



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1 8 0 3
FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODULACIÓN A LA CIRCULACIÓN OCEÁNICA EN EL
GOLFO DE URABÁ POR LA OCURRENCIA DE EVENTOS
ATMOSFÉRICOS DE BAJA Y ALTA FRECUENCIA**

Parte de los requisitos para obtener el grado de:
Ingeniero Oceanográfico

Presentado por:

Nery Sirley Barrientos Porras
Wilmar Andres Mosquera Ardila

Asesor:

Vladimir G. Toro

Co-Asesora:

Yuley Cardona

Turbo, Antioquia



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente al Dios de los cielos, por darnos el don de ciencia, la sabiduría, la fuerza y la paciencia para hacer esto posible.

Agradecemos a la Universidad de Antioquia por hacer presencia en la región de Urabá, por fortalecer los procesos académicos y propender por el desarrollo de la región. Igualmente, al proyecto CODI "Análisis de la modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia, a través de simulación numérica. 2017-17008" por el apoyo mensual para el desarrollo de las actividades de este trabajo.

Agradecemos enormes al profesor Vladimir Giovanni Toro, por su desmedido apoyo en este proceso, como asesor, como profesor y como mentor. Por regalarnos y transmitirnos de su amor y entrega por las ciencias del mar, que será una base para la vida profesional y personal.

Agradecemos a la profesora Yuley Cardona, por compartir con nosotros su amor por la investigación y por ser nuestra mentora en este proceso. Por brindarnos de su tiempo y su conocimiento.

También, queremos agradecer a todas las personas que nos apoyaron desde el grupo OCEÁNICOS de la universidad Nacional, en el desarrollo de este trabajo como lo fueron: Manuela Guarín, Maximiliano Arredondo y Luisa Gutiérrez.

Una inmensa gratitud a nuestra familia por todo el apoyo brindado durante esta etapa formativa, por motivarnos y alentarnos a alcanzar este sueño. En especial, le agradecemos a Lucelis Mosquera Berrio y Ana Teresa Porras, quienes han hecho de nuestra formación su proyecto de vida, gracias, muchas gracias. A Alder Llorente, Dylan Josué, Gregoria Berrio y Luz Nellys Mosquera por inspirarnos a seguir adelante y apoyarnos incondicionalmente.

Agradecemos a los amigos y compañeros que nos tendieron la mano en los momentos difíciles, y sin duda a los amigos incondicionales como Annie Robledo y Lorenzo Portillo.

RESUMEN

La hidrodinámica oceánica y costera de un lugar tiene implicaciones en el ámbito social, ambiental y económico de una región, por lo que se hace indispensable el estudio de la circulación oceánica al cumplir un papel fundamental para el entendimiento de la misma. Con el fin de avanzar en el conocimiento del comportamiento físico del Golfo de Urabá, en este trabajo se analizó la modulación que producen los vientos sobre las corrientes en el Golfo de Urabá teniendo en cuenta las épocas climáticas del año y las diferentes fases del ENSO. Para esto, se utilizó el modelo numérico de circulación de última generación ROMS-Agrif (3.1.1), con un forzamiento de tiempo variable durante el periodo 2010-2015. Se encontró que, en materia de circulación, y teniendo en cuenta solo la influencia del viento, el golfo puede dividirse en tres zonas (norte, centro y sur). Los resultados sugieren que el viento modula la circulación en el Golfo de Urabá, cuando su dirección es contraria al flujo del río Atrato confina las aguas más dulces en el sur. En este escenario se encontraron las menores magnitudes de la corriente superficial, principalmente para la zona centro y sur, con valores promedio de 0.1 m/s. En este caso, el Caribe tiene mayor influencia sobre la circulación del Golfo en su parte interna. Cuando el esfuerzo del viento está en la misma dirección del flujo del río Atrato (sur-norte), la corriente sigue esa dirección, con aguas saliendo del golfo por su costado este (escenario con mayor frecuencia). Se encontró, además, que la descarga fluvial tiene influencia aproximadamente hasta los 3 m de profundidad. Entre los 6 m y 10 m se encuentra la haloclina, formada por la mezcla de aguas dulces y saladas. En esta zona se forma un corte de velocidades, al parecer permite la formación de remolinos al interior del Golfo. Finalmente, a partir de los 10 m es notoria la influencia del Caribe en la circulación del Golfo. Por último, los resultados sugieren que el ENSO no modula la circulación al interior del Golfo de Urabá, debido a que en su interior dominan los fenómenos locales. En trabajos futuros se recomienda emplear bases de datos de viento con una resolución espacial más fina y tener en cuenta el aporte de otros afluentes importantes como el río León.

Palabras claves: Golfo de Urabá, circulación oceánica, eventos atmosféricos, ENSO, ROMS.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1 ENSO	12
3.2 Modelo numérico ROMS	12
4. METODOLOGÍA	15
4.1 Zona de estudio	15
4.1.1 Vientos	16
4.1.2 Circulación oceánica	16
4.2 Bases de datos	17
4.2.1 Batimetría	17
4.2.3 Condiciones iniciales y de frontera	20
4.3 Mallas de cálculo	21
4.4 Forzadores	21
4.4.1 Viento	21
4.4.2 Descarga fluvial	22
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
6. CONCLUSIONES	40
7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
ANEXOS	45
ANEXO I	45
ANEXO II	46
ANEXO III	47
ANEXO IV	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio	15
Figura 2. Batimetrías utilizadas. a) malla gruesa y b) malla fina.....	17
Figura 3. Ubicación geográfica de los puntos analizados para comparación de las bases de datos de vientos.....	18
Figura 4. Series de tiempo diaria multianual comparando las tres bases de datos, la línea azul describe a ERA-INTERIM, la línea negra a CCMP y la línea roja a ERA5. Donde, a) punto 1 de la figura 4; b) punto 2 de la figura 4; c) punto 3 de la figura 4; d) punto.....	19
Figura 5. Mallas de cálculo utilizadas en la modelación: A) malla gruesa; B) malla fina.	21
Figura 6. Series de tiempo de promedios mensuales de la velocidad del viento en los cuatro (4) puntos especificados en la figura 3, se especifican con la línea discontinua los valores máximos de velocidad del viento para los años Niño y Niña.....	22
Figura 7A. Bocas del río Atrato sobre el Golfo de Urabá. Editado de Escobar (2011).	23
Figura 7B. Valores promedios de los caudales máximos mensuales del río Atrato registrados por la estación Bellavista.....	23
Figura 8. Ciclo anual de valores promedio de caudales máximos del río Atrato distribuido en las cuatro bocas consideradas.	24
Figura 9. Campos de vientos trimestrales para año Niña (2011), Neutro (2013) y Niña (2015).	25
Figura 10. Rosas de vientos trimestrales para año Niña (2011), Neutro (2013) y Niña (2015) para el campo de viento promedio.	26
Figura 11. Delimitación de las zonas tres zonas en las que se realizó el análisis de los resultados de la circulación para el Golfo de Urabá.	27
Figura 12. Campos de Corrientes y salinidad superficiales para año Niña.....	28
Figura 13. Campos de Corrientes y salinidad superficiales para año Niño.....	29
Figura 14. Campos de corrientes y salinidad para a 3 m de profundidad. Año Niña.	30
Figura 15. Campos de corrientes y salinidad para a 4 m de profundidad. Año Niña.	30

Figura 16. Campos de corrientes y salinidad para a 6 m de profundidad. Año Niña.	31
Figura 17. Campos de corrientes y salinidad para a 10 m de profundidad. Año Niña.	31
Figura 18. Ubicación de los transectos en la zona norte (verde), centro (azul) y sur (rojo) del GU.....	32
Figura 19. Transecto de la zona norte (línea verde, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	33
Figura 20. Transecto de la zona norte (línea verde, figura 18), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	33
Figura 21. Transecto de la zona centro (línea azul, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	34
Figura 22. Transecto de la zona centro (línea azul, figura 18), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	34
Figura 23. Transecto de la zona sur (línea roja, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	35
Figura 24. Transecto de la zona sur (línea roja, figura 19), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.	36
Figura 25. Campos de corrientes en bahía Colombia en superficie, 4 m y 10 m. Año Niña.	36
Figura 26. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época seca del año Niño, en las zonas norte, centro y sur del GU.	37
Figura 27. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época seca del año Niña, en las zonas norte, centro y sur del GU.	38
Figura 28. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época húmeda del año Niño, en las zonas norte, centro y sur del GU.	38
Figura 29. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época húmeda del año Niña, en las zonas norte, centro y sur del GU.	39
Figura A1. Gráficos de dispersión para correlacionar la base de datos ERA5 con ERA-INTERIM y CCMP en los cuatro puntos de comparación.....	45

Figura A3-1. Mapa de ubicación de los cuatro puntos de descarga de caudal para la malla gruesa.....47

Figura A3-2. Caudal mensual distribuido en los cuatro puntos de descarga considerados para la malla gruesa47

Figura A4-1. Mapa de ubicación de los nueve puntos de descarga de caudal para la malla fina.....48

Figura A4-2. Caudal mensual distribuido en los nueve puntos de descarga considerados para la malla fina.....48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de las bases de datos.....	18
Tabla 2. Bases de datos utilizadas en el modelo ROMS.....	20
Tabla 3. Índice ONI para clasificación del fenomenos ENSO, tomado del centro de predicción del clima de la NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).	46

1. INTRODUCCIÓN

La hidrodinámica costera y oceánica de un lugar tiene impactos en sus ecosistemas, en la calidad de las aguas, e incluso en las actividades económicas de la zona. Con el fin de avanzar en el entendimiento físico de la hidrodinámica oceánica de un sitio, es necesario, entre otras cosas, conocer las características de los vientos, oleaje, marea y corrientes oceánicas, así como su batimetría y el caudal de ríos que desembocan en el lugar. A priori, se ha mostrado cómo los patrones de circulación permiten determinar algunos procesos físicos y biológicos, asociados al movimiento de la masa de agua. De manera particular y en los últimos años ante el creciente interés económico, el golfo de Urabá (GU) ha sido un lugar de estudio de las corrientes y de sus patrones de circulación.

En el GU se han desarrollado trabajos que han determinado las características de su hidrodinámica y su relación con ecosistemas, transporte de contaminantes entre otros. Numerosos autores como Molina *et al.* (1992), Chevillot *et al.* (1993), Lonin y Vásquez (2005), Montoya y Toro (2006), Álvarez y Bernal (2007), Montoya (2010), Escobar (2011) y Escobar *et al.* (2015) han definido los patrones de circulación en el GU utilizando mediciones y modelación numérica (ELCOM, CAEDYM, ECOMSED y Delft3D). En los trabajos realizados con modelación se usó información secundaria y mediciones *in situ*, con el fin de realizar procesos de calibración y validación.

Molina *et al.* (1992) y Chevillot *et al.* (1993) definieron los patrones de circulación oceánica en el GU utilizando imágenes del satélite SPOT de febrero de 1989. Con este fin, utilizaron como trazador la pluma de sedimentos de los ríos Atrato, León y Turbo. Luego, utilizando mediciones *in situ*, validaron las mediciones de satélite y describieron las características hidrodinámicas de las aguas del GU en dos épocas del año: seca y húmeda. Luego Roldán (2008) a partir de modelación numérica, encontró que las corrientes superficiales son moduladas por la acción combinada del caudal de los ríos y los vientos, describiendo dos patrones típicos de circulación, uno para la época húmeda y otro para la época seca.

Montoya (2010), obtuvo los patrones generales y estacionales de circulación del GU y su relación con contaminación por *E-Coli*. Adicionalmente, y a una escala más detallada, Álvarez (2011) usando un modelo numérico, determinó la dinámica cerca del delta del río León. En este mismo año, Escobar (2011) utilizó el modelo Delft3D forzado con marea en la frontera norte, oleaje, estratificación termo-salina, viento y descarga fluvial y determinó cuantitativamente el efecto de estos procesos en la hidrodinámica del GU. De la misma manera, Velásquez (2013) caracteriza los patrones de circulación de acuerdo con las dos épocas climáticas del año. Escobar *et al.* (2015) presentaron un estudio integral de las corrientes oceánicas en el GU, mediante el uso del modelo Delft3D, comparando con datos de campo medidos en las dos estaciones climáticas. Estos autores analizaron la influencia de forzadores como la marea, las olas, condiciones climáticas, las descargas de los ríos y los gradientes de densidad en la circulación oceánica. Como se observa, en general se

ha estudiado la circulación usando principalmente modelos numéricos. Con el fin de disminuir cada vez más la escala espacial en el GU y estudiar de esta manera fenómenos físicos particulares, se decide realizar una nueva implementación numérica.

La implementación de un modelo numérico a escala fina espacial y temporal, permitirá en el largo plazo, entre otras cosas, conocer la calidad del agua marina, inferir comportamientos biológicos, monitorear afectaciones ecológicas (p.e. blanqueamiento de corales) y elaborar esquemas de contingencia ante posibles casos de emergencia por derrame de contaminantes y/o naufragios. Teniendo en cuenta que el GU es uno de los mayores estuarios de Colombia, que contiene sitios con alto valor ecológico y que además se considera una región estratégica portuaria a nivel nacional e internacional (Puerto Antioquia, Puerto Pisisí y Puerto Darién), se implementó un modelo numérico de circulación, que permita avanzar en la caracterización de manera integral de los patrones de circulación del GU. Se espera que esta nueva implementación sirva en el mediano plazo a las operaciones portuarias, incentive proyectos de investigación oceanográficos y sirva como insumo para análisis ambientales y ecológicos. Para este proyecto de investigación se implementó el modelo de circulación ROMS-Agrif. Se parte de la hipótesis que en GU bajo escenarios donde las descargas de los ríos no tienen variaciones significativas a lo largo del año, existe una modulación de la circulación debido a la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia.

La estructura de este trabajo de investigación, es la siguiente: En el capítulo dos se presentan los objetivos y alcances planteados para llevar a cabo este proyecto. En el tercer capítulo se describen los conceptos fundamentales desde el punto de vista físico utilizados en esta investigación, así como una corta descripción del modelo numérico oceánico empleado. En el cuarto capítulo se presenta la descripción de la zona de estudio y su respectiva caracterización en términos climáticos y oceanográficos, así como las principales características del caso de modelación implementado. Finalmente, en el quinto capítulo con base en los resultados de modelación, se presentan los resultados y los análisis correspondientes a la modulación de la circulación bajo la influencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia en escenarios de ENSO.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la influencia de los eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia en la circulación oceánica del golfo de Urabá utilizando para ello un modelo numérico.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar los campos de viento en la región del GU a partir de información de reanálisis.
- ✓ Implementar el modelo numérico de circulación oceánica, ROMS (Sistema Regional de Modelación Oceánica).
- ✓ Determinar la influencia del ENSO y las épocas climáticas del año en la circulación oceánica en el GU.
- ✓ Determinar los patrones de circulación en diferentes niveles del GU.

3. MARCO TEÓRICO

Con el fin de caracterizar de manera integral los patrones de circulación del GU, se propusieron escenarios de ENSO. A continuación, se presentan algunas generalidades sobre este fenómeno.

