



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MODULACIÓN DE LAS CORRIENTES OCEÁNICAS EN EL GOLFO
DE URABÁ A PARTIR DE LA ONDA DE MAREA.**

Autores

MANUELA HIGUITA SÁNCHEZ.

RICARDO ANDRÉS QUINTANA BARRANCO.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, escuela ambiental

Turbo, Antioquia

2020



Modulación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá a partir de la onda de
marea

Manuela Higuera Sánchez [1]

Ricardo Andrés Quintana Barranco [2]

Informe de práctica o monografía o investigación o tesis o trabajo de grado
como requisito para optar al título de:

[1] oceanógrafa.

[2] ingeniero oceanográfico

Director

Vladimir g. toro

Magister en ingeniería - recursos hidráulicos

Doctor en oceanografía física

Co- Directora.

Luisa Fernanda Gutiérrez Acosta

Magister en ingeniería - recursos hidráulicos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.

Turbo, Antioquia

2020.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, a mis maestros por inspirarme y ser parte de mi proceso de aprendizaje y desarrollo en el mundo de la investigación y las ciencias del mar, a los semilleros de instrumentación y modelación oceanográfica por ser un excelente equipo de trabajo, a nuestro asesor por su paciencia, dedicación, calidad humana y por ser una inspiración para mí y para los estudiantes que tenemos el privilegio de contar con él como guía en nuestro proceso académico.

A mis padres, a mi hermano y a Coquito, por confiar en mí y apoyar siempre mis sueños y metas, por su amor incondicional y motivarme siempre a continuar.

A la universidad de Antioquia por brindarnos las herramientas necesarias para llevar a cabo nuestro proceso académico. También agradecer a las personas de la universidad nacional por el apoyo y asesorías brindadas. Especialmente a nuestra co-asesora Luisa F. Gutiérrez por su aporte en este trabajo.

Por último, como autores expresamos agradecimiento a la Gobernación de Antioquia y al proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, Ascon 18-417” por el apoyo para el desarrollo de las actividades de este trabajo.

Manuela Higueta.

A mi familia por su apoyo incondicional y motivación en todo este proceso.

A mis asesores, Vladimir Toro Valencia y Luisa Gutiérrez Acosta, por su invaluable colaboración, paciencia, recomendaciones y aportes académicos recibidos durante mi formación como ingeniero.

A la Universidad de Antioquia y docentes por haber cimentado y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. Finalmente, a mis compañeros con los que compartí ratos joviales.

Ricardo Quintana Barranco.

RESUMEN

El golfo de Urabá presenta un complejo sistema hidrodinámico que es afectado por diversos factores entre ellos los agentes atmosféricos, oceanográficos y el caudal de los ríos como el Atrato y León. La influencia de forzadores dinamizadores del océano como la marea, el oleaje, la estratificación salina y el esfuerzo del viento al parecer son los factores más predominantes en el proceso de formación de corrientes en el golfo de Urabá. Estas corrientes, oceánicas y costeras, están fuertemente relacionadas con procesos biológicos y químicos y modifican las condiciones pesqueras, de navegación y erosión costera que pueden afectar económicamente a las poblaciones. Por lo tanto, es necesario entender cuáles son los procesos que modulan los patrones de corrientes a nivel espacial y temporal. Esto es posible por medio del uso de modelos numéricos, tales como el ROMS (Regional Ocean Modeling System). En este trabajo se analizó el papel que cumple la onda de marea en la generación de corrientes en el golfo de Urabá. Los resultados de los promedios mensuales del nivel medio del mar y las salidas horarias para la velocidad de las corrientes y los análisis del coeficiente de variación local, sugieren que las mayores velocidades al interior del golfo de Urabá se presentan durante la época seca. Por otro lado, se observó que las velocidades de las corrientes totales superficiales al interior del golfo están forzadas principalmente por los aportes fluviales y que el campo de vientos es el agente dinámico que modula las corrientes superficiales en el exterior del golfo. Estos resultados han permitido avanzar en el entendimiento adecuado del sistema general de corrientes del golfo. Se espera que estos resultados, permitan la implementación de propuestas que aporten a la solución de problemas oceanográficos del golfo.

Palabras clave: Modelación, corrientes, marea, ROMS, golfo de Urabá.

ÍNDICE

Índice de figuras.....	7
Índice de Tablas.....	9
1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	12
3.1. Objetivos generales.....	12
3.2. Objetivos específicos.....	12
3. Marco teórico.....	13
3.1. Marea.....	13
4.1.1. Marea semidiurna.....	14
4.1.2. Marea semidiurna mixta.....	14
4.1.3. Marea diurna.....	14
4.1.4. Marea diurna mixta.....	15
4.2. Componentes armónicas de la marea.....	15
4.3. Modelación numérica	16
4.3.1. Modelo numérico ROMS.....	17
4. Metodología.....	18
4.1. Área de estudio.....	18
4.2. Bases de datos de entrada.....	20
4.3. Análisis de series de marea.....	22
4.4. Escenarios modelados.....	23
4.5. Evaluación del modelo.....	23
5. Resultados y análisis.....	25
5.1. Análisis de series de marea.....	25
5.2. Análisis de armónicos.....	25
5.3. Análisis de resultados para corrientes promedio mensuales.....	28
5.4. Análisis de resultados para corrientes promedio horarias.....	33

5.5. Análisis histogramas.....	41
5.6. Comparación de resultados del modelo y datos <i>in situ</i>	43
6. Conclusiones.....	46
7. Recomendaciones.....	47
8. Referencias bibliográficas.....	47
9. Anexos.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización área de estudio. América del sur, recuadro en rojo ubicando a Colombia(a); Colombia, recuadro en rojo ubicando el golfo de Urabá(b); golfo de Urabá (c).....	19
Figura 2. Batimetría del área de estudio. Obtenida de la base de datos ETOPO.	21
Figura 3. Ubicación de mareógrafos en el golfo de Urabá.....	22
Figura 4. Zonificación del golfo de Urabá.....	24
Figura 5. Ubicación puntos de muestreo usados en la validación del modelo.....	24
Figura 6. Gráfica de serie de marea de turbo.....	25
Figura 7. Espectro de energía de la marea.....	26
Figura 8. Espectro de amplitud de la marea.....	26
Figura 9. Espectro de fase de la marea.....	26
Figura 10. Gráfica de serie de marea. Boya turbo.....	28
Figura 11. Corrientes promedio mensuales, 2015. Forzado con aportes fluviales, vientos y marea.....	29
Figura 12. Corrientes promedio mensuales, 2015. Forzado con aportes fluviales y vientos, sin marea.....	30
Figura 13. Salidas coeficiente de variación local para los promedios mensuales de corrientes entre los dos casos propuestos.....	31
Figura 14. Corrientes superficiales horarias para el día 10 de febrero de 2017 (sicigia, época seca). Resultados obtenidos forzando el modelo con aportes fluviales, vientos y marea. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.....	34
Figura 15. Corrientes superficiales horarias para el día 10 de febrero de 2017 (sicigia, época seca). Resultados obtenidos forzando el modelo con aportes fluviales y vientos; sin marea.	

Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.....35

Figura 16. Salidas coeficiente de variación local horarias entre ambos casos propuestos para el día 10 de febrero de 2017 (sicigia, época seca). Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am..... 36

Figura 17. Corrientes superficiales horarias para el día 05 de octubre de 2017 (sicigia, época húmeda). Resultados obtenidos forzando el modelo con aportes fluviales, vientos y marea. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.....38

Figura 18. Corrientes superficiales horarias para el día 05 de octubre de 2017 (sicigia, época húmeda). Resultados obtenidos forzando el modelo con aportes fluviales y vientos; sin marea. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.....39

Figura 19. Salidas coeficiente de variación local horarias entre ambos casos propuestos para el día 08 de octubre de 2017 (sicigia, época húmeda). Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.....40

Figure 20. Ubicación de puntos para análisis de frecuencia en las velocidades de las corrientes del golfo de Urabá.....41

Figura 21. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona sur. Caso con marea (a) y caso sin marea (b).....42

Figure 22. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona centro. Caso con marea (a) y caso sin marea (b).....42

Figura 23. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona norte. Caso con marea (a) y caso sin marea (b).....43

Figura 24. Comparación de perfiles de datos in situ y resultados del modelo.....44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables usadas en las ecuaciones primitivas de movimiento.....	17
Tabla 2. Bases de datos de entrada.....	20
Tabla 3. Constituyentes principales de la marea – Turbo.....	27

1. INTRODUCCIÓN

El golfo de Urabá presenta un complejo sistema hidrodinámico que es afectado por agentes atmosféricos, oceanográficos y el caudal de los ríos como el Atrato y León (Montoya, 2010). De acuerdo con Bernal *et al.* (2005), el caudal de los ríos y las condiciones atmosféricas modulan los procesos hidrodinámicos al interior del golfo de Urabá. Estos autores encontraron que las descargas fluviales generan un forzamiento importante al sistema oceánicos y que según la época climática los campos de viento, también modifican la magnitud y dirección del sistema de corrientes en el golfo de Urabá.

La influencia de forzadores dinamizadores del océano como la marea, el oleaje, la estratificación salina y el esfuerzo del viento constituyen los factores más predominantes en el proceso de formación de corrientes en el golfo de Urabá (Escobar, 2011). El campo de corrientes pueden llegar a afectar procesos oceanográficos y costeros, que inciden en las condiciones de vida de sus pobladores.

Producto de estos cambios, se presentan afectaciones a la línea de costa tales como, la erosión costera e intrusión del agua de mar en el continente lo que provoca salinización de los suelos e inundaciones. En estos problemas una de las variables que incide cada vez más es el ascenso del nivel del mar, controlado por la variación del nivel de marea y en los últimos años por el cambio climático. Gracias a esto, cada vez más las ciudades litorales están sometidas a una constante búsqueda de soluciones que permitan mitigar los problemas que genera la dinámica del océano y en algunos casos los campos de corrientes. (INVEMAR,2008).

En general, un campo de corrientes puede ser modulado por la circulación de gran escala, las características del campo de viento, la rotura del oleaje (inclusive en aguas profundas, *white capping*) y el movimiento de la onda de marea. De acuerdo al régimen, la marea puede modular en mayor o menor grado la corriente total (Martin y McCutcheon, 2018).

En el golfo de Urabá, numerosos autores han estudiado la circulación oceánica a partir de datos medidos y modelados. De acuerdo con Montoya (2010), la circulación de las aguas en el golfo sigue un patrón de circulación estuarina como consecuencia de la interacción de las corrientes marinas y las fluviales provenientes principalmente del río Atrato. Este patrón es más marcado durante la época húmeda donde el caudal de salida del Atrato viaja superficialmente sobre el costado este. Sin embargo existen otras variables oceánicas como la marea que podrían modular el campo de corrientes.

La marea del golfo es semidiurna mixta y su es de +/- 50cm. De acuerdo a las caratceritcias morfológicas del golfo, la marea al entrar al golfo podría verse afectada por su forma (más alargado en sentido norte-sur) y por la batimetría irregular, generando posibles gradientes de presión entre la costa este y oeste. Por lo tanto, se plantea la pregunta de investigación, que tanto modula la onda de marea el campo de corrientes del golfo de Urabá y en que

zonas es más influyente? Resolver esta inquietud permitirá comprender la influencia del régimen de marea en el campo de las corrientes en el golfo.

Con el fin de resolver esta pregunta y avanzar en la comprensión de la dinámica oceánica y costera y además tener una visión detallada a nivel espacial y temporal, la modelación numérica adquiere relevancia principalmente en el tema de la dinámica de corrientes (Posada *et al.*, 2008). Es así como, la modelación se ha convertido en una herramienta importante para las investigaciones oceanográficas debido al gran número de escenarios que se pueden recrear y representar de manera fiable. Su uso además permite determinar el efecto que provocan el oleaje, la estratificación termo-halina, las mareas, el arrastre del viento y las descargas de ríos en las corrientes del golfo (Escobar, 2011).

A partir de modelos numéricos principalmente ELCOM y HYCOM, se ha estudiado la hidrodinámica del golfo de Urabá (Montoya, 2006). Por medio de experimentos numéricos a través del modelo ELCOM se describieron patrones de corrientes en el golfo de Urabá, obteniendo como resultado que la dirección del viento domina la dirección de la pluma de sedimentos del río Atrato, la cual genera estratificación en el golfo de Urabá. (Montoya, 2006).

Sin embargo, hasta ahora estos estudios no han tenido en cuenta la onda de marea en la generación de corrientes en el golfo de Urabá. Con el fin de determinar la influencia de la marea como forzador dinámico en los patrones de circulación en el golfo de Urabá se usó el modelo ROMS. Este es un modelo de circulación oceánica de última generación, está diseñado para realizar simulaciones en sistemas oceánicos regionales, ha sido empleado para simular gran variedad de regiones del océano del mundo (Marchesiello *et al.*, 2003; Penven *et al.*, 2001; Haidvogel *et al.*, 2000; Di Lorenzo *et al.*, 2003; Blanke *et al.*, 2002, entre otros). Este modelo tiene la ventaja de recrear múltiples escenarios con inclusión o exclusión de fenómenos y procesos físicos entre ellos la marea. Además cuenta con la disponibilidad de realizar anidaciones hasta alcanzar escalas muy detalladas y resuelve de manera efectiva las ecuaciones del modelo a un costo bajo computacional lo que repercute en menor tiempo para obtener resultados (Song & Haidvogel, 1994).

Mediante ejercicios numéricos se buscó correlacionar el movimiento periódico de ascenso y descenso del nivel del mar con el sistema de corrientes, así como definir áreas donde la circulación está modulada principalmente por la acción del viento, los aportes fluviales y la marea. El modelo fue forzado con series de ocho años de datos de marea, caudales y bases de datos de variables atmosféricas, climáticas y oceanográficas. Finalmente, se ejecutaron simulaciones de las condiciones dinámicas del golfo de Urabá para representar las condiciones reales y su sensibilidad frente a la marea. mediante la anterior premisa estimamos que el golfo de Urabá presenta una circulación que esta modulada principalmente por la acción del viento y los aportes fluviales. Al presentarse un régimen

micro mareal se considera que la onda de marea no modula significativamente la magnitud y dirección de las corrientes totales en el golfo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la onda de marea como modulador dinámico en los patrones de circulación del golfo de Urabá, utilizando datos de un modelo de circulación.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Obtener los campos de corrientes totales en el golfo de Urabá.
- ✓ Describir los patrones de circulación, asociados a las corrientes totales en el golfo de Urabá.
- ✓ Analizar los registros de marea disponibles en el golfo de Urabá, con el fin de obtener las componentes principales de la misma.
- ✓ Describir los patrones de circulación asociados a la marea en el golfo de Urabá.
- ✓ Determinar el aporte de la onda de marea a la corriente total por medio de la comparación de campos con y sin marea.

3. MARCO TEÓRICO

El glofo de Urabá puede es uno de los estuarios más grandes de Colombia. Un estuario es un cuerpo de agua costero semicerrado que tiene una conexión abierta con el océano y dentro del cual, tiene afluentes que le proporcionan agua dulce (Pritchard, 1967). La circulación típica de un estuario viene dada por la interacción entre masas de agua de diferentes densidades debido a las diferencias de temperatura y de salinidad (circulación termohalina). En este último caso, el agua dulce de baja salinidad flota sobre el agua de mar, debido a que esta última tiene mayor densidad. El agua de baja salinidad (dulce o de río) es advectada por corrientes superficiales que fluyen fuera del estuario y se compensa con una contra-corriente de fondo de agua marina que va hacia el interior del estuario. (Olsen et al., 2006). Las condiciones anteriores configuran al golfo de Urabá como un estuario, debido a que tiene una boca abierta al Mar Caribe y en su interior tiene un flujo importante de agua dulce proporcionado, principalmente, por los ríos Atrato y León. Por lo tanto, el campo de corrientes oceánicas al interior del estuario del golfo de Urabá estará modulado por la acción de agentes oceánicos, fluviales y atmosféricos.

Las corrientes oceánicas son flujos de masa forzados por procesos físicos como el viento, las mareas, aportes fluviales, gradientes termohalinos, rotura del oleaje entre otros (Molina et al., 1992). Para identificar el aporte de cada uno de estos procesos a la corriente total, es necesario identificar cuáles son sus forzadores (Roldán, 2007). En el caso del golfo de Urabá, la marea es un posible forzador en la componente de la corriente total.

3.1. Onda de marea

La marea es un fenómeno físico periódico que crea ascensos y descensos de masas de agua. Cuando estas variaciones son provocadas, principalmente, por la interacción gravitacional entre el Sol, la Luna y la Tierra, es llamada marea astronómica. Cuando a estas oscilaciones se le suman la variación del nivel medio del mar, las tensiones tangenciales inducidas por el viento y los campos de presiones, es llamada marea meteorológica. La suma de estas dos mareas se describen en términos de la variación del nivel del agua respecto a un nivel de referencia y es conocido como la amplitud de marea. De acuerdo a los valores de esta amplitud, los regímenes pueden ser macromareales cuando la amplitud es superior a los cuatro metros, mesomareales en un intervalo entre dos y cuatro metros y micromareales con amplitudes inferiores a dos metros.

Al considerar que la marea se genera principalmente por la atracción gravitacional de los cuerpos astrales, es importante comprender la influencia de la Luna y el Sol. Vistas desde la Tierra, las posiciones aparentes del Sol y de la Luna varían continuamente. En escenarios de Luna nueva y llena los efectos de ambos cuerpos celestes se suman dado que la Tierra, el Sol y la Luna se alinean, fenómeno llamado Sicigia. En ese caso las mareas altas alcanzan los máximos valores y las mareas bajas los mínimos. En tal situación el rango mareal (diferencia

en metros entre la marea alta y marea baja) llega a su valor máximo. Cuando las posiciones de la Tierra, el Sol y la Luna forman un ángulo recto entre sí los efectos de la Luna y del Sol se contrarrestan, y a este fenómeno se le denomina Cuadratura. En este evento, las mareas y el rango mareal alcanzan sus valores mínimos (Werlinger, 2004).

