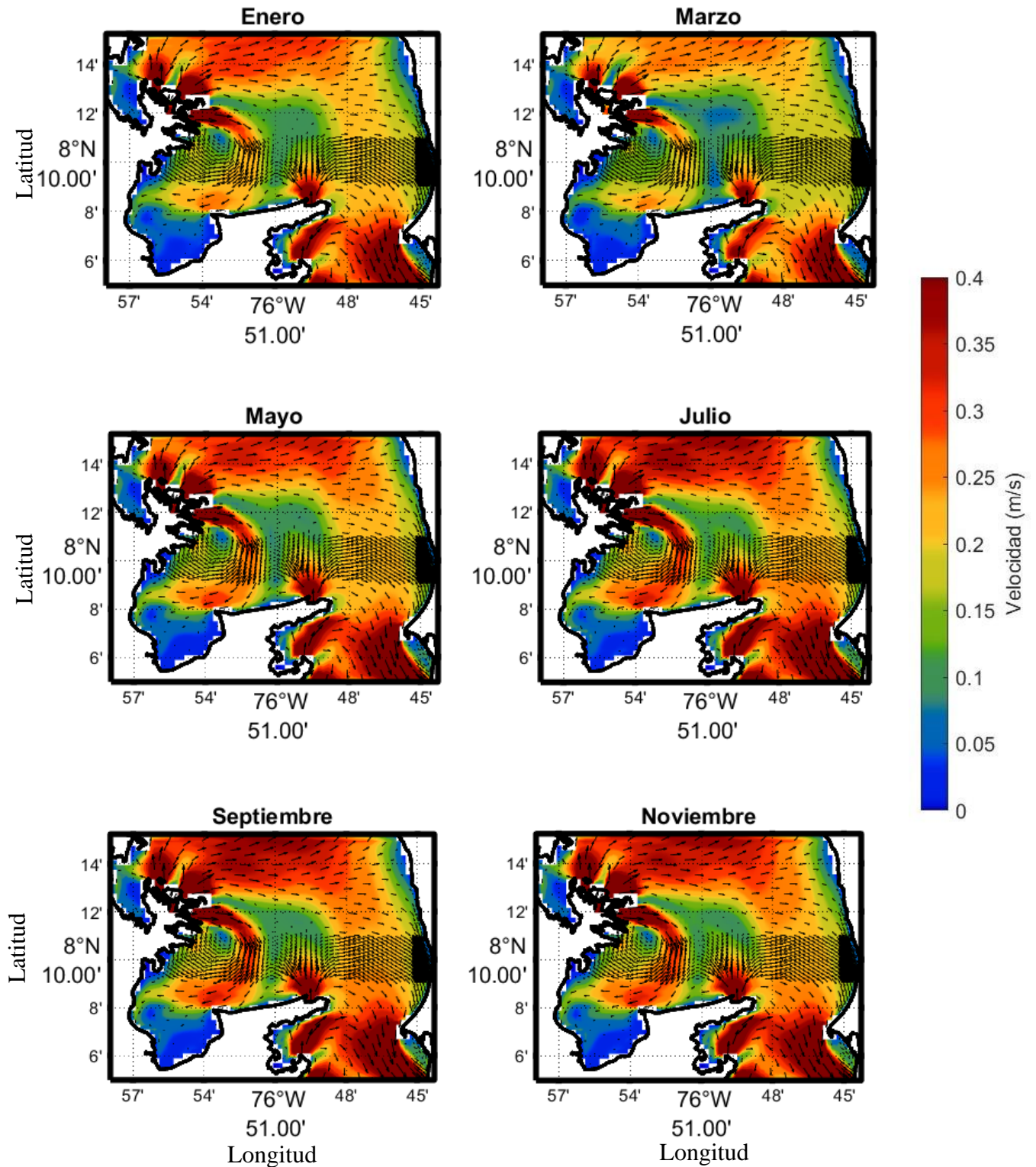
4. Resultados y discusiones

4.1. Análisis mensual multianual del campo de corrientes durante los años 2015 a 2019

Se presenta la simulación del campo vectorial de las corrientes correspondientes a los promedios mensuales multianuales de meses intercalados correspondientes a los años 2015 a 2019, considerando la malla anidada en la zona central del Golfo de Urabá (Figura 6) los meses completos se encuentran en el anexo 3. Se observa el comportamiento hidrodinámico del sistema estuarino a lo largo de cada uno de los meses.

En los primeros meses, específicamente febrero, marzo y abril, se observa que la magnitud de las corrientes es menor en la zona norte, con una dirección predominante hacia el sur. A medida que avanza el año, se aprecia un incremento en la magnitud de las corrientes, especialmente en las zonas cercanas a las desembocaduras de los ríos Atrato y León. Estos hallazgos coinciden con los encontrados por Velásquez (2013), quien sugiere que durante la época húmeda (septiembre, octubre y noviembre), el caudal de los ríos Atrato y León modula la circulación, generando corrientes mayormente hacia el norte. En contraste, en la época seca (enero, febrero y marzo) las corrientes superficiales tienden a dirigirse predominantemente hacia el sur, que de acuerdo con este mismo autor dan lugar a altas concentraciones de sedimentos en Bahía Colombia. En cuanto a los valores de la magnitud de las corrientes, se registraron velocidades superiores a 0.4 m/s en algunas zonas cercanas a los ríos, mientras que los valores promedio de las corrientes en la zona central del Golfo de Urabá están entre 0.25 m/s a 0.3 m/s. En términos generales, los resultados sugieren que el flujo superficial sale del golfo por la costa este y se ve modulado en gran parte de su ancho por las principales descargas fluviales.

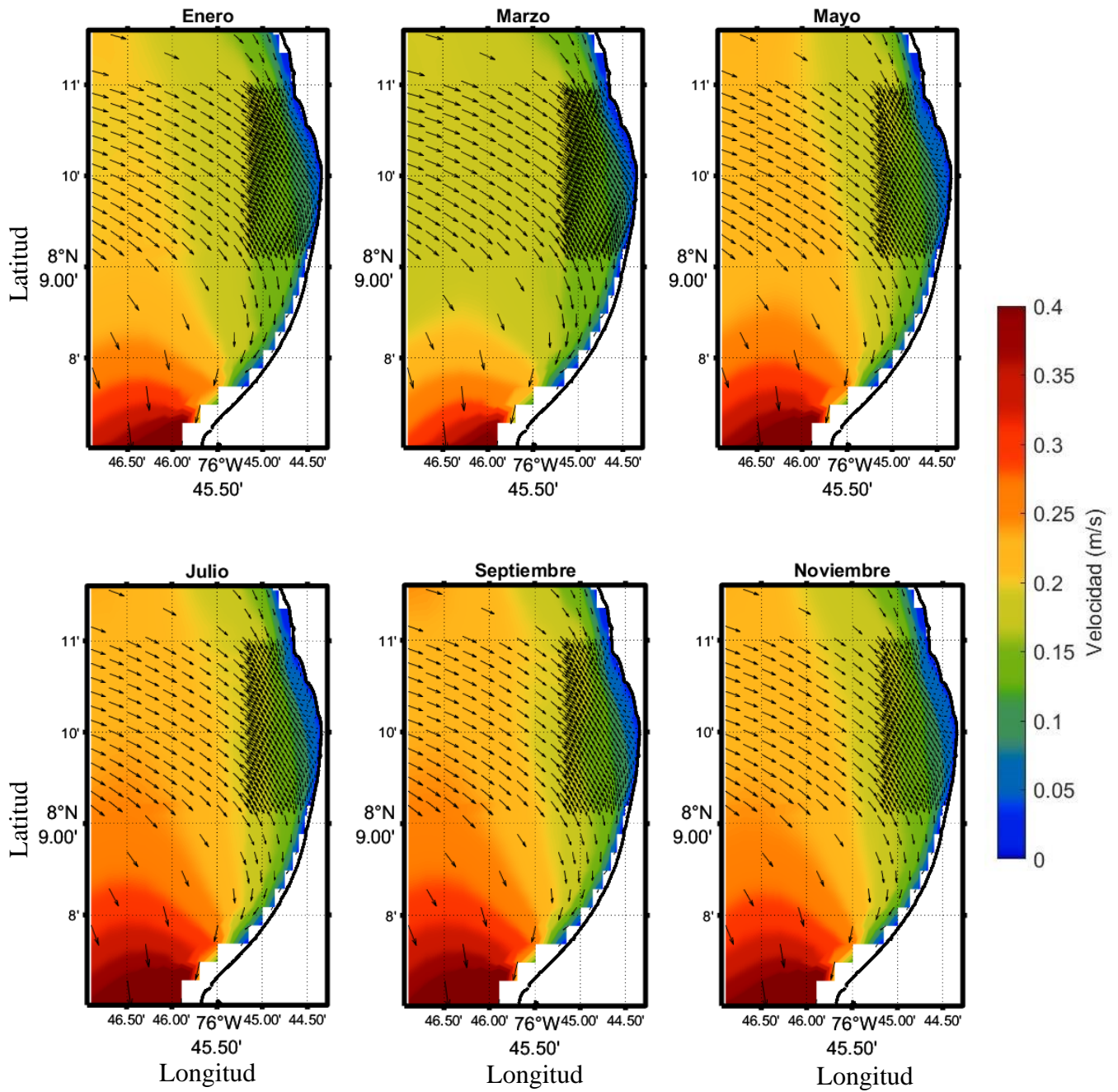
Figura 6. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual intercalado en la zona centro del golfo de Urabá para el periodo 2015 - 2019.



Por otro lado, al analizar los promedios mensuales multianuales de los meses intercalados correspondientes a los años 2015 a 2019, los meses completos se encuentran en el anexo 4.

En el sector de la playa La Martina, se observa un desplazamiento de norte a sur de la corriente superficial, con velocidades mayores en la parte sur del área de estudio (Figura 7). Estos valores aumentan a lo largo de los meses debido probablemente al incremento de las precipitaciones y a la intensificación de los vientos del sur durante la época húmeda (septiembre, octubre y noviembre). Esto produce corrientes de mayor magnitud, producido por el rompimiento del oleaje que facilita el transporte de sedimento. Se observa como las velocidades de las corrientes en la playa La Martina se mantuvieron entre 0.1 m/s a 0.25 m/s.

Figura 7. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual intercalado en la playa La Martina para el periodo 2015 - 2019.



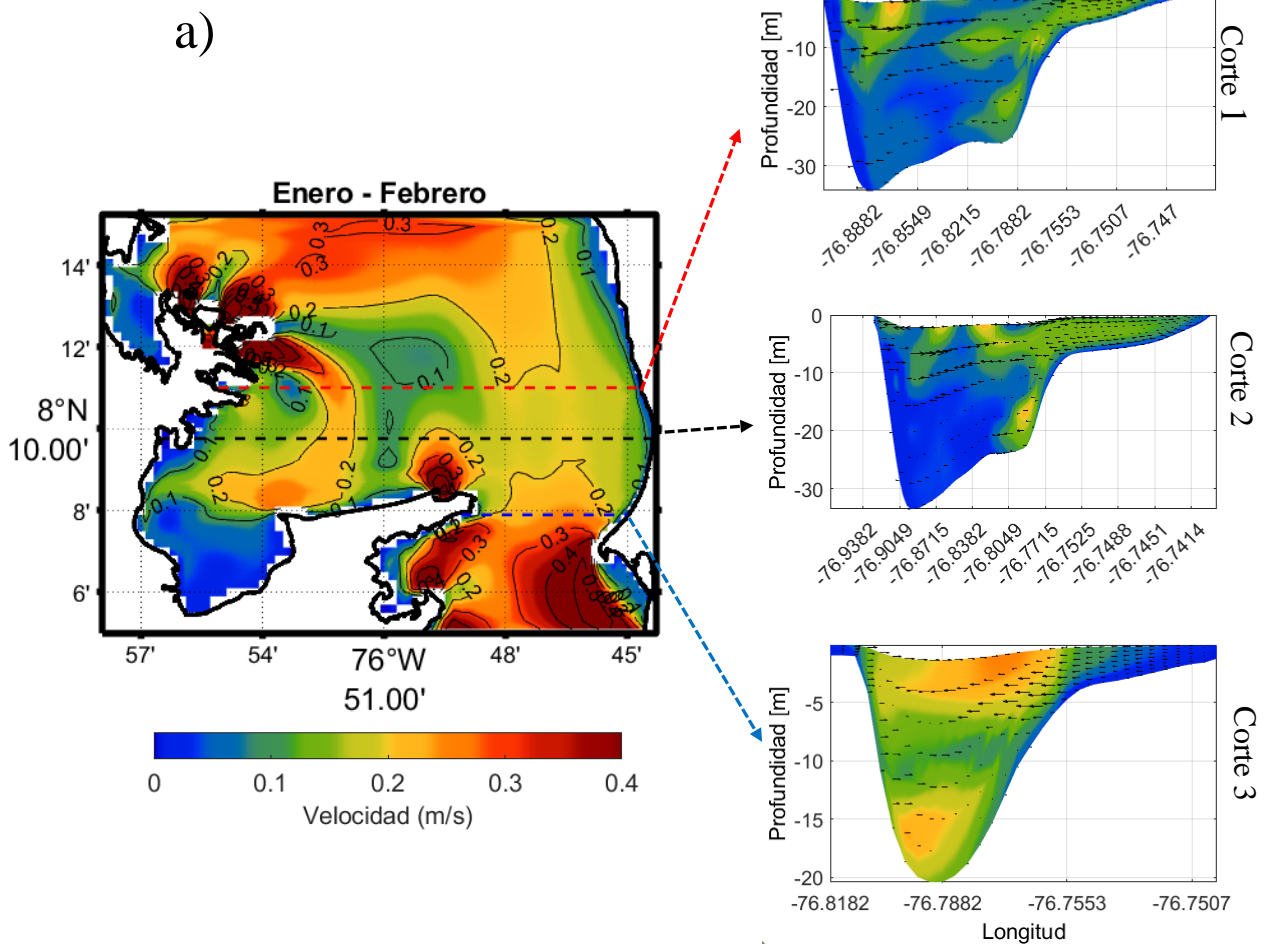
4.2. Análisis estacional de las corrientes durante los años 2015 a 2019.

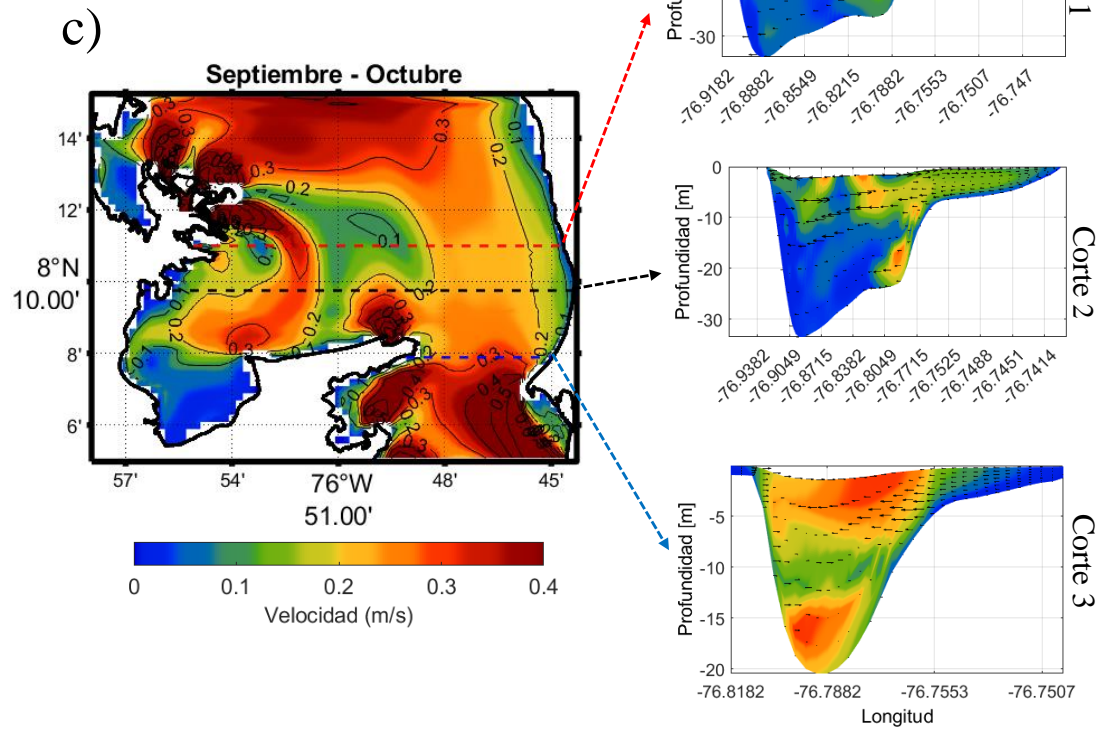
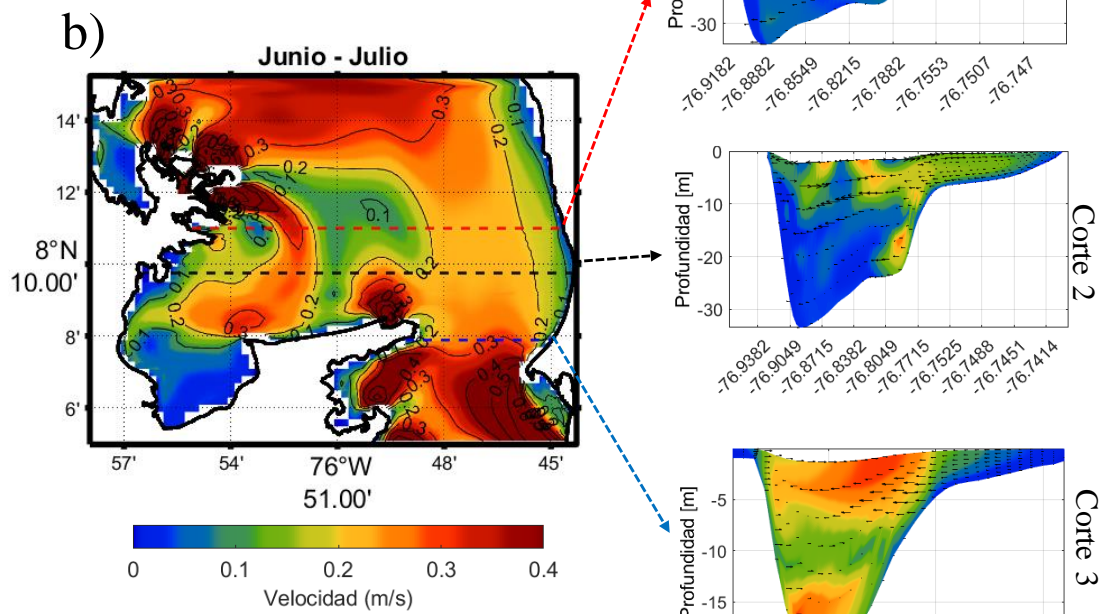
4.2.1. Zona centro del golfo de Urabá

Con el fin de avanzar en el entendimiento de los campos de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 en la parte central del golfo se

analizaron 3 cortes. Estos análisis se realizaron para los meses representativos de las tres épocas climáticas (época seca (enero – febrero); época de transición (junio – julio) y época húmeda (septiembre – octubre) y con la presencia o no del caudal de los ríos (Figura 8).