3.1 ENSO

El ENSO es un fenómeno a gran escala que se presenta en el Pacífico tropical. Tiene dos fases, positiva llamada Niño y negativa llamada Niña. Durante el Niño, las aguas del Pacífico ecuatorial en la costa este sufren un calentamiento anómalo que supera los índices de temperatura del océano en este lugar. Por el contrario, durante la Niña, las aguas sufren un enfriamiento anómalo. Asociado al ENSO está la Oscilación del Sur (OS), definida como el intercambio de masa atmosférica entre el hemisferio oriental y occidental en los trópicos. Se dice que están asociados y que el ENSO es la componente oceánica de comportamiento anómalo de la temperatura del océano y el OS su componente atmosférica. De acuerdo con Zambrano (1986) *“un evento ENSO es la interacción global océano-atmósfera que se produce por las variaciones de los vientos ecuatoriales que provocan cambios térmicos en la superficie del océano y en su circulación, afectando el calentamiento de la atmósfera tropical y consecuentemente la circulación atmosférica global”*.

Con el fin de estudiar los eventos Niño y Niña en el Pacífico tropical, la NOAA utiliza el Índice Oceánico del Niño (ONI). Este índice analiza los datos de anomalías de la Temperatura Superficial del Océano (SST, por sus siglas en inglés), calculando una media móvil de tres meses. De acuerdo con Golden Gate Weather Services (s.f), una anomalía positiva a partir de 0.5° se considera un evento Niño y una anomalía negativa a partir de 0.5° se define como Niña. El umbral de estos eventos se divide según la anomalía de SST en: débil (0.5° a 0.9°), moderado (1.0° a 1.4°), fuerte (1.5° a 1.9°) y muy fuerte (mayor o igual a 2.0°). Para que un evento se clasifique como débil, moderado, fuerte o muy fuerte, debe haber igualado o superado el umbral durante al menos 3 meses consecutivos.

Con el objetivo de caracterizar de manera integral los patrones de circulación del GU, se usó el modelo Regional Ocean Modelling System (ROMS). A continuación, una descripción del mismo.

3.2 Modelo numérico ROMS

Se utilizó el modelo ROMS en su versión Agrif (Adaptative Grid Refinement in Fortran). ROMS-Agrif 3.1.1 es un modelo numérico oceánico hidrostático, el cual puede ser integrado en 1, 2 o 3 dimensiones espaciales. El modelo utiliza coordenadas verticales Sigma (siguen la batimetría y la línea de costa) y es de amplio uso en la

actualidad. ROMS resuelve las ecuaciones de conservación de momentum para las componentes u y v conocidas como las ecuaciones primitivas. El detalle de estas ecuaciones puede ser consultado en Ocean model ROMS_AGRIF & Processing-tools ROMSTOOLS (2011) y se muestran a continuación:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \nabla(K_{Mh} \cdot \nabla u) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v - fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla(K_{Mh} \cdot \nabla v) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Donde, u es la componente de la velocidad en dirección x , v es la componente de la velocidad en dirección y , f es el parámetro de coriolis, ρ_0 es la densidad inicial, P es la presión, K_{Mh} es el coeficiente de difusión horizontal y K_{Mv} es el coeficiente de difusión vertical.

Con el fin de resolver las ecuaciones (1) y (2) se utiliza la aproximación hidrostática definida como:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \quad (3)$$

Donde, z es la coordenada vertical, ρ es la densidad y g es la gravedad.

Además, se utiliza la ecuación de continuidad definida como:

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

Donde, x , y son las coordenadas horizontales y w es la componente de la velocidad en dirección z .

Por último, utiliza la ecuación de estado:

$$\rho = \rho(S, T, p) \quad (5)$$

Donde, S es la salinidad, T es la temperatura y p es la profundidad.

Este modelo numérico incluye algoritmos numéricos precisos y eficientes, que permiten resolver de manera adecuada los procesos físicos. Tiene la capacidad de acoplarse a otros modelos numéricos como: modelos biogeoquímicos, (Powell *et al.*, 2006), modelos bio-ópticos (Bissett *et al.*, 1999) y modelos de sedimentos (Warner *et al.*, 2008) entre otros. ROMS-Agrif 3.1.1 permite la anidación de dominios con intercambio de información de una vía o doble vía, en el anidamiento de una vía, sólo la malla gruesa tiene la posibilidad de generar condiciones de contorno para la malla fina, y en dos vías, la malla gruesa le puede pasar información a la malla fina y

viceversa. Las ecuaciones se resuelven de forma simultánea para las mallas gruesa y fina.

Finalmente es de notar que en este trabajo se utilizó la versión CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity Model) de ROMS. Este sistema de modelación oceánica basado en ROMS-Agrif 3.1.1 cuenta con los mismos tipos de anidamiento, siendo estos una de las mayores ventajas frente a los modelos numéricos utilizados en el GU, permitiendo que procesos ocurridos en la malla gruesa tengan influencia en la malla fina. Por otra parte, los niveles sigma permiten apreciar el efecto de la batimetría sobre la circulación, y al igual que ROMS cuenta con parametrizaciones y esquemas de advección para resolver de forma precisa en tres dimensiones la circulación oceánica.

4. METODOLOGÍA

En este proyecto de investigación se implementó la modelación numérica como principal herramienta, utilizando el modelo de circulación ROMS-Agrif 3.1.1 en su versión CROCO. Para esto se corrió un caso anidado de tiempo variable para el periodo de 2010-2015 con las características que se mencionan a continuación.

4.1 Zona de estudio

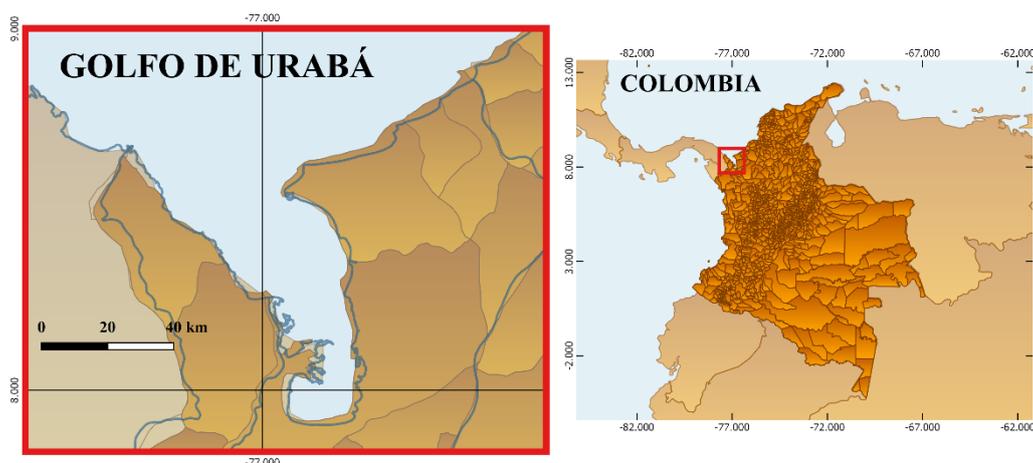


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

El modelo se implementó en el mar Caribe cercano al GU y dentro de él mismo (Figura 1). El GU, es un estuario ubicado en el extremo sur del Caribe colombiano. Según García (2007), entre sus principales características, se encuentran una línea de costa de 543 km, con un ancho que varía de 16 km y 49 km y una longitud axial (norte-sur) de 80 km. De acuerdo con Chevillot y Molina (1993), la batimetría del GU se caracteriza por profundidades promedio de 40 m, con profundidades someras (< 15 m) en la zona sur y mayores en su frontera abierta (hasta 80 m) con fondos lodosos y sedimentarios, producto de la fuerte carga de sedimentos aportada por los ríos Atrato, León, Turbo y Caimán. En cuanto al clima, los valores medios anuales de temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y cobertura de nubes son 27° C, 85 %, 2500 mm/año y 69,8 % respectivamente (García, 2007; Roldán, 2008; Montoya, 2010).

El GU es un estuario que presenta altas descargas de agua dulce debido a la desembocadura de ríos caudalosos ubicados principalmente en la zona centro-sur, donde el río Atrato es el mayor aportante de todos. De acuerdo con Velásquez y Guevara (2018), la presencia de los ríos en dicha zona, desarrolla una cuña salina propia de estuarios con baja salinidades en la superficie (2 ups) y aguas más salinas (35 ups) en las zonas profundas del GU.

4.1.1 Vientos

Los vientos en el GU presentan una variación bimodal que obedece al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) desarrollando dos épocas climáticas: época seca y época lluviosa (Velásquez, 2013). De acuerdo con Chevillot y Molina (1993), Roldán (2008) y Restrepo y López (2008), la época seca está comprendida entre los meses de diciembre y abril. Esta época está caracterizada por los vientos alisios provenientes del norte con promedios de velocidad de 4 ms^{-1} , que pueden alcanzar valores picos superiores a 9 ms^{-1} . Por otro lado, la época lluviosa está comprendida entre los meses de mayo y noviembre está caracterizada por variaciones en la dirección de los vientos, con predominio de los vientos provenientes del sur, con velocidades máximas de hasta 2 ms^{-1} .

4.1.2 Circulación oceánica

Molina *et al.* (1992) y Chevillot *et al.* (1993), describieron la circulación de la masa de agua en el GU en dos épocas del año: época seca y húmeda. La primera fue caracterizada con vientos alisios de alta intensidad soplando desde el norte, los cuales al parecer confinan las aguas superficiales en el sur del GU. En la época húmeda, los resultados mostraron vientos de menor intensidad soplando desde el sur, los cuales permiten un intercambio de aguas del centro-sur del GU con el océano abierto. Lonin y Vásquez (2005), mencionan que la capa superficial depende del caudal descargado por los ríos y que la capa inferior depende de la corriente proveniente del Caribe en dirección del GU.

Roldán (2008) evidenció que la circulación en Bahía Colombia (sur del GU) en la época húmeda está caracterizada por la presencia de dos vórtices, uno anticiclónico ubicado al occidente y el otro ciclónico al oriente. En la época seca, la circulación superficial se caracteriza por corrientes en sentido norte-sur, las cuales son evacuadas a través de una contracorriente profunda hacia el norte que se extiende por todo el dominio del GU en profundidades mayores a 4 m. Montoya (2010) utilizó el modelo ELCOM y lo forzó con campos de viento, marea y la descarga del río Atrato. Sus resultados sugieren que la capa oceánica que se encuentra arriba de los 4 m de profundidad posee una fuerte influencia del río en la zona centro y noreste del GU. Estos autores, además, describieron los dos patrones principales de circulación, el primero cuando los vientos vienen del sur o sureste y la circulación es hacia el norte o noreste. El segundo cuando los vientos son del norte, noreste o son débiles, la circulación va en dirección en dirección de Bahía Colombia. De acuerdo con Montoya (2010), el comportamiento bimodal de los vientos y las descargas de los ríos, generan una circulación de tipo estuarino, con agua dulce saliendo por la parte superior y agua salada entrando por la parte inferior.

Escobar (2011) utilizando el modelo numérico Delft3D, encontró que el río y las corrientes de densidad son las que modulan la circulación en el golfo, y que los demás procesos físicos como la marea, el oleaje y el viento, toman relevancia sólo bajo ciertos escenarios. Velásquez (2013) propone que en la época húmeda el caudal de los ríos Atrato y León dominan la circulación generando corrientes en dirección principalmente hacia el norte. Este mismo autor, sugiere que en la época seca las corrientes superficiales tienen una dirección, predominantemente hacia el sur, generando altas concentraciones de sedimentos en Bahía Colombia.

Finalmente, Escobar *et al.* (2015) analizó las corrientes de forma integral al incluir la influencia de diferentes forzadores como la marea, el oleaje, condiciones atmosféricas, las descargas de los ríos y los gradientes de densidad en la circulación del GU. El estudio combinado de la modelación numérica y mediciones *in situ*, reveló un patrón complejo de circulación dominado por una circulación estuarina típica, con flujos promedios en tres capas e incluso con circulación inversa de acuerdo a las épocas climáticas del año.

4.2 Bases de datos

A continuación, se presentan la información de las bases de datos utilizadas en la implementación del modelo ROMS.

4.2.1 Batimetría

Se utilizó información de batimetría proveniente de dos fuentes de datos. Para la malla gruesa se utilizó la base de datos Etopo2 (<https://sos.noaa.gov/datasets/etopo2-topography-and-bathymetry-natural-colors/>) con una resolución espacial de 2 arc minutos. Para la malla fina se usó la batimetría de la carta náutica 412 (<https://www.cioh.org.co/index.php/cartas-nauticas.html>) con una resolución promedio de 0.06 arc minutos (Figura 2).

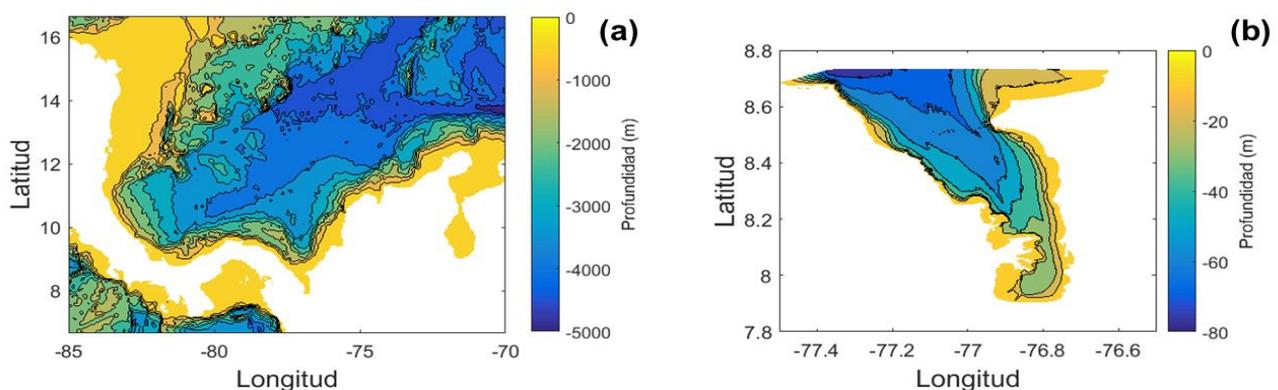


Figura 2. Batimetrías utilizadas. a) malla gruesa y b) malla fina.

4.2.2 Vientos

Se recopiló la información de magnitud y dirección del viento a 10 m de altura proveniente de bases de datos de acceso libre. Se utilizó la base de datos ERA5 (<http://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>) teniendo en cuenta que tiene una alta resolución temporal. Esta información fue facilitada por el Dr. Julien Jouanno del instituto LEGOS-Observatoire Midi-Pyrénées de Francia quien colaboró en el desarrollo de este trabajo. Los datos de ERA5 son relativamente nuevos y por lo tanto son un producto no validado, por ello, se analizaron y compararon dos bases de datos de reanálisis validadas (CCMP V2 y ERA-Interim).

Con el fin de realizar una comparación adecuada, se graficaron rosas de viento, series de tiempo diarias multianuales y gráficos de dispersión. Estas comparaciones permitieron establecer una similitud de las dos bases de datos mencionadas y ERA5. En la Tabla 1 se muestran las principales características de las tres bases de datos. Las comparaciones se realizaron en cuatro puntos distribuidos al interior del GU como se aprecia en la figura 3. En la figura 4 se muestran las series de tiempo analizadas para cada punto de la figura 3. Las gráficas de dispersión se pueden consultar en el anexo A.

Tabla 1. Principales características de las bases de datos analizadas.