El régimen o tipo de marea se puede clasificar de varias maneras. El criterio más empleado para clasificar los diferentes tipos de marea es utilizar el factor de forma o factor de Courier (F), que es el resultado del cociente entre la suma de las amplitudes de las componentes K_1 , O_1 y la suma de las amplitudes de las componentes M_2 y S_2 (ecuación 1).

$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$	(1)
-----------------------------------	-----

Donde K_1 , O_1 , M_2 y S_2 , son las amplitudes asociadas a efectos de la declinación del plano formado por la luna y el sol, declinación del plano formado por la luna y la tierra, la rotación de la luna respecto a la tierra y la rotación de la tierra respecto al sol, respectivamente. Con los valores de F la marea se puede clasificar de la siguiente manera:

- F = 0 - 0,25 marea semidiurna.
- F = 0,25 - 1,5 marea mixta, predominantemente semidiurna
- F = 1.5 - 3,0 marea mixta, predominantemente diurna
- F > 3,0 marea diurna

A continuación, se presenta una descripción detallada de cada uno de los tipos de marea:

- 3.1.1. Semidiurna:** se caracteriza por tener dos mareas altas y dos mareas bajas, el periodo es de aproximadamente 12 horas y 25 minutos (igual a la mitad de un día lunar). Estas marea puede presentar algunas oscilaciones causadas por las fases de la Luna. Las máximas elevaciones de la marea suceden en Sicigia, y las menores en Cuadratura.
- 3.1.2. Semidiurna mixta:** este tipo de marea presenta dos mareas altas y dos mareas bajas durante el periodo correspondiente a un día lunar. Debido a la declinación de la luna la marea tiene inicialmente un comportamiento diurno. Sin embargo, las mareas altas y bajas ocurren débilmente con lo cual obtiene su carácter mixto.
- 3.1.3. Diurna:** se caracteriza por tener una marea alta y una marea baja durante un día lunar. Las variaciones del nivel del mar están relacionadas con la declinación lunar. Ante una declinación máxima de la luna, el valor del nivel medio del mar es máximo y cuando hay una declinación lunar cercana a cero el valor de la marea es mínima.

3.1.4. Diurna mixta: se caracterizan por presentar una marea alta y una marea baja durante un periodo de 24 horas y 50 minutos que corresponde aproximadamente a un día lunar. Las declinaciones lunares inducen variaciones en los niveles de marea.

Otra forma de clasificación de la marea se realiza con base en los rangos o amplitud de marea. Se distinguen varios intervalos en los que podemos caracterizar a la marea: rangos entre 0 y 2 metros se denomina régimen micromareal, rangos con valores superiores a 2 metros e inferiores a 4 metros se denomina mesomareal y rangos superiores a 4 metros se llama macromareal.

El golfo de Urabá tiene un régimen micromareal (las amplitudes no superan los 50 cm) y del tipo semidiurno (Restrepo y Correa, 1994). En cuerpos de agua semicerrados, como es el caso del golfo de Urabá, la marea puede ser oscilante (Defant, 1958). La principal implicación de esta oscilación es que las fronteras y la batimetría de la cuenca pueden producir cambios en el régimen de la onda de marea en el interior del estuario (Martin y McCutcheon, 2018).

Con el fin de caracterizar de manera adecuada la onda de marea, es necesario conocer y analizar las fuerzas que la producen. Esto se puede hacer a partir de las mediciones *in situ*, a cuyos valores se les realiza una descomposición de la señal monitoreada, obteniendo sus componentes armónicas los cuales se pueden asociar a eventos astronómicos (Cardona *et al.*, 2001)

3.2. Componentes armónicas de la marea astronómica.

Estas componentes son constantes periódicas por medio de las cuales se puede expresar el forzamiento generador de la marea. Con el fin de calcular las componentes de un lugar en particular, es necesario realizar un análisis de descomposición astronómica que tiene en cuenta los movimientos de la Tierra, la Luna y el Sol. Esta descomposición supone que el movimiento relativo entre la Tierra, Sol y Luna causa a su vez una variación en el nivel del mar. A partir de este método se obtienen la frecuencia, amplitud, fase e importancia relativa de cada componente.

Las componentes se identifican con una letra (o letras) y un subíndice que indica el número de oscilaciones de dicha componente durante un día. Por ejemplo la componente armónica M_2 representa el efecto de la rotación de la Luna (Moon) con respecto a la Tierra y de dos oscilaciones. La componente armónica S_2 describe el efecto rotación del Sol (Sun) respecto a la Tierra y de dos oscilaciones. De forma similar, también se pueden definir componentes para describir la trayectoria elíptica de la luna N_2 , los efectos de la declinación de la Luna y el Sol, K_2 y P_1 respectivamente. Existe un número infinito de componentes armónicas para

describir todas las variaciones de los movimientos del Sol, la Luna y la Tierra. Sin embargo, muchas constantes armónicas pueden tener efectos pequeños que permitan representar de manera adecuada la onda de marea.

A través de suma de las componentes armónicas, la onda de marea de un lugar se puede representar de manera adecuada. Sin embargo, cuando la marea se propaga cerca de la costa o en el interior de un estuario o bahía, es necesario introducir una serie de componentes adicionales cuyo origen fundamental se debe a efectos no lineales propios de la forma del estuario y de las variaciones de la batimetría.

El método de armónicos, consiste en descomponer una serie del nivel del mar en un número finito de componentes u ondas regulares. Estas componentes coinciden con los periodos de eventos o movimientos astronómicos que ocurren entre la Tierra, la Luna y el Sol. Se utiliza una serie de nivel del mar con una longitud mínima de un mes de datos y se calculan las amplitudes y fases de las componentes armónicas. De esta forma la marea astronómica se puede aproximar de manera acertada a través de la suma de varias componentes armónicas de acuerdo con la ecuación (2):

$S(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$	(2)
--	-----

Donde S es la serie de nivel medio del mar en función del tiempo (t), a_0 es la amplitud del nivel de referencia, a_i es la amplitud de la i componente armónica, ω_i es la frecuencia i de la componente armónica, φ_i es la fase i de la componente armónica y finalmente n es el número de componentes consideradas. Los datos obtenidos de este análisis servirán para caracterizar la onda de marea al interior del golfo y para como insumo para el modelo numérico.

3.3. Modelación numérica

El modelo seleccionado para desarrollar estudiar la influencia de la marea como forzador dinámico en la circulación del golfo de Urabá es ROMS-AGRIF (Regional Oceanic Modelling System). Este modelo considera una gran cantidad de variables oceánicas y atmosféricas con el fin de representar de manera adecuada, entre otras cosas, el campo de corrientes.

ROMS es un modelo ampliamente usado a escala regional, lo que lo hace un modelo completo frente a otros modelos como Princeton Ocean Model (POM), Eulerian-Lagrangian Circulation (ELCIRC) y Parallel Ocean Program (POP) por medio de los cuales también se obtienen campos de corrientes. Este modelo fue seleccionado por ser un modelo de código abierto que puede ser editado y adecuado por los usuarios. Además, posee gran cantidad de herramientas de pre y post- procesamiento de sus datos y se puede

acoplar con otros modelos numéricos. Se ha comprobado que sus resultados son adecuados y se aproximan a las condiciones reales de los medios modelados, a un bajo costo computacional.

4.3.1 Modelo numérico ROMS

ROMS-AGRIF es un modelo de superficie libre, que sigue la batimetría y resuelve las ecuaciones primitivas de movimiento en un sistema de rotación en la tierra usando la aproximación de Boussinesq y el balance de momentum hidrostático (Haidvogel *et al.*, 2000; Marchesiello *et al.*, 2003). También incluye varios esquemas de mezcla vertical, múltiples niveles de anidación y la posibilidad de usar mallas compuestas (Warner *et al.*, 2005).

En la vertical, las ecuaciones primitivas son discretizadas sobre una topo-batimetría variable usando coordenadas que discretizan la malla de cálculo mediante coordenadas curvilíneas que siguen el terreno y la línea de costa (coordenadas Sigma). Este tipo de coordenadas verticales permiten una mejor resolución de las áreas de interés, tales como la termoclina o la capa límite del fondo (Song & Haidvogel, 1994). Las ecuaciones primitivas de movimiento son la ecuación de balance de momentum en las direcciones x,y,z representadas por las ecuaciones (3) y (4), las cuales usan las variables especificadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables usadas en las ecuaciones primitivas de movimiento y ecuaciones asociadas

u, v, w	Componentes (x,y,z) del vector velocidad (v)
x, y	Coordenadas horizontales
z	Coordenada vertical
t	Tiempo
D_u, D_v, D_C	Términos difusivos
F_u, F_v, F_C	Términos de forzamiento
$f(x, y)$	Parámetros de coriolis
g	Aceleración de la gravedad
ν, ν_θ	Viscosidad molecular y viscosidad difusiva
$\phi(x, y, z, t)$	Presión dinámica $\phi = (P/\rho_0)$
$S(x, y, z, t)$	Salinidad
$T(x, y, z, t)$	Temperatura potencial

$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla u - fv = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u$	(3)
---	-----

$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla v - fu = - \frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v$	(4)
---	-----

La evolución de los campos escalares (C) en el tiempo, tales como salinidad (S), temperatura (T) o los nutrientes está gobernado por la ecuación de difusión (ecuación 5):

$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla C = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + D_c$	(5)
---	-----

La ecuación (5) se complementa con la ecuación de estado dada por la ecuación (6)

$\rho = \rho(T, S, P)$	(6)
------------------------	-----

La aproximación de Boussinesq es empleada por el modelo para describir la contribución de la fuerza boyante en la ecuación de momentum vertical. Se utiliza la aproximación hidrostática y se supone que el gradiente de presión en la vertical balancea la fuerza de boyancia, mediante la ecuación (7):

$\frac{\partial \phi}{\partial z} = - \frac{\rho g}{\rho_0}$	(7)
--	-----

Para resolver el sistema, se utiliza la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles está dada por la ecuación (8):

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	(8)
---	-----

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las variables utilizadas en las ecuaciones primitivas y asociadas, usadas por el modelo ROMS-AGRIF.

4. AREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El golfo de Urabá se encuentra ubicado al suroeste del mar Caribe entre las latitudes 7°55' N y 8°40' N y las longitudes 76°45' W y 77°15' W (figura 1C.), cerca de la frontera entre Colombia y Panamá. Presenta una forma alargada en la orientación sur-norte con una longitud aproximada de 80 km, mientras que en su orientación este-oeste presenta anchos entre 15 y 40km. Su batimetría es relativamente somera con una profundidad promedio de 30m y valores máximos de 70m en la frontera norte (Restrepo y Correa, 2008). En su costado oeste las pendientes de la batimetría son abruptas y en la costa opuesta las pendientes son suaves (Chevillot *et al.*, 1993).

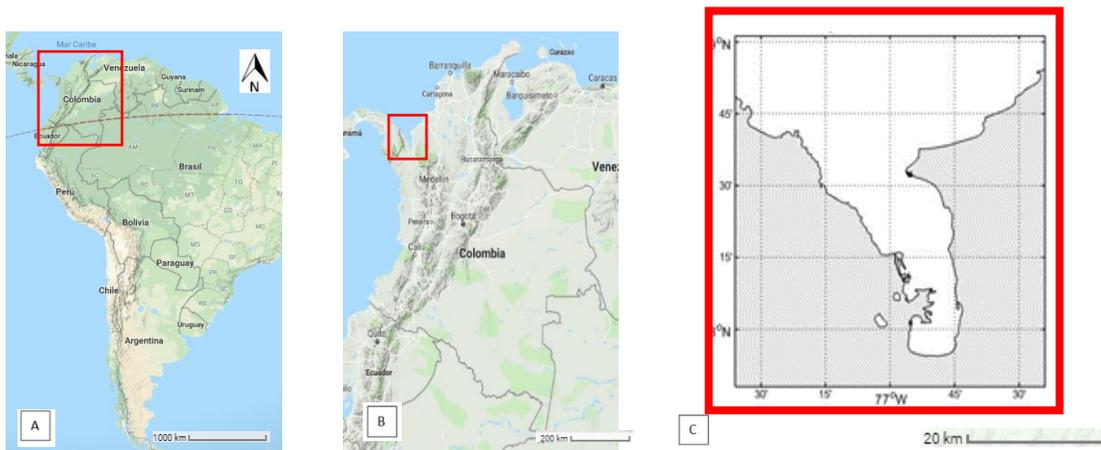


Figura 1. Localización área de estudio. América del sur, recuadro en rojo ubicando a Colombia (A); Colombia, recuadro en rojo ubicando el golfo de Urabá (B); golfo de Urabá (C).

El clima de la zona se rige por el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el cual genera dos épocas climáticas diferenciadas entre sí por cambios considerables en los patrones de las lluvias y los vientos (Restrepo y López, 2008). En general, la época seca se presenta entre diciembre y abril y se caracteriza por precipitaciones medias entre 40 y 100mm/mes. En esta época predominan los vientos alisios del Norte y Noreste con velocidades medias de 4m/s y máximas de 10 m/s. Durante la época húmeda entre agosto y noviembre, las lluvias se encuentran entre 200 y 300 mm/mes y los vientos predominantes provienen del sur (Correa y Vernet, 2004; Molina *et al.*, 1992).

El golfo de Urabá presenta un régimen micromareal con amplitudes que no superan los 50 cm (Restrepo y Correa, 1994; Vernet *et al.*, 2002). Los mareógrafos más cercanos son las estaciones San Cristóbal (Panamá), Coveñas, Carpuganá y guardacostas de Turbo (figura 3). Esta última posee registros de nivel medio del mar a partir de enero del año 2017, los cuales fueron suministrados por la dirección general marítima (DIMAR).

4.2. Base de datos de entrada al modelo

En la Tabla 2 se muestra el listado de variables que utiliza el modelo ROMS-AGRIF como forzadores externos. De igual manera la base de datos utilizada y su descripción.

Tabla 2. Bases de datos de entrada

Variable	Modelo ROMS		
	Base de datos	Resolución	Descripción
Temperatura superficial atmosférica	ERA 5	0,3º (aproximadamente 33 kilómetros)	Campo escalar de la temperatura en Celsius de la capa atmosférica que está a 10 metros sobre el nivel del mar.
Velocidad del viento.			Campo de velocidades (m/s) del viento de la capa atmosférica que se encuentra a 10 metros sobre el nivel del mar.
Componente zonal de la velocidad del viento.			Campo de velocidades en dirección este-oeste del viento de la capa atmosférica que se encuentra a 10 metros sobre el nivel del mar.
Componente meridional de la velocidad del viento.			Campo de velocidades del viento en dirección norte-sur de la capa atmosférica que se encuentra a 10 metros sobre el nivel del mar.
Humedad específica del nivel del mar.			Campo escalar que relaciona el vapor de agua contenido en el aire húmedo.
Humedad relativa.			Campo escalar que relaciona el vapor de aire seco y el contenido de vapor de aire saturado.
Tasa de precipitación.			Campo escalar que denota la precipitación en milímetros por unidad de tiempo.
Radiación de onda corta.			Campo escalar que relaciona la radiación electromagnética recibida directamente del sol por unidad de área.
Radiación de onda larga.			Campo escalar que relaciona la radiación que es emitida desde la superficie de la tierra y la atmosfera por unidad de área.
Temperatura superficial del mar.			Campo escalar de la temperatura en Celsius de la de la superficie del mar.
Esfuerzo del viento.			Campo escalar que relaciona la fuerza del viento por unidad de área sobre la superficie del mar.
Componente zonal del esfuerzo del viento.	Campo vectorial que relaciona la fuerza del viento por unidad de área sobre la superficie del mar en dirección este-oeste.		
Componente meridional del esfuerzo del viento.	Campo vectorial que relaciona la fuerza del viento por unidad de área sobre la superficie del mar en dirección norte-sur.		
Batimetría.	ETOPO	0,25 °	Contorno de la superficie del fondo oceánico.

		(aproximadamente 27,5 kilómetros)	
Componentes armónicas de la marea.	TPOX9	0,25 ° (aproximadamente 27,5 kilómetros)	Campo escalar que representa las constantes armónicas de la marea en donde relaciona el periodo, la fase y la amplitud de la misma.

La información batimétrica fue obtenida de la base de datos de acceso libre ETOPO (<https://ngdc.noaa.gov/mgg/global>). Esta información es global, tiene una resolución espacial de 1/30 de grado (aproximadamente 3,67 Km) y contiene topografía terrestre y batimetría marina.

A partir de esta información se generó una malla de cálculo para el golfo de Urabá con una resolución de $3,7 \text{ km}^2$. Se utilizaron 20 niveles sigma para la malla de cálculo. Se utilizaron valores de 5 y 0,2 para el parámetro de estiramiento en superficie y en profundidad, respectivamente. El modelo se ejecutó en modo tiempo variable con salidas mensuales cada dos horas.