Figura 8. Campo de corrientes superficiales promedio mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 en la malla anidada con todos los forzantes para: a) época seca (Enero – Febrero), b) época de transición (Junio – Julio) y c) época húmeda (Septiembre – Octubre).





Los resultados obtenidos indican una marcada diferencia en la magnitud de la velocidad superficial del agua entre la época seca y la época húmeda. Durante la época seca, se observa un aumento en la intensidad de las corrientes en la zona sur del golfo con magnitudes de hasta 0.5 m/s y en la parte norte de 0.3 m/s. En contraste, en la época húmeda y de transición, la parte norte muestra valores similares que llegan a los 0.4 m/s (Figura 8).

En el Corte 1, cercano a la desembocadura de El Roto, se evidencia un flujo que claramente se dirige del oeste hacia el este, con magnitudes de hasta 0.2 m/s en la época seca, y un flujo que se desplaza en profundidad hacia el oeste, posiblemente debido a las descargas de los ríos. Los Cortes 1 y 2 muestran dos flujos cerca de la superficie (a 10 m de profundidad): uno desde el este y otro desde el oeste, siendo más evidentes en la época de transición y húmeda (Figura 8). De acuerdo con García *et al.* (2010), existe una diferencia notoria en la magnitud superficial de la velocidad entre la época seca y la húmeda.

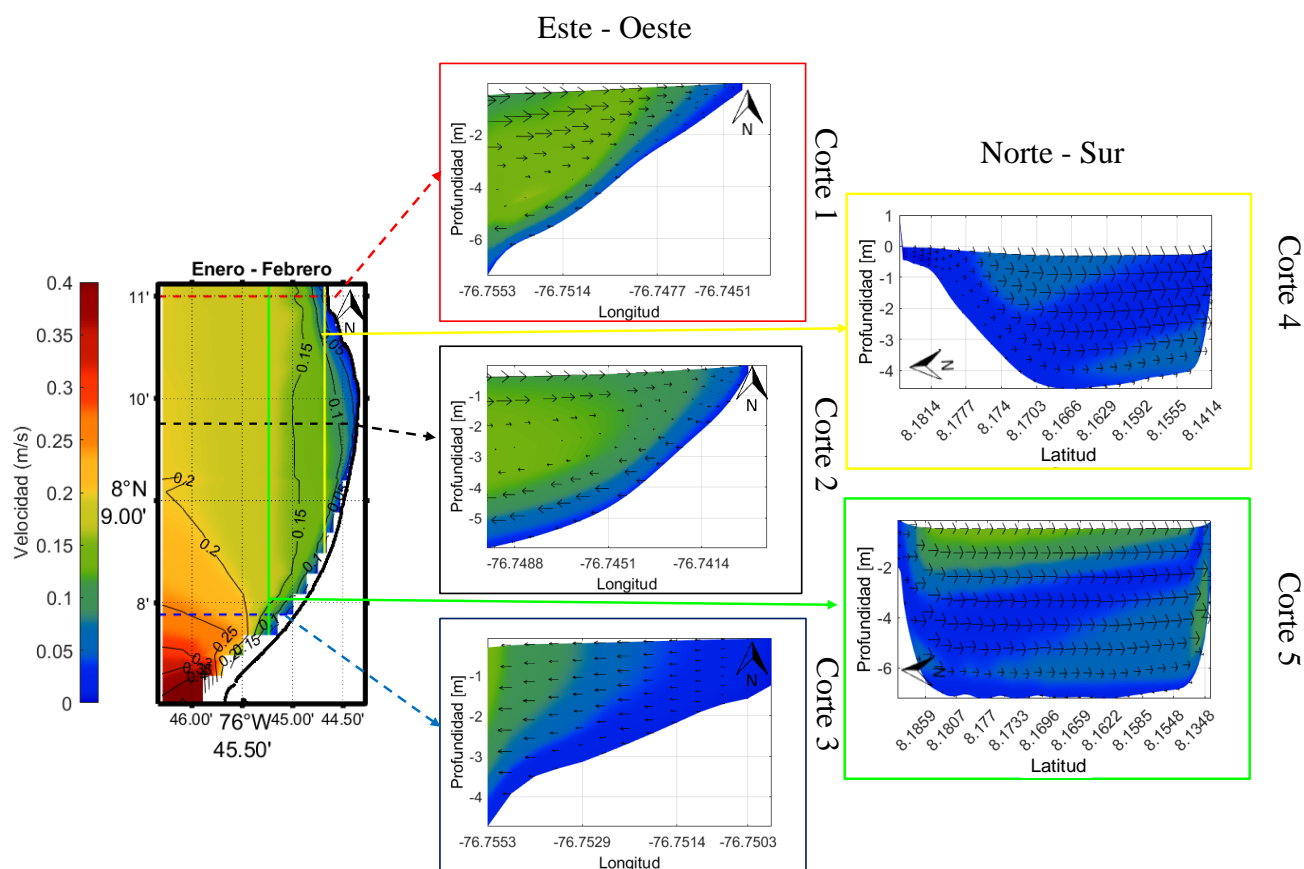
La pluma del río Atrato se dirige hacia el norte del golfo a lo largo del lado este. Durante la estación húmeda, coincide con la dirección del viento que viene del sur el cual contribuye al aumento de la magnitud de la corriente. Este comportamiento es ligeramente más pronunciado en la época seca y de transición. En contraste, durante la estación seca, el lado oeste muestra las mayores magnitudes de velocidades superficiales.

En la zona estrecha del delta del río Atrato (Corte 3), el patrón de circulación cambia a una circulación en dos o tres capas. Se observa como en este corte se presenta un flujo de tres capas, que ingresa en superficie y fondo por la costa este, y luego gira y sale en una capa intermedia por la costa oeste. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Escobar (2011), Velásquez & Posada (2015). Este comportamiento es más marcado durante la época seca probablemente debido a la alta energía del oleaje. Sin embargo, durante la época húmeda y de transición se observan velocidades, de hasta 0.3 m/s en los primeros 10 metros de profundidad, disminuyendo a 0.15 m/s entre los 10 y 15 metros, para luego aumentar nuevamente a más de 0.1 metros de profundidad, con un flujo en dirección este.

4.2.2. Procesos hidrodinámicos en la playa La Martina

Teniendo en cuenta los promedios mensuales multianuales (2015 – 2019) se hicieron 3 cortes este- oeste: uno al norte de la playa (punta Cangrejo), uno en la playa la Martina y uno al sur (a 1 km de la desembocadura del río Turbo). Además, se evaluaron los procesos Norte – Sur con dos cortes paralelos a playa La Martina (Figuras 9, 10 y 11)

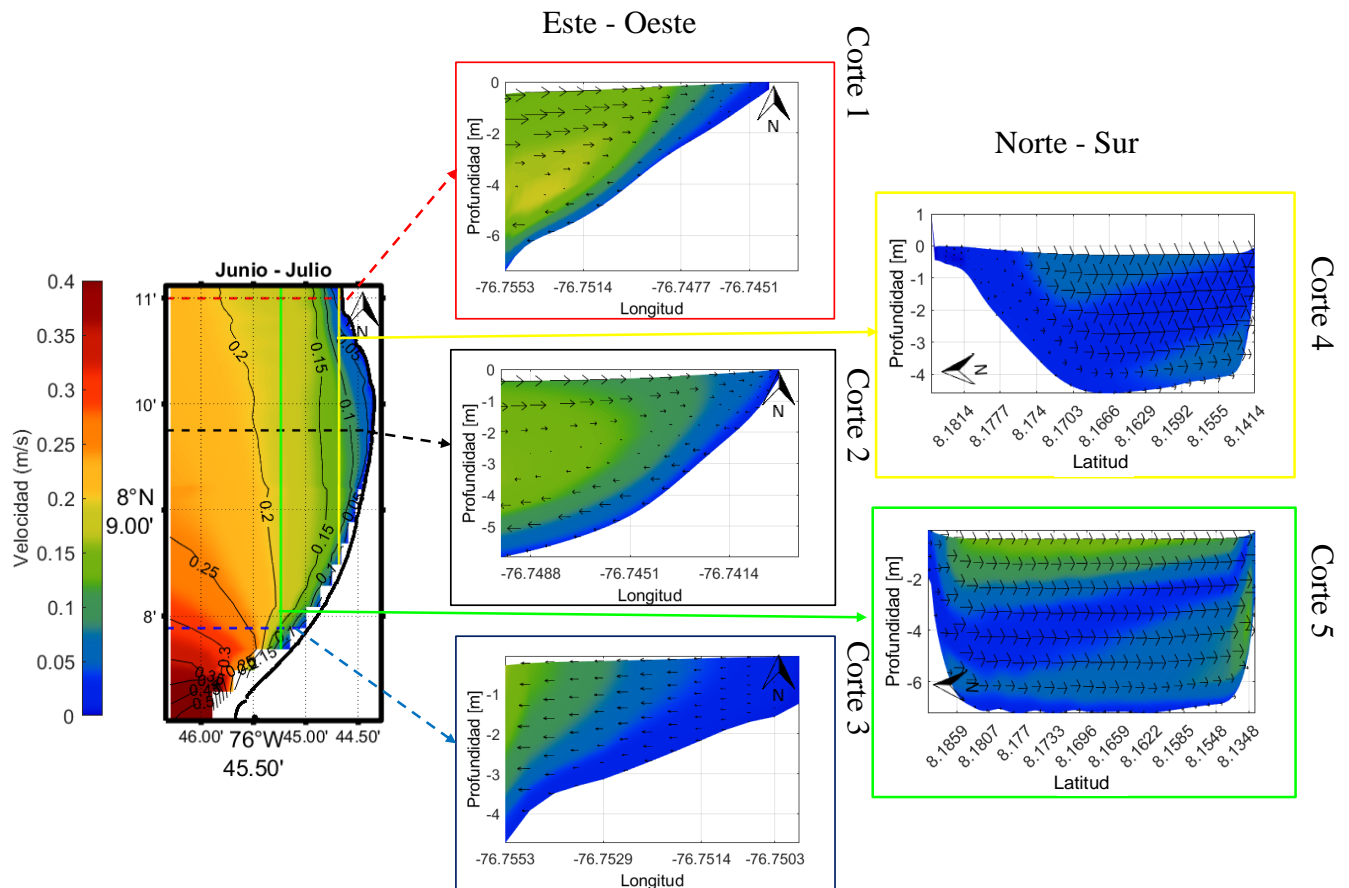
Figura 9. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época seca (Enero – Febrero) en playa La Martina.



En términos generales, se puede observar durante la época seca que las magnitudes de las corrientes superficiales oscilan entre 0.1 m/s cerca de la costa y 0.2 m/s en la parte más profunda hacia el oeste (Figura 9). En los Cortes 1 y 2, se observa un flujo que se desplaza desde el oeste hacia el este, alcanzando magnitudes de hasta 0.1 m/s hasta los 6 metros de profundidad, en dirección a la línea de costa. Sin embargo, en el Corte 3 se observa una corriente que fluye desde la costa hacia el mar, posiblemente debido a la descarga del río Cope, que se encuentra cercano a

este sitio. En los Cortes 4 y 5, se visualiza un flujo que se desplaza desde el norte hacia el sur a lo largo de toda la columna de agua. Esto coincide con lo mostrado por Robledo-Posada (2019), quien identificó a través de datos *in situ* una corriente superficial que va hacia el sur. Los resultados sugieren que las capas superficiales poseen las magnitudes mayores comparadas con las de las capas más profundas. De acuerdo con lo expuesto por Valbuena (2021), la dinámica en playa La Martina podrían estar influenciadas por el esfuerzo del viento el cual genera una fricción significativa sobre la superficie del mar, lo cual podría explicar el comportamiento de los Cortes 1, 2 y 3 que se encuentran paralelos a la línea de costa.

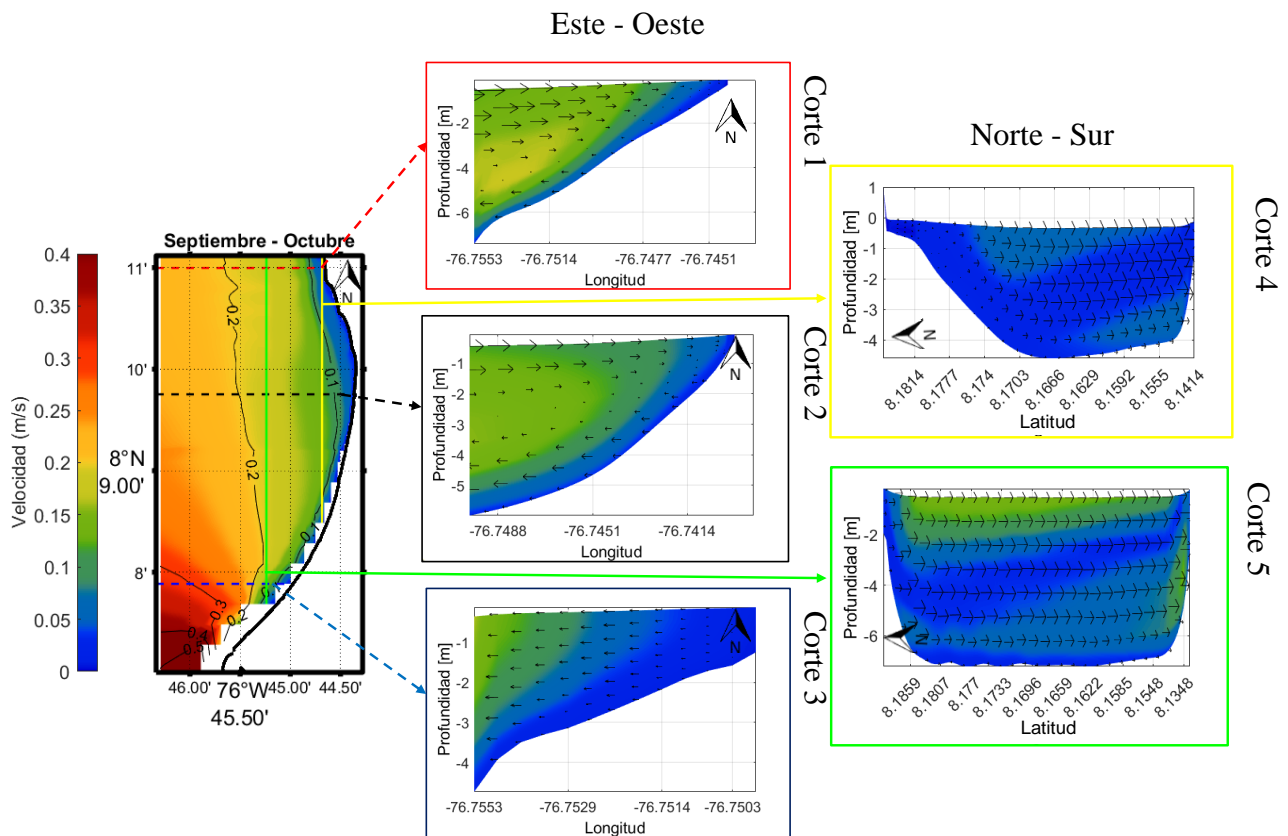
Figura 10. Campo de corrientes superficiales promedios mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época de transición (Junio – Julio) en playa La Martina.



El comportamiento de la hidrodinámica local en Playa La Martina exhibe similitudes en épocas de transición y húmeda (Figuras 10 y 11). La diferencia radica en que la magnitud de las

corrientes se intensifica durante la época húmeda al aproximarse a la costa (Corte 1). Los resultados muestran mayores magnitudes cerca de los ríos Turbo y Cope, donde se registraron velocidades de entre 0.3 m/s y 0.4 m/s, respectivamente. Estos hallazgos coinciden con las observaciones de Ramírez (2020), quien, mediante datos *in situ*, también observó este comportamiento. Este autor sugiere que el arrastre producido por el viento es más intenso en la región sur en comparación con el norte. Esta disparidad en la energía de arrastre podría explicar la erosión observada durante la temporada húmeda en la parte sur del área de estudio.

Figura 11. Campo de corrientes superficiales promedio mensuales multianuales de los años 2015 – 2019 con todos los forzantes para la época húmeda (Septiembre – Octubre) en playa La Martina.



Se identificaron dos flujos en los Cortes 1 y 2 que se dirigen desde el oeste hacia la costa: el primero con valores de hasta 0.15 m/s y el segundo, a 5 metros de profundidad, con velocidades de hasta 0.2 m/s. Al llegar a la costa, este último disminuye su velocidad (Figuras 11 y 12).