Bases de datos	Serie de tiempo	Resolución espacial	Resolución temporal
ERA-Interim	2010-2015	0.25°	6 horas
CCMP V2	2010-2015	0.25°	6 horas
ERA5	2010-2015	0.30°	1 hora

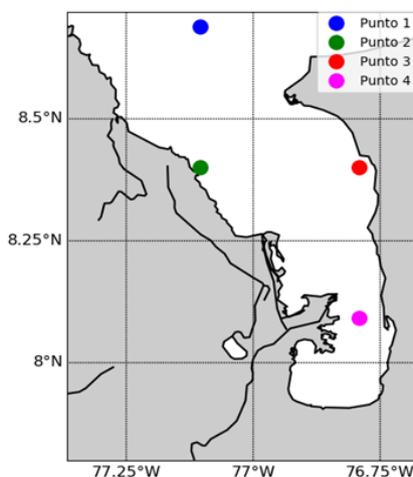


Figura 3. Ubicación geográfica de los puntos analizados para comparación de las bases de datos de vientos.

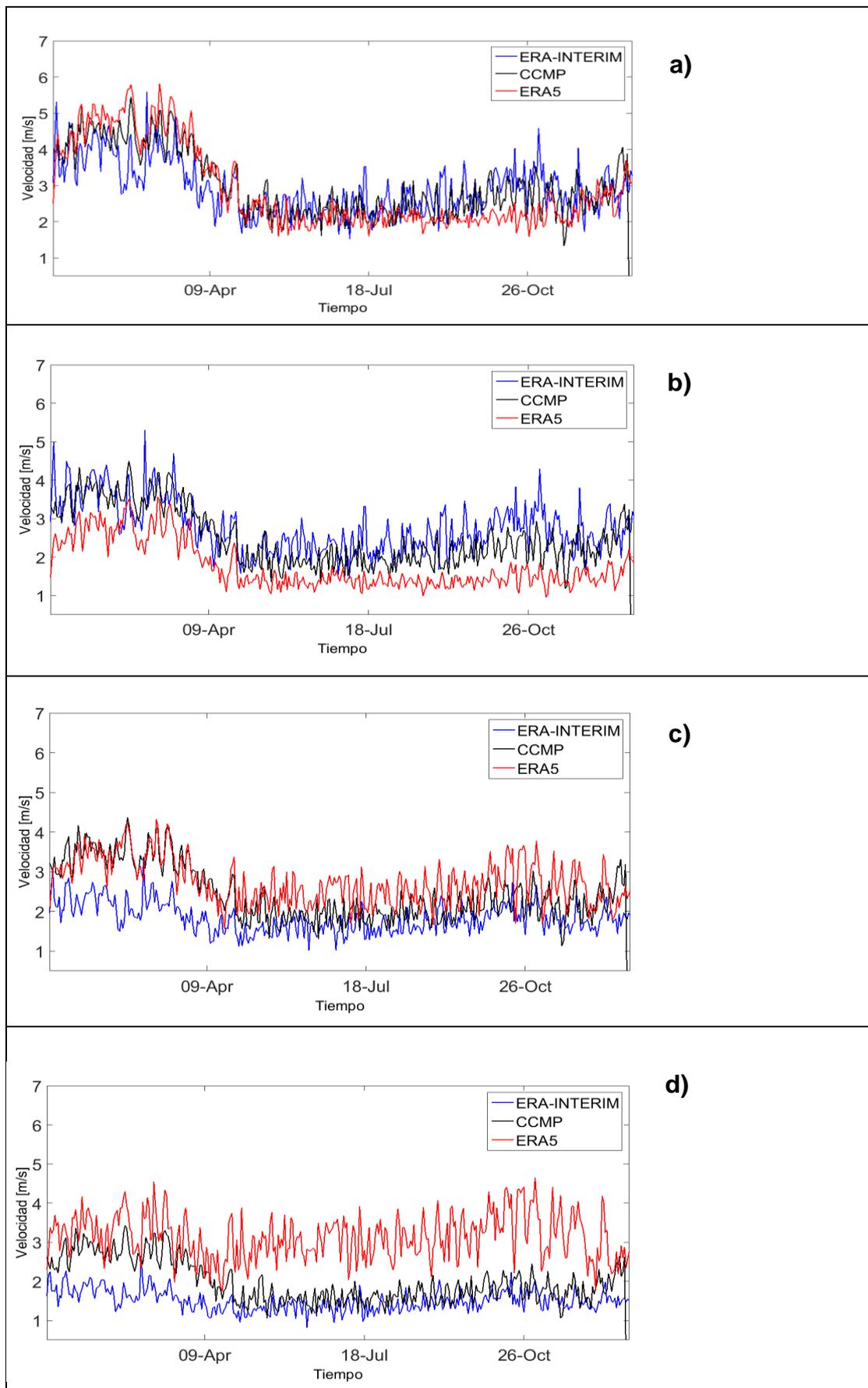


Figura 4. Series de tiempo diaria multianual comparando las tres bases de datos, la línea azul describe a ERA-INTERIM, la línea negra a CCMP y la línea roja a ERA5. Donde, a) punto 1 de la figura 4; b) punto 2 de la figura 4; c) punto 3 de la figura 4; d) punto 4 de la figura 4.

Los resultados sugieren una similitud entre los datos de ERA5 y CCMP, mientras que la comparación entre ERA5 y ERA-Interim sugieren valores similares en el punto 1, una sobrestimación de ERA5 en el punto 2 y subestimación de los datos de ERA5 en el punto 3 y 4. Las diferencias encontradas entre ERA5 y ERA-Interim tienen que ver probablemente con la ubicación en océano abierto, donde los datos son más confiables. Al parecer al interior del GU la geomorfología podría estar influyendo en las diferencias de estas dos bases de datos. Esta comparación no se hizo con el fin de validar una base de datos como ERA5, se hizo para obtener valores promedio del viento en el GU. Trabajos futuros deberán incluir comparación de series de viento de ERA5 y datos *in situ*.

4.2.3 Condiciones iniciales y de frontera

Con el fin de forzar el modelo en aguas oceánicas, se usaron datos de salinidad y temperatura de la base de datos GLORYS2 V3 (Global Ocean Reanalysis and Simulation). De ERA5 se obtuvieron datos de radiación de onda corta, radiación de onda larga, precipitación total, temperatura y humedad a 2 m sobre el nivel del mar. Los flujos como esfuerzo del viento, calor latente y sensible, radiación de onda corta emitida, y evaporación se calcularon en el modelo a partir de las variables de ERA5. En la Tabla 2 se presentan las principales características de las bases de datos que se usaron para forzar el modelo numérico ROMS.

Tabla 2. Bases de datos utilizadas para forzar el modelo ROMS.

Bases de datos	Tiempo de registro	Resolución espacial	Resolución temporal	Variables extraídas
ETOPO2	2006	0.03°	N.A.	Batimetría
Carta Náutica	2009	0.001°	N.A.	Batimetría
ERA5	1979-presente	0.3°	horaria	Velocidad de la componente zonal (u10) y meridional del viento (v10), radiación de onda corta, radiación de onda larga, precipitación, temperatura a 2m, humedad a 2m
MERCATOR Glorys2 V3	1992-2012	0.25°	diaria	Salinidad y temperatura

4.3 Mallas de cálculo

En la implementación del modelo se usó un anidamiento, que consiste en una superposición de mallas. La malla de cálculo exterior (malla gruesa) se diseñó de tal manera que la zona de estudio del GU quedará contenida en una región extensa del Caribe. La malla gruesa se encuentra entre las latitudes 7.7° N a 10.7° N y las longitudes -79° W a -75° W, con una resolución espacial de 0.02° (Figura 5-A). La malla de cálculo interna (malla fina), se diseñó para que contuviera el GU. La malla fina está delimitada por las latitudes 7.87° N a 8.72° N y las longitudes -77.36° W a -76.67° W con una resolución espacial de 0.005° (Figura 5-B).

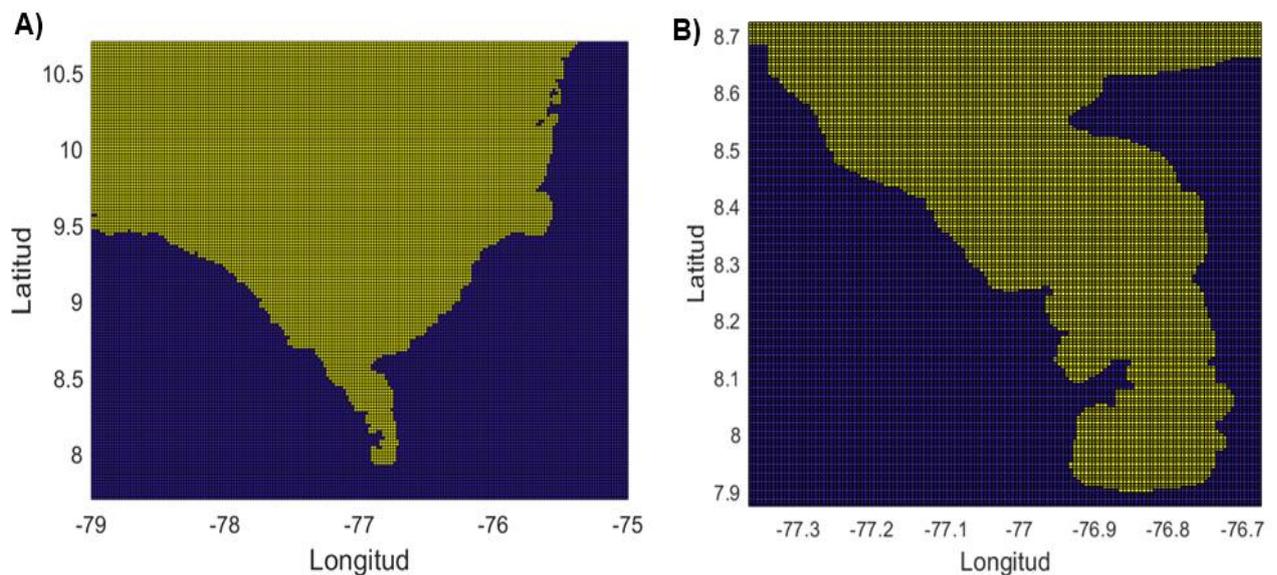


Figura 5. Mallas de cálculo utilizadas en la modelación: A) malla gruesa; B) malla fina.

Con el fin de tener una resolución detallada en la vertical, el modelo utiliza coordenadas sigma. Estas coordenadas dividen la capa de agua en la cantidad de niveles determinados siguiendo el contorno de la batimetría y la línea de costa. En este estudio se utilizaron 32 niveles sigma con parámetros de discretización en superficie $\theta_s=7$ y en el fondo $\theta_b=2$. Estos parámetros permiten una distribución de los niveles sigma en la columna de agua, el valor de θ_s es mayor al de θ_b , ya que, se espera tener una mejor representación de los procesos presentes en la superficie.

4.4 Forzadores

4.4.1 Viento

Los vientos de ERA5 fueron analizados teniendo en cuenta los cuatro trimestres del año (los cuales coinciden de manera general con las épocas climática) y bajo escenarios del fenómeno ENSO. De esta manera se analizaron eventos atmosféricos

de alta y baja frecuencia tomando. En el caso del ENSO, dentro del periodo de tiempo modelado (2010-2015), se tomó el año Niño, Niña y Neutro (año con condiciones muy débiles de Niño y/o Niña) con base en la información del centro de predicción del clima de la NOAA (s.f). La NOAA (ver anexo B) determinó, dentro del periodo de tiempo mencionado, que el año Niño más intenso fue en 2015, el año Niña el 2011 y el año Neutro el 2013.

Se analizaron los datos de magnitud del viento de ERA5 en los cuatro sitios de la Figura 3. La Figura 6 muestra series de tiempo de vientos con promedios mensuales en los cuatro puntos propuestos en la Figura 3, de los años 2010 al 2015, señalando con las líneas discontinuas los valores máximos de la magnitud del viento en los años Niño y Niña. Los resultados sugieren que en el año 2011 se encuentren los vientos de menor intensidad y los de mayor intensidad en el 2015, lo cual concuerda con las características del fenómeno ENSO expuesta en la sección 3.2 del presente trabajo

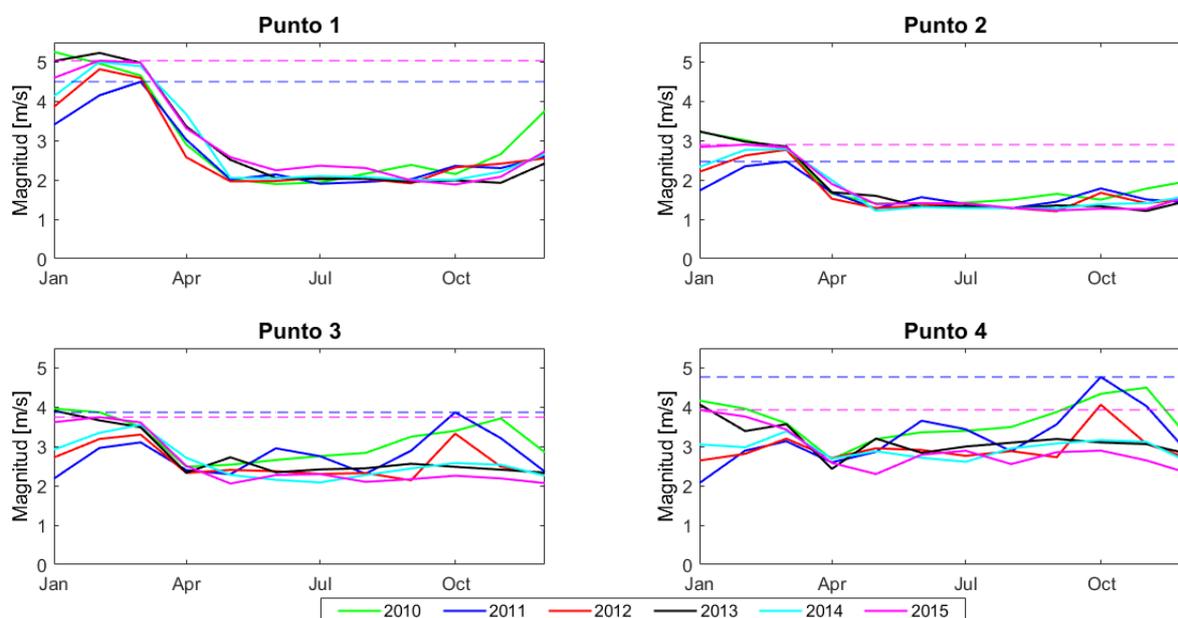


Figura 6. Series de tiempo de promedios mensuales de la velocidad del viento en los cuatro (4) puntos especificados en la figura 3, se especifican con la línea discontinua los valores máximos de velocidad del viento para los años Niño y Niña.

4.4.2 Descarga fluvial

El caudal del río Atrato es considerado como una de las descargas de aguas más importante provenientes del continente al golfo (García 2007). Este caudal se ramifica en siete brazos principales, de los cuales cuatro son los principales y que finalmente desembocan en el GU (Figura 7A). Para efectos de este estudio, se consideraron los valores promedios de los caudales máximos mensuales del río Atrato

registrados por la estación Bellavista (código IDEAM 11077010) y de la cual se tiene información diaria del caudal (Figura 7B).