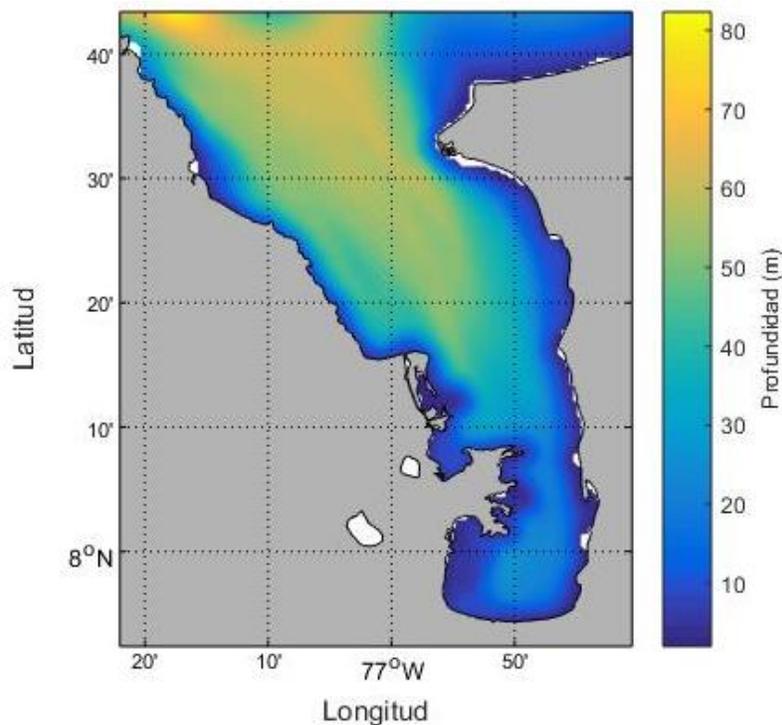


Figura 2. Batimetría del área de estudio. obtenida de la base de datos ETOPO

Para el forzamiento superficial del modelo ROMS se seleccionó la base de datos ERA5 (ECMWF). Se utilizaron los datos correspondientes al periodo de 2010 hasta 2017 con una resolución espacial aproximada de 33Km. Las variables superficiales que incluye esta base

de datos, y que son indispensables para ejecutar el modelo, son: temperatura atmosférica superficial, velocidad y esfuerzo del viento en sus componentes meridional y zonal, humedad específica a nivel del mar, humedad relativa de la atmósfera, densidad del aire, tasa de precipitación, radiación de onda corta y radiación de onda larga. Esta base de datos tiene una resolución temporal de 1 hora lo cual permite estudiar de manera detallada fenómenos como la marea.

La información para el forzamiento lateral del modelo ROMS se obtuvo de la base de datos GLORYS12V1. Las variables que se utilizaron fueron temperatura y salinidad con una resolución espacial de aproximadamente 10Km y temporal diaria.

Para el forzamiento generado por la marea utilizó la información de la base de datos TPOX9 que es de acceso libre y tiene disponible los principales constituyentes de la marea para todas las regiones costeras del mundo. Adicionalmente, se contó con serie de niveles de marea de mediciones *in situ* del mareógrafo de guardacostas de Turbo.

4.3. Análisis de series de marea

Con el objeto de calcular las principales componentes armónicas de la marea en el golfo de Urabá, se utilizaron los datos del mareógrafo de guardacostas del municipio de Turbo. Los registros están comprendidos desde el 31 de diciembre de 2017 hasta el mes de mayo del año 2019. Durante este periodo de tiempo la serie no cuenta con datos faltantes y su frecuencia de mediciones es de un minuto.

Se utilizó el método de análisis de armónicos con el fin de calcular la componentes armónicas que gobiernan el comportamiento de la marea en el golfo de Urabá. Este método determina las amplitudes, fases y periodos de cada uno de los armónicos mediante un análisis espectral al registro del nivel del mar. De la serie de resultados fueron seleccionados los 10 principales constituyentes teniendo en cuenta los de mayor amplitud.

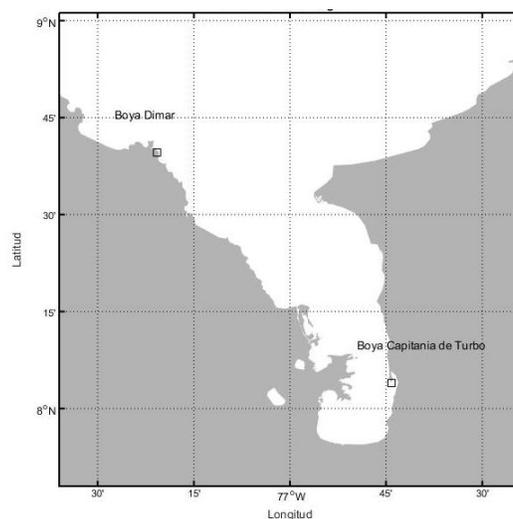


Figura 3. Ubicación de mareógrafos en el área del Golfo de Urabá.

4.4. Escenarios modelados

Con el fin de determinar la influencia de la marea en las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá se realizaron diferentes escenarios numéricos utilizando el modelo ROMS-AGRIF. Debido a que el modelo dispone de varias parametrizaciones numéricas las cuales pueden ser utilizadas en conjunto con la inclusión o no de variables oceanográficas y/o atmosféricas.

Inicialmente se realizó una simulación de corrientes durante el periodo 2010 a 2017 en donde se forzó el modelo con todas las variables de forzamientos superficial, lateral disponibles para el golfo de Urabá y se incluyó la marea. En ROMS-AGRIF la marea se tiene en cuenta incorporando las componentes principales. Este escenario se aproxima al comportamiento hidrodinámico real de las corrientes oceánicas del golfo. Fue objeto de validaciones con mediciones *in situ* de variables como la temperatura y la salinidad

Posteriormente se realizó una segunda simulación en donde se excluyó el forzamiento de la marea. De esta forma, al comparar las simulaciones planteadas y realizar análisis estadísticos de los escenarios con y sin marea.

Para cuantificar el efecto que produce la marea en la hidrodinámica del área de estudio se empleó el coeficiente de variación local (CVL), por medio del cual se pudo determinar el aumento/disminución del nivel hidrodinámico generado por la marea. Este coeficiente se define mediante la ecuación 9 (Escobar, 2011):

$CVL = \frac{V_f - V}{V_f}$	(9)
-----------------------------	-----

donde V_f son los valores de la magnitud del campo total de velocidades y V se refiere a los valores del campo de velocidades de las simulaciones en donde se excluyó la marea. El CVL permite determinar a nivel espacial, la modulación que producen la marea sobre las corrientes totales.

Teniendo en cuenta los resultados de Mosquera y Barrientos (2019), se dividió el golfo de Urabá en cuatro zonas: sur, centro, norte y externa (ver Figura 4). En cada una de estas zonas se caracterizaron las corrientes usando los momentos estadísticos de la media y la varianza. Los anteriores parámetros estadísticos se utilizaron en los campos de corrientes para diferentes profundidades durante épocas de Cuadratura y Sicigia.

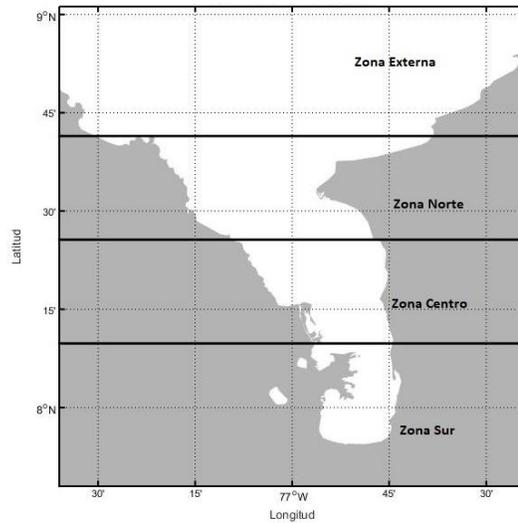


Figura 4. Zonificación del Golfo de Urabá en los análisis realizados

4.5. Evaluación del modelo.

El modelo ROMS fue validado para el golfo de Urabá utilizando datos *in situ* de temperatura y salinidad de una campaña realizada por la Universidad de Antioquia –UdeA- (Calderón, 2019). La campaña de medición fue realizada durante el mes de abril del año 2019 en donde se tomaron muestras con un CTD Castaway® en los puntos mostrados en la figura 5. Se compararon las salidas de temperatura y salinidad del modelo más cercanos a los sitios de la campaña. Se realizó el cálculo del error cuadrático medio y el coeficiente de determinación (R^2) para establecer la calidad y asertividad de los resultados del modelo frente a las condiciones *in situ*.

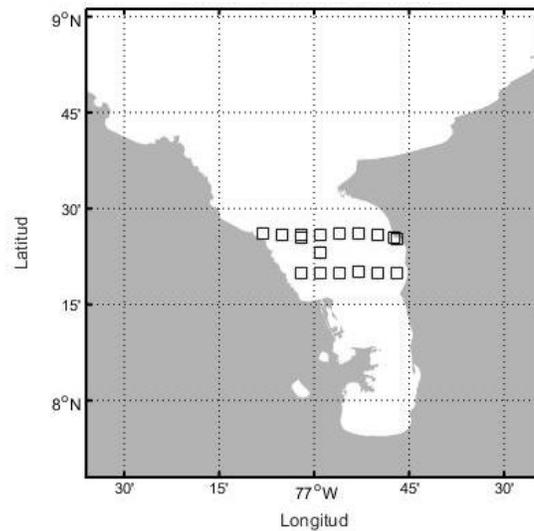


Figura 5. Ubicación puntos de muestreo medidos en la campaña de la UdeA.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En los análisis de las salidas del modelo se presentan a continuación los resultados correspondientes a las Sicigias, ya que en estos periodos se producen las mayores diferencias del nivel del mar. No obstante, las salidas del modelo para los periodos correspondientes a las Cuadraturas se presentan en el capítulo de Anexos.

5.1. Análisis de series de marea.

Se analizaron los registros de la variación del nivel medio del mar obtenidos del mareógrafo ubicado en la estación de guardacostas del municipio de Turbo (*Figura 3*). Se obtuvieron los 10 armónicos que poseen las mayores amplitudes de marea y que están relacionados con los movimientos astronómicos.

5.2. Análisis de armónicos

La *Figura 6* muestra la serie de tiempo utilizada para el análisis, la cual posee 548 días de registro. Esta serie tiene datos continuos cada minuto durante todo el registro y no presenta datos atípicos que alteren el cálculo de las constituyentes de marea. Con el fin de evitar errores en el procedimiento de análisis de armónicos, la serie de datos fue sometida a un filtro que consistió en emplear la media móvil con pasos cada cinco datos (minutos). De esta forma, se suprime el ruido que contiene la serie y reduce el efecto inducido por posibles eventos que no están relacionados con el movimiento astronómico.

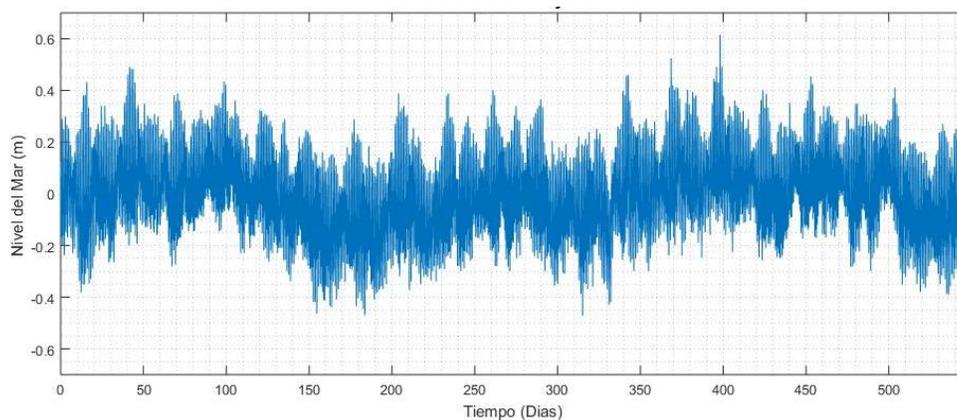


Figura 6. Gráfica de serie de marea de la estación guardacostas de Turbo.

Al realizar el análisis espectral de armónicos a la serie de marea, se obtuvieron los espectros de función de la energía ($m^2 \cdot s$), amplitud (cm) y fase (rad) a partir de los cuales se pueden identificar los periodos se concentran las mayores energías (ver Figuras 7, 8 y 9).

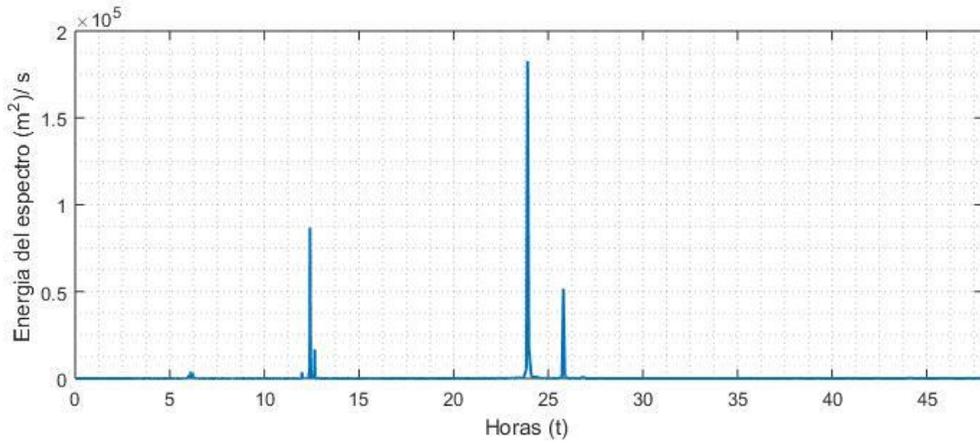


Figura 7. Espectro en función de la energía ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) y el tiempo (h).

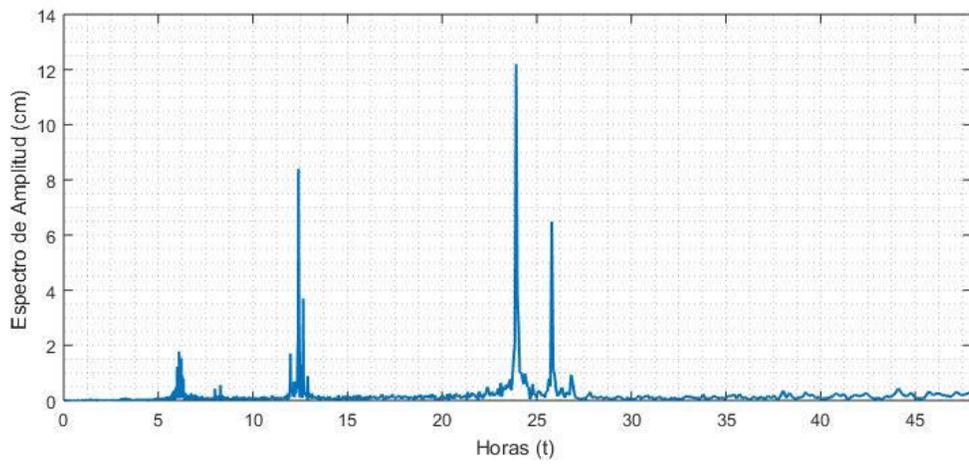


Figura 8. Espectro en función de la amplitud (cm) y del tiempo (h).

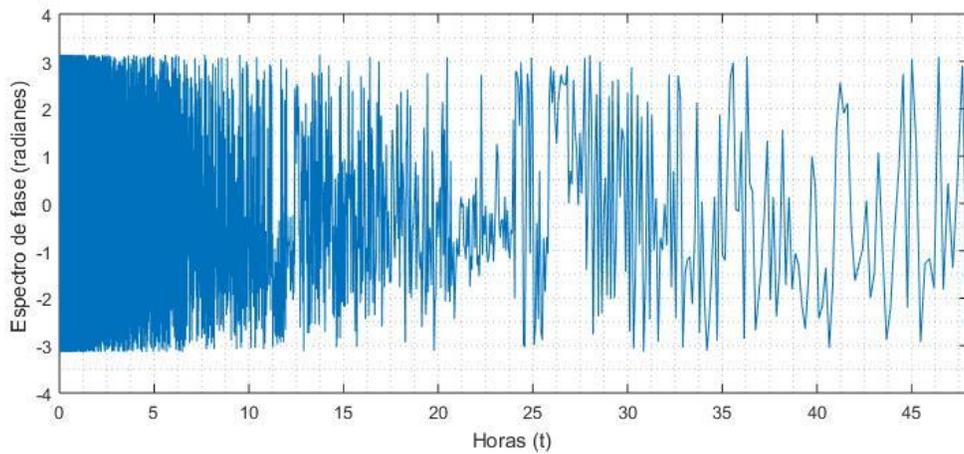


Figura 9. Espectro en función de la fase (rad) y tiempo (h).

Los resultados de la *Figura 7* muestran que en la banda de las 6 a 30 horas se concentran los picos más energéticos. Con excepción de dos picos se encuentran con periodos de 328 y 661 horas que podrían tener relación con otros fenómenos (no se muestran en la figura). En la *Tabla 3* se presentan los 10 picos más energéticos y su periodo (h), amplitud (cm) y fase (grados) asociados.

Los armónicos seleccionados en nuestro análisis corresponden a aquellos que son de origen astronómico, es decir que se generan netamente por los movimientos relativos entre la Tierra, la Luna y el Sol. Por lo pronto se descartaron aquellos de origen no astronómico que pueden ser producidos por efectos relacionados con efectos meteorológicos y las condiciones morfológicas y batimétricos de la zona en que se fue medido el nivel mar.