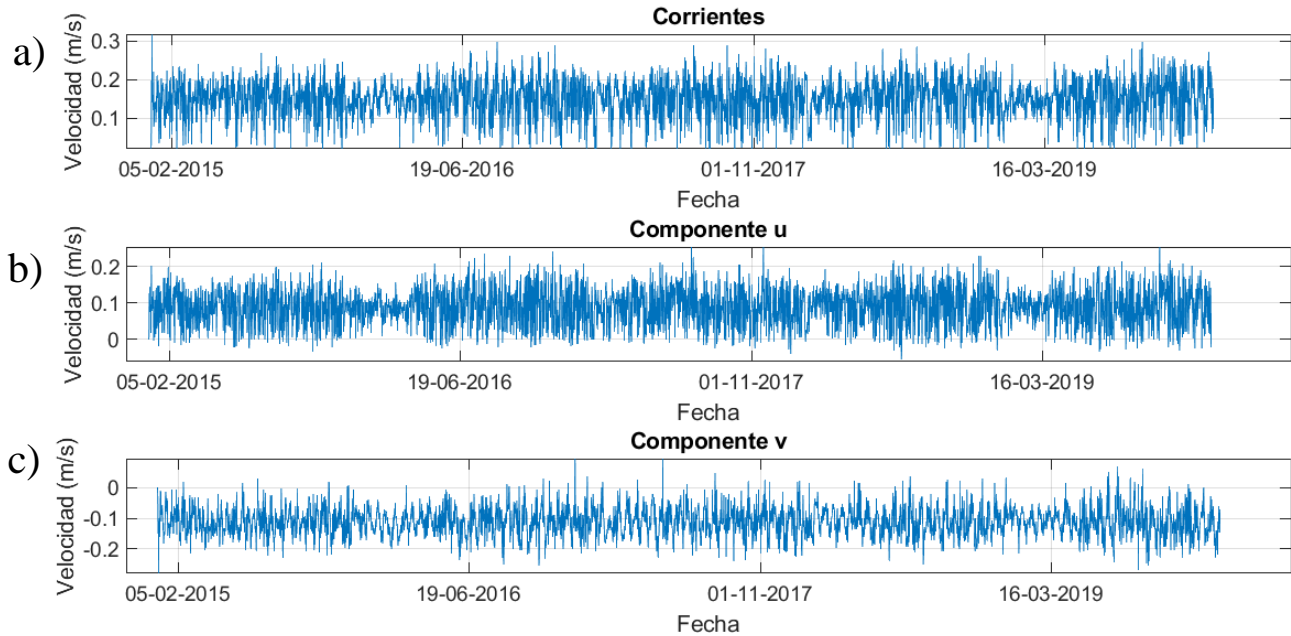
El Corte 2 revela un comportamiento similar durante las épocas de transición y seca (Figuras 10 y 11). En cuanto al Corte 5, se observa una diferencia en las magnitudes de la

velocidad en profundidad. Se evidencia una capa entre 2 m y 5 m, desplazándose hacia el norte a lo largo de la superficie. Simultáneamente, otra capa de agua ingresa desde el sur. Es posible que en la superficie se estén presentando corrientes influenciadas por el viento local y las descargas de los ríos. En el Corte 5, se presentan corrientes en dirección norte-sur, y se puede evidenciar una corriente de mayor intensidad en profundidad al sur de la playa La Martina, la cual se vuelve somera al acercarse al límite de Punta Cangrejo. Los resultados sugieren que este comportamiento, es más notorio en época húmeda, y que probablemente corresponda a un apilamiento de agua en la superficie debido a la dinámica que se desarrolla en el golfo durante esta época del año.

Esta dinámica podría estar asociada a los vientos que soplan desde el sur y dominan el comportamiento local de estas playas, generando un transporte de Ekman. De acuerdo con Abbot, M. R., & PM, Z. (1987), Ekman actúa en sentido perpendicular a la dirección del viento. Estos desplazamientos se compensan mediante descensos (convergencia) o ascensos (divergencia) de las masas de agua. El apilamiento encontrado coincide con lo observado por Coca, J., Ramos, A. G., & Redondo, A. (2006).

Con el fin de evaluar los cambios en la magnitud de las corrientes de la capa superficial en función del viento en el área de estudio, se estableció una boya virtual cerca a La Martina (Latitud: 8° 9' 59.76; Longitud 76° 44' 55). En dicha ubicación, se analizaron la magnitud de las corrientes, así como las componentes u y v (Figura 12).

Figura 12. Serie temporal de la corriente superficial en una boya virtual ubicada en playa La Martina ((2015 – 2019). a) Magnitud de la velocidad; b) componente u ; c) componente v



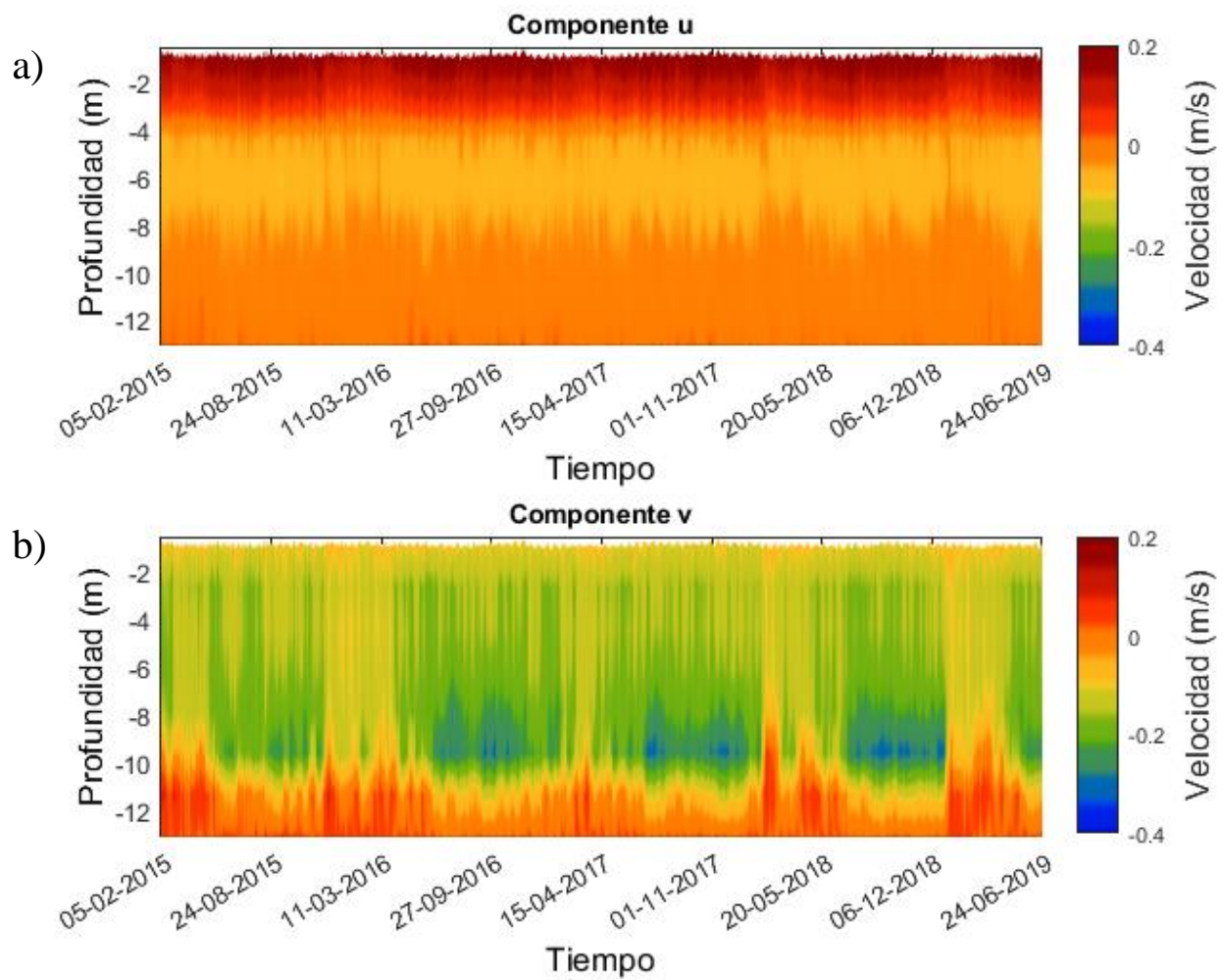
Los resultados indican que las corrientes en el punto de playa La Martina oscilan entre 0.1 m/s y 0.3 m/s. Se observa como ligeramente las velocidades más bajas se registran durante la época seca (marzo y abril) (Figura 12a). Estos hallazgos son consistentes con los encontrados por Valbuena (2021). No obstante, en este estudio se registraron corrientes con valores de hasta 0.6 m/s cerca de la zona de rompientes.

En la Figura 12b, se observan las corrientes en dirección este-oeste (componente u) con un flujo predominante del este, alcanzando valores máximos de 0.2 m/s. Mientras que en la componente v (Figura 12c) se observa un flujo de menor intensidad hacia el sur, con valores que llegan hasta 0.2 m/s. Estas corrientes son más intensas durante los meses de octubre a noviembre a lo largo de la serie analizada.

Con el fin de analizar la evolución de las velocidades en el perfil vertical se analizaron los datos de las simulaciones en el sitio de la boya virtual tomando en cuenta la componente u y v , y filtrando los datos por medio del cálculo de la media móvil diario para eliminar el ruido de los datos (Figura 12). Las corrientes longitudinales (componente v) presentan una mayor variabilidad, en la vertical con corrientes en dirección hacia el sur en los primeros 8 m con

valores entre 0.2 m/s y 0.1 m/s y dirección hacia el norte luego entre los 8 m y 12 m con valores entre 0.1 m/s y 0.2 m/s. Se observa un comportamiento de un flujo hacia el sur entre los 6 m y 8 m en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre de los años 2015 – 2019 relacionados con la época húmeda que se presenta en estos meses con valores negativos de hasta 0.4 m/s. Mientras que en la época seca (enero, febrero, marzo y abril) las velocidades tienen la misma orientación (hacia el norte) en toda la columna de agua. Estos resultados sugieren la influencia las épocas climáticas en esta zona.

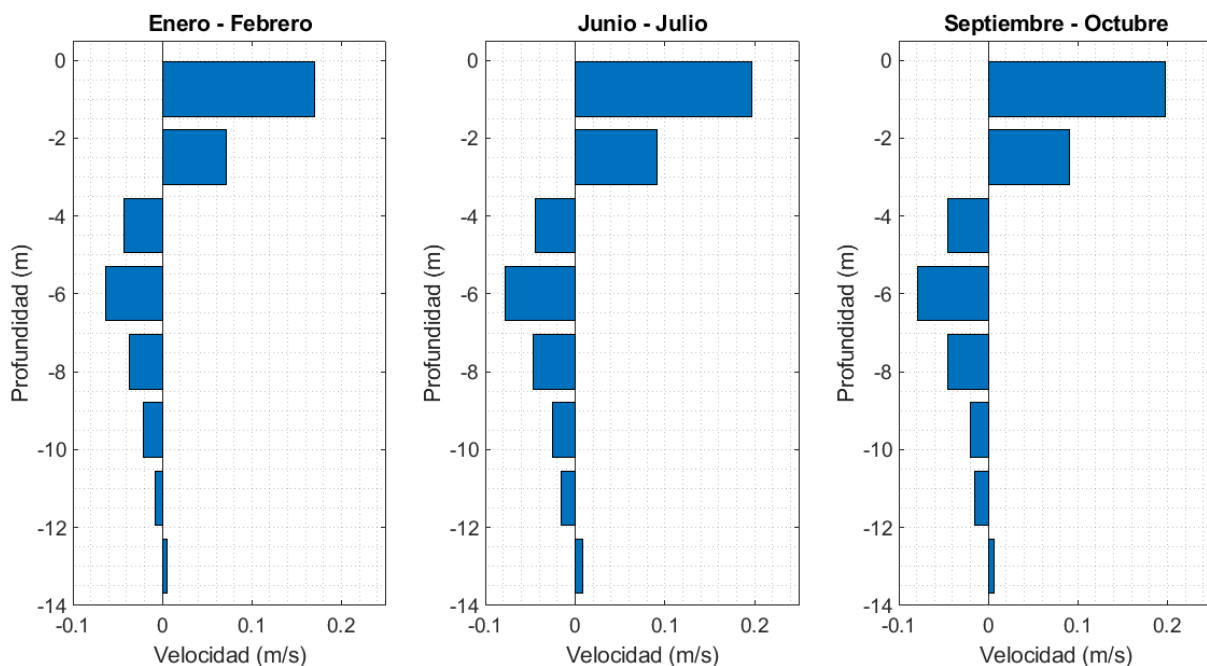
Figura 13. Perfil vertical de velocidades en la boya virtual para los años 2015 a 2019 con media móvil diaria: a) componente u; b) componente v (coordenadas Latitud: 8° 9' 59.76 Longitud 76° 44' 55).



Por su parte, los valores de velocidad de la componente u están caracterizadas exhiben un comportamiento notable en cuanto a velocidad y dirección a lo largo del perfil vertical. Hasta los 4 m se observan las mayores velocidades con direcciones mayoritariamente hacia el este, es decir, en dirección a la playa. Estas velocidades alcanzan valores de 0.2 m/s a lo largo de toda la serie temporal. Posteriormente, entre los 4 y los 8 metros de profundidad, las corrientes muestran direcciones predominantemente negativas, orientadas hacia el oeste, con valores aproximados de 0.1 m/s. A partir de los 8 metros en adelante, las velocidades vuelven a ser positivas, aunque se caracterizan por ser poco intensas (0.01 m/s). Es de notar que, a lo largo del periodo analizado, de manera general esta componente presentó un comportamiento similar.

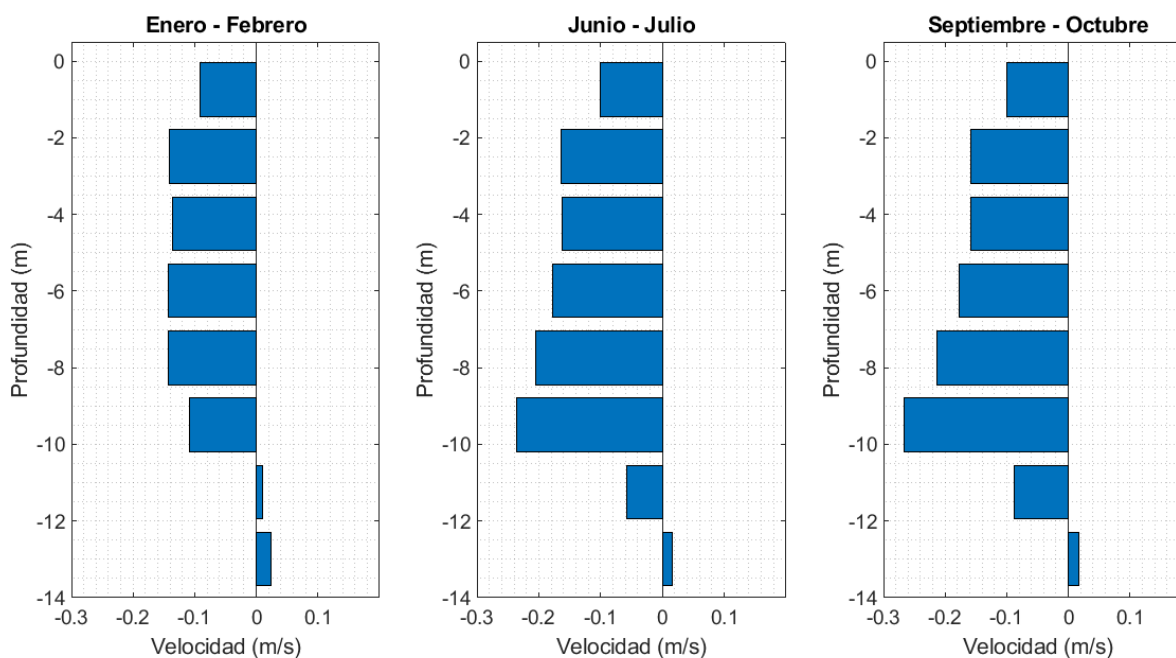
Con el fin analizar el perfil vertical de las velocidades en las diferentes épocas climáticas se hizo el cálculo de los promedios mensuales multianuales de toda la serie temporal en el sitio de la boya virtual. En la Figura 14 se observa que en los meses más representativos de las diferentes épocas climáticas el comportamiento del flujo es similar, con velocidades que tienden hacia el este en la capa superficial y un flujo que sale hacia el oeste a partir de los 4 m de profundidad. Luego a los 12 m se observa un flujo hacia el este con menor intensidad.

Figura 14. Promedios mensuales multianuales del perfil vertical de la velocidad de las corrientes de la componente u para época seca (Enero – Febrero), de transición (Junio – Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre). Coordenadas Latitud: $8^{\circ} 9' 59.76$ Longitud $76^{\circ} 44' 55$



El comportamiento de las corrientes en la componente v se observa en la Figura 15. Durante la época seca (enero-febrero), se observa que las corrientes tienden a dirigirse hacia el norte, siendo menos intensas en comparación con la época de transición y húmeda. En este último periodo, las corrientes muestran un aumento considerablemente con una dirección predominante hacia el sur. A una profundidad de 12 m, las corrientes tienen una dirección hacia el norte, pero con una intensidad débil. Un aspecto destacado es el comportamiento particular registrado durante la época seca entre los 10 m y 12 m de profundidad, donde se observa un flujo en dirección al norte. Sin embargo, en la época de transición y húmeda, este flujo cambia de dirección hacia el sur.