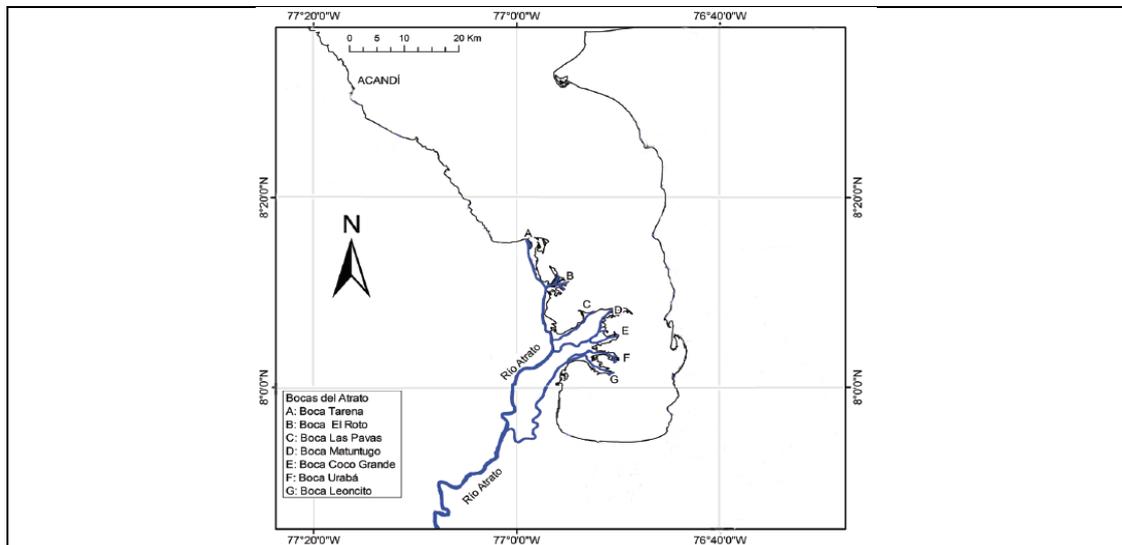


Figura 7A. Bocas del río Atrato sobre el Golfo de Urabá. Editado de Escobar (2011).

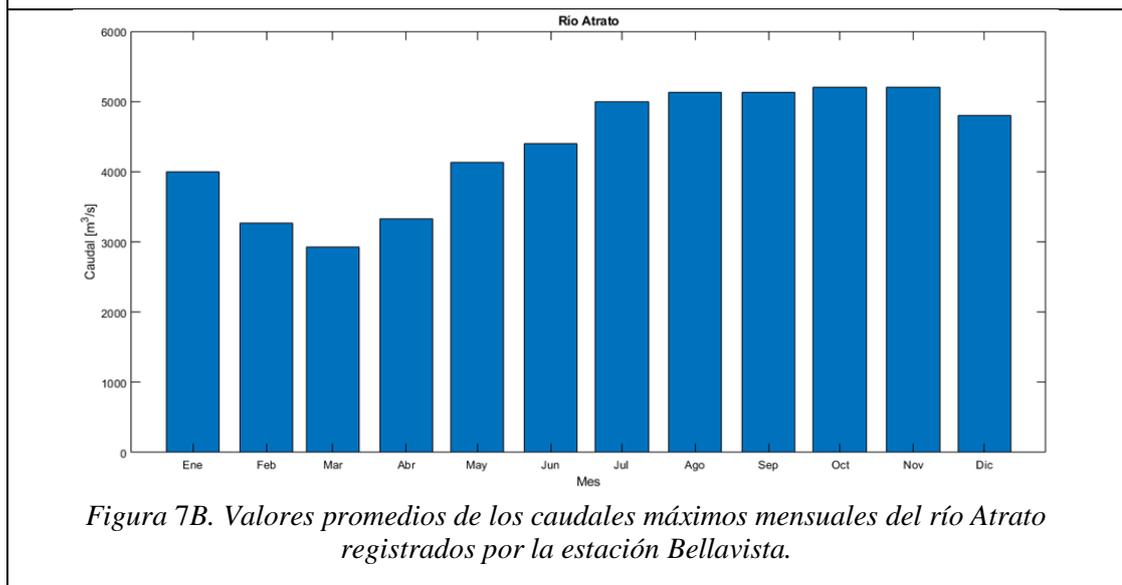


Figura 7B. Valores promedio de los caudales máximos mensuales del río Atrato registrados por la estación Bellavista.

De acuerdo con las consideraciones de Roldán (2008), el valor del caudal total del Atrato se redistribuye en cuatro brazos (o bocas) los cuales son: El Roto, Matuntugo, Coco Grande y Leoncito. De acuerdo con esta autora, los porcentajes de caudal que salen por cada boca son 65 %, 15 %, 5 % y 15 % respectivamente. De acuerdo con lo anterior, el ciclo anual de los caudales máximos en cada una de las bocas se observa en la Figura 8. En este trabajo se supone que el caudal del río León no modula de manera significativa el patrón de corrientes en el GU.

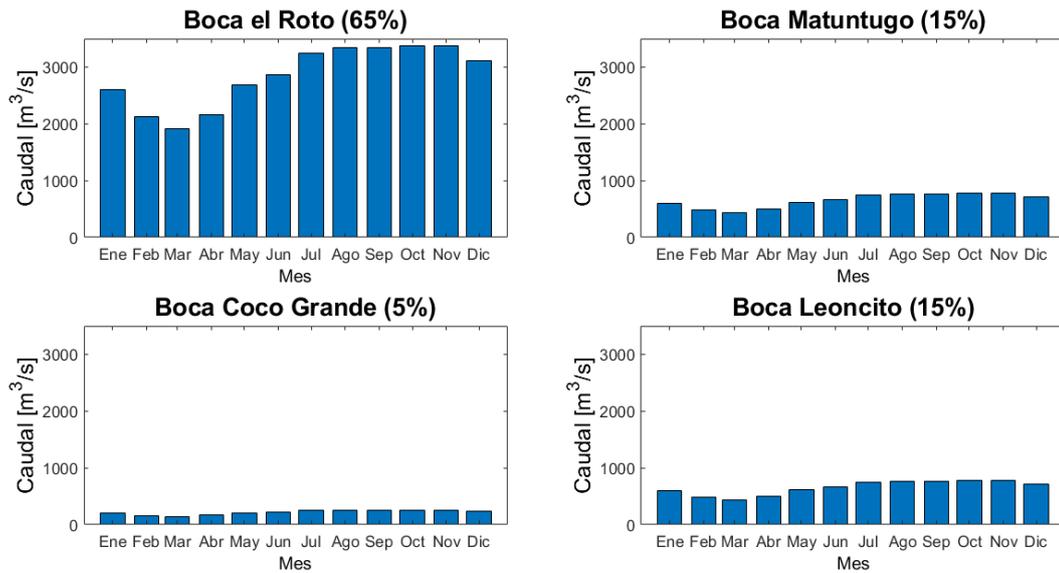


Figura 8. Ciclo anual de valores promedio de caudales máximos del río Atrato distribuido en las cuatro bocas consideradas.

En la malla gruesa se usaron cuatro nodos para ubicar la descarga de las cuatro bocas principales consideradas en este estudio. La variación mensual de los caudales y ubicación de estos cuatro puntos sobre la malla se puede ver detalladamente en el Anexo C. En la malla fina se usaron nueve nodos para ubicar la descarga del caudal de las cuatro bocas principales consideradas en este estudio. La variación mensual de caudales y ubicación de estos nueve puntos sobre la malla se puede ver detalladamente en el Anexo D.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó una interpolación de los campos de viento de ERA5 en una malla con resolución de 0.005° calculado usando los programas de interpolación asociados a la herramienta CROCO Tools [®]. En la figura 9 se muestran los campos de vientos para los años 2011-Niña, 2013-Neutro, 2015-Niño según la clasificación de la NOAA, en promedios trimestrales para cada año. En los resultados de este trabajo los trimestres que ilustra la época seca son EFM (Enero-Febrero-Marzo), la época húmeda JAS (Julio-Agosto-Septiembre), y las épocas de transición AMJ (Abril-Mayo-Junio) y OND (Octubre-Noviembre-Diciembre).

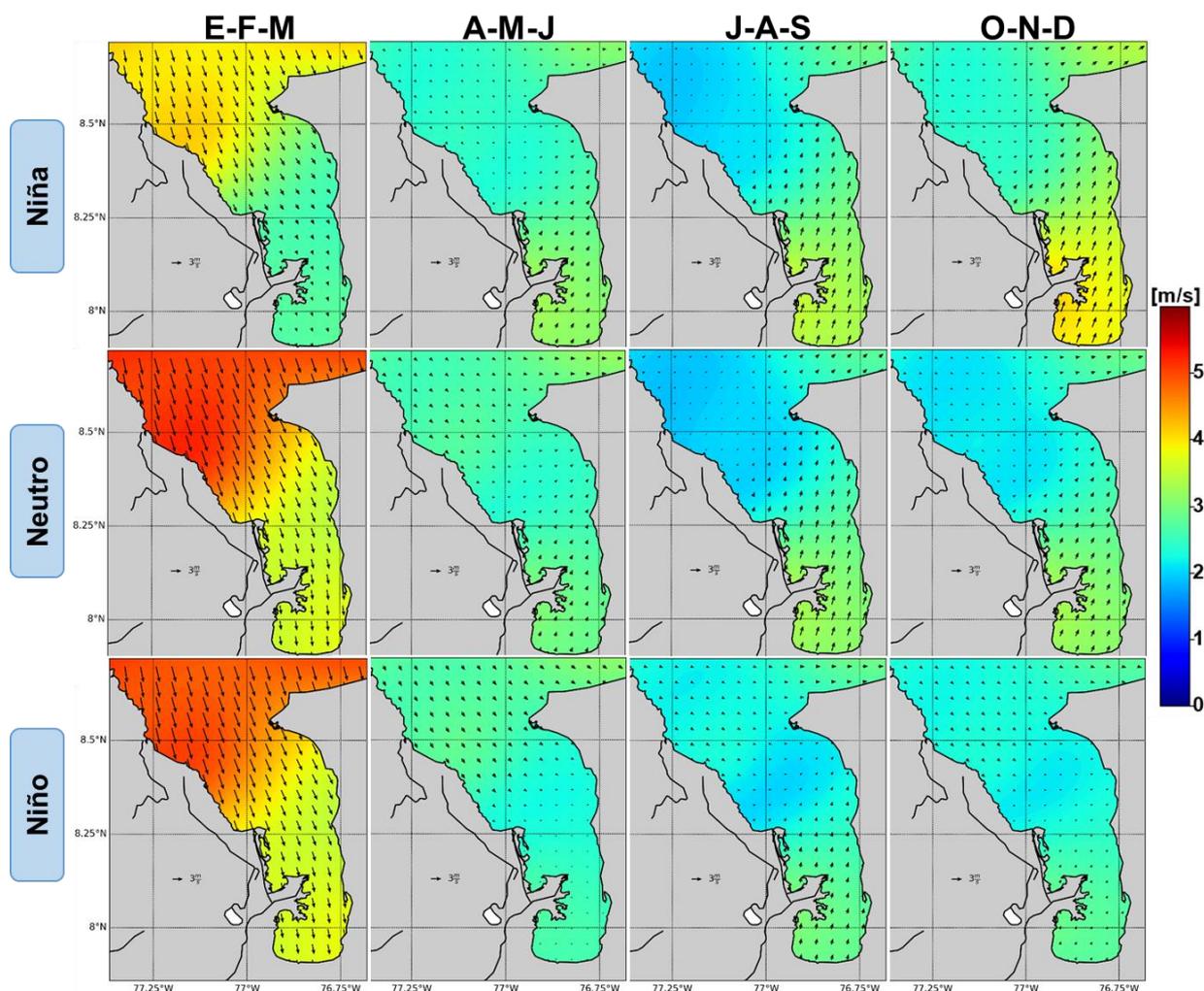


Figura 9. Campos de vientos trimestrales para año Niña (2011), Neutro (2013) y Niña (2015).

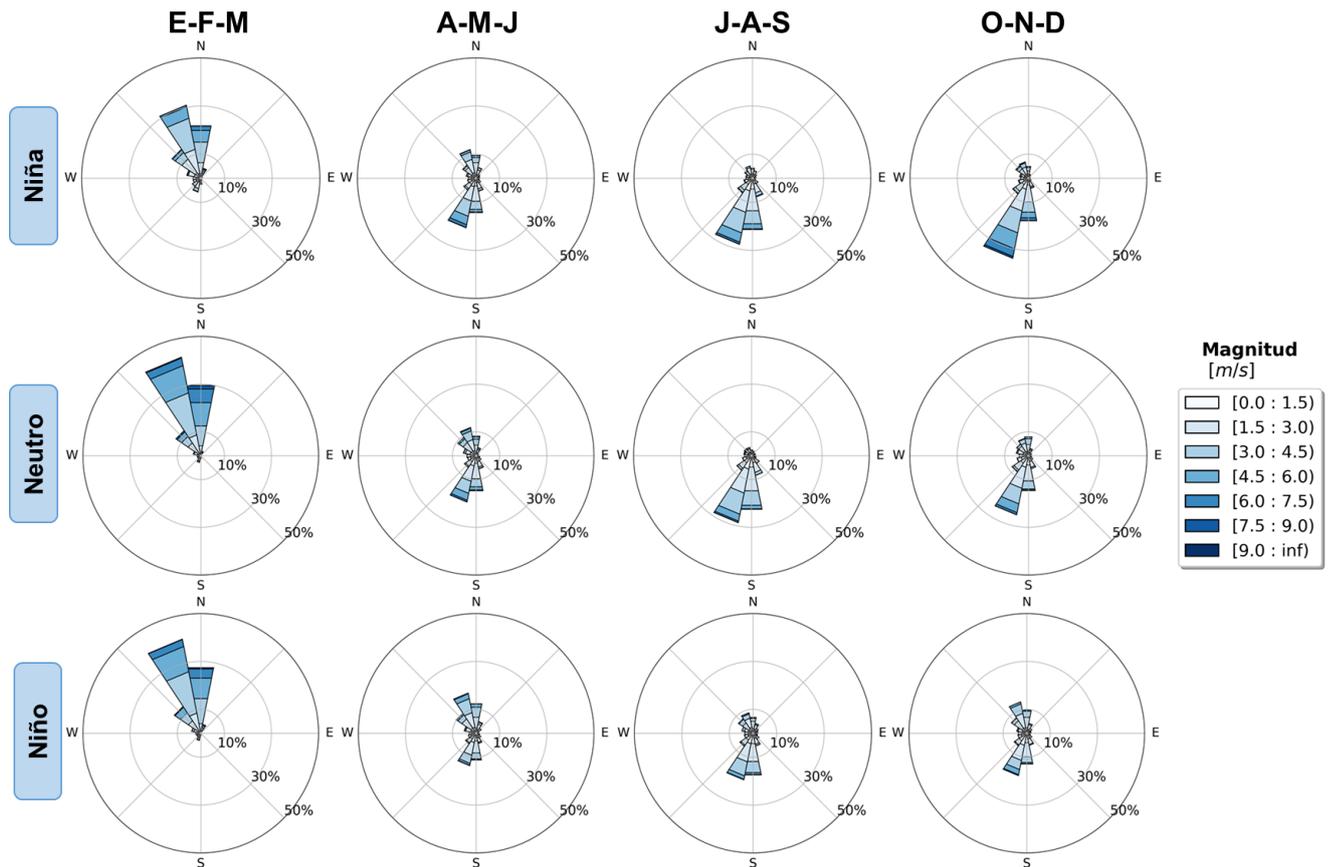


Figura 10. Rosas de vientos trimestrales para año Niña (2011), Neutro (2013) y Niña (2015) para el campo de viento promedio.