Tabla 3. Principales constituyentes de la marea para la estación guardacostas

Armónico	Periodo (horas)	Amplitud (cm)	Fase (grados)
K_1	23.94	12.20	-36.88
M_2	12.42	8.41	62.89
K_2	11.97	6.04	34.98
N_2	12.66	4.28	70.75
Q_1	26.87	4.03	-116.23
S_2	12	2.59	-92.89
O_1	25.8	2.40	-116.44
M_f	328	0.67	-3.57
M_m	661	0.60	-5.09
P_1	24.07	0.10	-111.03

Del análisis espectral de armónicos (*Tabla 2*) se obtuvo que el armónico de mayor amplitud es el K_1 , siendo el mayor responsable de las oscilaciones del nivel del mar. De acuerdo con factor de Courrier (F), se tiene obtuvo un valor de 1.32. De acuerdo con el intervalo de F entre 0.25 y 1.5 la marea se puede clasificar como marea mixta, predominantemente semidiurna. Estas mareas se caracterizan por presentar en un día lunar dos mareas altas y dos mareas bajas con un periodo de 12 horas y 25 minutos. Tienen además una particularidad y es que en las dos pleamares diarias consecutivas los niveles de elevación consecutivos no necesariamente tienen los mismos valores.

Malikov (2010) utilizando análisis espectral de armónicos para series de marea del golfo de Urabá encontró que el armónico K_1 es el más energético de todos. Estos resultados coinciden con los cálculos realizados en el presente trabajo en el cual se encontró una amplitud de 12.2 cm en el rango de marea.

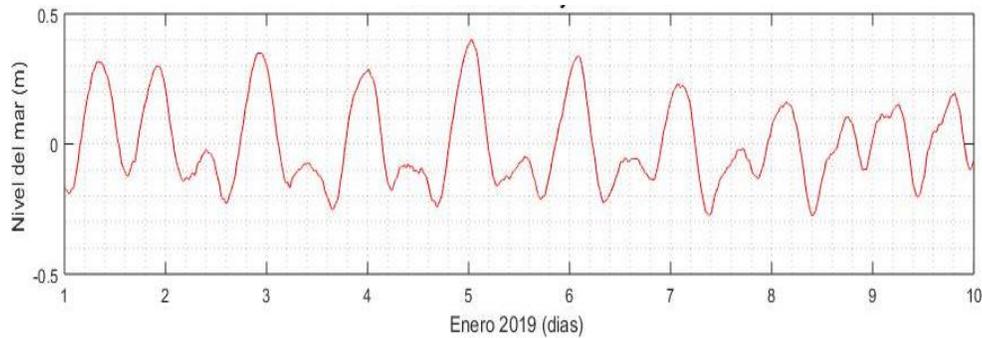


Figura 10. Gráfica de serie de marea estación de guardacostas. Enero 2019(10 días)

Lo anteriormente descrito se puede evidencia en la Figura 10. Allí se observan las variaciones del nivel medio del mar para el mes de Enero de 2019 en un intervalo de diez días. Se observan las diferencias de nivel entre mareas altas y mareas bajas consecutivas. Además se nota la amplitud o rango de la marea la cual se aproxima a los 50 cm.

La importancia de realizar este cálculo sobre un registro de mareas, radica en que a partir de sus armónicos principales podemos predecir la elevación del nivel del mar en cualquier instante. Es de notar, que estos armónicos fueron utilizados como forzamiento asociado a la marea en el modelo ROMS-AGRIF.

5.3. Análisis de Resultados corrientes promedio mensuales.

En los resultados que se presentan a continuación, se presentan las graficas y análisis para el campo de corrientes mensuales superficiales para el año 2015 y las gráficas y análisis para el campo de corrientes horarias (cada dos horas) para el año 2017, en fechas de sicigia. A pesar de haber realizado la simulación para el periodo 2010-2017, se seleccionó este año para las gráficas horarias debido a que eran los más actuales, y el año 2015 para las gráficas de promedios mensuales debido a que este fue un año niño, con condiciones del campo de viento particularmente mas energéticos.

En la Figura 11 se presentan las corrientes superficiales promedio totales (forzado con vientos, aportes fluviales y la marea) para los 12 meses del año 2015. Los resultados sugieren que la zona más dinámica en términos de la velocidad de las corrientes corresponde a la zona externa del golfo, con la particularidad de que durante el primer cuatrimestre (enero a abril) se observan las velocidades con valores máximos de hasta 2.5 m/s. En los meses de septiembre a noviembre se observan las velocidades más bajas del área de estudio.

A nivel espacial, en las zonas norte, centro y sur del golfo de Urabá durante todos los meses del año, las velocidades de las corrientes no superan los 0.6 m/s. Excepto en las áreas

cercanas a las desembocaduras del río Atrato donde se observan velocidades de aproximadamente 1.2 m/s (mes de octubre).

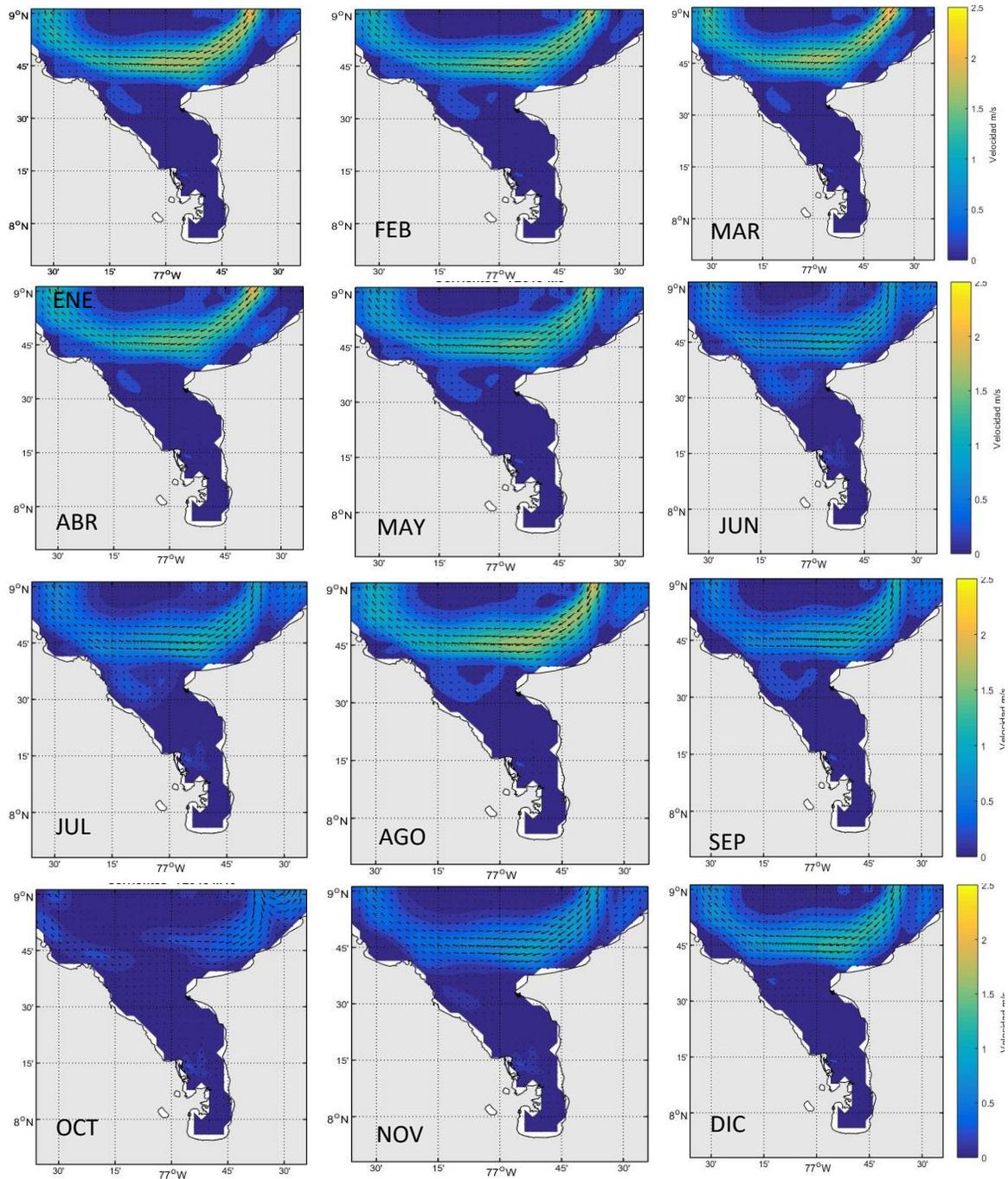


Figura 11. Corrientes totales (forzado con aportes fluviales, campos de vientos y marea) promedio mensuales, para el año 2015.

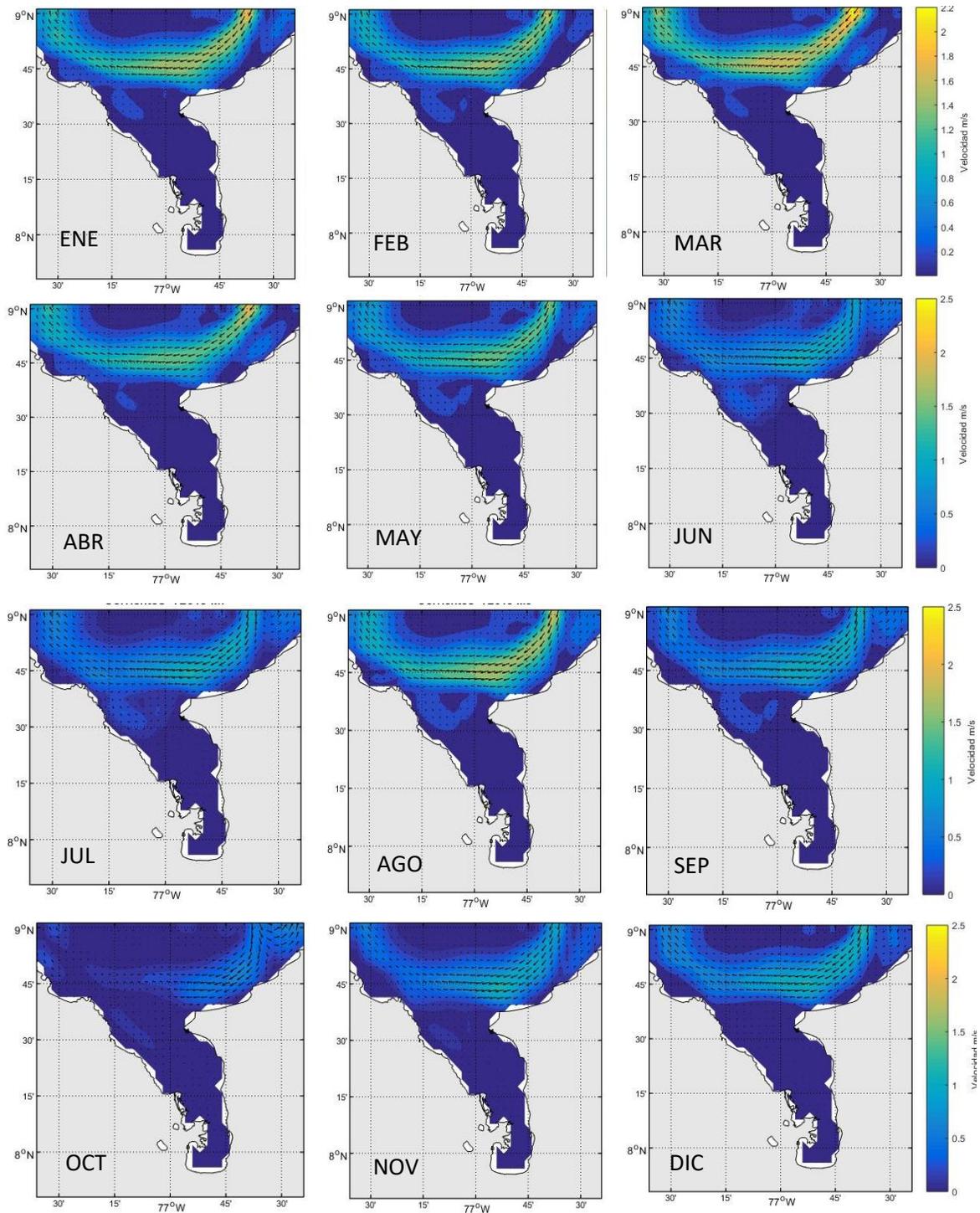


Figura 12. Corrientes (forzado con aportes fluviales y campos de vientos) promedio mensuales, para el año 2015.

En la *Figura 12* corresponde a las corrientes promedio mensuales del año 2015 en la cual no se utilizó como forzante a la marea. Se observa como nuevamente, las corrientes de mayor magnitud se presentan en la zona externa del golfo de Urabá, en donde los meses de enero a abril tienen picos de hasta 2.5 m/s. Por el contrario, los meses de octubre y noviembre, presentan las menores velocidades sobre el área de estudio.

A nivel espacial, las zonas norte, centro y sur del golfo de Urabá poseen velocidades de hasta 0.6 m/s, durante todo el año de simulación. Los valores más altos en términos de velocidades al interior del golfo para los dos casos con y sin marea sugieren que en la desembocadura del río Atrato se presentan los valores más elevados de corrientes con magnitudes similares para ambos de 0.4 a 0.6 m/s, respectivamente.

A nivel general en la *Figura 11* y la *Figura 12* sugieren que en general el efecto de la marea sobre las corrientes totales parece no tiene gran influencia. Los resultados sugieren que el comportamiento hidrodinámico mensual coincide con los cambios de las épocas climáticas seca y húmeda. Durante la época seca (meses de diciembre a abril) es donde se observan las velocidades más altas sobre el área de estudio. Mientras que para la época húmeda (meses de mayo a noviembre), se presentan las menores velocidades, sobresaliendo el mes de octubre y noviembre como los meses menos energéticos en cuanto a las magnitudes de las corrientes.

En la *Figura 13* se presentan los valores del coeficiente de variación local (CVL) calculado a partir de los los promedios mensuales de corrientes con y sin marea. Los valores del CVL muestran la sensibilidad que ofrece la magnitud de las corrientes ante el forzamiento de la marea. En general para todo el area de estudio se observan valores máximos de hasta 5.5 %. De acuerdo a la zonificación propuesta se evidencia que la zona externa del golfo se alcanzan valores del 1% con excepción del mes de junio y octubre con picos del 5 %.

En general para todos los meses del año 2015 en las zonas norte, centro y sur del golfo de Urabá se observan valores máximos de CVL entre el 5% y 5.5%. Esto indica que a medida que la marea se propaga desde el Caribe hacia el interior del golfo de Urabá la marea que al parecer no es determinante en la parte exterior, podría afectar someramente los patrones de circulación de las corrientes oceánicas en el interior.

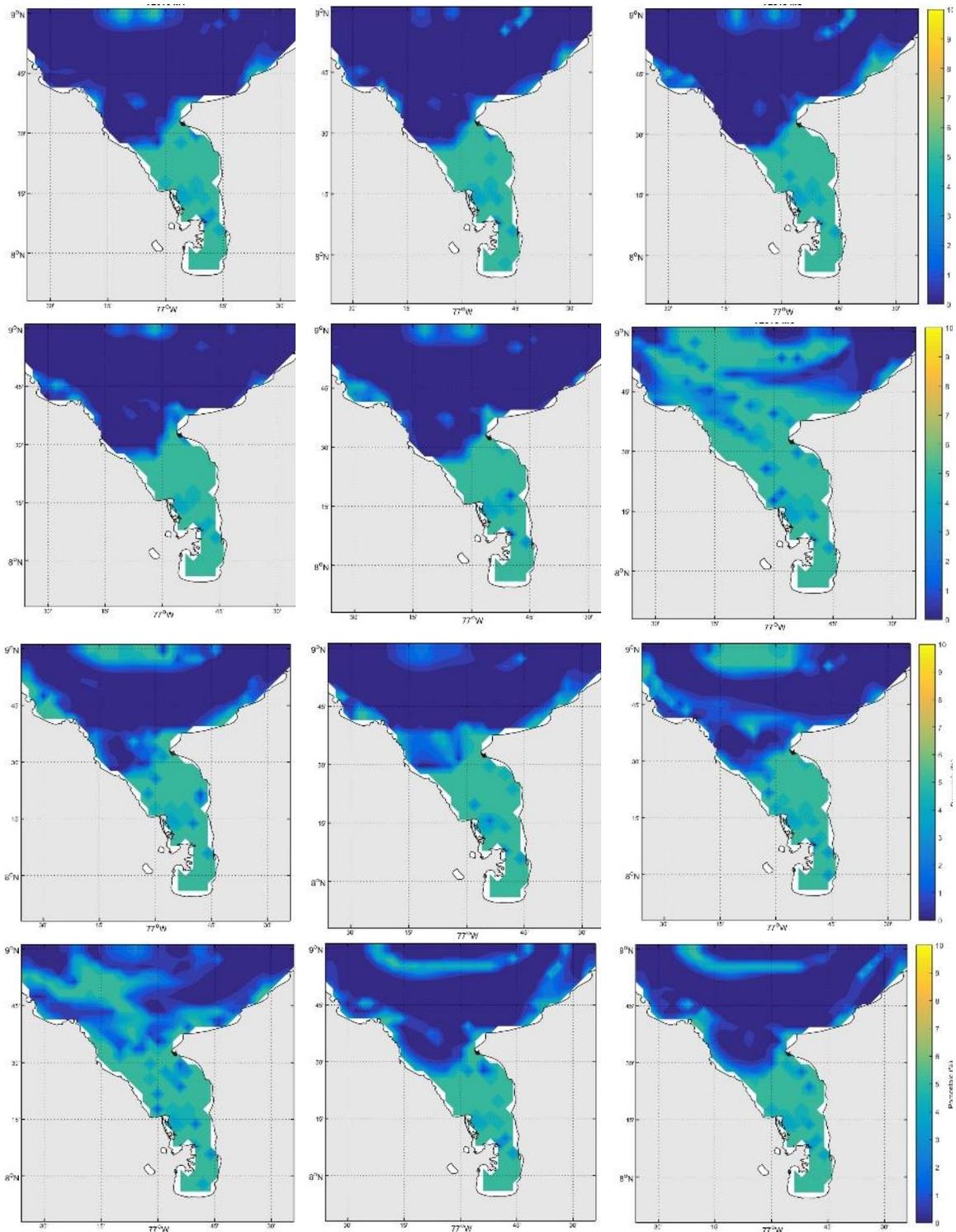


Figura 13. Valores del coeficiente de variación local calculados a partir de los promedios mensuales de las corrientes con y sin marea. Se muestran los resultados mensuales del año 2015.