Figura 15. Promedios mensuales multianuales del perfil vertical de la velocidad de las corrientes de la componente v para época seca (Enero – Febrero), de transición (Junio – Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre). Coordenadas Latitud: $8^{\circ} 9' 59.76$ Longitud $76^{\circ} 44' 55$

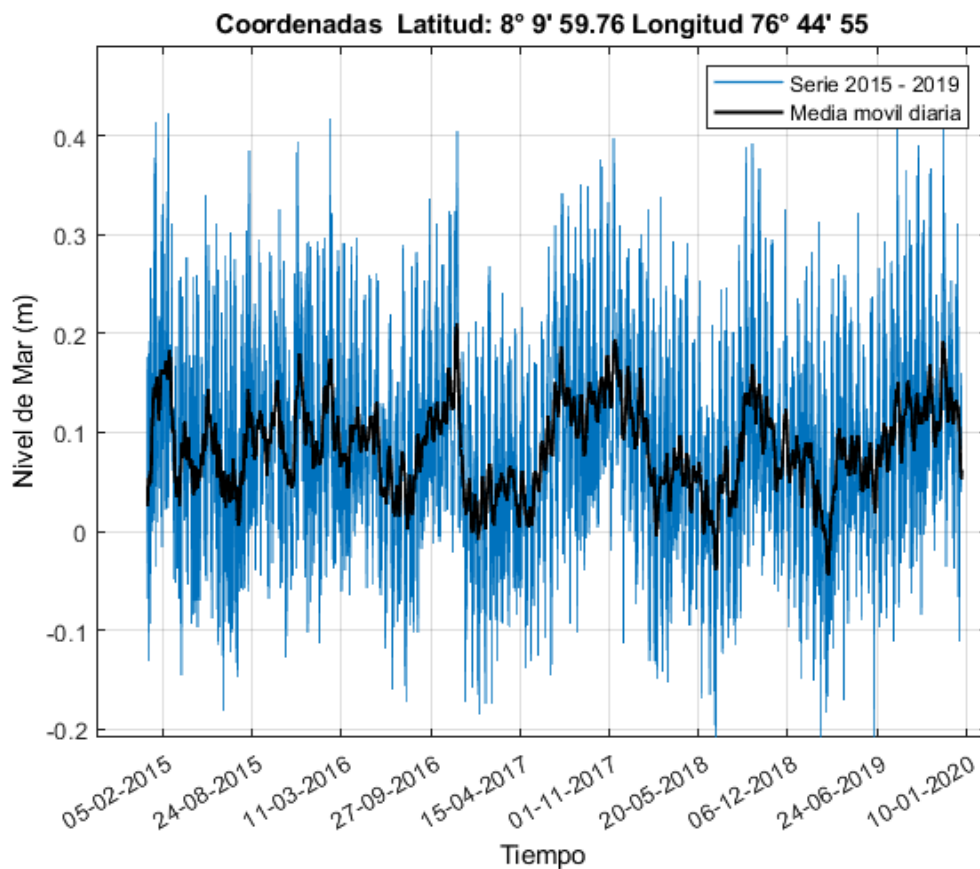


4.2.3. Análisis de los niveles del mar en la serie temporal 2015 – 2019

En la Figura 16 se observan los niveles del mar en el sitio de la boya virtual. El comportamiento observado es consistente a lo largo de los cinco años. Es importante señalar que para detectar cambios significativos en el aumento o disminución del nivel del mar en esta región se requieren datos de una serie temporal más extensa. No obstante, los resultados de las

simulaciones sugieren que el nivel del mar se mantiene en un intervalo entre 0.1 m y 0.2 m. La utilización de la media móvil diario proporciona una representación más suavizada de los datos y revela que entre los años 2015 y 2016 los niveles del mar se mantuvieron constantes. Además, se observa como el nivel del mar experimenta algunos ciclos de aumento observados en los años 2016 y 2017. Estos resultados sugieren que estos cambios pueden deberse a factores naturales o a alteraciones antropogénicas en las playas turísticas.

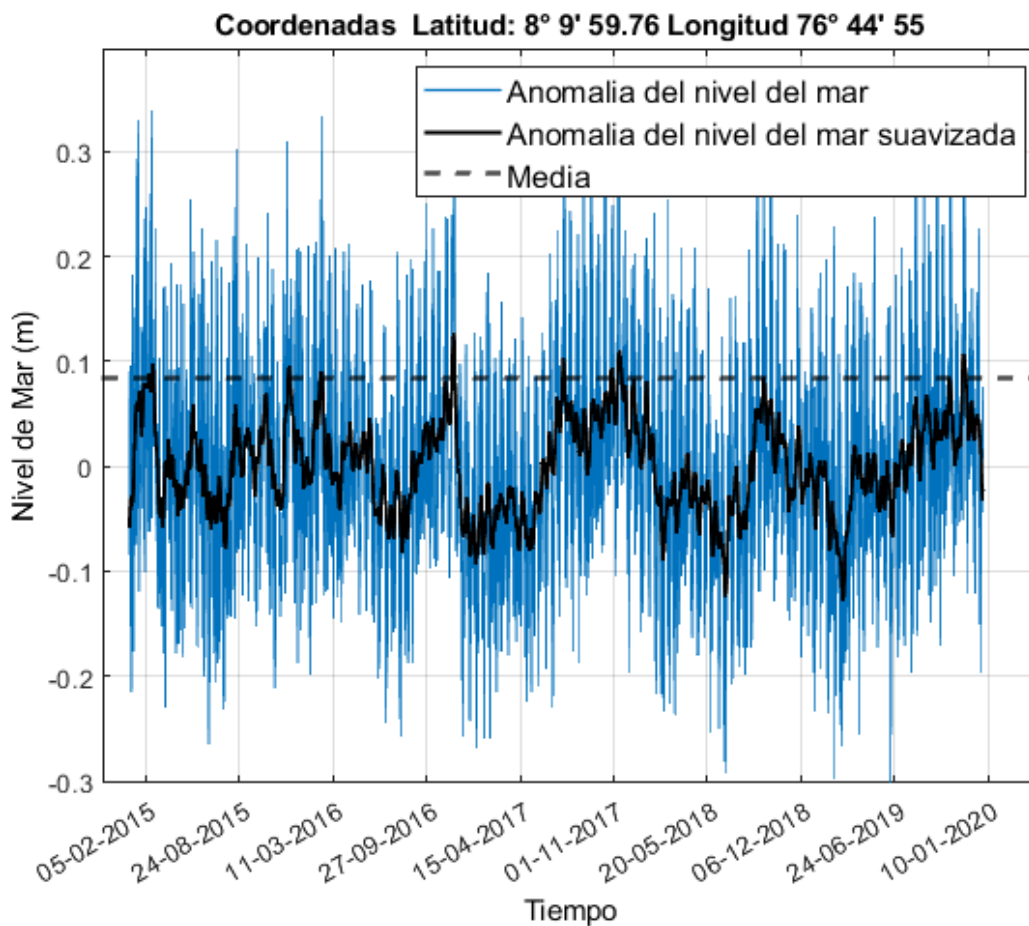
Figura 16. Niveles de mar de promedios mensuales de la serie temporal 2015 –2019 para el sitio de la boya virtual ubicada.



A finales de 2016, se observa un ligero aumento progresivo del nivel del mar, seguido por una drástica disminución a principios de 2017. Posteriormente, se registra un nuevo aumento a finales de 2017 (en septiembre, octubre y noviembre), seguido de una disminución a principios de 2018 (en febrero, marzo y abril). Estos cambios coinciden con las estaciones húmedas, lo que sugiere una posible influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento de los niveles del mar.

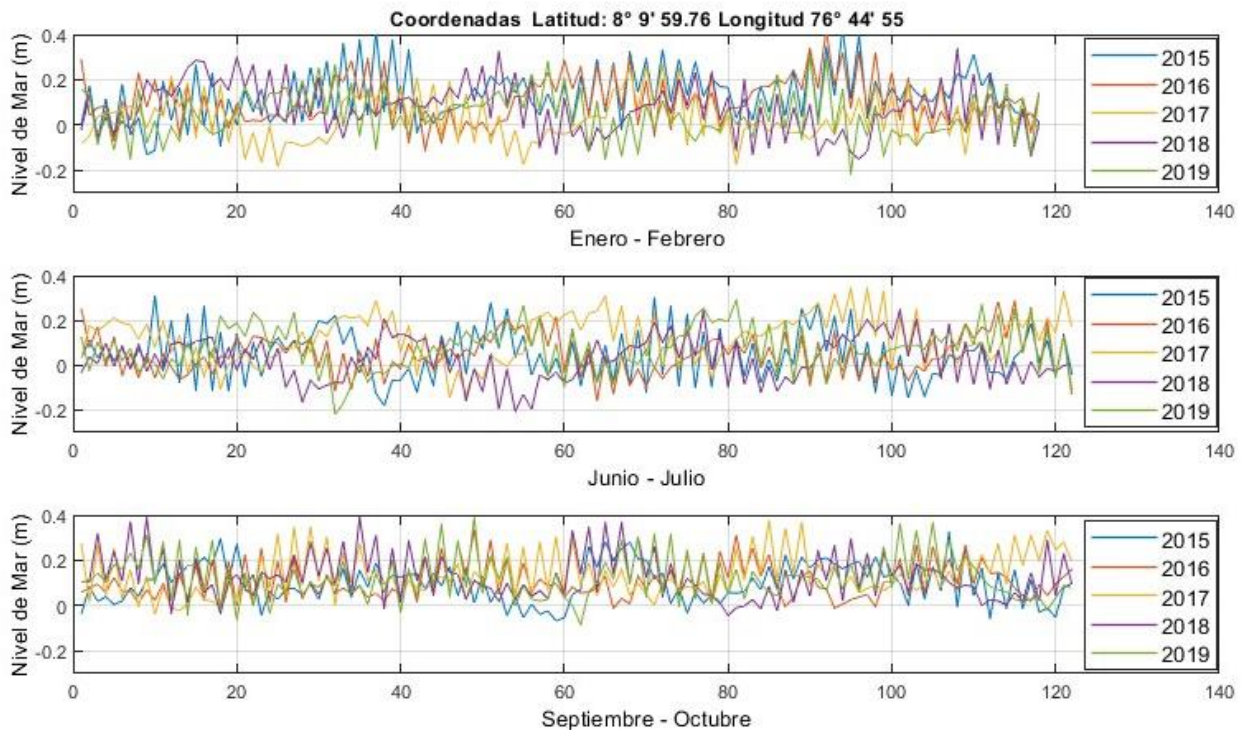
La Figura 17 presenta las anomalías del nivel del mar a través del cálculo basado en las simulaciones de la serie temporal de los niveles de mar obtenidos de la boya virtual. Se observan los valores de la anomalía del nivel del mar en comparación con los valores medios suavizados por medio de una media móvil.

Figura 17. Anomalía del nivel del mar de promedios mensuales de la serie temporal 2015 –2019 para el sitio de la boya virtual ubicada.



Los resultados sugieren que la mayoría de los valores tienden a situarse por debajo del promedio de todos los datos simulados. El cálculo de la media móvil diario muestra datos entre -0.1 y 0.1 m con variaciones del nivel del mar probablemente debido a la estacionalidad. Para análisis más detallado de estos patrones y en donde se pudiera evidenciar la influencia de las épocas climáticas se utilizaron datos de la boya virtual, obtenidos cada 12 horas (Figura 18).

Figura 18. Niveles de mar para la boya virtual ubicada con resultados cada 12 h de la serie temporal 2015 –2019 por épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).



En este análisis se utilizaron los datos de la boya virtual de las épocas climáticas: seca (enero-febrero), transición (junio-julio) y húmeda (septiembre-octubre). Se graficaron los niveles del mar de los años 2015 a 2019 con el objetivo de identificar patrones y tendencias a largo plazo. Los resultados obtenidos revelaron que durante la época seca existe una mayor variación en el nivel del mar, fluctuando entre valores negativos y positivos (-0.1 m y 0.2 m). Esta variabilidad sugiere posibles influencias de la intensidad del viento durante esos meses. Durante la época seca la zona analizada está influenciada por vientos locales, especialmente durante enero y febrero, cuando los vientos alisios del norte predominan. Estos factores climáticos locales podrían contribuir a las variaciones observadas en los niveles del mar durante esta época.

En junio y julio (época de transición), se evidencia un comportamiento ligeramente más uniforme en comparación con la época seca. Sin embargo, es importante señalar que es semejante al observado durante la época seca, teniendo en cuenta que, en esta etapa, los vientos alisios aún tienen cierta influencia. Respecto a la época húmeda (junio-julio), el comportamiento del nivel del mar difiere notablemente diferente a las anteriores épocas, y se observa un ligero

incremento en el nivel del mar. Además, se destaca como el comportamiento para todos los años es similar, manteniéndose por encima de los 0 m y alcanzando valores máximos de 0.4 m. Este comportamiento se relaciona directamente con los hallazgos presentados en la figura 11. En dicha figura se discutió como las corrientes son afectadas por los vientos del sur durante la temporada húmeda. Se destaca un fenómeno de acumulación de agua en esta zona, y esta tendencia se refleja en los niveles del mar.

Estos resultados sugieren que el incremento en el nivel del mar podría estar relacionado al bombeo de Ekman, debido a que cuando el viento sopla paralelo a la costa en dirección sur-norte hay un apilamiento de agua en la costa. Como consecuencia directa, esto podría explicar las inundaciones en la zona de playa La Martina, junto con la erosión de las playas. Un estudio realizado por Pickett & Paduan (2003) encontró que el bombeo de Ekman puede causar aumentos de hasta 10 cm en los niveles de mar durante los períodos de vientos fuertes.

4.3. Identificación de los aportes del flujo del río Atrato a la corriente total estimada de la zona de estudio durante el año 2019.

Para evaluar la sensibilidad del modelo ante la presencia de los ríos en la playa La Martina, se propusieron dos escenarios para el año 2019, con simulaciones de 12 horas. Uno de los escenarios consideró las descargas de los ríos (Atrato y León), mientras que el otro no. Con el fin de analizar los resultados de ambos escenarios se analizó la magnitud de la velocidad de la capa superficial en la malla general.

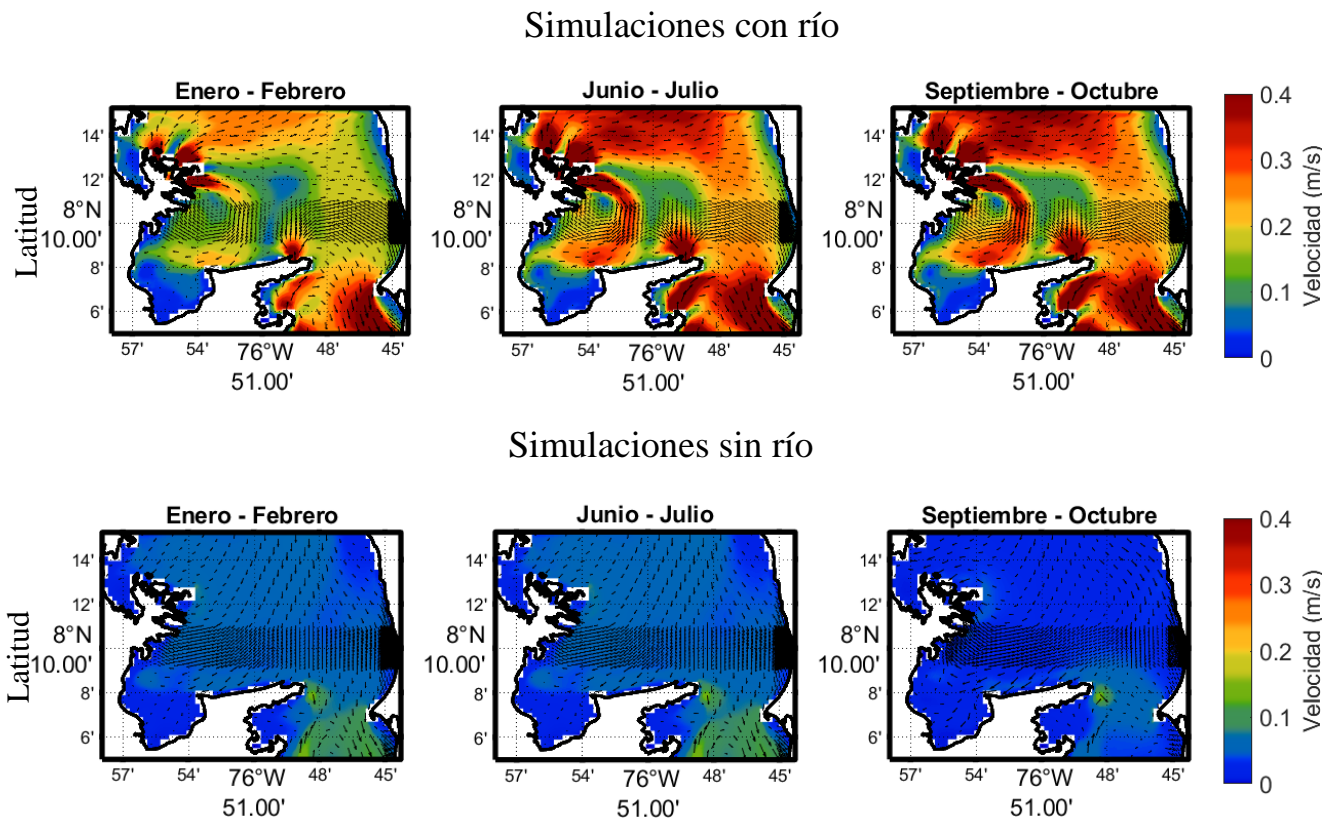
El comportamiento de la capa superficial, según las simulaciones en la malla anidada (Figura 19), revela que el flujo procedente del río Atrato se dirige predominantemente hacia el norte. De acuerdo con Toro *et al.* (2019), este patrón se debe en gran medida a que las corrientes entran en fase con el esfuerzo del viento, provocando que el flujo se desplace fuera del golfo. Los resultados sugieren que las bocas de El Roto y Leoncito son responsables de distribuir el flujo a lo largo de todo el golfo.

Durante la época húmeda (septiembre - octubre), se observa un patrón de circulación similar al de la época de transición (junio - julio), pero con velocidades de corriente más elevadas. Se observa una diferencia en el mes de octubre, con valores superiores la época húmeda en el lado norte y oeste. Esto podría atribuirse al efecto combinado del viento y el afluente del río

Atrato, que fluyen en la misma dirección, resultando en un aumento del transporte de agua hacia el norte del golfo. En contraste, durante la estación seca, donde el viento se dirige predominantemente en dirección opuesta, se observan corrientes de menor intensidad contrarrestadas por la acción del río.

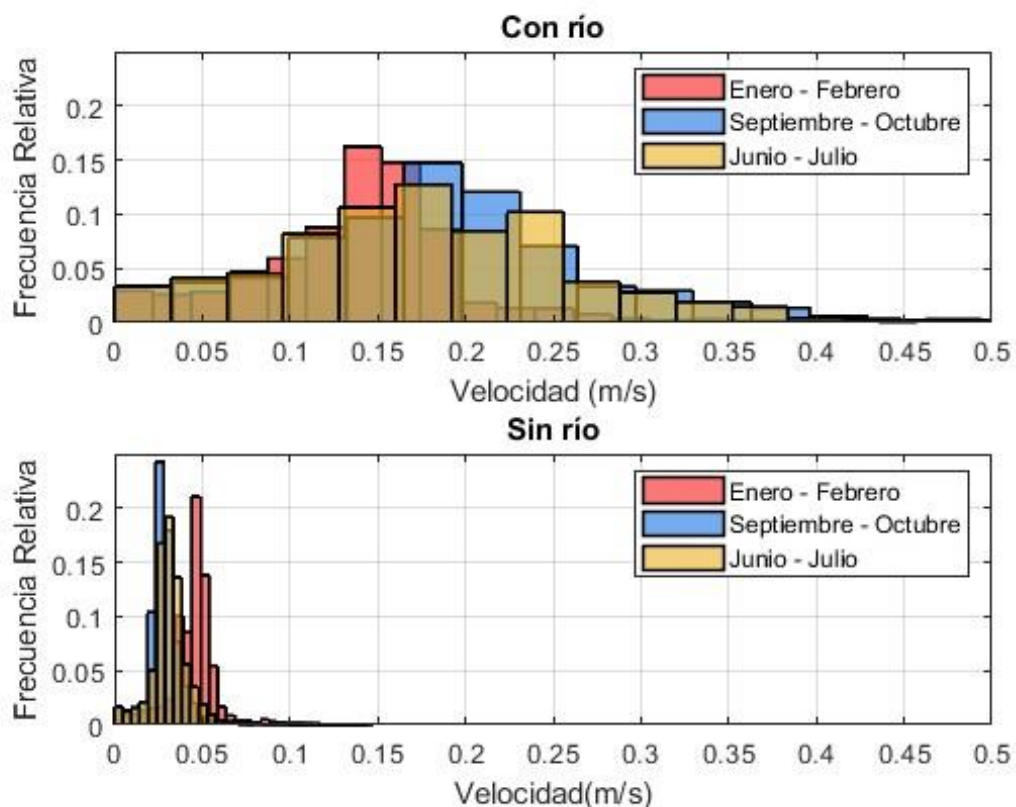
El escenario sin la influencia del río revela una alteración drástica en los patrones de circulación en todo el dominio del golfo. Al sur de la zona, en Bahía Colombia en general el campo es norte-sur sigue. Al desactivar las descargas fluviales, el patrón de corriente exhibe un comportamiento anticiclónico, más evidente en época seca que en la húmeda (septiembre - octubre) probablemente debido a las altas precipitaciones. Esto sugiere que el escenario con río mantiene una circulación estable y confina las aguas de los ríos al interior del golfo durante la época seca (enero - febrero), lo cual coincide con lo observado por Chevillot *et al.* (1993).