En la Figura 9 se muestran los campos de viento promedio para el GU, y en la Figura 10, las rosas de viento para todo el campo de viento analizado. De manera general, en las Figura 9 y 10 se evidencian un patrón bimodal de vientos en el GU. En la Figura 9 los resultados sugieren que en el primer trimestre se presentan los vientos de mayor magnitud los cuales provienen del norte y del noroeste debido al paso de los vientos Alisios. En el segundo trimestre, un periodo de transición de seca a húmeda, existe una influencia de los vientos del norte y noroeste y se empiezan a registrar vientos del sur. En el tercer trimestre (época húmeda) se evidencian los vientos de menor intensidad en dirección sur-norte. Finalmente, en el cuarto trimestre se observa de nuevo una época de transición, de húmeda a seca, donde los vientos que vienen del sur tienen la mayor intensidad, a pesar que se registran vientos del norte y noroeste. De acuerdo con estos resultados, el año Niño y el Neutro tienen características similares en el GU. De acuerdo con lo anterior, en adelante los análisis de las corrientes solo tendrán en cuenta el año Niña y Niño.

Considerando la posible influencia del ENSO, se planteó la hipótesis que, en el año Niño, se presentan los vientos con mayor magnitud y durante la Niña los vientos más débiles. Los patrones de viento mostrados en la Figura 9 sugieren comportamientos diferenciados entre la zona norte, centro y sur del GU. Esto coincide con los resultados obtenidos en la Figura 6.

Por lo tanto, proponemos que en materia de circulación el golfo debe estudiarse dividido en tres zonas: norte, centro y sur (Figura 11). Los resultados obtenidos en los campos de corrientes sugieren que el ENSO no tiene una influencia considerable al interior del GU, y que al parecer en estas zonas dominan los fenómenos locales como la descarga de ríos, la batimetría y fenómenos atmosféricos.

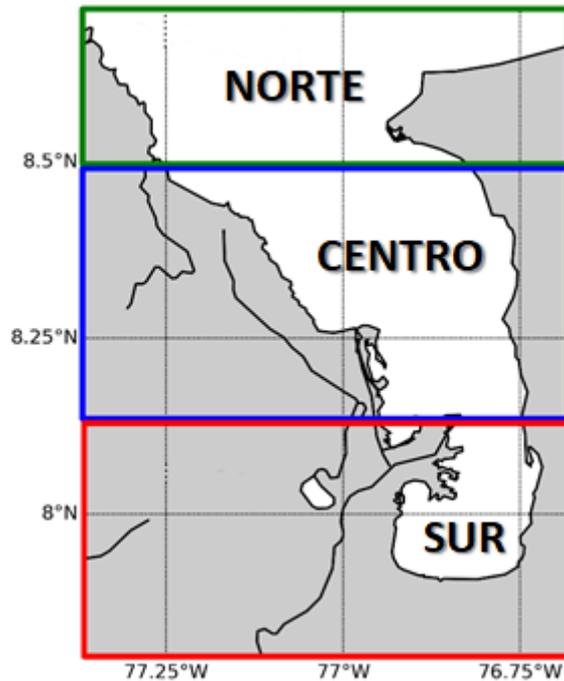


Figura 11. Delimitación de las zonas tres zonas en las que se realizó el análisis de los resultados de la circulación para el Golfo de Urabá.

En las figuras 12 y 13 se observan, por trimestres, los campos de corrientes superficiales y la salinidad. En general los resultados sugieren que los patrones de circulación son similares para el año Niño y Niña, y solo cambian los valores de su magnitud. Además, se observa como la dirección predominante de las corrientes superficiales en gran parte del GU es sur-norte, de manera específica en la costa este.

En el primer trimestre (EFM), en general, se observaron las menores magnitudes de la corriente superficial en comparación con las demás épocas. Se observó una mayor coincidencia en los patrones de circulación-vientos en los lugares donde las magnitudes de viento son mayores. En la zona norte se observa como la corriente superficial sale por la costa este y entra por la costa oeste. En la zona centro y sur no se encontró un patrón definido de la circulación. Esto es probablemente debido a la diferencia entre la dirección del viento y del flujo del río Atrato. En estas zonas se presentan las corrientes más débiles (entre 0 ms^{-1} y 0.1 ms^{-1}). Por otra parte, en la zona sur, predominan las corrientes que van hacia el sur confinado las aguas del golfo en bahía Colombia.

En el segundo trimestre (AMJ), se observa como la corriente superficial entra por la costa oeste, aunque prevalecen las corrientes que salen del GU principalmente por la costa este, debido a que en este trimestre los vientos comienzan a cambiar su dirección hacia el norte, pero con cierta influencia de los vientos que se dirigen al sur. En esta época se empieza a evidenciar como aumenta la salinidad en la zona sur y centro en el golfo.

Ahora bien, en el tercer trimestre (JAS), el esfuerzo de la dirección del viento está en la misma dirección de la descarga del río (sur-norte) y por lo tanto la mayor parte de la corriente superficial sale del golfo. En el cuarto trimestre (OND) se evidenció el mismo patrón de circulación que en JAS, pero con magnitudes superiores en la velocidad de la corriente y aguas con un psu más elevado.

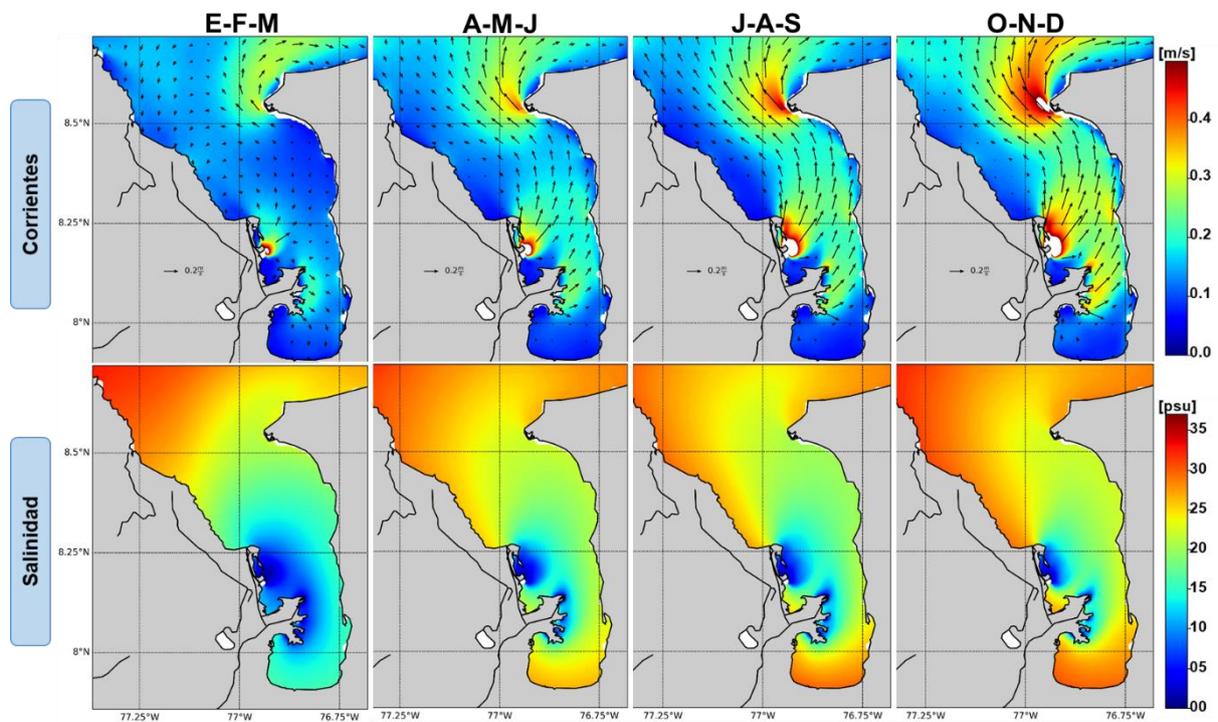


Figura 12. Campos de Corrientes y salinidad superficiales para año Niña.

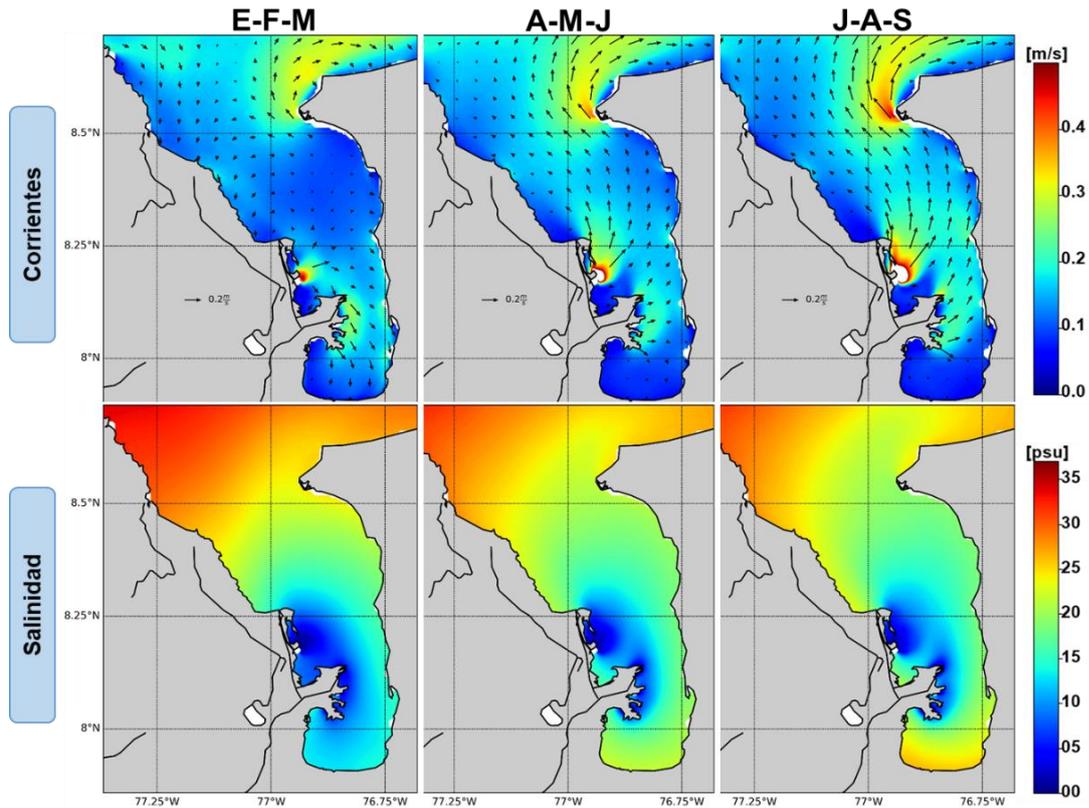


Figura 13. Campos de Corrientes y salinidad superficiales para año Niño.

Respecto a la salinidad, en las figuras 12 y 13 se evidencia que a pesar de los grandes aportes del río Atrato, en la medida que la dirección del viento es en dirección sur-norte aumentan los valores de salinidad en la zona sur y centro del GU (entre 0 y 20 ups). Esto se debe a que el viento está en fase con la descarga del río, lo que aumenta la velocidad de la corriente sur-norte en superficie. Estas aguas salen hacia el Caribe, y por lo tanto para que haya equilibrio las aguas superficiales son reemplazadas por aguas intermedias con mayor salinidad. Además, cabe resaltar que se utilizaron caudales máximos promedios multianuales (no hay variación interanual) y esto eventualmente podría cambiar si se incluyen las variaciones interanuales de los datos de caudales.

Con el fin de caracterizar la circulación interna del GU, se analizaron los campos de corrientes a 3 m (figura 14), 4 m (figura 15), 6 m (figura 16) y 10 m (figura 17) de profundidad, para cada uno de los trimestres. Debido a las similitudes encontradas en los patrones de circulación a profundidad entre los años Niño y Niña, solo se presentan los resultados para este último.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidencia que el viento modula la circulación principalmente hasta los cuatro metros de profundidad. La figura 14 sugiere que, a 3 m de profundidad existe una influencia débil del viento (principalmente en la zona norte), evidenciado por la dirección que es predominante sur-norte y modulada por la dirección del flujo del río. A 4 m de profundidad (figura 15) ya se empieza a ver la influencia de la circulación incidente del Caribe en el lado oeste del GU.

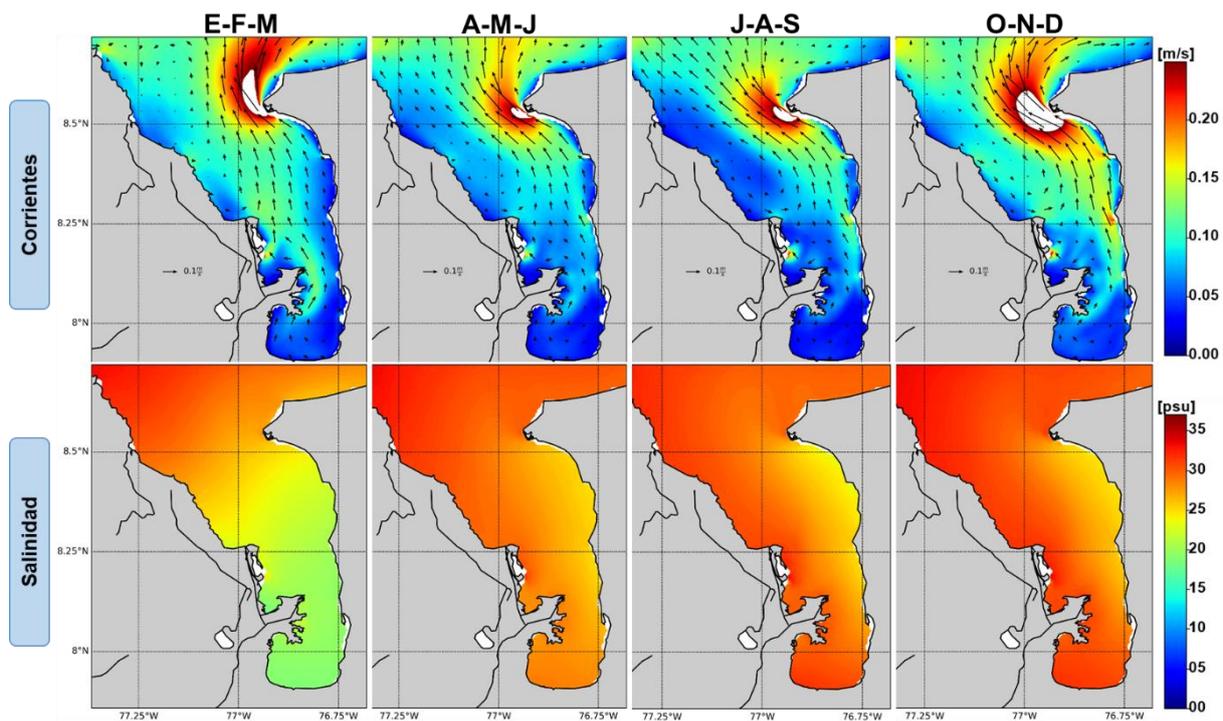


Figura 14. Campos de corrientes y salinidad para a 3 m de profundidad. Año Niña.