5.4. Análisis de Resultados corrientes promedio horarias.

A continuación se presentan los campos de corrientes mensuales superficiales con y sin marea, así como los campos del CVL para los días 10 de febrero y 5 de octubre de 2017. Estos dos días fueron seleccionados debido a que el mes de febrero corresponde a la época seca y el mes de octubre corresponde a la época húmeda, ambas fechas coinciden en que son días en los que se presenta sicigia, en la cual los valores correspondientes al fenómeno de marea se ven aumentados en el caso de marea alta y disminuidos en el caso de la marea baja. Por tanto permite analizar el fenómeno de marea de forma más detallada.

Resultados para el 10 de febrero de 2017

En la *Figura 14* se presentan los resultados durante Sicigia en época seca para los campos horarios de corrientes totales (forzado con aportes fluviales, vientos y marea). Se observa que los valores más altos de las corrientes se presentan en la zona externa del golfo y en la zona sur, específicamente en el área cerca al delta del río Atrato. Estos valores máximos oscilan entre 0.2 m/s y 0.8 m/s a lo largo del día. Estas velocidades máximas están asociadas en la zona externa a presencia de los vientos Alisios. En la zona sur los valores altos de las corrientes en la desembocadura del río Atrato y en costa occidental del golfo, están moduladas por la fuerza inducida por los aportes fluviales. Los valores más altos de velocidad se observan cuando la dirección de la corriente coincide con la orientación de la descarga del río Atrato.

En la *Figura 15* se presentan los resultados para el modelo sin marea. En las salidas horarias se observa en términos generales que los valores de velocidad de las corrientes son menores que los casos con marea. Estas diferencias son más notorias en la zona externa hacia la costa occidental. Sin embargo son diferencias mínimas pero que presentan valores entre 0.6 y 0.8 m/s en la zona de la desembocadura del río.

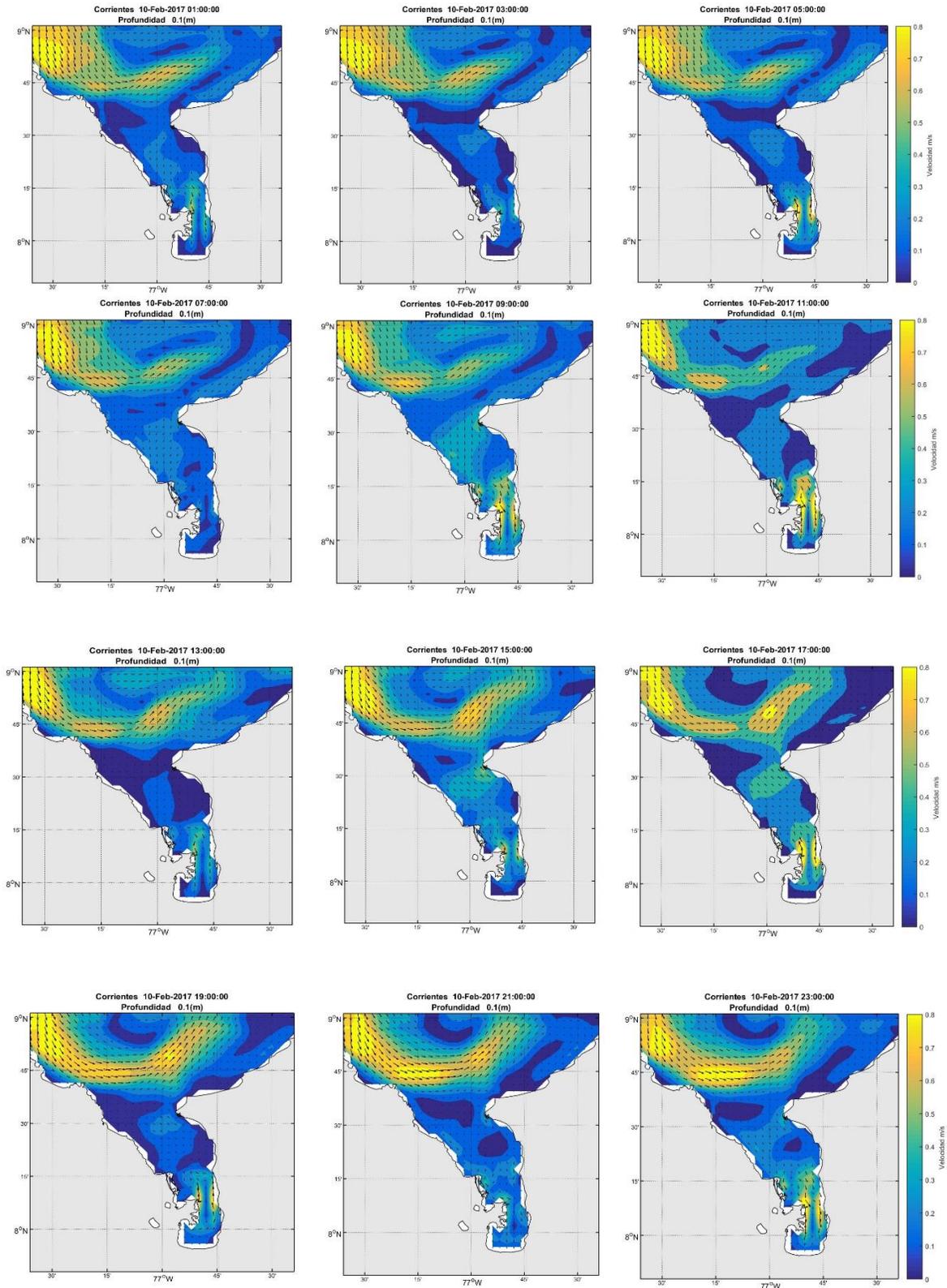


Figura 14. Campos de corrientes superficiales horarias totales (forzamiento con aportes fluviales, vientos y marea) para el día 10 de febrero de 2017 (época seca) durante Sicigia. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.

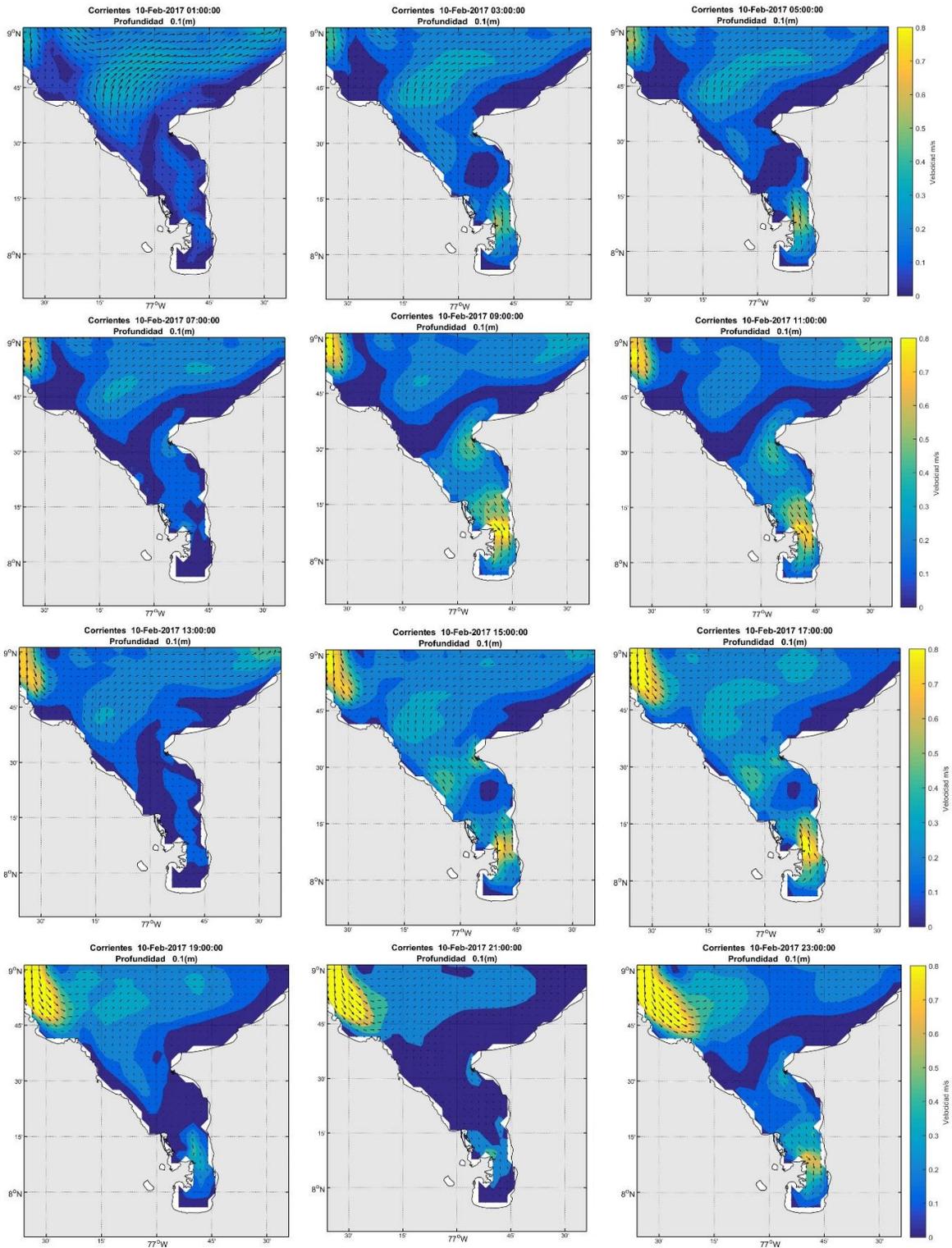


Figura 15. Campos de corrientes superficiales horarias (sin marea) para el día 10 de febrero de 2017 (época seca) durante Sicigia. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.

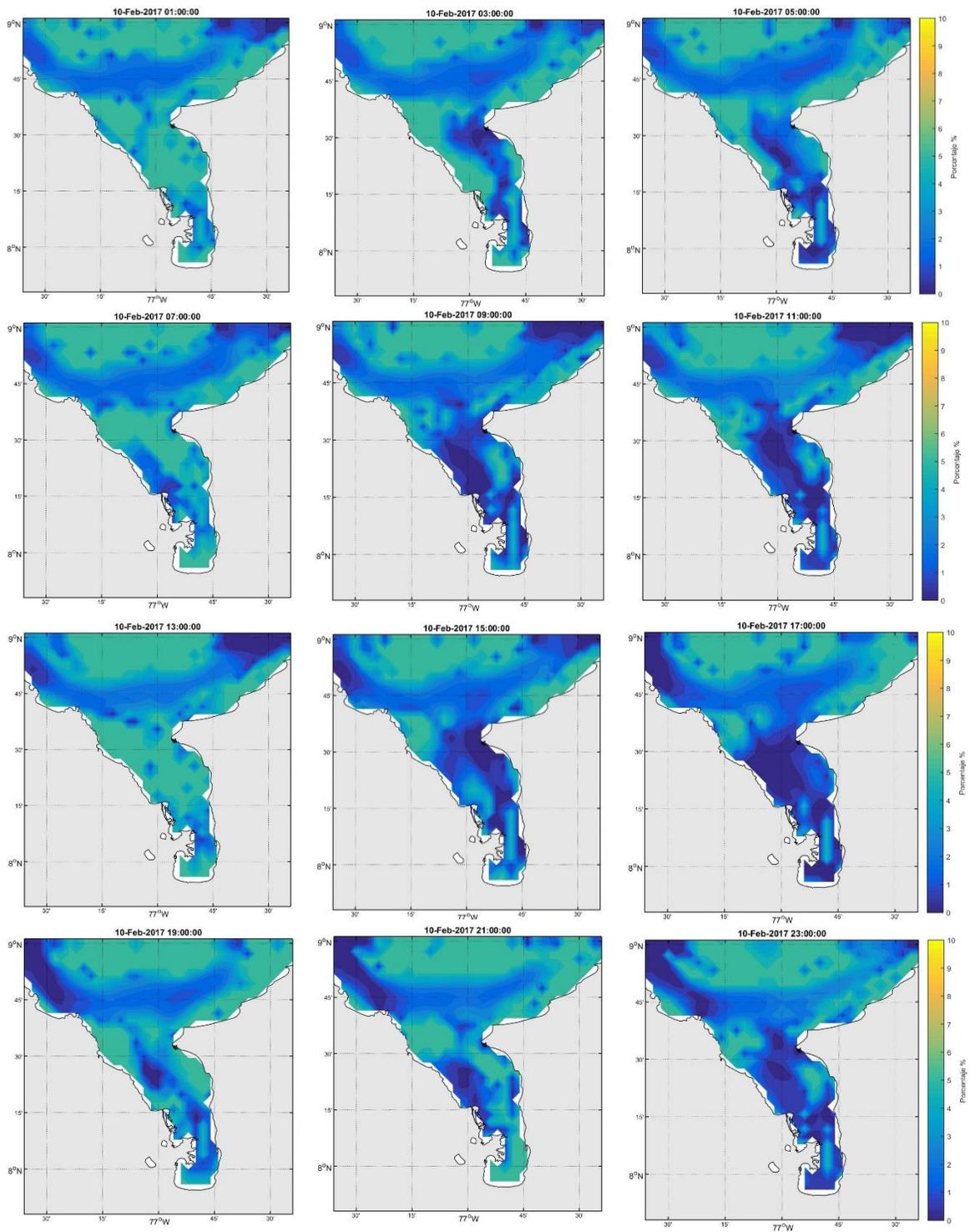


Figura 16. Valores del coeficiente de variación local calculados a partir de los promedios horario de las corrientes con y sin marea. Día 10 de febrero de 2017 (época seca) durante Sigia. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.

El campo de CVL obtenido a partir de las corrientes horarias durante Sicigia en época seca (*Figura 16*) sugiere que la diferencia entre los campos de corrientes con y sin marea no superan el 6%. En la zona más estrecha del golfo (zona cercana a las desembocaduras del río Atrato) es donde se presentan los mayores valores del CVL durante todo el periodo de Sicigia.

Resultados para el 5 de octubre de 2017

En la *Figura 17* se muestran los resultados de corrientes totales (marea, aportes fluviales y vientos) para el 05 de octubre de 2017 (época húmeda) durante Sicigia. En la zona centro y la zona externa del golfo las velocidades están en un intervalo entre 0.1 m/s y 0.4 m/s, a excepción del área ubicada en la zona centro, en la cual se presentan velocidades de hasta 0.8 m/s. Finalmente, en el área más al sur (bahía Colombia) se presentan valores de velocidad de la corriente entre 0.1 y 0.3 m/s.

De otro lado, en la *Figura 18* se muestran los campos de corrientes obtenidos con el modelo forzado sin marea. Se observa como sobre la costa oeste de la zona norte se presentan los valores más bajos de la magnitud de la corriente entre 0.1 y 0.2 m/s aproximadamente. Por otro lado, se observa en el área del delta de río Atrato los valores más altos de la velocidad de la corriente, entre 0.4 y 0.8 m/s.

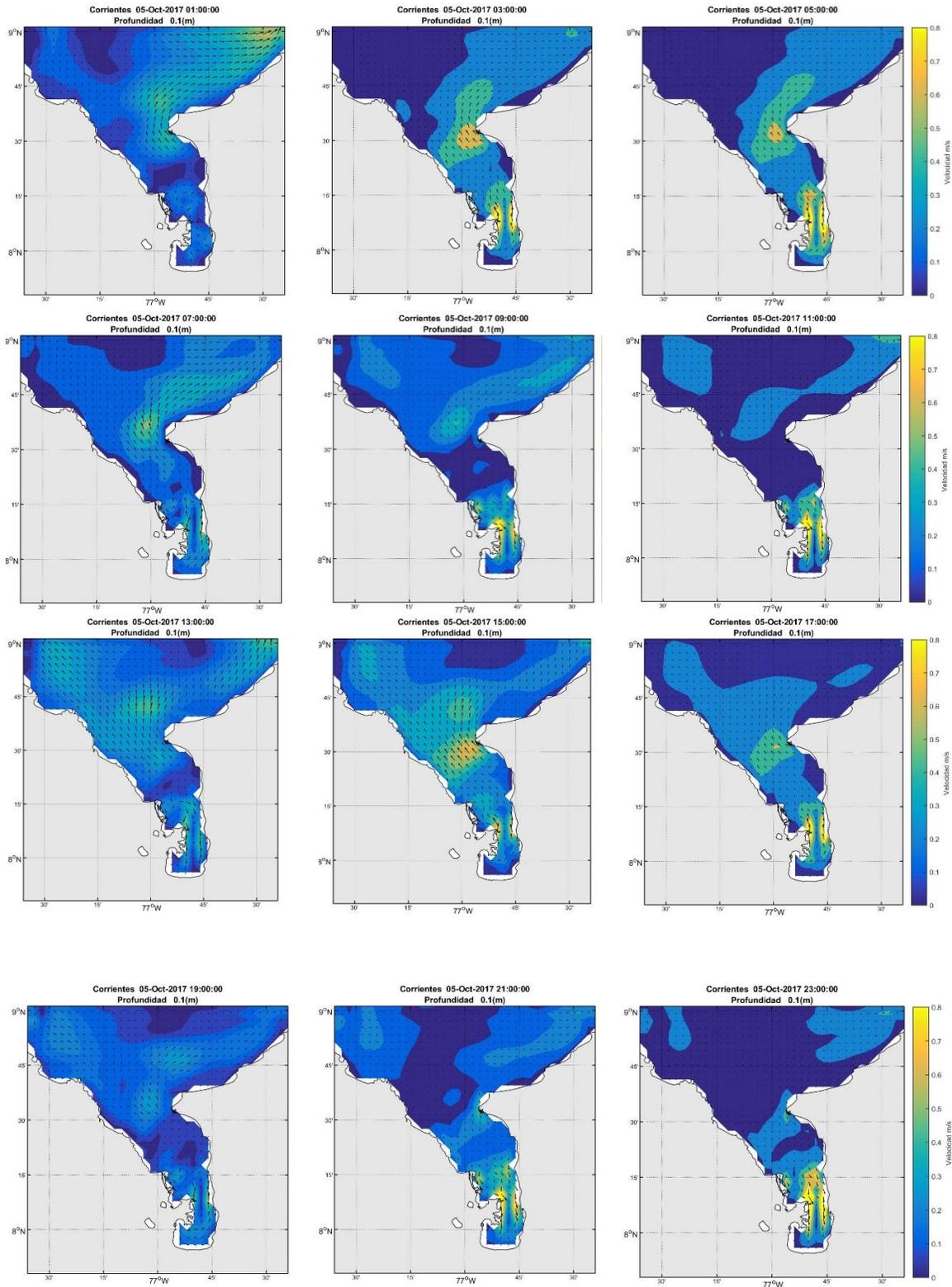


Figura 17. Campos de corrientes superficiales horarias (sin marea) para el día 05 de octubre de 2017 (época húmeda) durante Sicigia. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am .