Figura 19. Campo vectorial de corrientes promedios mensuales para el año 2019 en la zona centro del golfo de Urabá. Escenario con todos los forzantes (panel superior), simulaciones sin el caudal de los ríos (panel inferior). Épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre)



Los histogramas de frecuencia relativa revelan como las mayores magnitudes de corriente superficial se presentan durante la época húmeda, alcanzando velocidades de hasta 0.4 m/s (Figura 20). Las velocidades más frecuentes se sitúan alrededor de 0.2 m/s, con una frecuencia relativa que llega al 0.1 en el escenario con la presencia del río. En contraste, durante la época seca, las velocidades más comunes no superan los 0.1 m/s, con una frecuencia relativa de 0.15, mientras que las velocidades más intensas llegan a los 0.2 m/s. La situación es totalmente diferente en el escenario sin río, donde las velocidades máximas alcanzan los 0.1 m/s durante la época seca, en contraste con la época húmeda, con velocidades máximas de hasta 0.05 m/s. Esto evidencia un cambio significativo en la magnitud de las velocidades al simular escenarios con y sin la contribución del río en distintas épocas climáticas.

Figura 20. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial en la zona centro del golfo de Urabá en los escenarios con y sin aporte del río para la época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre) del año 2019 en la malla anidada.



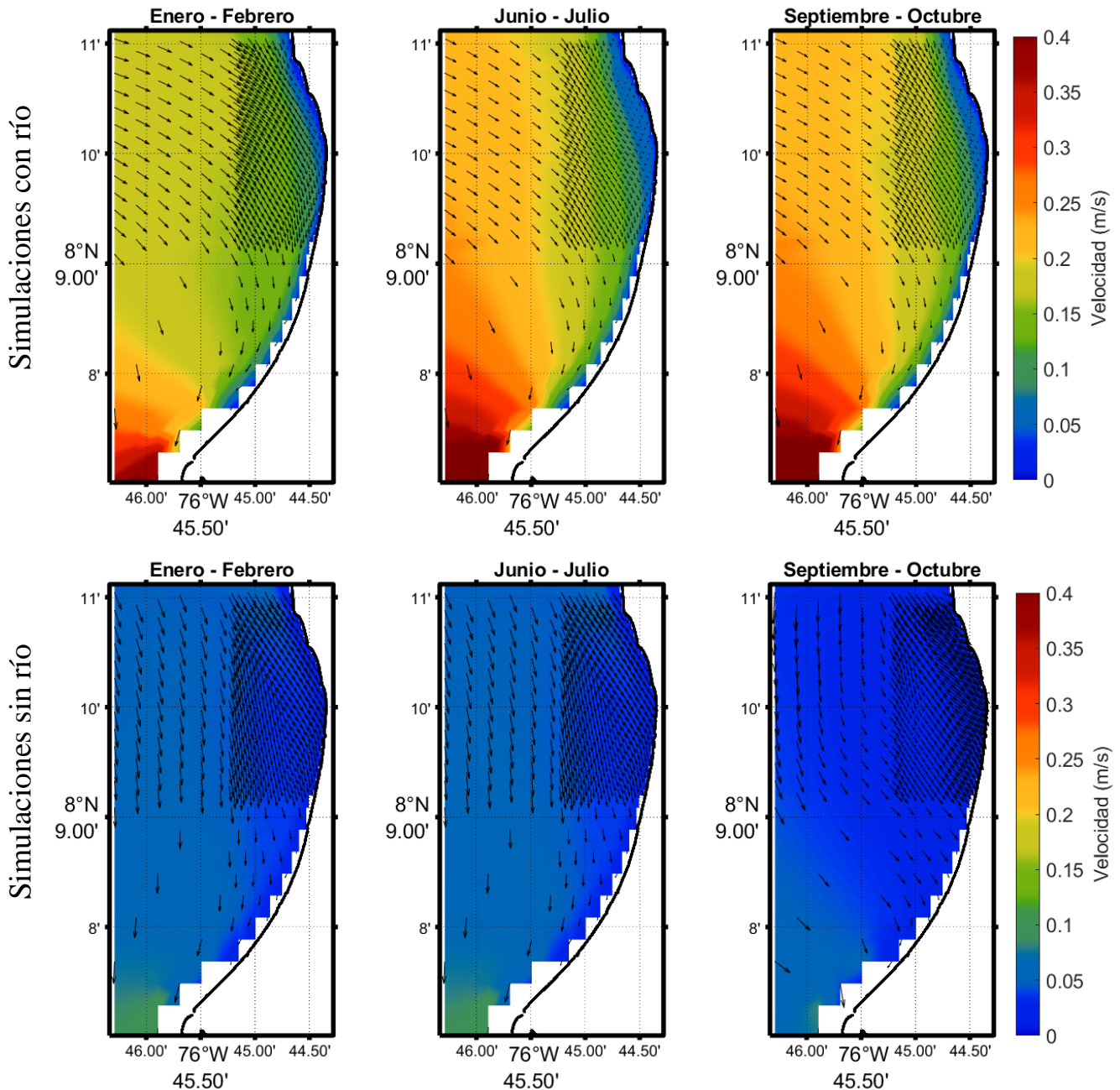
Por otro lado, en la Figura 21 se observa el campo de corrientes superficiales durante distintas épocas climáticas en el área de la Playa La Martina para escenario con y sin río. En el

caso con río se observa una corriente cuasi permanente que fluye en dirección norte-sur, conforme. Este patrón de flujo ha sido evidenciado por Valbuena-Sierra (2021) y Cifuentes-Torres & Campo-Julio (2021), quienes lo identificaron mediante datos *in situ*.

Además, se observan magnitudes de la corriente entre 0.2 m/s y 0.3 m/s. Durante la época seca (enero y febrero), se muestran las velocidades más bajas, posiblemente debido a la escasa precipitación y corrientes influenciadas principalmente por la dirección del viento local. En contraste durante la época húmeda (septiembre - octubre), la intensidad del campo de las corrientes aumenta significativamente en la parte sur del dominio de estudio. Es notorio como en la época de transición (junio - julio), hay un ligero un incremento en la velocidad de las corrientes probablemente debido al aumento de los vientos alisios del norte.

En cuanto al escenario sin la influencia del río, se observa un cambio en la dirección respecto al escenario con río. Además de una disminución en la intensidad del campo vectorial, con valores de hasta 0.05 m/s.

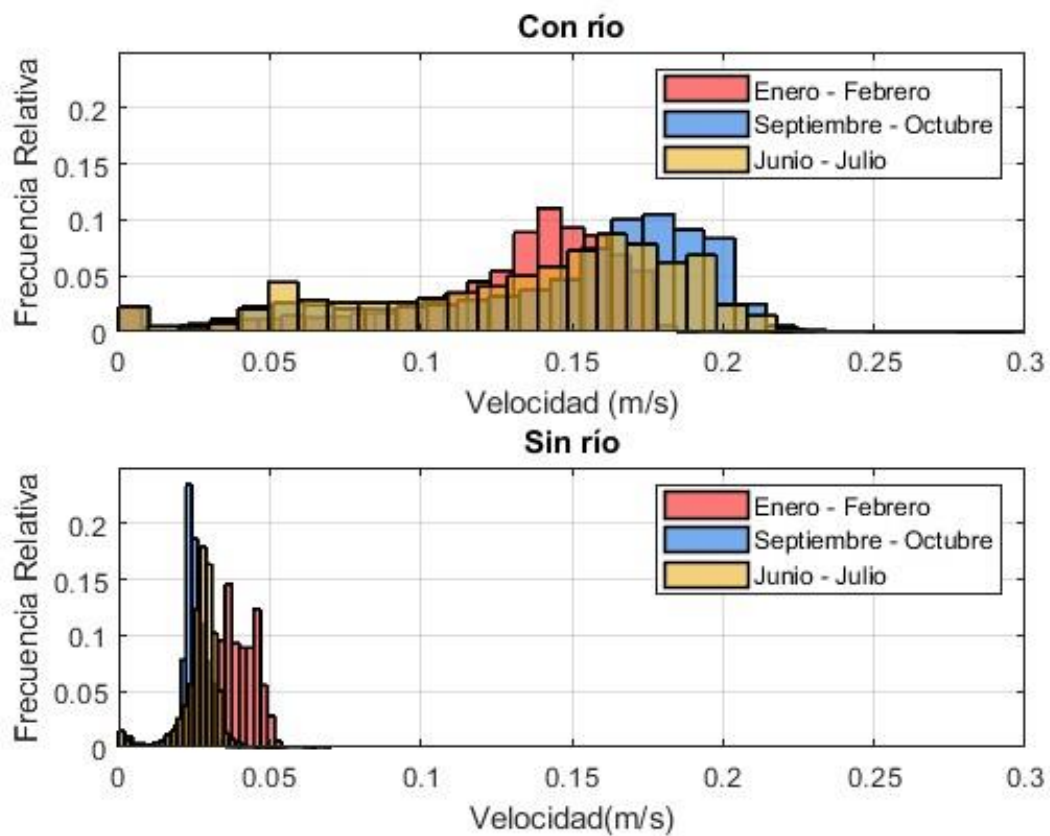
Figura 21. Campo vectorial de corrientes promedio mensuales para el año 2019 en la zona de la playa La Martina. Escenario con todos los forzantes (panel superior), simulaciones sin el caudal de los ríos (panel inferior). Épocas climáticas: seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre)



En la Figura 22 se presenta la frecuencia relativa de la magnitud de las corrientes superficiales en todo en el dominio de la playa La Martina. En el escenario sin influencia del río, se observa que durante la época húmeda se registran las velocidades superficiales más intensas, alcanzando magnitudes entre 0.15 m/s y 0.2 m/s. En contraste, cuando se desactivan las descargas

fluviales, se evidencia que la magnitud de la velocidad disminuye, llegando a valores de hasta 0.05 m/s. Además, se destaca que, durante la época seca, estas velocidades son mayores en este escenario que cuando hay río. Esto probablemente se deba que al desactivar las descargas de los ríos el patrón de circulación y la hidrodinámica es influenciada principalmente por el viento y por la marea. Esto coincide con lo evidenciado por Robledo-Posada (2019) donde en los meses de enero y febrero predominan los vientos alisios provenientes del norte y del noreste y en época húmeda vientos débiles del sur.

Figura 22. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial en la zona de Playa La Martina en los escenarios con y sin aporte del río para la época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre) del año 2019 en la malla anidada.



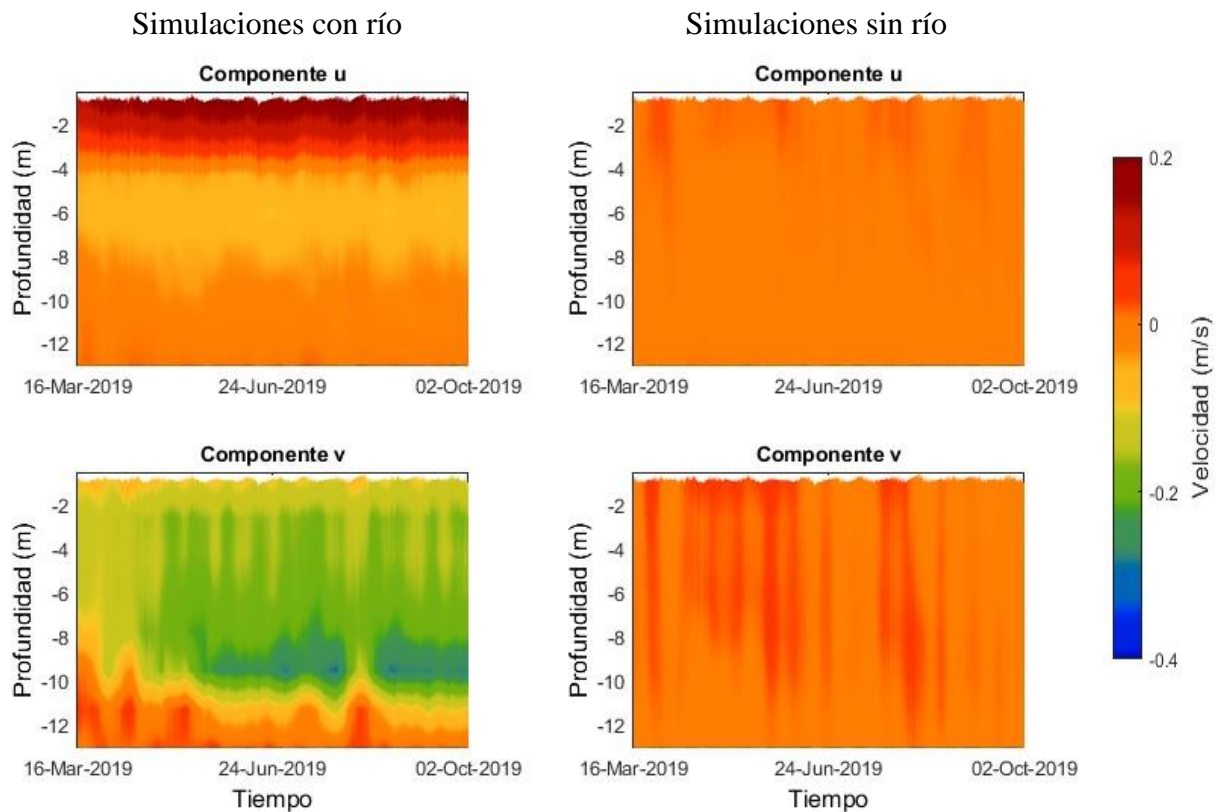
Con el fin de analizar la evolución temporal de las componentes zonales y meridionales de la velocidad en la vertical se usaron los datos de la boya virtual cercana a playa La Martina y se analizaron los valores del año 2019 para ambas mallas, tanto el escenario sin río y con río (Figura 23). Se realizó una media móvil con una ventana de 24 h a los datos de dicho sitio.

El comportamiento del modelo, al considerar el escenario con el río, exhibe similitudes con los resultados presentados en la Figura 13. Esta figura ilustra la evolución temporal del perfil vertical de las velocidades durante el período comprendido entre los años 2015 y 2019. En cuanto a la componente u , se observan las velocidades más intensas en la superficie con corrientes que provienen del este. A partir de una profundidad de 4 m, se evidencian valores negativos indicando que la velocidad se desplaza desde el oeste.

En contraste, en el escenario sin río, la componente u muestra un flujo proveniente del oeste, con tendencia a ser negativo en toda la columna de agua. Esta diferencia sugiere que la presencia del río tiene un impacto significativo en el campo de corrientes, especialmente en las capas más profundas, donde se manifiestan cambios notorios en la dirección y velocidad del flujo. En la componente v , se observa un comportamiento diferente al escenario con aporte del río. En los primeros meses del año, se muestra un flujo negativo hacia el sur con valores de 0.15 m/s, que cambia a velocidades hacia el norte entre 0.1 m/s y 0.2 m/s a una profundidad de 8 metros. Posteriormente, durante los meses de junio a septiembre, se evidencia una estratificación con tres capas de agua. Entre los 2 m y 8 m, se observan velocidades hacia el norte entre 0.1 m/s y 0.2 m/s, seguidas una capa entre 8 m y 10 m con velocidades hacia el sur de 0.5 m/s. A partir de los 10 m, la velocidad vuelve a ser hacia el norte con valores de hasta 0.1 m/s.

En contraste, para el escenario sin la influencia del río se observa un patrón de flujo hacia el norte durante los primeros meses del año (enero a marzo), con velocidades de hasta 0.2 m/s. Sin embargo, a medida que avanza el año y nos acercamos a los últimos meses (octubre a diciembre), las velocidades tienden a disminuir gradualmente hasta aproximarse a los 0 m/s en toda la columna de agua.