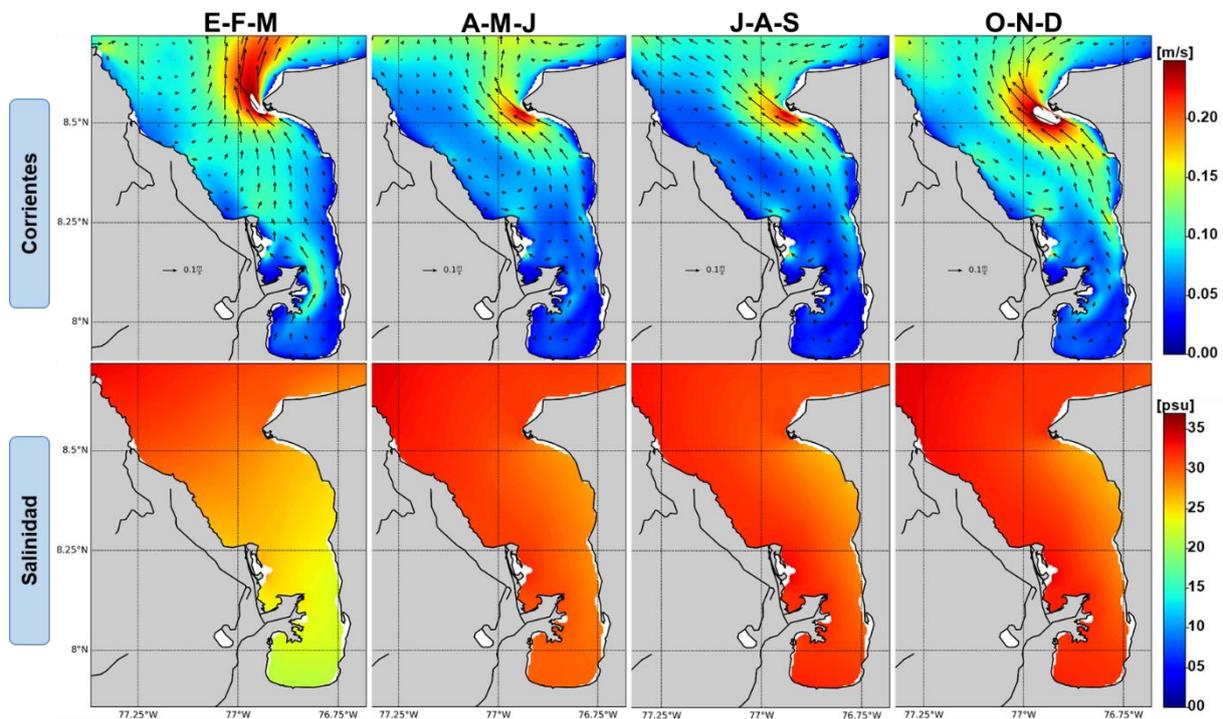


Figura 15. Campos de corrientes y salinidad para a 4 m de profundidad. Año Niña.

Luego, a 6 m de profundidad (figura 17), en general, se evidencia una influencia de las aguas del Caribe entrando por el norte. Aunque en la costa este la dirección de la corriente se mantiene en dirección sur-norte. Esta diferencia de direcciones forma un corte de velocidades que podría estar formando remolinos al interior del golfo en

los 3 últimos trimestres. Por último, a 10 m de profundidad es claro como la circulación está dominada por la corriente incidente del Caribe (formando remolinos) y probablemente por la contracorriente Panamá-Colombia, sobre todo en el primer trimestre (figura 17).

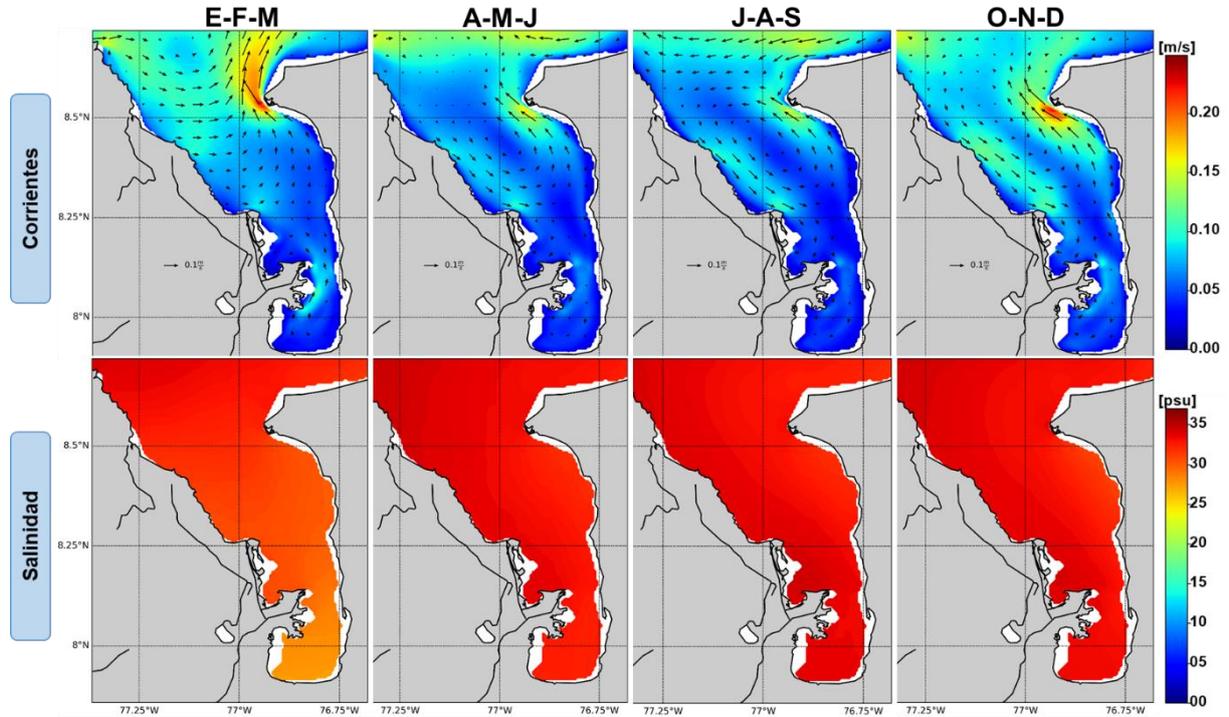


Figura 16. Campos de corrientes y salinidad para a 6 m de profundidad. Año Niña.

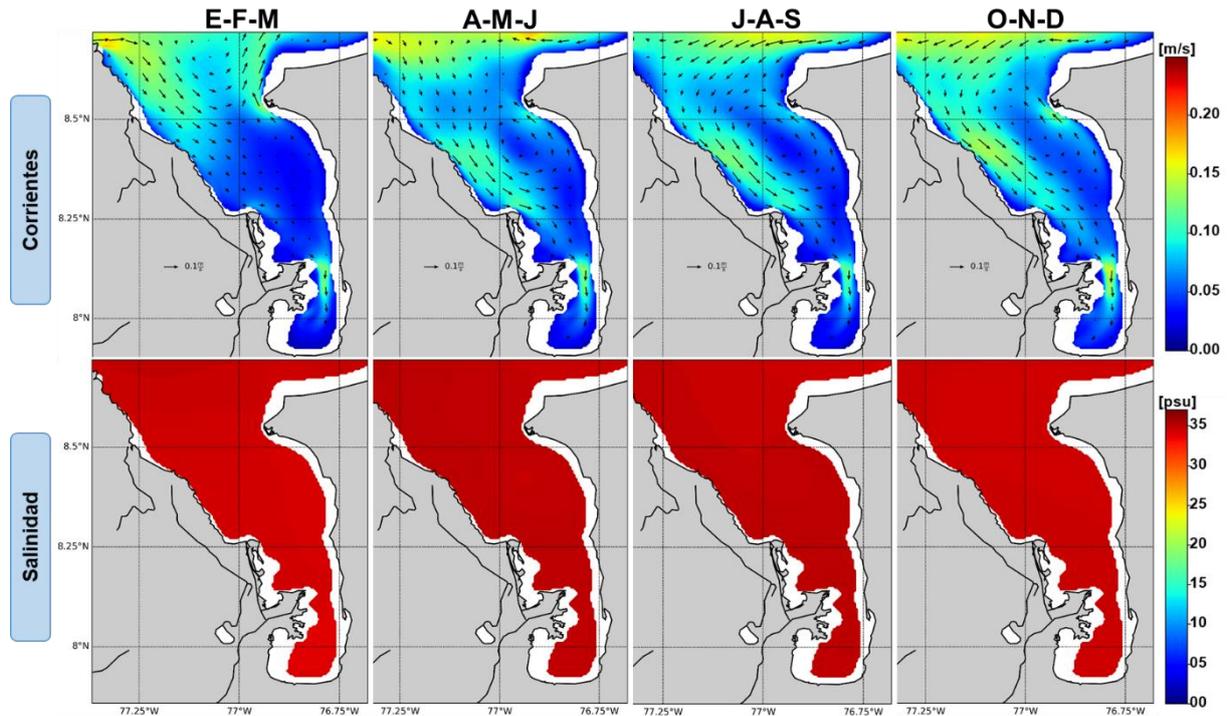


Figura 17. Campos de corrientes y salinidad para a 10 m de profundidad. Año Niña.

Respecto a los valores de la salinidad, se observa cómo entre los 3 m y 4 m de profundidad se encuentran aguas con valores intermedios entre 10 ups y 20 ups, probablemente asociados a la haloclina. En las capas inferiores a los 6 m, se observa un incremento del valor de la salinidad, lo cual evidencia una fuerte influencia de aguas provenientes del Caribe.

Con el fin de caracterizar de una mejor manera el patrón de circulación en las capas internas de GU, se graficaron tres transectos este-oeste, ubicados en la zona norte (línea verde), centro (línea azul) y sur (línea roja) del GU como se muestra en la figura 18. De acuerdo a los resultados obtenidos hasta este momento, la mayor variabilidad de la corriente se presenta en el sentido sur-norte. Por lo tanto, en las figuras 19, 20, 21, 22, 23 y 24 se presentan los transectos verticales de la componente meridional (v) de la velocidad de la corriente. Las magnitudes positivas representan la corriente saliendo del golfo o en dirección sur-norte y las magnitudes negativas indican corrientes entrando al golfo.

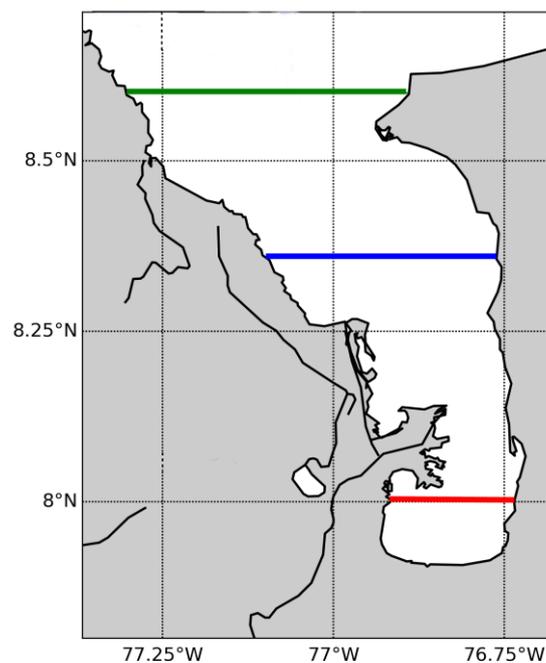


Figura 18. Ubicación de los transectos en la zona norte (verde), centro (azul) y sur (rojo) del GU.

En las figuras 19 y 20 se observan los transectos de la zona norte para los escenarios Niña y Niño respectivamente. En el trimestre EFM se observa un corte de velocidades entre la costa este (saliendo) y oeste (entrando), relacionado con corrientes inducidas por el viento y la descarga de los ríos al interior del GU. En los demás trimestres, se observa que, cuando la dirección del viento es sur-norte, el flujo que sale del GU por el lado este es más superficial y ocupa gran parte del ancho del GU. El agua que entra al GU lo hace principalmente por las capas intermedias en todo el ancho del golfo.

Respecto a la salinidad, las figuras 19 y 20 muestran como en la zona norte al haber mayor contacto con el Caribe, el agua dulce del interior del GU solo se observa en las capas superficiales y recostada a la costa este. En el resto de los transectos la salinidad tiene valores casi homogéneos y superiores a 30 ups, lo cual sugiere una fuerte influencia del mar Caribe. Respecto a los escenarios Niña y Niño, los resultados muestran como los patrones se conservan, aunque la Niña presenta en general magnitudes de hasta 0.35 ms^{-1} , casi el triple respecto al Niño.

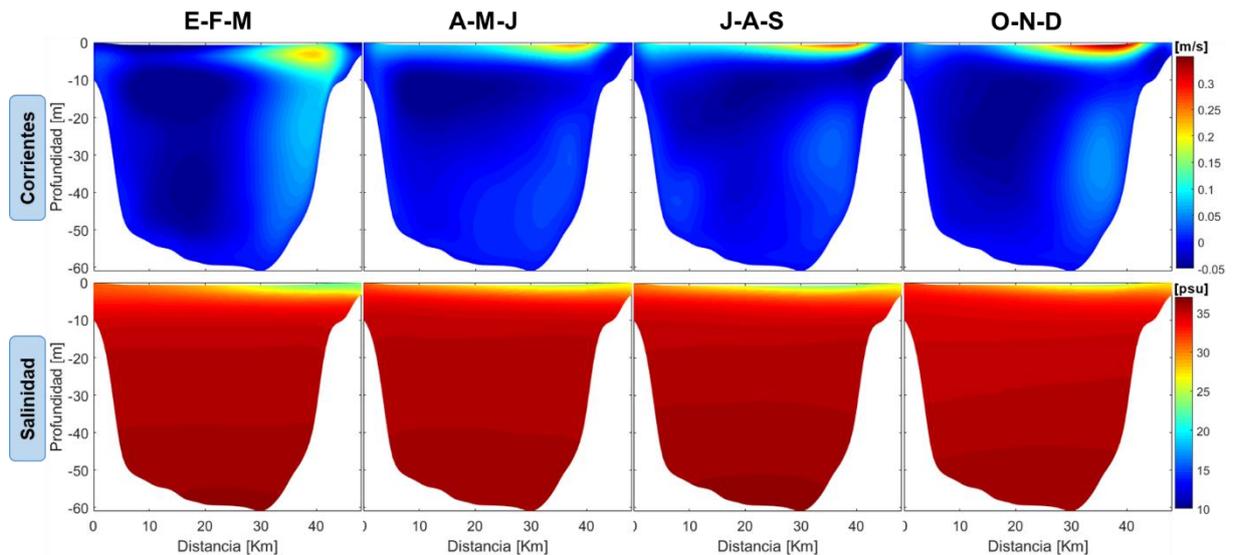


Figura 19. Transecto de la zona norte (línea verde, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