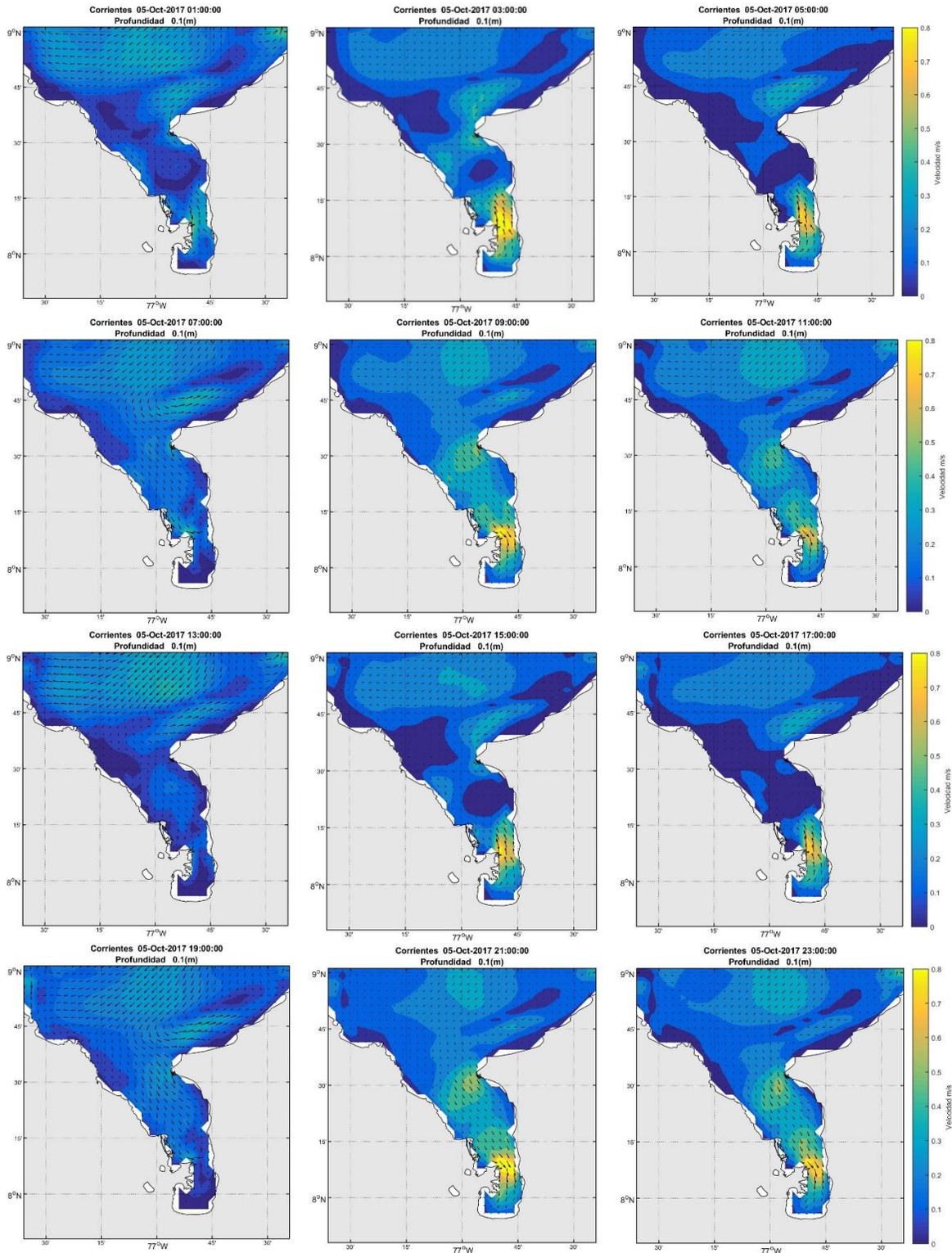


Figura 18. Corrientes superficiales horarias para el día 05 de octubre de 2017 (sicigia, época húmeda). Resultados obtenidos forzando el modelo con aportes fluviales y vientos; sin marea. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.

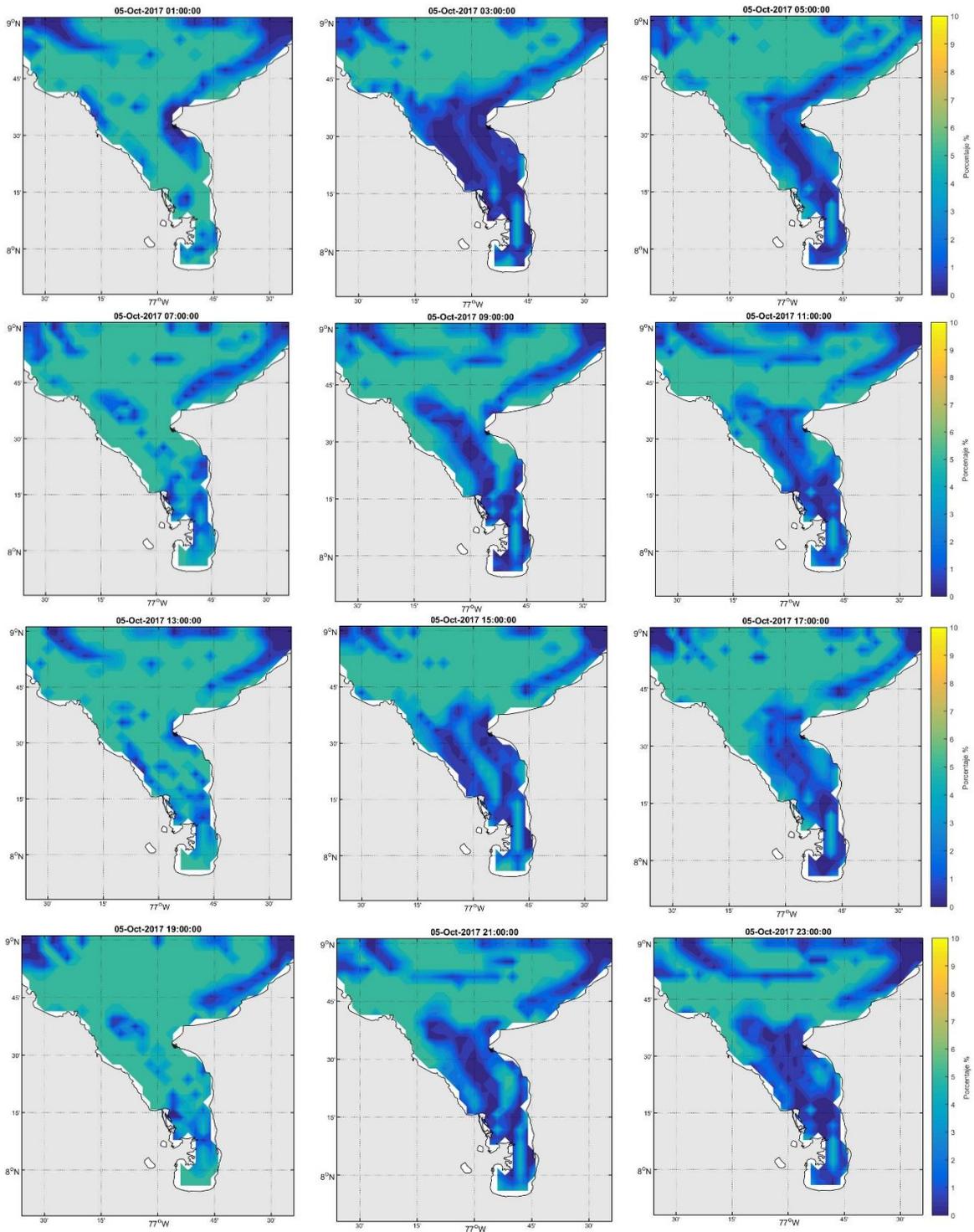


Figura 19. Valores del coeficiente de variación local calculados a partir de los promedios horario de las corrientes con y sin marea. Día 05 de octubre de 2017 (época húmeda) durante Sicigia. Se muestran los resultados cada dos horas desde la 01:00 am.

En cuando a los campor de CVL en Sicigia durante época húmeda (*Figura 19*) se presentan valores similares de CVL a los encontrados para en el campo de corrientes durante la época seca. Los resultados además coincide con valores similares a los de la zona del delta del río Atrato donde se presentan los valores más elevado de este coeficiente.

5.5. Análisis de histogramas para las corrientes.

Con el fin de realizar un análisis estadístico del campo de corrientes en las zonas sur, centro y norte del golfo de Urabá se seleccionaron tres sitios ubicados en el centro de cada de ellas (*Figura 20*). Los sitios fueron ubicados de tal manera que los valores de las corrientes no se vieran afectados por cercanía a la costa, batiemtria somera o descargas fluviales. En cada sitio se construyeron histogramas de velocidad con los resultados horarios de todo el periodo de modelación forzado con y sin marea. No se tuvo en cuenta en este análisis la zona externa debido a que a partir del análisis de coeficiente de variación local (*Figura 19, Figura 16*) se observó que estos valores son menores al 1%, por tanto no son representativos para el análisis a realizar.

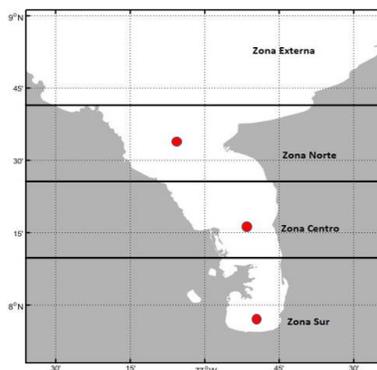


Figure 20. Ubicación de los sitios para análisis de frecuencia en las velocidades de las corrientes del golfo de Urabá en las zonas norte, centro y sur.

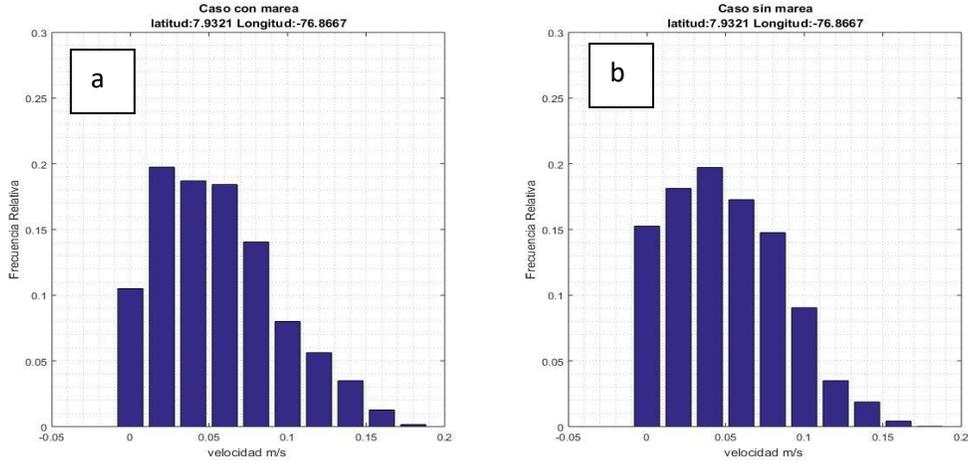


Figura 21. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona sur. Caso con marea (a) y caso sin marea (b)

El histograma de velocidades para la zona sur muestra que para el caso en que se simularon las corrientes utilizando la marea (Figura 21.a) las velocidades más frecuentes se encuentran en el rango de 0,02 a 0,08 m/s con una probabilidad de ocurrencia de cerca del 80 %. Por otra parte, para el escenario en que estuvo ausente la marea (Figura 21.b), el mismo intervalo de velocidades tiene una frecuencia del 85 %.

Los resultados sugieren que en la zona sur se presentan mayores velocidades en el escenario en que estuvo presente el forzamiento mareal. Esto se debe a que la frecuencia es mayor respecto al escenario sin marea para velocidades superiores a los 0,10 m/s.

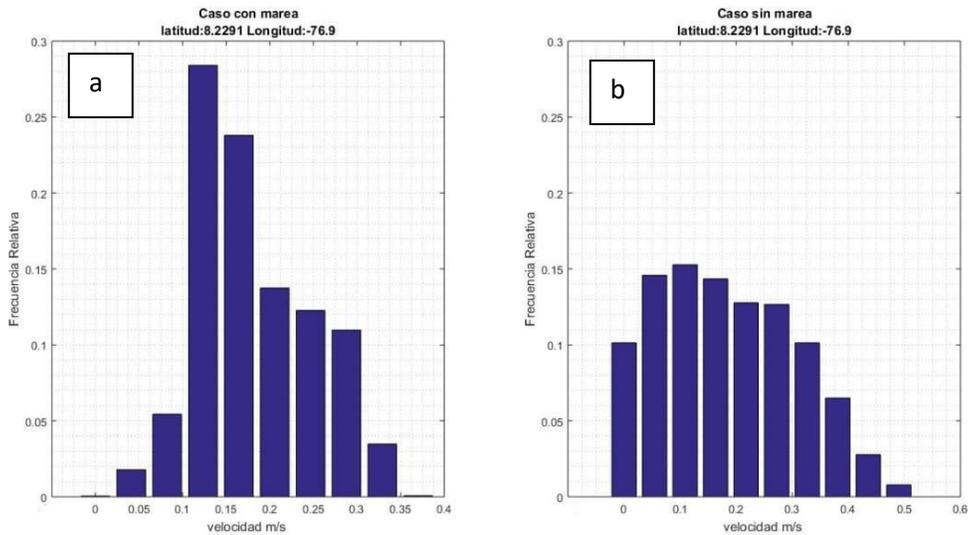


Figure 22. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona centro. Caso con marea (a) y caso sin marea (b)

Los histogramas de velocidades para la zona centro para los escenarios con y sin marea se presentan en la Figura 22. Los resultados sugieren que para el caso en donde se cuenta con el forzamiento con marea (Figura 22.a), el intervalo de velocidades entre 0,1 y 0,15 m/s presentan frecuencias de ocurrencia de aproximadamente el 50 %. Mientras que para este mismo intervalo de velocidades el escenario sin marea (Figura 22.b) el valor es del 30%. Es de resaltar que para el caso con marea las velocidades inferiores a 0,3 m/s son más frecuentes con respecto al caso sin marea.

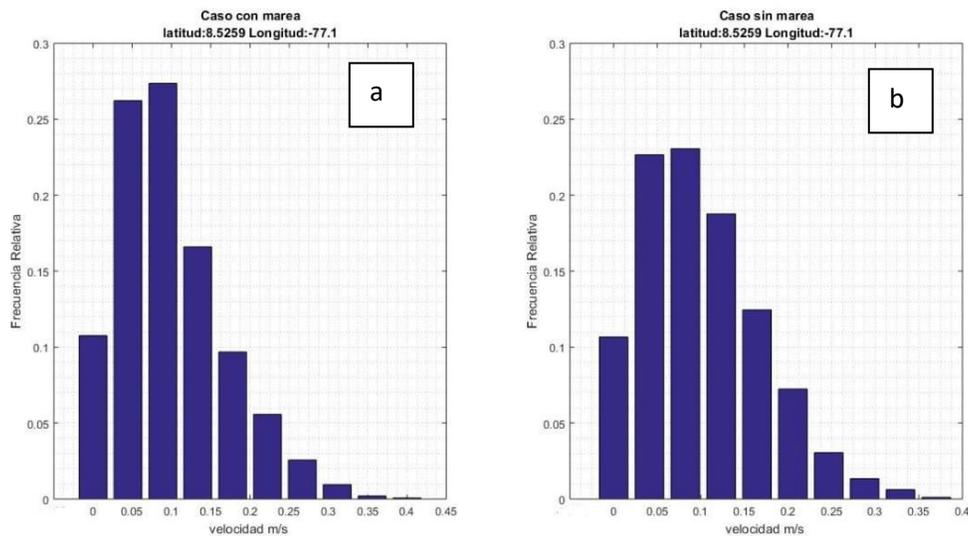


Figura 23. Histograma de velocidades para el punto de muestreo de la zona norte. Caso con marea (a) y caso sin marea (b).