Figura 23. Evolución temporal del perfil vertical de velocidades con media móvil diaria (componente u – arriba- y v -abajo-) en el sitio de la boya virtual para el año 2019. Simulaciones con río (izquierda) y sin río (derecha). Coordenadas Latitud: $8^{\circ} 9' 59.76$ Longitud $76^{\circ} 44' 55$



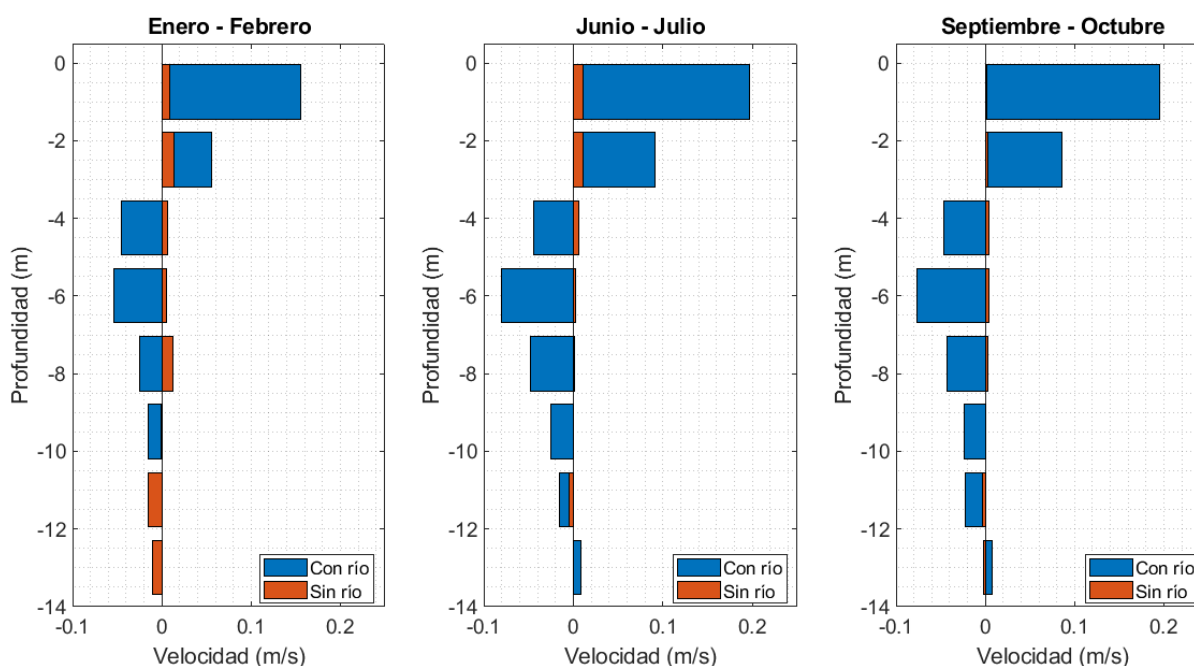
Con el fin de analizar el perfil vertical de las velocidades en los dos escenarios mencionados, se realizó un promedio de los datos correspondientes a las tres épocas climáticas de 2019. Se usaron los datos obtenidos en la boya virtual que se mencionó anteriormente.

En la Figura 24, se presentan los perfiles comparativos de las velocidades en la vertical para la componente u . Se destaca claramente la influencia significativa del río Atrato (escenario con río) con velocidades más bajas en el escenario sin río. A pesar de esta diferencia, se nota que el comportamiento de ambos escenarios las direcciones tienden a ser similares. Este hallazgo sugiere que la presencia del río Atrato tiene un impacto principalmente en la magnitud de las velocidades verticales.

En época seca, los resultados sugieren que, en la superficie, las velocidades tienden a ser hacia el este. Sin embargo, en profundidad, las velocidades tienden a ser hacia el oeste en las simulaciones con aporte del río (barras azules). Esto contrasta con las simulaciones sin río (barras

naranjas), donde se evidencia que el flujo en toda la columna de agua tiende a tener velocidades de menor intensidad hacia el este. Esta tendencia cambia a partir de los 10 m y en profundidad, donde las velocidades se tornan hacia el oeste. En todas las épocas climáticas, se observa una diferencia significativa entre ambos escenarios. En las simulaciones con aporte del río, la intensidad aumenta, mientras que, en las simulaciones sin río, la magnitud disminuye.

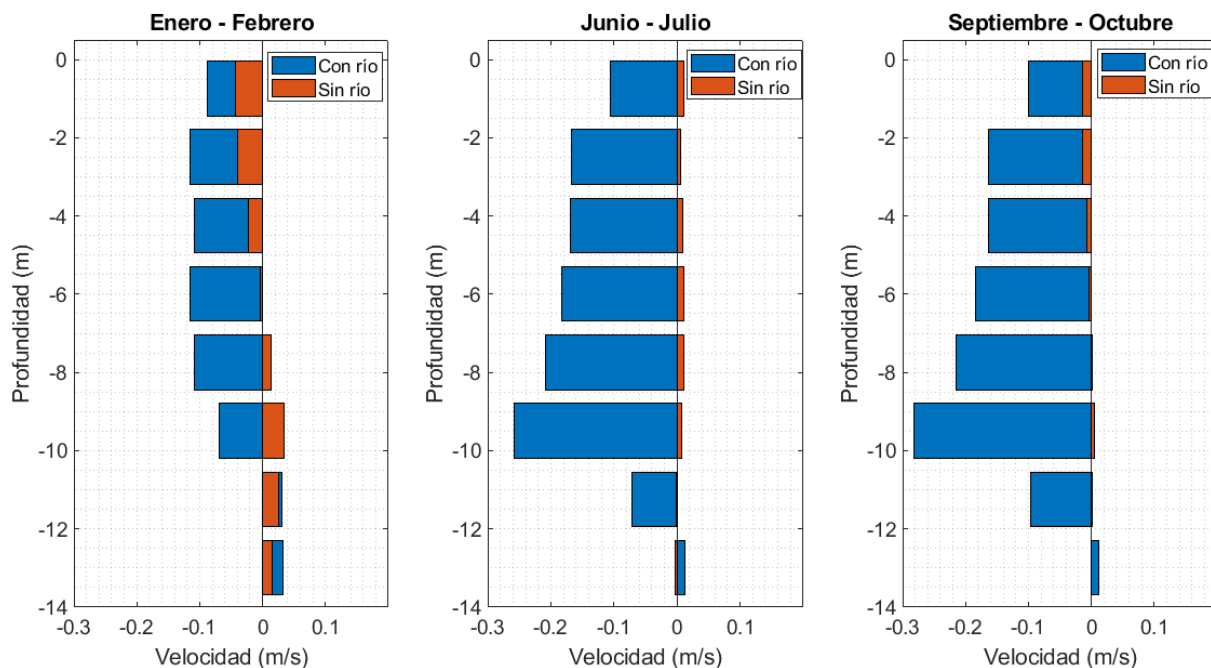
Figura 24. Perfil vertical de la componente u de la velocidad para las simulaciones con y sin aporte del río en el lugar de la boya virtual para el año 2019 en la época seca (Enero – Febrero), transición (Junio – Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).



En la Figura 25 se observan los perfiles de la componente v de las corrientes en las tres épocas climáticas para los escenarios con y sin el aporte del río. En las simulaciones que incluyen el río, se observa un flujo que se desplaza hacia el sur a lo largo de toda la columna de agua. Durante la temporada seca, se registra una disminución en la magnitud de la velocidad, mientras que en las épocas de transición y húmeda, se observa un incremento significativo de la misma. En estas dos últimas épocas, la magnitud de la velocidad muestra una tendencia a aumentar con la profundidad. Por otro lado, el escenario sin el río exhibe un comportamiento diferente. En la temporada seca, las corrientes muestran magnitudes en los primeros 6 m de profundidad que se dirigen hacia el sur, con valores entre -0.1 m/s y 0 m/s. A partir de los 6 metros, la dirección

cambia a un flujo hacia el norte, alcanzando velocidades de hasta 0.05 m/s. En la época de transición, el flujo tiende a ser hacia el norte con velocidades débiles hasta los 10 m de profundidad. Posteriormente, en la temporada húmeda, se observan corrientes que se desplazan en dirección hacia el sur con velocidades de hasta -0.03 m/s hasta los 6 metros, a partir de donde se vuelven cercanas a 0 m/s.

Figura 25. Perfil vertical de la componente v de la velocidad para las simulaciones con y sin aporte del río en el lugar de la boya virtual para el año 2019 en la época seca (Enero – Febrero), transición (Junio – Julio) y húmeda (Septiembre – Octubre).

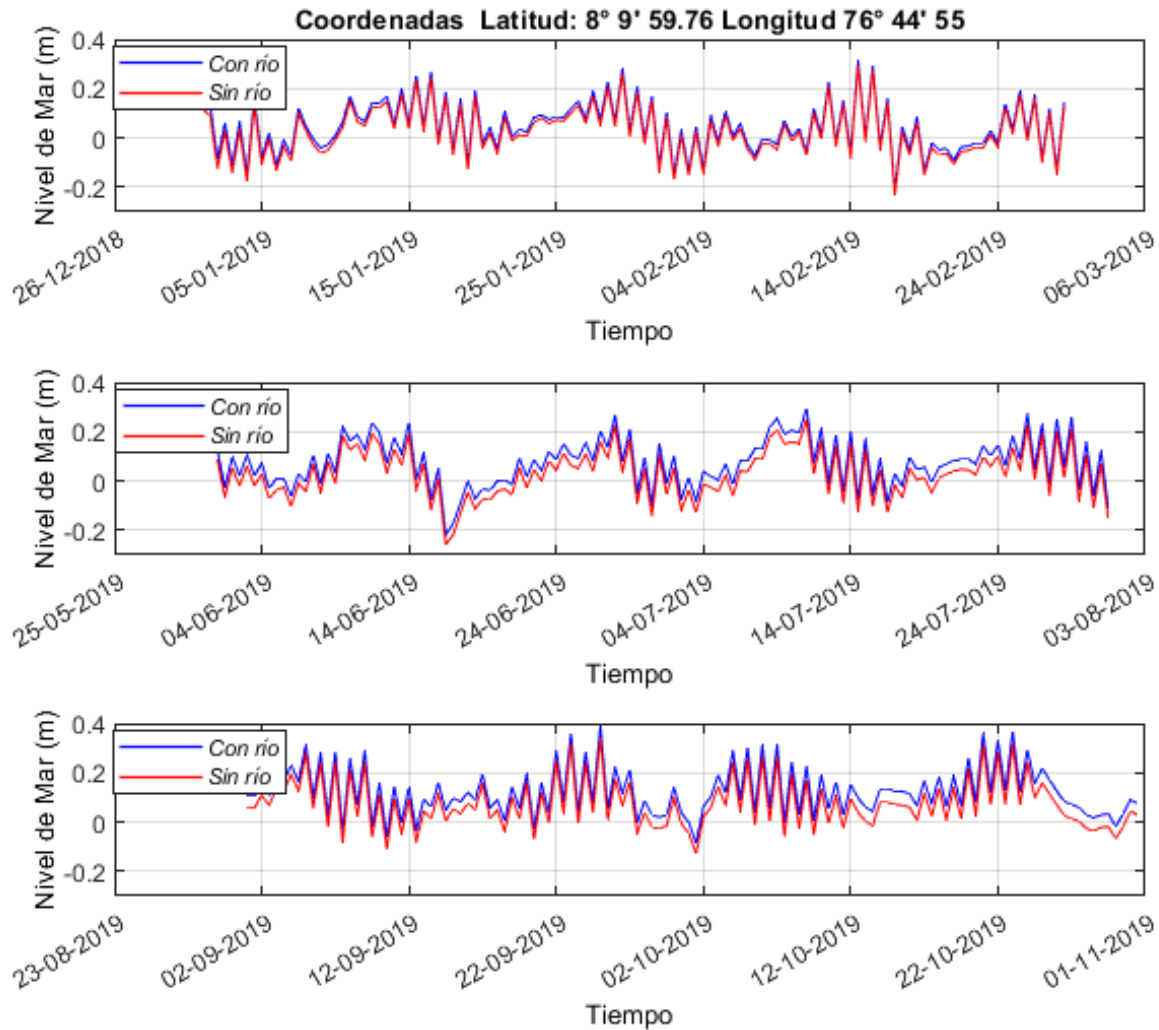


4.3.1. Análisis de niveles de mar con y sin influencia del río

En la Figura 26, se presentan los valores de los niveles del mar en la boya virtual cercana a la playa La Martina durante las épocas: seca, transición y húmeda y escenario con y sin río. Los resultados sugieren que, al desactivar las descargas de los ríos en el área de estudio, se observa un claro impacto en el nivel del mar. Esta diferencia es más pronunciada en épocas de transición y húmedas alcanzando diferencias de hasta 0.5 m. Los niveles del mar siguen el mismo patrón en ambos escenarios, pero difieren en sus valores ya que, al desactivar las descargas de los ríos, se observa una tendencia a la disminución en el nivel del mar. La variación en la cantidad de agua dulce proveniente de los ríos podría influir en los niveles del mar en la zona de estudio. Estos

resultados coinciden con estudios anteriores, como los de Valbuena (2021) y Robledo - Posada (2021), que sugieren que la dinámica en La Martina está mayormente influenciada por la descarga de los ríos y por el viento local,

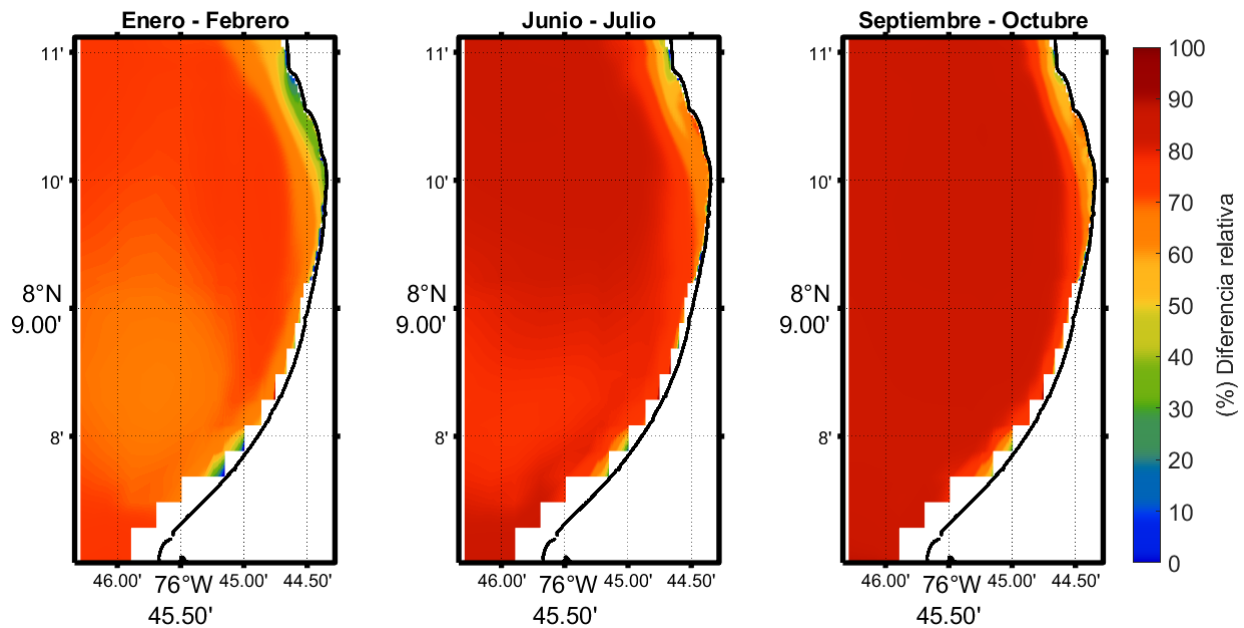
Figura 26. Promedios mensuales del nivel de mar para un punto en playa la Martina en el año 2019. Escenarios con y sin río.



Se realizó el cálculo la diferencia relativa (Pdr) entre los escenarios con y sin río para los campos de magnitud total y de las componentes zonal (u) y meridional (v) superficiales en el dominio de playa La Martina. La figura 27 se muestra como en general los valores de la magnitud total se alcanzan diferencias de hasta el 90% en gran parte de la zona de estudio para la

época de transición y húmeda. Sin embargo, para la época de seca se muestran valores de diferencia $< 65\%$ y que son menores en la parte sur del dominio de estudio donde se observan valores de $\pm 50\%$. Esto podría indicar que en la zona sur en época seca cuando las precipitaciones son menores el aporte del río influye en menor medida. En general, los resultados sugieren que las descargas de los ríos tienen una fuerte influencia en la magnitud total de la velocidad de las corrientes.

Figura 27. Cálculo de la diferencia relativa (*Pdr*) de la magnitud total de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.

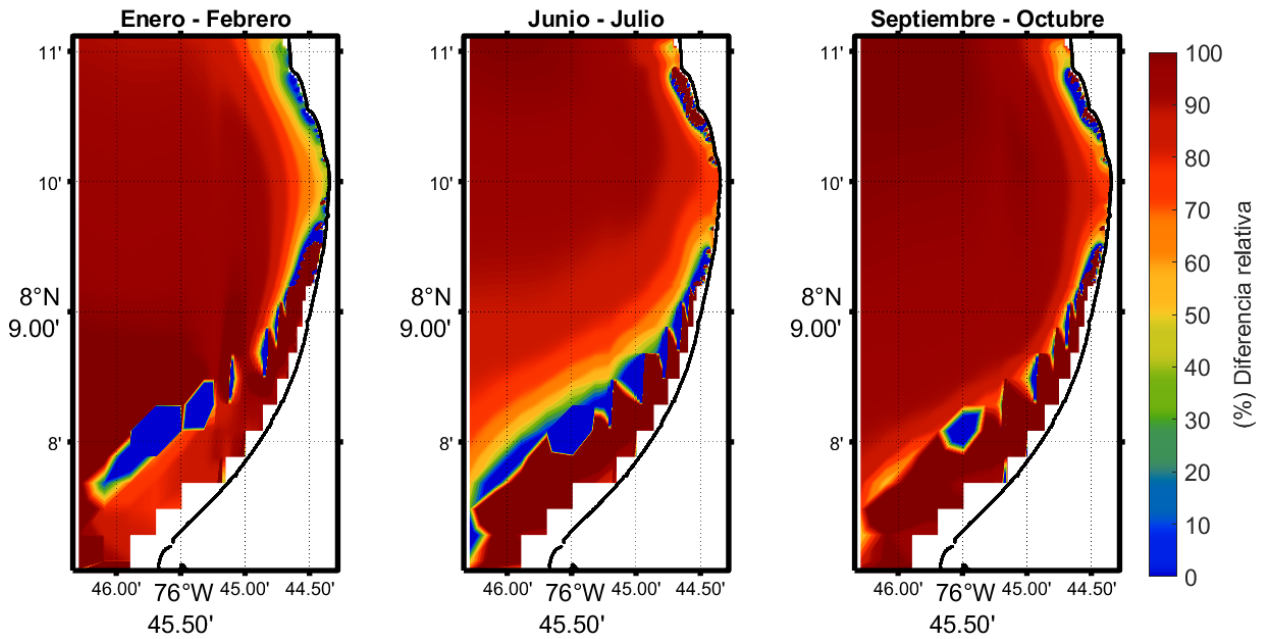


El comportamiento de la *Pdr* para la componente zonal (u) en la capa superficial presenta características diferentes respecto a las corrientes totales. Se observa cómo hay un flujo hacia el este, relacionado con la presencia del río. Este impacto alcanza valores de *Pdr* de hasta 95% en todo el dominio de estudio durante todas las épocas climáticas (Figura 28).