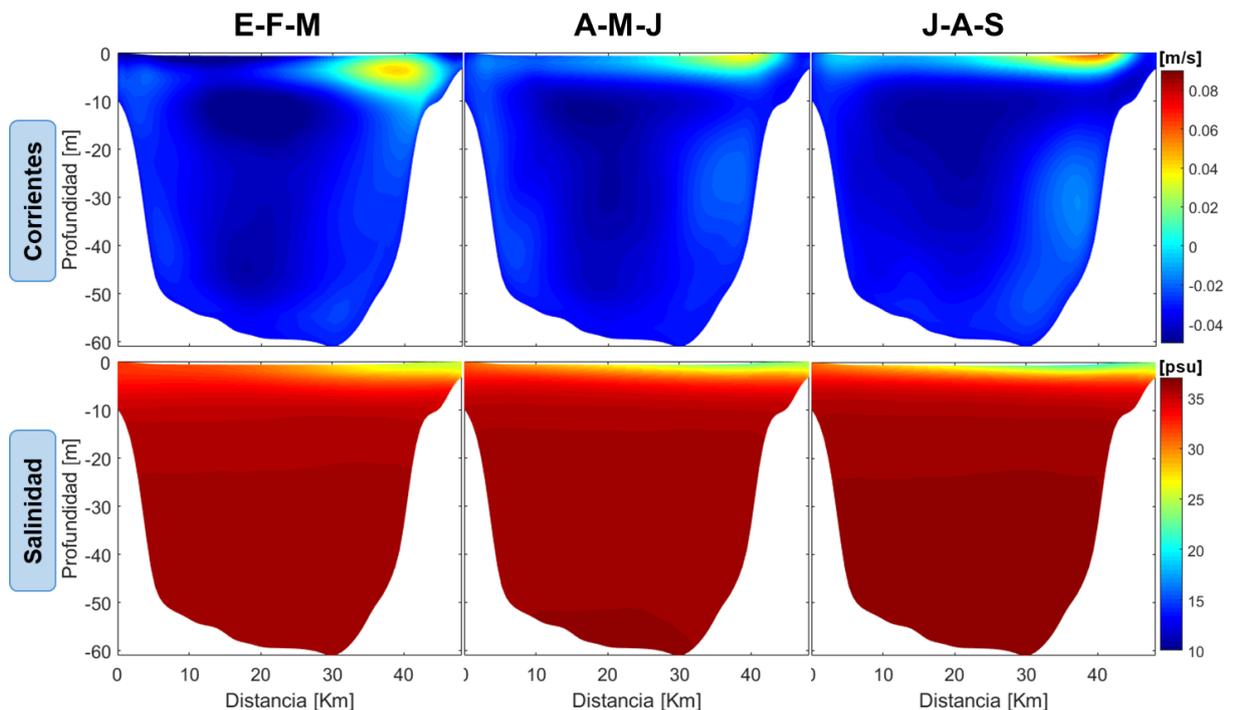


Figura 20. Transecto de la zona norte (línea verde, figura 18), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

En los transectos de la zona centro (figuras 21 y 22), se observa una mayor influencia del caudal del río Atrato. En general, los resultados sugieren que el flujo que sale del golfo en superficie abarca gran parte de su ancho y su costa este. La influencia del río se puede evidenciar con los valores bajos de salinidad en las capas superficiales. Esto permite una mayor estratificación y menores salinidades superficiales que en la zona norte. Para los demás trimestres, el agua entra al GU por la costa oeste y por sus capas intermedias.

Respecto a los escenarios Niña y Niño, en general los patrones vuelven a ser similares como en el transecto norte. Sin embargo, los valores máximos durante Niña son hasta de 0.2ms^{-1} , siendo en algunos casos el doble respecto al Niño.

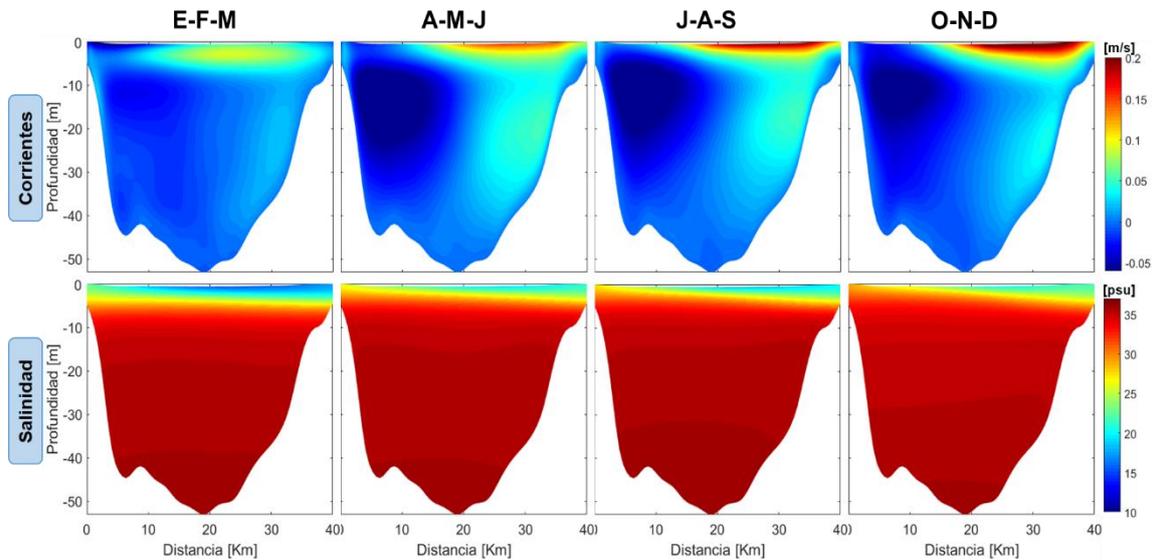


Figura 21. Transecto de la zona centro (línea azul, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

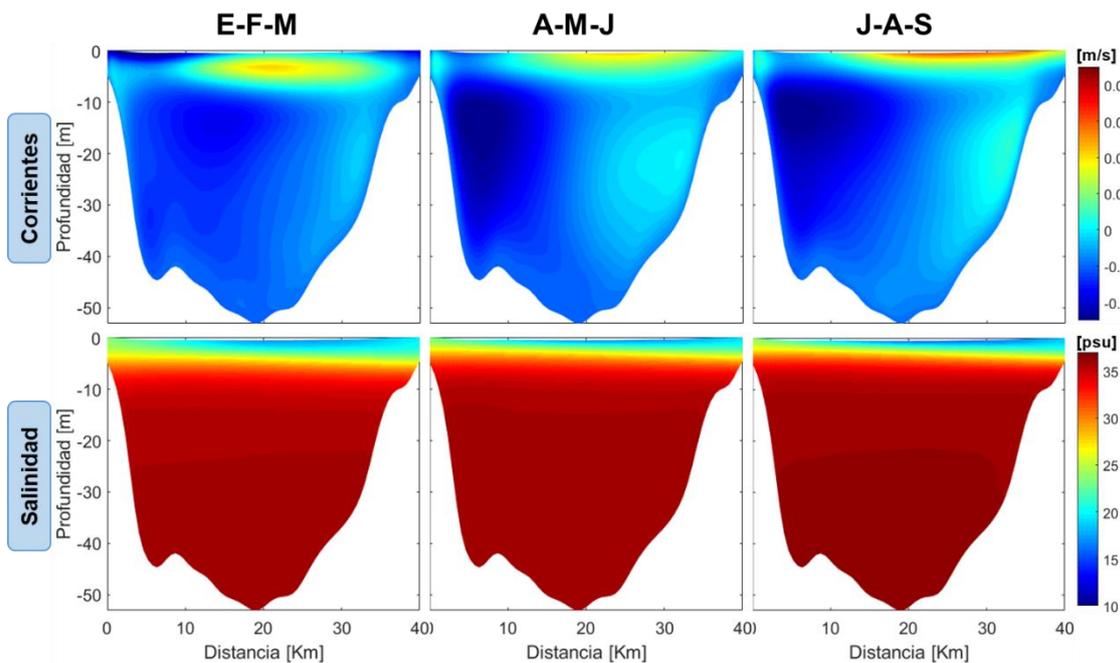


Figura 22. Transecto de la zona centro (línea azul, figura 18), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

En el transecto de la zona sur ubicado sobre bahía Colombia (figuras 23 y 24) se presenta un flujo de tres capas en el primer trimestre. Se evidencia como la corriente entra a bahía Colombia por la costa este entre los 0 m y 2 m de profundidad asociado a la descarga de la boca Leoncito del río Atrato y a la dirección del viento en sentido norte-sur. Entre 2 m y 8 m se encuentra una especie de vórtice que entra por la costa este, y gira de manera anticiclónica debido a la morfo-batimetría y sale por la costa oeste. La tercera capa de flujo entra a bahía Colombia por la costa este a partir de los 9 m de profundidad, lo cual se corrobora en la figura 25. Los patrones de circulación coinciden con los resultados obtenidos por Roldan (2008) y Escobar (2015).

En los demás trimestres, se observó un corte de velocidades en vertical, con un flujo de agua que sale en la capa superficial y entra desde una capa intermedia y hasta cerca del fondo por el lado este del golfo. De acuerdo a los resultados, en estos trimestres hay mayor circulación del flujo al interior de bahía Colombia. Esto sugiere que los tiempos de residencia podrían ser menores en época húmeda. Los patrones de circulación entre los escenarios Niña y Niño son similares, sin embargo, en la zona sur no existe una diferencia entre los valores de uno y otro escenario.

Las características de la dirección y magnitud del viento permiten que en la bahía Colombia exista una mayor estratificación en la época seca. Esto se evidencia en los campos de salinidad de los cuatro trimestres.

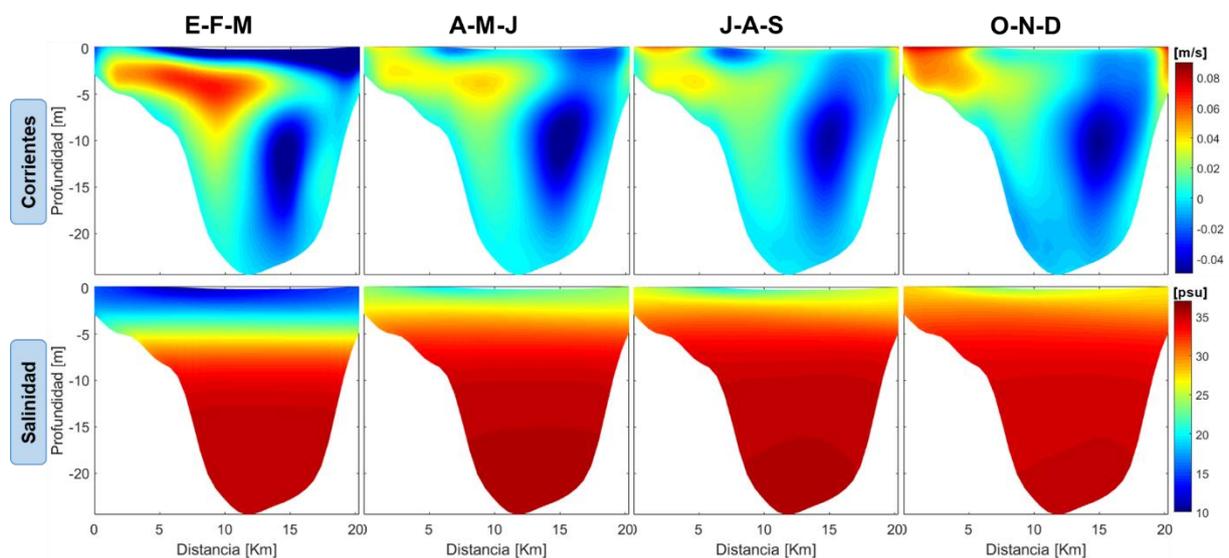


Figura 23. Transecto de la zona sur (línea roja, figura 18), para el año Niña. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

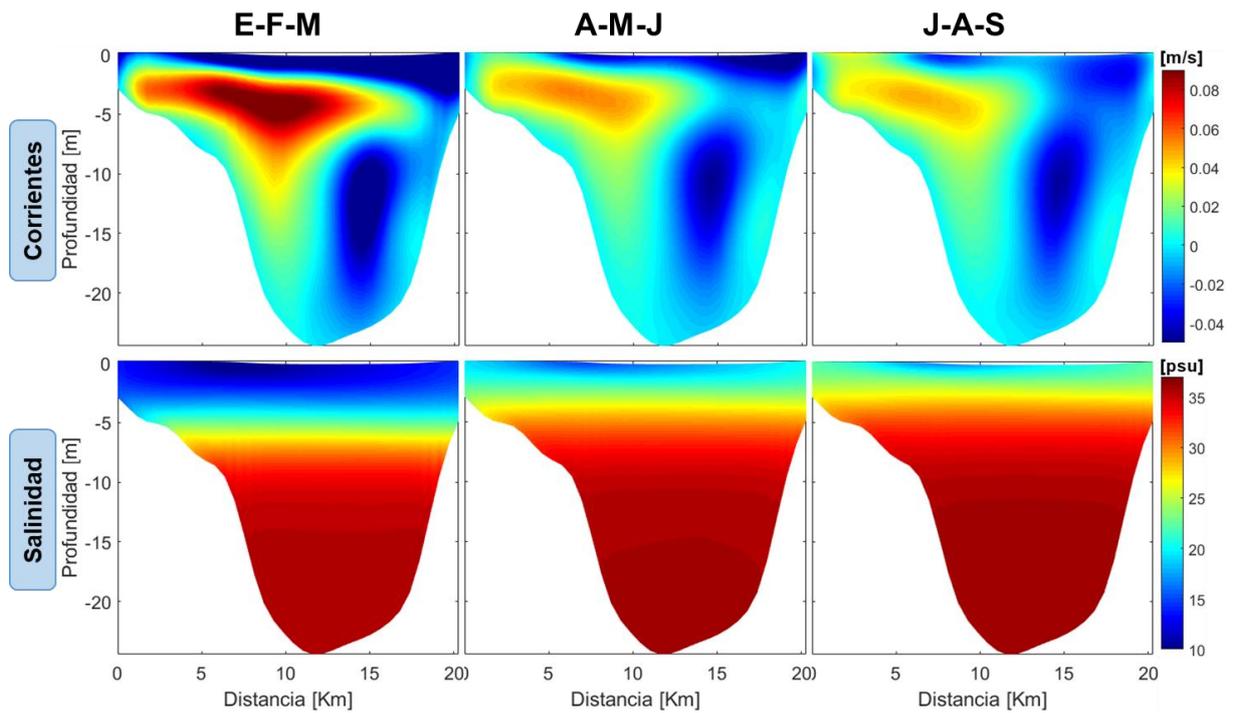


Figura 24. Transecto de la zona sur (línea roja, figura 19), para el año Niño. La primera fila corresponde a circulación y la segunda fila a salinidad.