En la Figura 23 se presenta el histograma de corrientes para la zona norte del golfo de Urabá. Los resultados muestran velocidades superiores a 0,2 m/s. Esta zona presenta altas frecuencias relativas para el caso sin marea (Figura 23.b) con respecto al escenario en dónde tiene activo el forzamiento mareal (Figura 23.a).

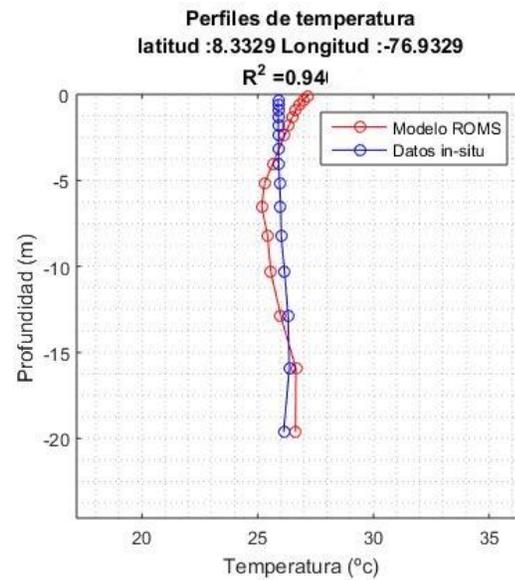
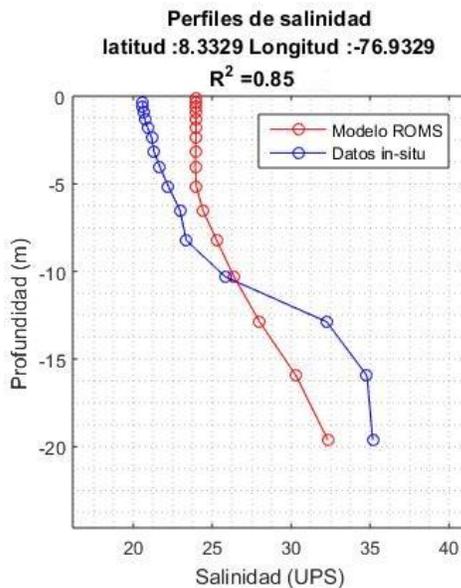
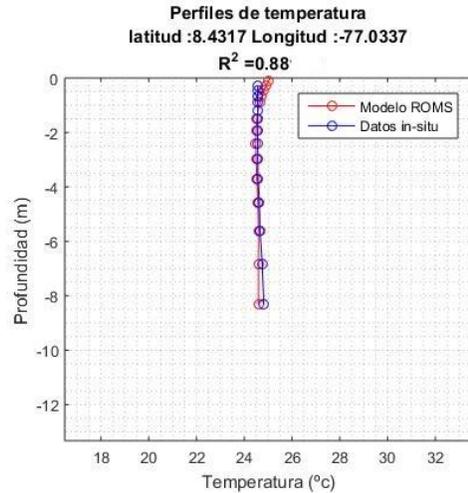
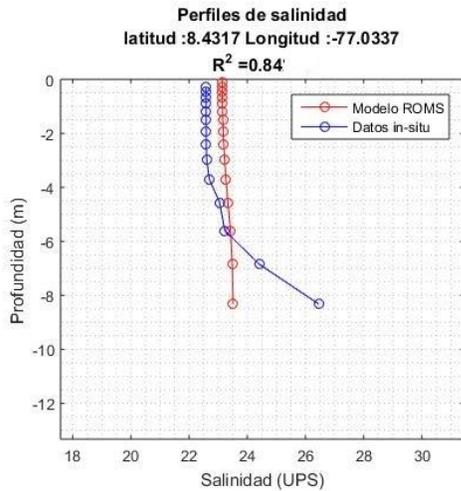
De las tres zonas analizadas por medio de los histogramas de velocidades, la zona central del golfo de Urabá es la que muestra mayores frecuencias para velocidades superiores a los 0,2 m/s. Por el contrario, la zona sur se caracteriza por contar con velocidades de mayor probabilidad de ocurrencia inferiores 0,05 m/s. Los resultados sugieren que la zona sur es la que tiene las menores magnitudes de velocidades superficiales para el golfo de Urabá.

5.6. Comparación de resultados del modelo y datos *in situ*

Con el fin verificar el desempeño del modelo, se compararon sus resultados con datos medidos *in situ* durante una campaña de muestreo realizada en el mes de abril de 2019 por la Universidad de Antioquia (Calderón, 2019). Se compararon perfiles modelados y medidos de salinidad y temperatura.

El caso de estudio que fue objeto de este procedimiento solo corresponde al escenario que contiene el forzamiento mareal. Esto se hizo, ya que este caso contiene todos los forzamientos que suponemos definen de manera adecuada el comportamiento de las condiciones hidrodinámicas del golfo.

Los sitios seleccionados para esta comparación fueron los puntos de menor coeficiente R2, el más acertivo y dos puntos más de forma aleatoria.



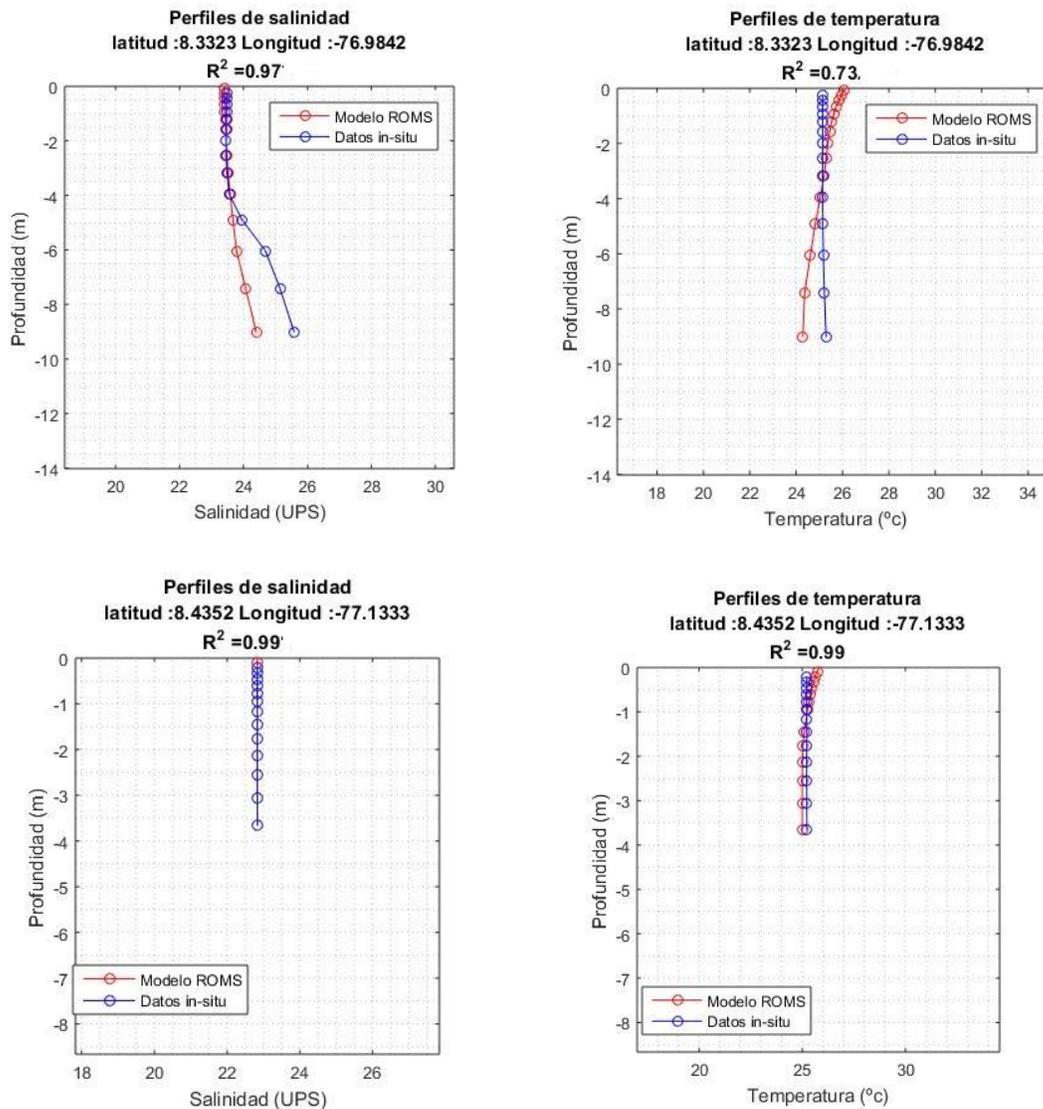


Figura 24. Comparación de perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) para datos *in situ* (líneas azules) y salidad del modelo (líneas rojas).

En la Figura 24, se presentan la comparación de los los perfiles de salinidad y temperatura entre los datos modelados y los medidos *in situ*. En general, los perfiles medidos y modelados tienen el mismo comportamiento. Esto se corrobora con los valores promedio del coeficiente de determinación de 0.85 y 0.73 para los perfiles de salinidad y temperatura, respectivamente. En general, estos resultados sugieren que el modelo ROMS-AGRIF esta realizando una representación aceptable de las condiciones reales de campo de corrientes.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los análisis realizados en los campos de corrientes superficiales horarias y promedios mensuales sugieren que las modulaciones de la marea sobre los patrones de circulación oceánica en el golfo de Urabá son débiles (no mayores a CVL del 6%). Este resultado está relacionado con el régimen micro mareal que se presenta en el área de estudio. Por tanto, se considera que la onda de marea no modula significativamente la magnitud y dirección de las corrientes totales en el golfo de Urabá, por lo cual se acepta la hipótesis planteada.

En la parte externa del golfo, los resultados sugieren que la modulación de la onda de marea es mínima (valores de CVL menores a 2%). A medida que la onda de marea se propaga desde el Caribe al interior del golfo de Urabá la marea tiene una modulación un poco más significativa (valores de CVL de hasta 6%) en los patrones de circulación oceánica.

En general, los valores del CVL sugieren que no existen variaciones importantes del CVL para la épocas secas y húmedas. En las salidas horarias de la época seca las corrientes presentan mayores velocidades respecto a la húmeda al interior del golfo de Urabá (zona norte, centro y sur). Esto se debe a que la influencia de los vientos alisios presentes en la época seca. En la zona central, los resultados muestran que el aporte fluvial es el principal modulador de las corrientes en la zona central del golfo.

Aun en época de Sicigia, en la cual se tiene el mayor rango mareal, tanto para la época seca como para la época húmeda, el coeficiente de variación local no supera el 6%. Sin embargo en la zona central se sugiere realizar análisis más detallados, ya que la interacción de la marea y la descarga del río Atrato puede generar valores altos de la magnitud de la corriente.

De acuerdo con los análisis estadísticos (histogramas), los valores de la frecuencia de valores de corrientes en la zona sur es similar para el caso con y sin marea. Sin embargo, en las zonas central y norte, las frecuencias son mayores para el caso con marea. Esto sugiere que aunque el aporte de la marea a las corrientes totales en estas zonas es mínimo, si genera una diferencia que podría ser significativa.

A partir del análisis de descomposición de armónicos se obtuvieron que los armónicos K1, M2 y K2 son los que presentan los mayores valores de amplitud. Se sugiere tener en cuenta los primeros 10 armónicos con el fin de definir de manera adecuada la marea astronómica en el golfo de Urabá.

La comparación de los perfiles de temperatura y salinidad mostraron valores superiores a 0,73. Esto sugiere que el modelo ROMS-AGRIF, en general, está reproduciendo de manera adecuada las condiciones dinámicas del golfo.

7. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se considera, que a nivel general, la modulación producida por la marea en el campo de corrientes totales es mínimo. No obstante, se sugiere analizar este aporte a menor escala espacial, ya que, bajo diferentes condiciones como batimetría o geomorfología la marea puede modular en mayor o menor medida ciertas áreas. De manera específica la zona centro y norte.

A pesar que la comparación de perfiles de salinidad y temperatura mostraron valores altos del coeficiente de correlación, se sugiere realizar comparaciones con información de corrientes medidas in situ. Esto permitirá una mejor verificación de los resultados del modelo.

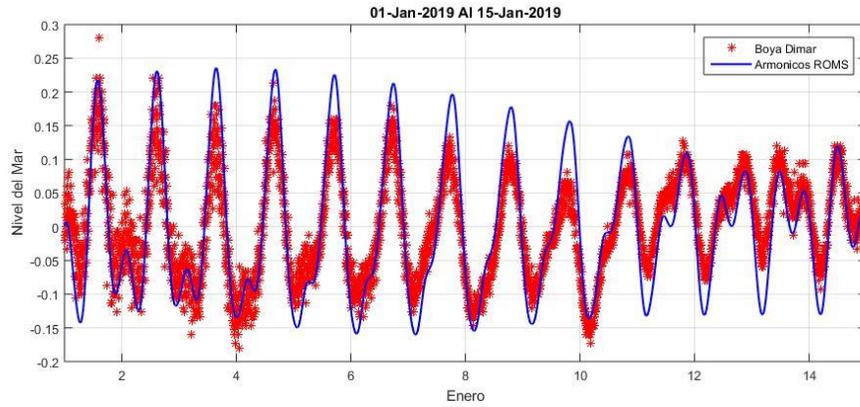
8. REFERENCIAS

- Barrientos, N. S., y Mosquera, W. A. (2019) *Modulación a la circulación oceánica en el golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia*. (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Turbo.
- Bernal, G., Toro, M., Montoya-Jaramillo, L. J., Garizábal-Carmona, C. E., y Ernesto, C. (2005). Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del Golfo de Urabá. *Gestión y Ambiente*, 8(1), 123-135.
- Blanke, B., Roy, C., Penven, P., Speich, S., McWilliams, J.C., Nelson, G., 2002. Linking wind and upwelling interannual variability in a regional model of the southern Benguela, *Geophysical Research Letters* 29, 2188-2191.
- Calderón, Y.C. (2019). *Variabilidad espacio-temporal del potencial energético salino por medio de mediciones in situ en el golfo de Urabá, mar Caribe colombiano* (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Turbo.
- Cardona, Y.M, Fernández, J.M., Toro, M., y Monsalve, M., (2001). Análisis de mareas por el método de la descomposición en armónicos. Medellín. Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia. 172p.
- Chevillot, P., Molina A., Giraldo L. y Molina C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá, *Boletín científico CIOH*, 14, 79-89.
- Correa, I.D. y Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa caribe colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol. 33, 7-28.
- Defant, A. (1958). *Ebb y Flow: The tides of the earth, air and water*. Ann Arbor Press, pp. 239-251.
- Di Lorenzo, E., Miller, A.J., Neilson, D.J., Cornuelle, B.D., Moisan, J.R. (2003). Modeling observed California Current mesoscale eddies and the ecosystem response. *International Journal of Remote Sensing*, in press.
- Escobar, S. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol.40(2), 327-346.
- Haidvogel, D. B., Arango, K., Hedstrom, A., Beckmann, P., Malanotte-Rizzoli, & Shchepetkin A. F. (2000). Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dyn. Atmos. Oceans*, 32, 239-281.
- Málikov, I. (2010). *Régimen de la marea en diferentes puntos de las costas colombianas*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá, D.C.

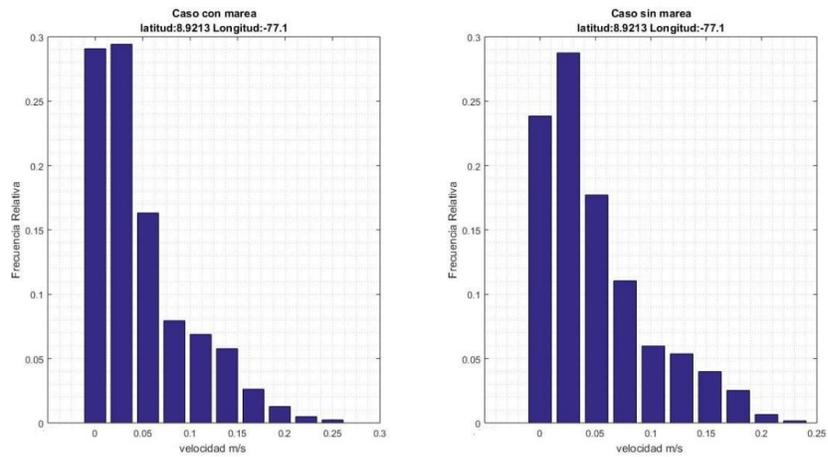
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., & Shchepetkin, A. (2003). Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *Journal Physical Oceanography*, 33(4), 753-783.
- Martin, J. L., & McCutcheon, S. C. (2018). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. CRC Press, pp.120-2021
- Molina, A., Molina, C., y Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín Científico CIOH*, 11, 43-5
- Montoya, L. (2010). *Dinámica Oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con la Dispersión de Sedimentos y Contaminantes*. Universidad Nacional, Medellín.
- Montoya, L. J., y 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).
- Olsen, S. B., Padma, T. V., y Richter, B. D. (2006). Guía para el manejo del flujo de agua dulce a los estuarios. *Coastal Resources Center*, 1-52.
- Penven, P., Roy C., Lutjeharms, J.R.E., Colin de verdière, A., Johnson, A., Shillington, F., Fréon, P., Brundrit, G. (2001). A regional hydrodynamic model of the Southern Benguela. *South African Journal of Science* 97, 472-476.
- Posada, P., Blanca Olivia y Henado P., William. (2008). *Diagnóstico de la erosión costera del Caribe colombiano*. INVEMAR, serie de publicaciones especiales No.13, santa marta, 200 páginas.
- Pritchard, D. W. (1967). What is an estuary: Physical viewpoint. En G. H. Lauff (Ed.), *Estuaries*. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science. (52-63).
- Restrepo, J. D. & Lopez, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 25, 1-21.
- Restrepo, J., y Correa, I. (1994). Aspectos generales sobre el estado actual de conocimiento de la franja costera del Pacífico colombiano. *Memorias del Taller de Expertos Sobre el Estado del Conocimiento y Lineamientos para una Estrategia Nacional de Biodiversidad en los Ecosistemas Marinos y Costeros, Minca-Magdalena*. CCO/ENB/Colciencias, Santafé de Bogotá.