Sin embargo, se producen cambios notables cuando el flujo se acerca a la línea de costa del lado este, especialmente en la zona sur del área de estudio. En esta región, se registran valores de *Pdr* de hasta el 10%. Estos valores son más evidentes en épocas secas y de transición, sugiriendo que en estos periodos el río tiene un impacto menor al llegar a la línea de costa. Es probable que, al aproximarse a la costa, el flujo se vea mayormente influenciado por los vientos durante estas dos épocas. Adicionalmente, se evidencian valores más bajos en la zona cercana a

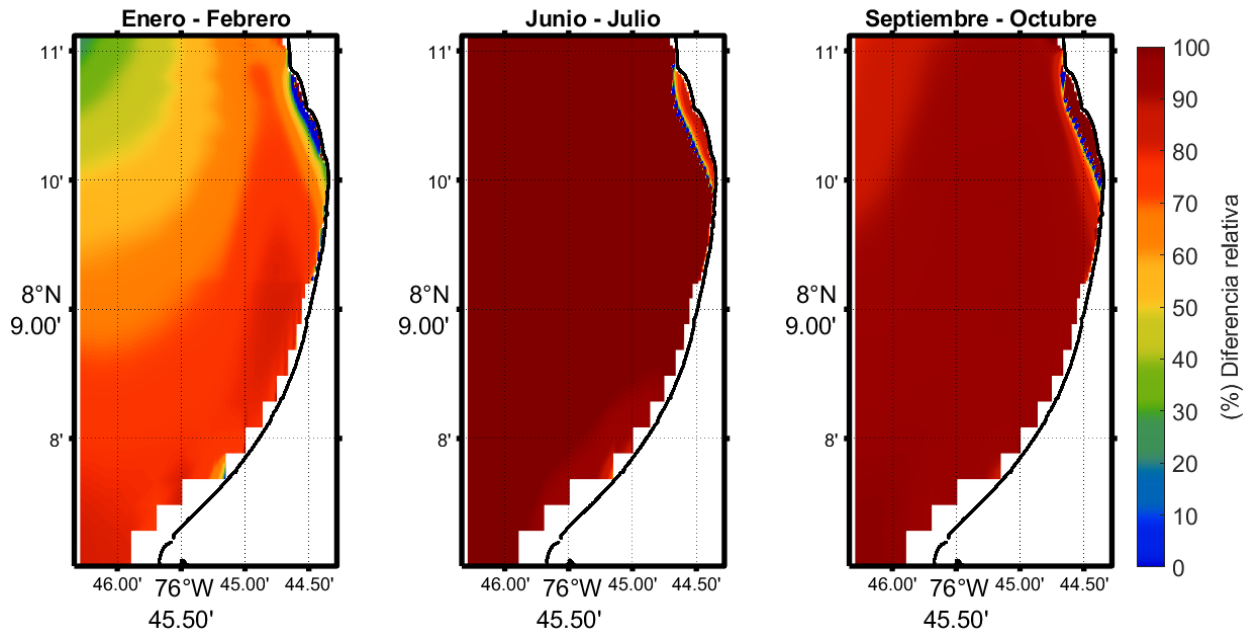
Punta Cangrejo. En resumen, la componente u experimenta variaciones notables en diferentes áreas del dominio de estudio, siendo especialmente sensible al caudal del río y a la influencia de los vientos en las épocas secas y de transición.

Figura 28. Cálculo de la diferencia relativa (Pdr) de la componente u de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.



En la componente meridional (v) se destacan variaciones significativas en diferentes épocas climáticas. Durante la época seca, los Pdr muestran valores más bajos en comparación con las épocas de transición y húmeda (Figura 29). En particular, al norte de la zona de estudio, se registran valores de Pdr del 35%, los cuales aumentan al llegar a la línea de costa, llegando a un máximo del 75%. En las épocas de transición (junio-julio) y húmeda (septiembre-octubre), los Pdr en todo el dominio de estudio muestran valores más altos, llegando incluso al 95%. Sin embargo, se observa un comportamiento particular nuevamente en la zona de Punta Cangrejo, donde los valores de Pdr son menores.

Figura 29. Cálculo de la diferencia relativa (P_{dr}) de la componente v de la velocidad superficial para época seca (Enero – Febrero), transición (junio y Julio) y época húmeda (Septiembre – Octubre) en el dominio de playa La Martina.



Finalmente, se calcularon los coeficientes de correlación y varianza para cada uno de los componentes u y v durante la épocas seca y húmeda, meses de enero-febrero y septiembre-octubre, respectivamente (Tabla 4). Durante la época seca, se observan valores bajos en la varianza explicada para la componente u , indicando que el escenario que excluye al río explica solo el 10% de valor total de las corrientes. Por otro lado, en la componente v , este escenario explica el 50% de las corrientes totales y muestra una correlación de 0.70, lo que indica una alta correlación del escenario donde no se tuvo en cuenta el río con el escenario de referencia.

En contraste, durante la época húmeda, la componente v presenta una correlación de 0.33 lo cual sugiere una influencia de la descarga de los ríos. Los resultados en esta época para la componente u muestran una varianza explicada del 6% y una correlación de -0.25. Estos porcentajes bajos sugieren la importancia de los caudales en la hidrodinámica del golfo durante esta época del año. En general, los resultados de la tabla indican que la exclusión del caudal del río lleva a velocidades más bajas y direcciones significativamente diferentes con respecto al patrón de circulación del área de estudio.

Tabla 2. Análisis estadístico de las simulaciones con todos los forzantes y las simulaciones de los casos sin río para época seca (enero y febrero) y época húmeda (septiembre y octubre)

Épocas climáticas	Componente	Varianza explicada (R^2)	Correlación (r)
Enero - Febrero	<i>u</i>	0.10	0.32
	<i>v</i>	0.50	0.70
Septiembre – Octubre	<i>u</i>	0.06	-0.25
	<i>v</i>	0.10	0.33

Es importante tener en cuenta que la malla utilizada en estos últimos análisis es la fina y podría sobreestimar los resultados. Por esta razón, se recomienda validar estos resultados con datos *in situ*. Mientras tanto, estos hallazgos nos brindan información adicional sobre la hidrodinámica local, permitiéndonos realizar inferencias preliminares.

5. Conclusiones

A través del uso del modelo Delft3D y la consideración de diversos forzantes como las mareas, los vientos y el caudal se logró caracterizar los procesos hidrodinámicos en la zona de estudio para los años 2015 a 2019. Los resultados obtenidos permitieron ampliar el conocimiento de la circulación hidrodinámica en la playa La Martina en diferentes épocas climáticas y comprender la influencia de las descargas de los ríos en la zona de estudio.

Los resultados sugieren que en época seca los valores en la magnitud de las corrientes son menores que en época de transición y húmeda esto debido probablemente que es un periodo fuertemente dominado por los vientos alisios que vienen del norte y a las bajas precipitaciones que se dan en esta época. Se observó un flujo que se dirige hacia la línea de costa en superficie y que al llegar a la costa se devuelve en profundidad hacia el oeste. También se evidenció un flujo en dirección norte – sur.

El comportamiento observado durante la época húmeda en dirección norte – sur se atribuye a un apilamiento de agua en la superficie, resultado de la dinámica en el golfo influenciada por vientos del sur. Este desplazamiento de agua podría estar generado por el bombeo de Ekman, aunque se esperaría compensación vertical (convergencia o divergencia). Estos resultados se corroboraron con los análisis del nivel de mar en época húmeda, en el que se evidenció un aumento del nivel del mar en toda la serie temporal. Como consecuencia directa, esto podría explicar algunas de las inundaciones y la erosión de las playas de la zona de playa La Martina.

Los escenarios con río y sin río permitieron identificar los aportes del flujo del río Atrato a la corriente total estimada de la playa La Martina durante el año 2019. Los resultados sugieren que al eliminar el caudal de los ríos se producen transformaciones importantes en el campo de corrientes. Sin el caudal de los ríos, se alteran significativamente la circulación, la magnitud y la dirección de las corrientes tanto en superficie como en profundidad.

Los análisis estadísticos para la playa La Martina indican un cambio significativo en las velocidades para las simulaciones con río y sin río. Durante la época húmeda, se evidenciaron velocidades más altas (0.15-0.2 m/s), con una disminución de valores de hasta 0.05 m/s cuando se desactivan las descargas fluviales. Por otro lado, al desactivar las descargas de los ríos, en la época seca, las velocidades son mayores, posiblemente debido a la influencia predominante del viento y en segundo lugar a la marea.

En época seca, la playa La Martina experimenta una influencia de aproximadamente el 75% por parte de los ríos, mientras que en épocas de transición y húmedas, este porcentaje supera el 90%. Se observó un comportamiento particular para la componente u , con cambios significativos cuando el flujo se acerca a la línea de costa del lado este, especialmente en la zona sur del área de estudio, llegando a registrar valores de Pdr de hasta el 10%. Estos valores son más notables en épocas secas y de transición, indicando que en esos periodos el impacto del río es menor al llegar a la línea de costa. Los estadísticos sugieren que hay una baja correlación entre el escenario con río y sin río lo que destaca la gran influencia del caudal en el comportamiento de la hidrodinámica local en la playa La Martina.

Estos resultados permitieron expandir el conocimiento de la circulación hidrodinámica dentro de playa La Martina en las diferentes épocas climáticas y conocer la influencia de las descargas de los ríos en la zona de estudio. Se obtuvo la calibración y validación del modelo que puede ser usado en futuros trabajos de investigación.

6. Recomendaciones

Los resultados obtenidos con muestran un buen desempeño del modelo y reflejan de manera apropiada el comportamiento en la playa La Martina. No obstante, se recomienda llevar a cabo una campaña batimétrica que abarque toda la zona de playa La Martina y, de manera conjunta, el golfo de Urabá para ser incorporada en futuros trabajos. Esta mejora en la información batimétrica permitirá realizar modelaciones con mayor refinamiento, evitando así posibles sobreestimaciones de los datos. Adicionalmente, se aconseja llevar a cabo una validación de estos resultados mediante mediciones *in situ*.

Se recomienda como trabajo futuro realizar evaluaciones decadales para evaluar la influencia fenómeno del Niño y la Niña. Asimismo, se sugiere llevar a cabo un análisis más profundo de los forzantes del viento y realizar un cálculo detallado del bombeo de Ekman en la región. Esta acción tiene como finalidad validar los resultados presentados en el presente trabajo.

Los resultados presentados son una contribución significativa para la comprensión de los procesos de erosión e inundación que han estado ocurriendo en los últimos años en la Playa La Martina. Esto es esencial para implementar estrategias de gestión efectivas y pueden servir como base para la formulación de políticas públicas y estrategias de planificación territorial.

7. Referencias bibliográficas

- ABBOT, M. R. y ZION. P. M. 1987. Spatial and temporal variability of phytoplankton pigments of northern California during coastal ocean dynamics experiments. *J. Geophys. Res.* 92 (C2): 1745-1755.
- Alcántara-Carrió, J., Caicedo, A., Hernández, J. C., Jaramillo-Vélez, A., & Manzolli, R. P. (2019). Sediment bypassing from the new human-induced lobe to the ancient lobe of the Turbo delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). *Journal of Coastal Research*, 35(1), 196-209. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00221.1>
- Aristizabal, C., Betancur, M., & Vesquez, C. (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, Golfo de Urabá. Universidad Eafit - Departamaneto de Geología
- Aristizabal, C., Betancur, M., & Vesquez, C. (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, Golfo de Urabá. Universidad Eafit - Departamento de Geología.
- Aristizabal, et al., 1990; Caicedo, et al., 2017; Correa & Vernet, 2004; Franco & Gomez, 1996; Gonzáles & Guarín, 2003; Gonzales, 1992; Mazorra, 2004; Paniagua, 2013; Posada, 2002; Posada P & Henao, 2008).
- Ávila, D. L., & Porres, A. (Eds.). (2021). Análisis de los efectos del oleaje en la conformación de diferentes ambientes costeros (Vol. 191, Número 1). Instituto Mexicano del Transporte Publicación bimestral de divulgación externa. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=533&IdBoletin=192>
- Barranco, R. Q., Higueta, M., Acosta, L. F. G., & Valencia, V. G. T. (2021). Evaluación de las principales características de la onda de marea al interior del golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 40(2), 35-46.
- Barrientos Porras, N. S., & 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.
- Barrientos, N., & Mosquera, W. (2018). Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia. Trabajo de grado. Turbo, Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Bedoya Henao, Y. A., & Toro Valencia, V. G. (2023). Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá debido a condiciones meteomarinas y a la descarga de ríos [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Caicedo, A. P., Hernández, J., Castañeda, J., & González, M. (2017). Aportes Sedimentarios y Evolución Litoral de la Franja Oriental del Golfo de Urabá, Zona de Turbo. *INVEMAR*, 1–47.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH. (30 de 04 de 2021). CIOH Oceanografía operacional. Obtenido de Climatología del Caribe: <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe8.php>
- Cifuentes, D., & Campos, J. (2021). Caracterización morfodinámica en época seca de las secciones submareal y subárea, de la playa La Martina. (Turbo, Antioquia) [Universidad de Antioquia].

[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18341/1/Cifuentes_Daniela_2021_Caracterizaci%
c3%b2nMorfodinamicaMartina.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18341/1/Cifuentes_Daniela_2021_Caracterizaci%c3%b2nMorfodinamicaMartina.pdf)

- Coca, J., Ramos, A. G., & Redondo, A. (2006). Ekman pumping calculation from data of the SeaWindS wind dispersometer on the QuikSCAT satellite. *Revista de Teledeteccion*
- Coleman, J.M. (1981). (Ed.) Deltas: processes of deposition and models for exploration. 2 Ed. Burgess Publishing Company, 124 p.
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al Problema de la Erosión Litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33(1), 07–28.
- Deltas y Estuarios de Colombia - Colección Ecológica del Banco de Occidente. (2007). Imeditores.com. <https://www.imeditores.com/banocc/deltas/cap2.htm>
- Franco, E., & Gómez, J. (1996). Evolución de la Línea de Costa del Litoral Antioqueño. Aspectos Geomorfológicos, sector Río Necoclí - Turbo. Facultad Nacional de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Galloway, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. En: Broussard, M. L. (Ed.) Deltas, models for exploration. Houston Geological Society, pp. 87-98.
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados. (Formatos impreso y digital). © Medellín / Antioquia / Colombia. Litografía Grafiservicios S.A.S
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados. (Formatos impreso y digital). © Medellín / Antioquia / Colombia. Litografía Grafiservicios S.A.S
- González, D., & Guarín, F. (2003). Evolución Geomorfológica de los acantilados entre Arboletes (Antioquia) y la desembocadura del Río Córdoba (Córdoba). Medellín, Colombia: Universidad de Eafit - Departamento de Geología
- Gonzales, J. (1992). Geomorfología y problemas erosivos del Litoral Caribe Colombiano, sector: Delta de Tinajones-Punta Caribaná. INGEOMINAS Regional Del Caribe.
- González, C.J., Álvarez, Ó., Reyes, J., & Acevedo, A. (2010). Modelado bidimensional de la hidrodinámica y transporte de sedimento en el caño de marea San Pedro (Bahía de Cádiz): Implicaciones morfodinámicas. *Ciencias marinas*, 36(4), 393-412. Recuperado en 12 de marzo de 2022, de
- Gyssels, P., Baldissone, C. M., Hillman, G., Rodriguez, A., Bosc, J., Corral, M., Pagot, M., Brea, D., Spalletti, P., & Farias, H. D. (2013). Aplicaciones del Modelo Numérico Delft3D a Diferentes Problemas Hidrosedimentológicos en Casos Argentinos. *Mecánica Computacional*, 32(33), 2757–2777. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4517>

- Gyssels, P., Bosc, J., Rodriguez, A., Corral, M., & Hillman, G. MODELACIÓN NUMÉRICA CON DELFT3D DEL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY.
- Higuita, M., & Quintana, R. (2020). Modulación de las corrientes oceánicas en el golfo de urabá a partir de la onda de marea. Trabajo de grado. Turbo, Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Jaramillo, L. J. M., Botero, M. T., & Giraldo, A. G. (2010). Descripción de los patrones estacionales de circulación hidrodinámica en el Golfo de Urabá (Colombia). Cuadernos del Caribe, (14), 13-34. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/40915>
- Mazorra, J. (2004). Geomorfología y dinámica de la franja costera entre Punta Arboletes y cristo Rey, Departamento de Córdoba. 100p. Universidad Nacional - Invemar Facultad de Geología, Santa Fe, Bogota, Colombia
- Mercado, A., & Hernández, T. (2020). Estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el distrito de Turbo, Colombia. Trabajo de grado. Turbo, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Montoya, L. J., & Toro, 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).
- Nieto Oliveros, M. J. (2011). El nuevo delta del Río Turbo: colonización, cambio de paisaje y dinámica costera en el Urabá antioqueño [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/11718>
- Orejuela, F. (2020). Modulación de oleaje causado por la construcción de una obra de protección costera utilizando un modelo numérico con mallas no estructuradas. Caso de estudio Puerto Rey-Minuto de Dios. Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Turbo, Antioquia.
- Paniagua, J. F. (2013). Migración Historia Actualizada y Predicción de la Posición de la línea de costas en sectores Acantilados críticos del Litoral Antioqueño Considerando Escenarios de Ascenso del Nivel del Mar. Medellín: Universidad EAFIT - Escuela de Ingeniería
- Pickett, M. H., & Paduan, J. D. (2003). Ekman transport and pumping in the California Current based on the US Navy's high-resolution atmospheric model (COAMPS). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10).
- Posada Jaramillo, F. (2019). Modelo hidrodinámico y de oleaje del mar caribe: DELFT Caribe. Universidad EAFIT.
- Posada P, B., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. Serie de Publicaciones Especiales No13, Santa Marta: INVEMAR.
- Posada, L. (2002). Erosión costera en el litoral Caribe colombiano, Departamentos de Antioquia y Córdoba. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellin.16p.
- Ramírez Guerrero, R. E. (2020). Caracterización de la dinámica geomorfológica y sedimentaria de la playa La Martina, en época húmeda. Turbo, Antioquia.
- Ramos Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama Campillo, L. M., Pech Pool, D., & Ortiz Pérez, M. A. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el

- ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581-598.
- Restrepo, J. C. (2014). *Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales–Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia–Mar Caribe)*. Doctor in Marine Science Dissertation, Universidad del Norte. Colombia.
- Restrepo, J.D., & López, S.A (2007). *MODELOS MORFODINÁMICOS DE LOS DELTAS FLUVIALES COLOMBIANOS*. *Boletín de Geología*, 29(1),103-113. [fecha de Consulta 9 de mayo de 2022]. ISSN: 0120-0283. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349632017007>
- Robledo Posada, A. K. (2019). *Patrones de transporte de sedimentos en Playa La Martina durante la época húmeda*.
- Roldán, P. A. (2008) *Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos* Tesis de Maestría. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 113p
- Silva, G., Ramírez, E., y Caldwell, J. 1978. *Proyecto Darién, Colombia - OEA. Estudio para la Orientación del Desarrollo de la región del Darién. Estudio de un puerto para Urabá*. Medellín: Informe técnico. Organización de los Estados Americanos.
- Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia. (2018). *Informe final del proyecto "Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia"*. Medellín
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149-4162.
- Valbuena Sierra, D. F. (2021). *Análisis dinámico de los procesos físicos, paralelos y perpendiculares al inner-shelf y surf zone de la playa La Martina, Turbo (Caribe colombiano)*.
- WL Delft Hydraulics. (2023). *Delft3D: Software for integrated water management*. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

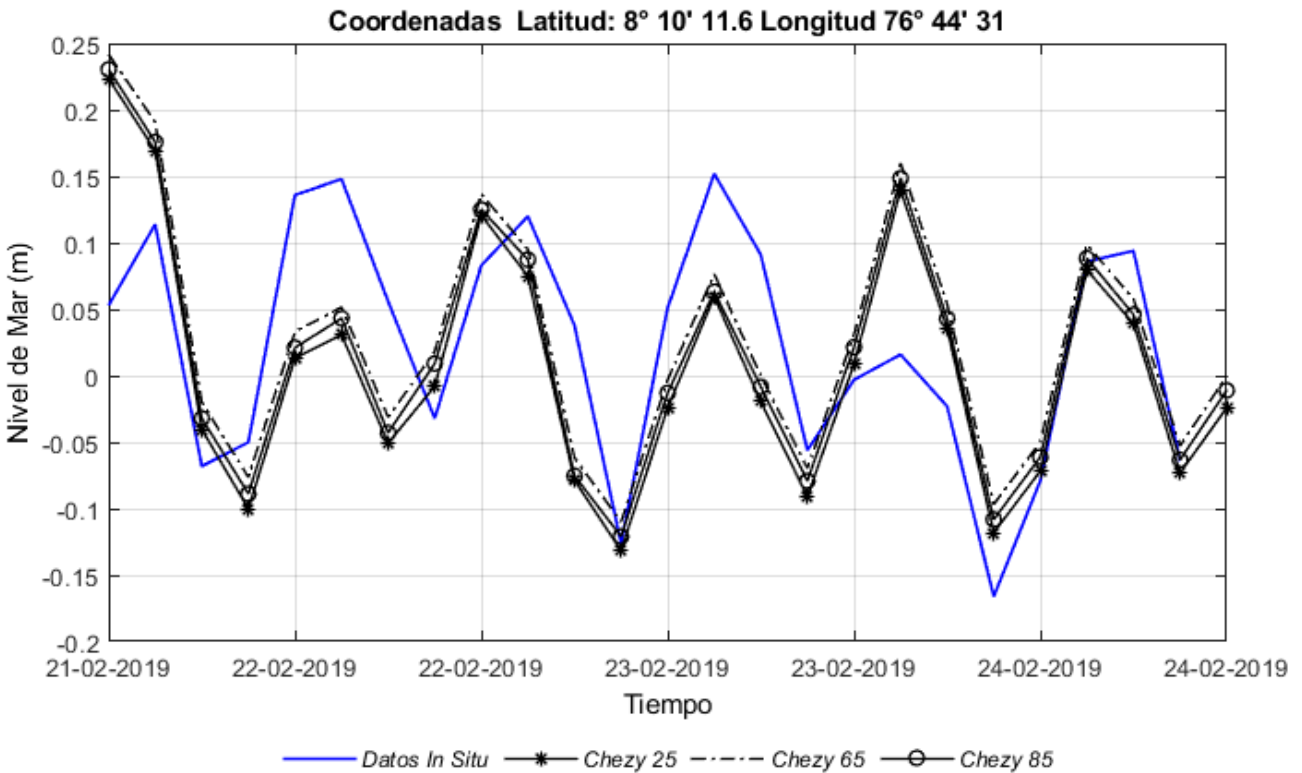
8. Anexos

Anexo 1. Calibración del modelo numérico Delft3D: Rugosidad del fondo tipo Chezy

Se realizaron estudios de la sensibilidad del modelo hidrodinámico a diferentes valores de rugosidad de Chezy con el fin de determinar su efecto en el nivel del mar. Las investigaciones se llevaron a cabo comparando los niveles de mar de las simulaciones del modelo con los medidos en campo para ello se dispone de un conjunto de datos de niveles de mar recolectados entre el 21 de febrero de 2019 a las 12:00 horas y el 24 de febrero de 2019 a las 12:00 horas, como parte del proyecto "Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia". Estos datos se obtuvieron durante una campaña llevada a cabo cerca de playa La Martina (Valbuena Sierra, 2019). Con el propósito de ajustar el modelo numérico Delft3D, se realizaron tres simulaciones considerando distintos coeficientes de rugosidad del fondo expresados en términos de coeficientes de Chezy (25, 65 y $85 \frac{m^2}{s}$).

En el modelo, se mantuvo constante la rugosidad del fondo en el tiempo y en el espacio. Se aplicaron niveles de agua medidos a lo largo de los límites del mar abierto del modelo para poder calibrarlo adecuadamente. Esta decisión fue tomada debido a que los datos disponibles para calibrar y validar las corrientes se encuentran ubicados en una zona somera y cercana a la costa, por lo que los niveles de agua resultan ser una métrica más adecuada para esta calibración.

Figura 30. Niveles de mar obtenidos de las salidas del modelo numérico Delft3D en función de los datos in situ ADCP01.



La tabla 2 muestra los estadísticos de los niveles de mar simulados para los diferentes valores de rugosidad de Chezy. El RMSE (Root Mean Square Error) es una medida utilizada en estadísticas y análisis de datos para evaluar la precisión de un modelo o una predicción en relación con los valores observados o reales. Cuanto más cercano sea el valor de RMSE a cero, mejor será la precisión del modelo en hacer predicciones precisas. En este caso, los tres valores de RMSE son muy cercanos entre sí, lo que sugiere que el modelo tiene un buen rendimiento en términos de precisión de las predicciones, comparado con los niveles de mar modelados. Los valores de R^2 indican que alrededor del 40.9% de los datos del modelo muestran una correspondencia con los datos medidos. En términos generales, esta medida es positiva, sugiriendo que el modelo tiene cierta capacidad para explicar el comportamiento en la playa La Martina.

Los resultados indican que los tres modelos tienen un rendimiento satisfactorio en relación con las expectativas, ya que las comparaciones entre sus resultados no revelan diferencias significativas en relación con los niveles de agua. Esto se debe a la amplia cobertura de la batimetría utilizada, en este caso la carta náutica 412. Al ajustar el coeficiente de Chezy, no

se observan impactos significativos en los datos, lo que sugiere que se puede emplear cualquier valor de rugosidad del fondo tipo Chezy dentro de ese rango de modelación sin afectar considerablemente los resultados. Se decidió trabajar con el coeficiente de Chezy de $65 \frac{m^{\frac{1}{2}}}{s}$, esto con el fin de tener un valor intermedio entre ambos experimentos.

Tabla 3. *Análisis estadístico de las simulaciones del modelo.*

Chezy $\frac{m^{\frac{1}{2}}}{s}$	Rugosidad de	RMSE	Bias	R²
25		0.070488	-2.6021e-18	0.409
60		0.070286	-5.7824e-19	0.403
85		0.070087	3.4694e-18	0.404

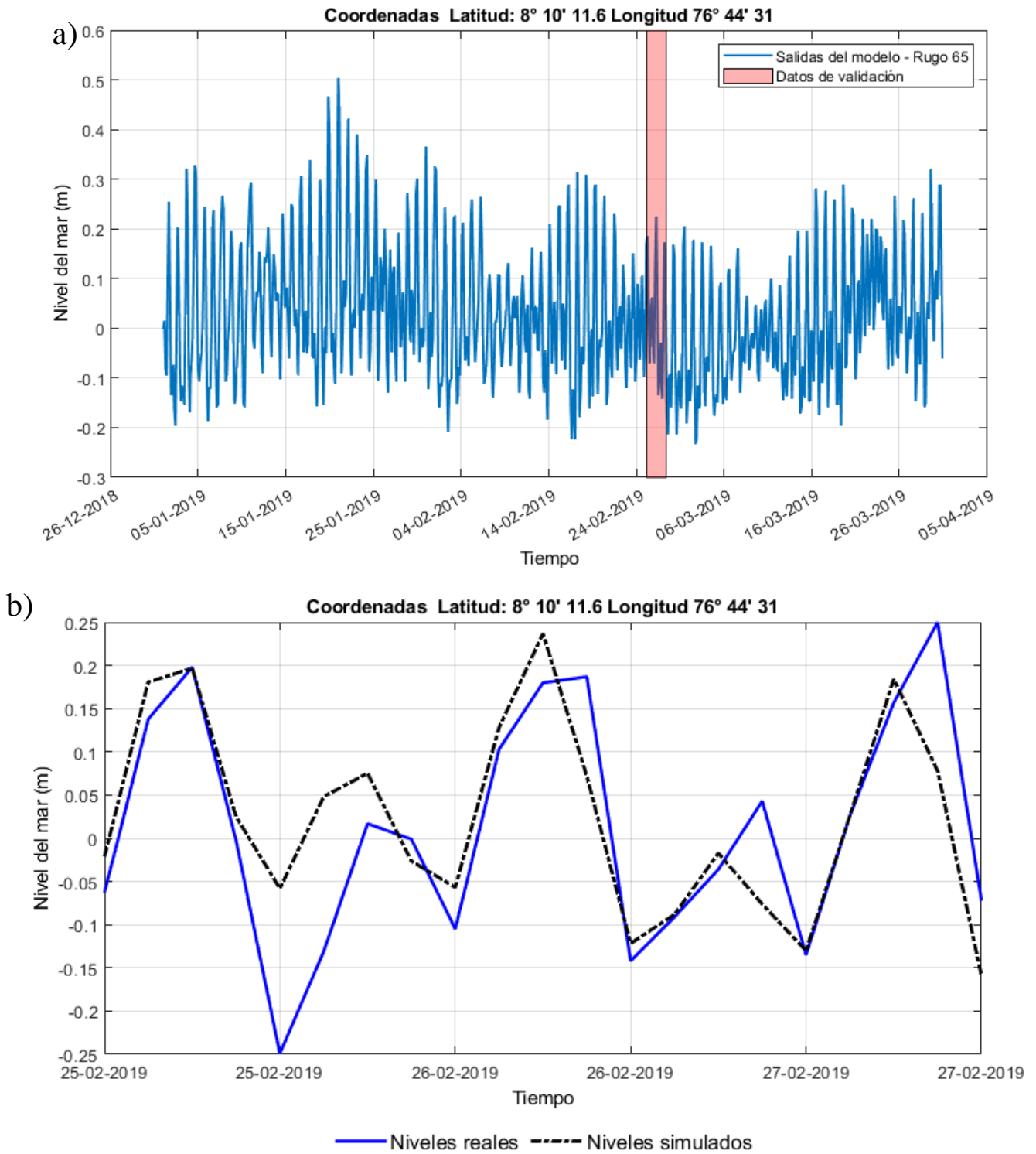
Anexo 2. Validación del modelo hidrodinámico Delft3D.

Para la validación del modelo hidrodinámico Delft3D, se cuenta con un conjunto de datos adicionales de niveles de mar, distintos de los utilizados en el proceso de calibración. Estos datos fueron recolectados entre el 24 de febrero de 2019 a las 15:00 horas y el 28 de febrero de 2019 a las 12:00 horas, como parte del proyecto "Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia". Al igual que en la fase de calibración, esta campaña de recolección de datos tuvo lugar cerca de playa La Martina (Valbuena, 2021).

Para llevar a cabo la validación, se procedió a ejecutar nuevamente el modelo numérico Delft3D con una simulación que abarcó un período de tres meses, desde enero hasta marzo de 2019 con todos los forzadores del modelo (Figura 6b). Esta extensión en el tiempo permitió que la simulación tuviera un período de calentamiento adecuado para representar los procesos hidrodinámicos en el área de estudio.

A través de esta validación, se buscó verificar la habilidad del modelo para replicar de manera precisa los niveles del mar registrados durante el período mencionado. Al contrastar los resultados de la simulación con los datos medidos en el terreno, fue posible evaluar el rendimiento del modelo en condiciones que no fueron tenidas en cuenta durante la calibración. Esto proporcionó una mayor confianza en su capacidad para representar de manera eficiente los fenómenos hidrodinámicos en la playa La Martina.

Figura 31. A) Niveles de mar obtenidos de las salidas del modelo numérico Delft3D durante los meses de enero, febrero y marzo de 2019. B) Comparación de las salidas del modelo con los datos tomados en campo para la validación.



Después de comparar los resultados del modelo hidrodinámico Delft3D con los datos *in situ* utilizados para validar el modelo, se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos:

Tabla 4. *Análisis estadístico de las simulaciones del modelo para la fase de validación*

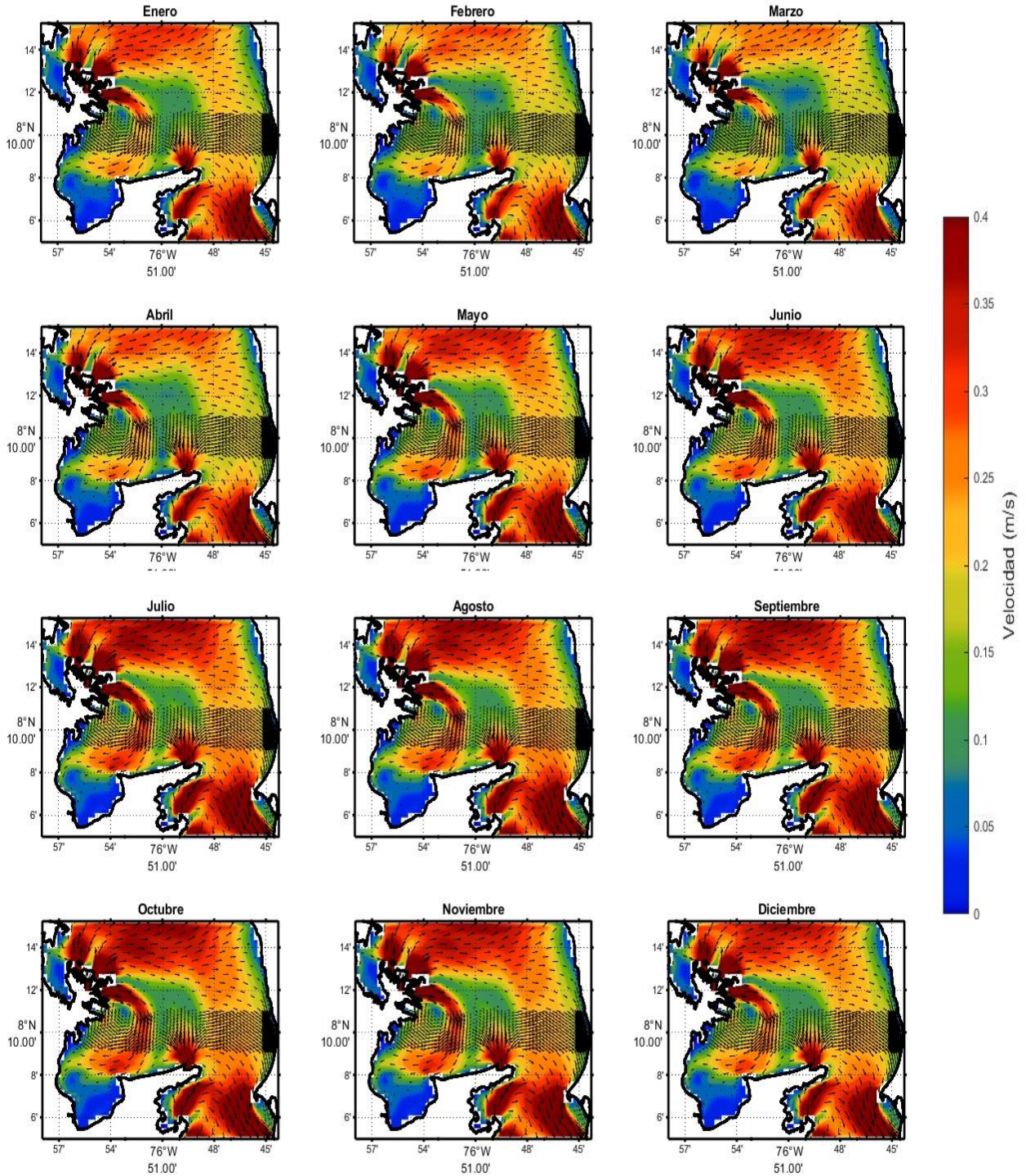
RMSE	Bias	R²
0.072177	0	0.58796

En líneas generales, los estadísticos de comparación entre las simulaciones del modelo para validar con los datos *in situ* fueron altamente satisfactorios. El valor de RMSE de 0.072 indica que el modelo exhibe una precisión aceptable en relación con los datos medidos, siendo un indicador

clave para evaluar su desempeño. La proximidad del bias a cero ($2.313e-18$) sugiere que el modelo carece de sesgo sistemático, mostrando una adecuada adaptación a los datos de validación. Asimismo, el valor de R² de 0.5879 señala que el modelo explica alrededor del 58.7% de la variabilidad de los datos *in situ*, lo cual, aunque aceptable, indica que aún persiste una proporción significativa de variabilidad no explicada. En resumen, estos resultados sugieren que el modelo hidrodinámico Delft3D posee una precisión aceptable y se ajusta de manera razonable a los datos de validación *in situ*.

Anexo 3. Promedio mensual multianual para la zona centro del golfo de Urabá.

Figura 32. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual en la zona centro del golfo de Urabá para el periodo 2015 - 2019.



Anexo 4. Promedio mensual multianual para playa La Martina.

Figura 33. Campos vectoriales de la corriente superficial promedio mensual multianual en la Playa La Martina para el periodo 2015 - 2019.