- Roldán, P. A. (2007). *Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá- implicaciones para el transporte de sedimentos (Tesis de Recursos Hidráulicos)*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 102.
- Song, Y. & Haidvogel, D. (1994). A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of Computational Physics*, 115(1), 228-244.
- Vernette, G., Gayet, J., Echeverry, C. M., Piedrahita, I., y Correa, I. D. (2002). *Introducción a los ambientes deltaicos: morfología y sedimentación. Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral Pacífico colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, 22-53.
- Warner, J. C., Sherwood, C.R., Arango, H.G., & Signell, R.P. (2005). Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. *Oceanic modelling*, 8 (1-2), 81-113.
- Werlinger, C. (2004), *Biología marina y oceanografía : conceptos y procesos*, Chile, Consejo Nacional del Libro y la Lectura, 2004.

9. ANEXOS

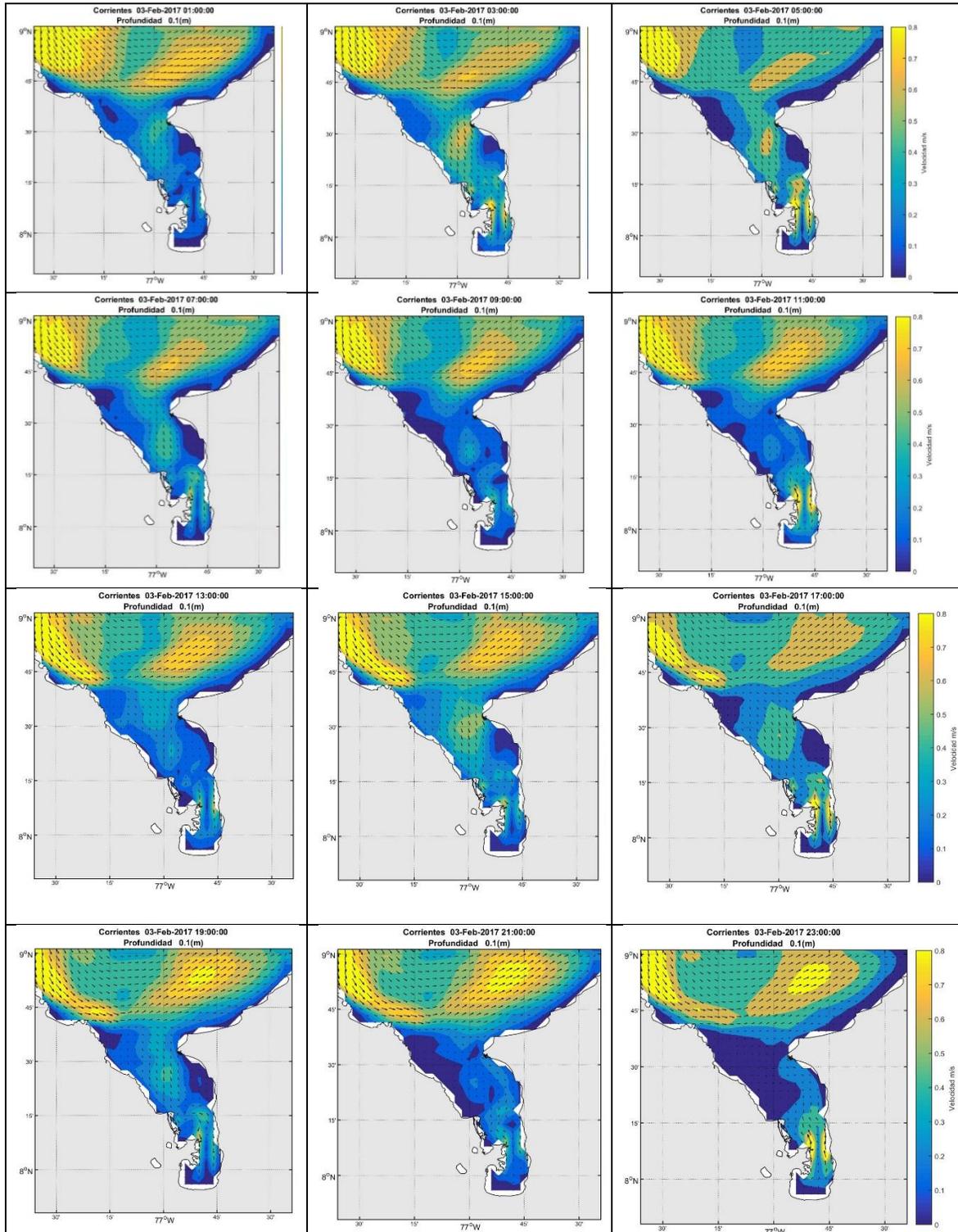


Anexo. Comparación de datos modelados (Armonicos ROMS, Línea azul) con datos de mareógrafo (Boya DIMAR, puntos rojos).



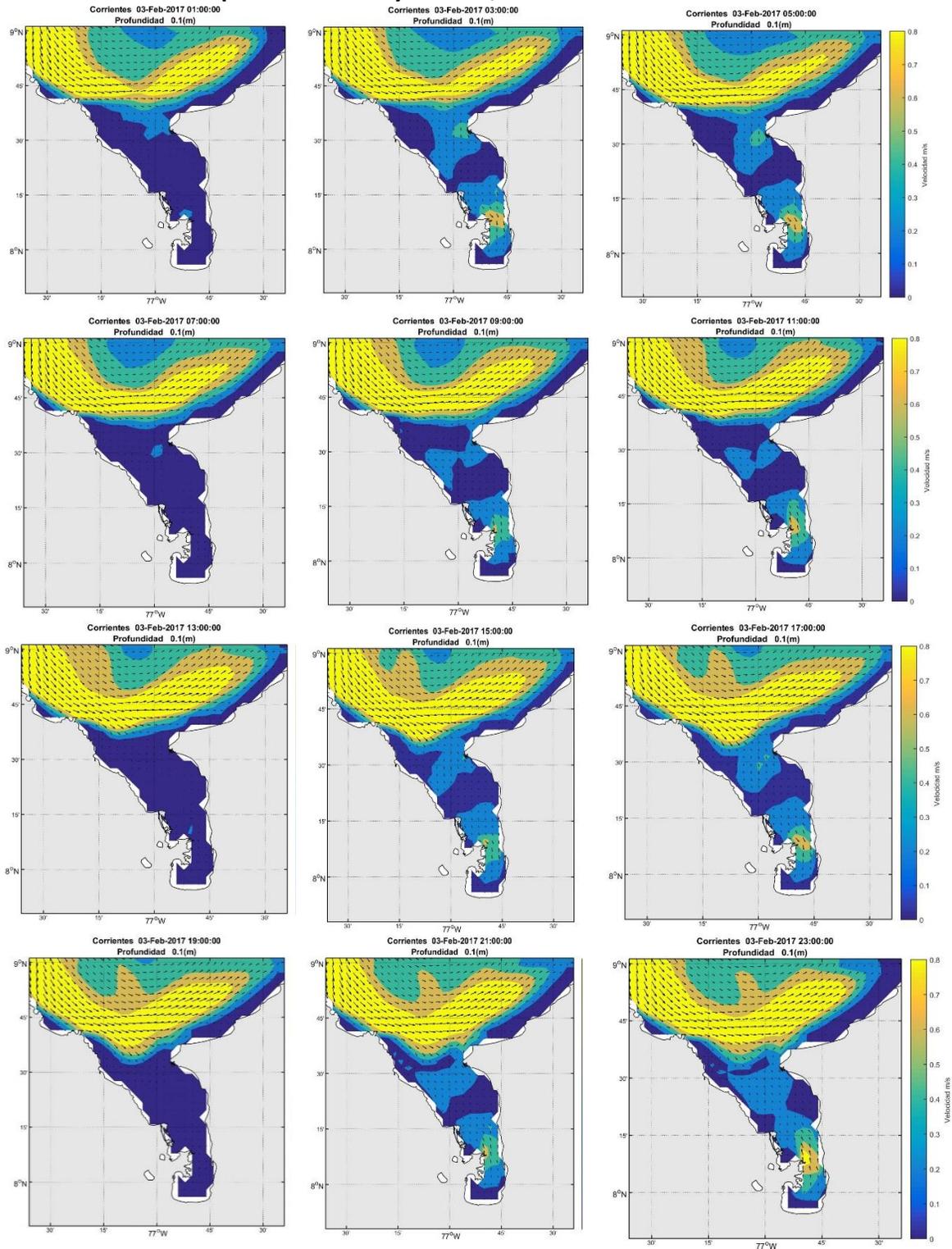
Anexo. Histogramas de comparación, casos con y sin marea, para la zona externa.

Cuadratura febrero 03 - época seca - forzado con marea, aportes fluviales y vientos.



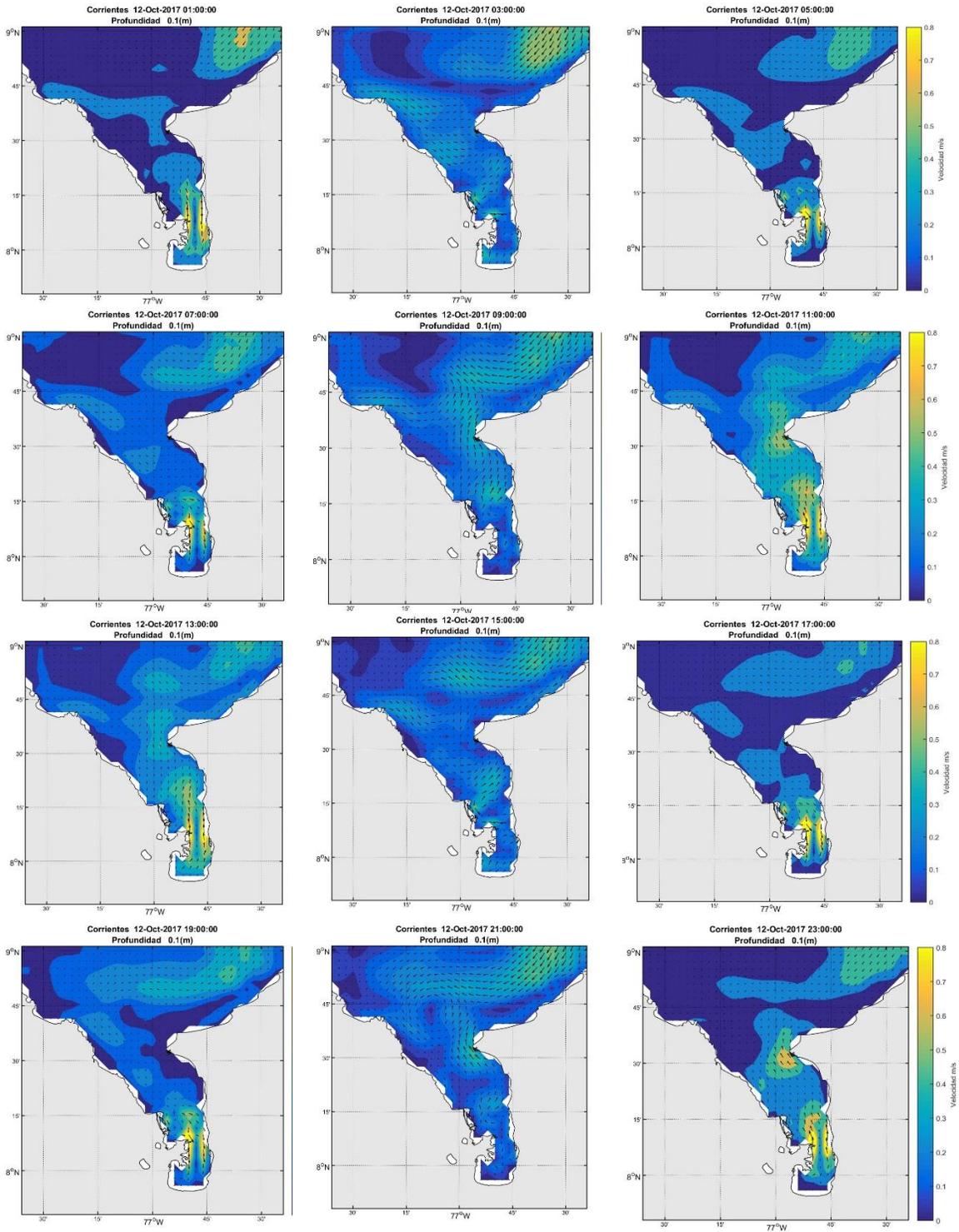
Anexo. Cuadratura febrero 03 - época seca - forzado con marea, aportes fluviales y vientos.

Forzado con aportes fluviales y vientos; sin marea.



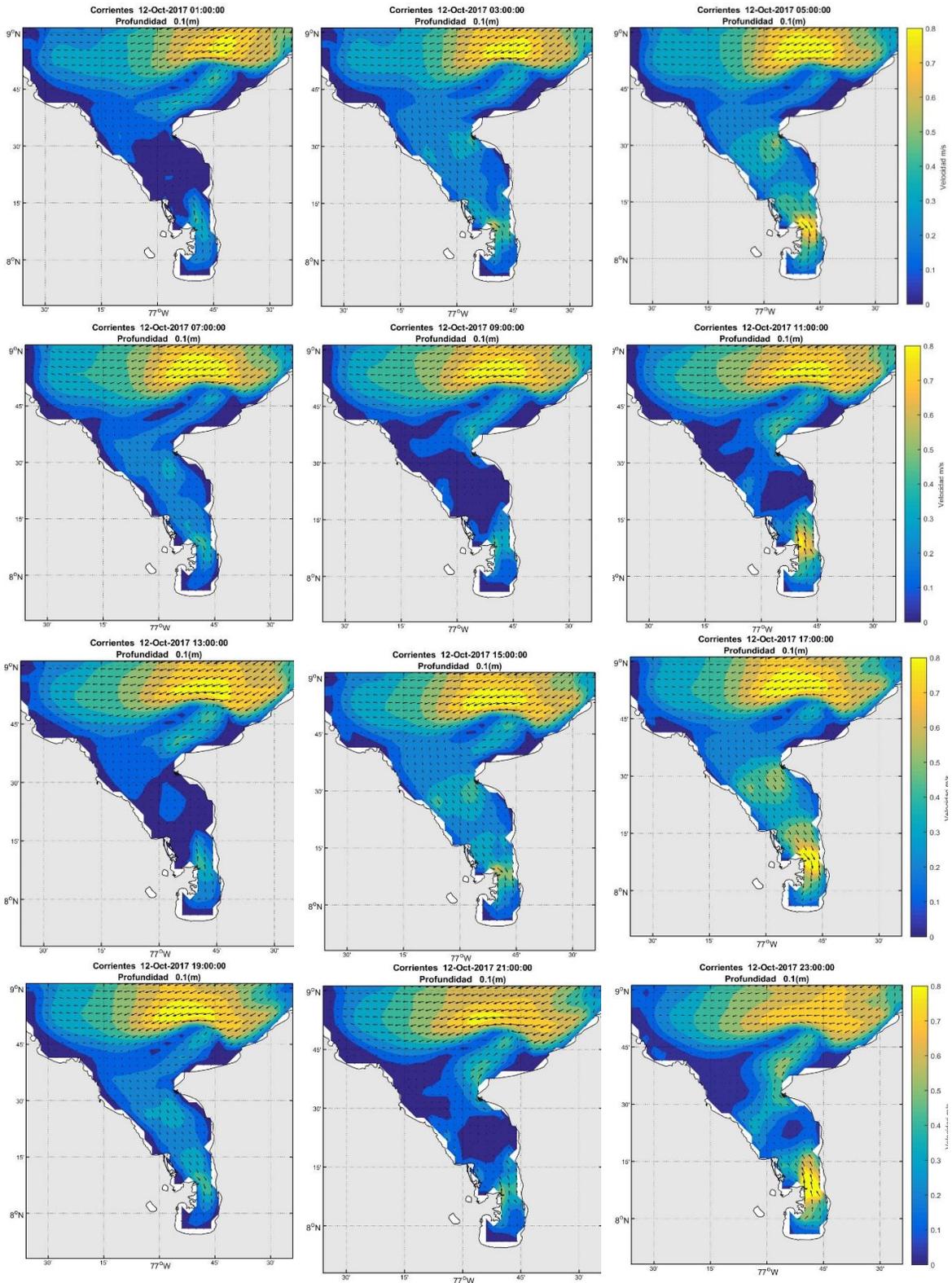
Anexo. Cuadratura febrero 03 - época seca - forzado con aportes fluviales y vientos, sin marea.

Cuadratura octubre 12 - época húmeda - forzado con marea, aportes fluviales y vientos.



Anexo. Cuadratura octubre 12 - época húmeda - forzado con marea, aportes fluviales y vientos.

Forzado con aportes fluviales y vientos; sin marea.



Anexo. Forzado con aportes fluviales y vientos; sin marea.