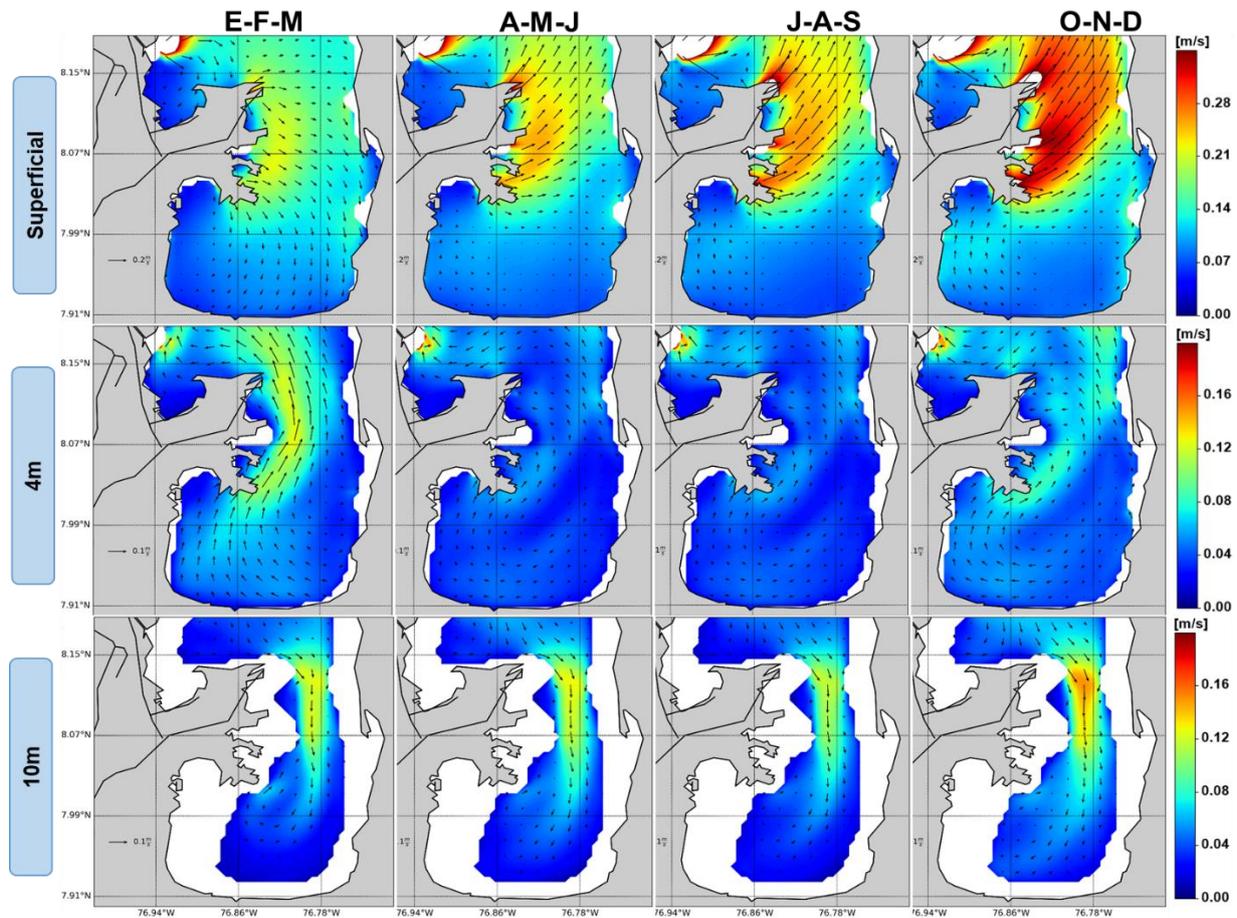


Figura 25. Campos de corrientes en bahía Colombia en superficie, 4m y 10m. Año Niña.

Con el fin de aclarar el comportamiento de la circulación al sur del golfo en bahía se graficaron campos de corrientes como lo muestra la figura 25, mostrando como en la superficie en el primer trimestre el flujo entra, pero en los últimos tres trimestres el flujo sale de la bahía. Se corrobora lo expuesto por Roldán (2008) en relación al giro anticiclónico en la capa intermedia sobre todo en la época húmeda. Y se observa como a partir de los 10 m de profundidad aproximadamente el flujo entra a la zona sur al considerar la influencia del Caribe a estas profundidades.

Con el objetivo de caracterizar de una manera adecuada el campo de vientos y de corrientes en las tres zonas mencionadas, se realizaron histogramas de las magnitudes de estas variables. En las figuras 26 a 29 se presentan estos análisis para las épocas seca (EFM) para los años Niño y Niña y húmeda (JAS) nuevamente para los años Niño y Niña, respectivamente.

En la época seca (figuras 26 y 27), las mayores magnitudes de la corriente se presentan en la zona norte y centro con valores de hasta 0.35 ms^{-1} . Y las menores magnitudes se encuentran en la zona sur con valores máximos de 0.3 ms^{-1} . No hay diferencias significativas entre los escenarios Niña y Niño.

Respecto a la magnitud del viento, en general tienen mayores valores durante el Niño respecto a la Niña. En la zona norte se presentan valores de hasta 6 ms^{-1} , mientras que en la zona centro se observa una gran dispersión de los datos entre 2.5 ms^{-1} y 5 ms^{-1} . En la zona sur se observan valores concentrados alrededor de 3.7 ms^{-1} y 2.7 ms^{-1} para el Niño y la Niña respectivamente.

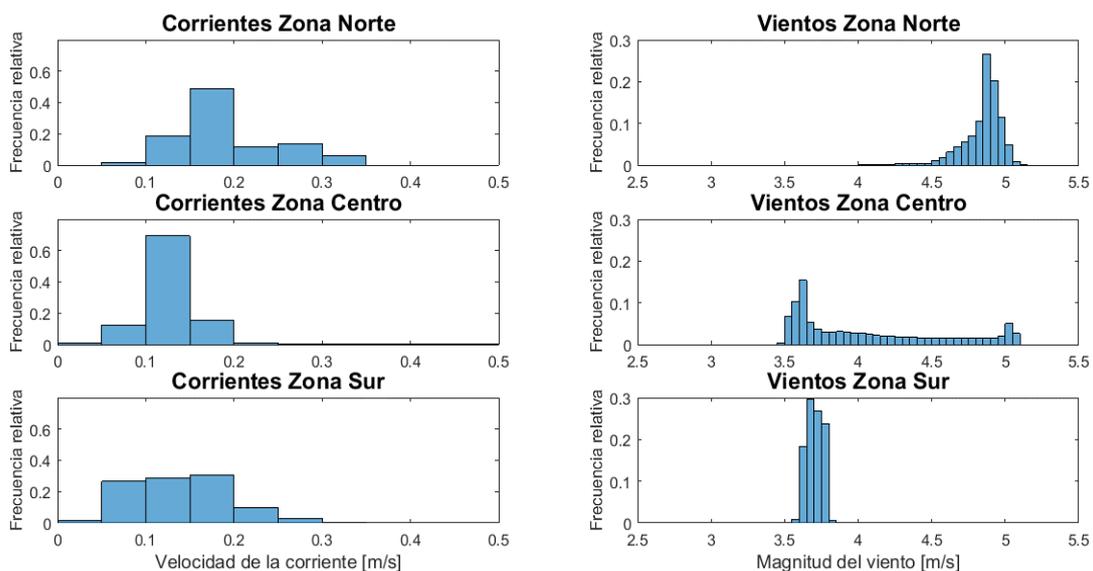


Figura 26. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época seca del año Niño, en las zonas norte, centro y sur del GU.

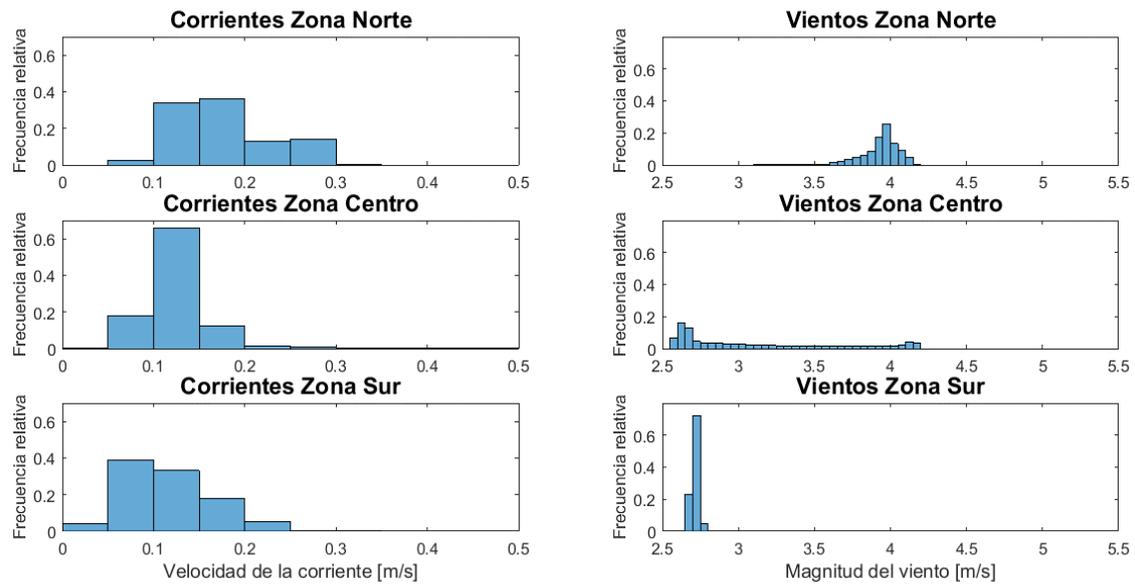


Figura 27. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época seca del año Niña, en las zonas norte, centro y sur del GU.

En las figuras 28 y 29 se observan los histogramas de las magnitudes de las corrientes y el viento para la época húmeda. De forma general, la magnitud de las corrientes es similar en cada una de las zonas para los dos escenarios de Niña y Niño. Corrientes de hasta 0.4 ms^{-1} se encuentran en la zona norte y centro y las magnitudes de menor intensidad en la zona sur.

En cuanto a las magnitudes del viento, las velocidades de mayor intensidad se encuentran en la zona sur con valores alrededor de 3 ms^{-1} y 3.4 ms^{-1} en los escenarios de Niña y Niño respectivamente. En la zona norte y centro las magnitudes de las velocidades del viento son menores y están dispersas en un intervalo entre 0 y 3.5 ms^{-1} .

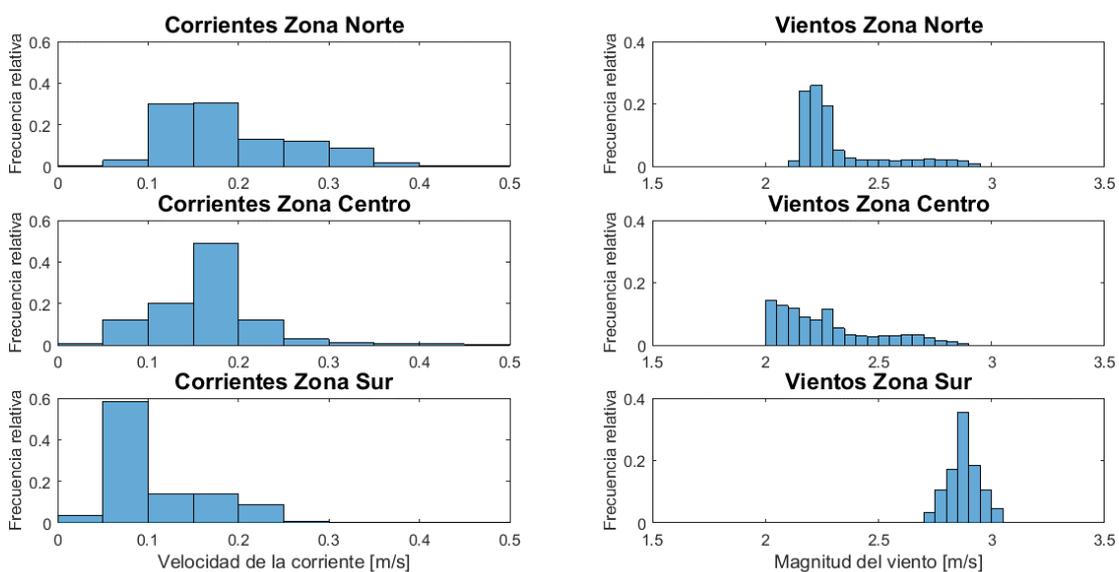


Figura 28. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época húmeda del año Niño, en las zonas norte, centro y sur del GU.

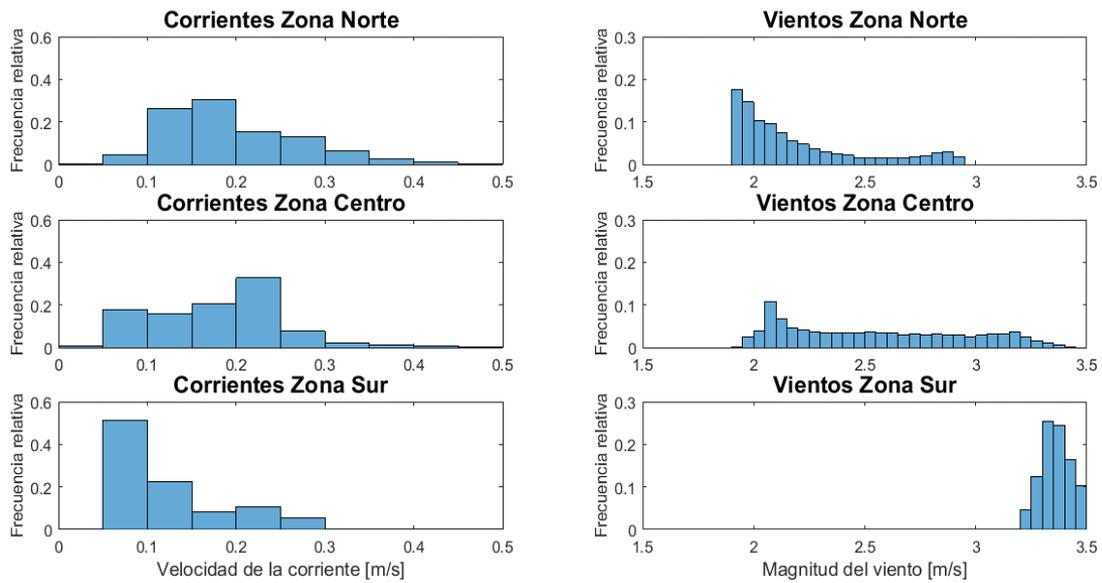


Figura 29. Histogramas de la magnitud de la corriente superficial (izquierda) y del viento (derecha) para la época húmeda del año Niña, en las zonas norte, centro y sur del GU.

De acuerdo con lo analizado, los resultados sugieren que en la zona sur no hay una diferencia significativa respecto a las magnitudes de las velocidades de la corriente y del viento. En la zona norte y centro, las magnitudes de las velocidades presentan algunas diferencias, no tanto así entre escenarios Niña y Niño. Finalmente, en la zona norte las corrientes presentan comportamientos similares para las dos fases de ENSO. Sin embargo, respecto a la magnitud de la velocidad del viento, los valores son mayores durante el Niño que durante la Niña.

6. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que en general el GU se debe estudiar en tres zonas: norte, centro y sur. Las razones se deben a diferencias en los patrones en el campo de viento y de circulación oceánica, además, a la morfología y la batimetría de cada una de las zonas y presencia del delta del río Atrato.

En el primer trimestre del año se detectaron las mayores intensidades de los vientos debido al paso de los Alisios del noroeste. Esto permite que dentro del GU se presenten las menores magnitudes de la corriente, debido a la diferencia en dirección entre la descarga del río y el viento. En la zona norte y centro, el flujo entra por la costa oeste en toda la columna de agua y sale por la parte superior y por la costa este. En la zona sur se presenta un flujo de tres capas que entra en superficie y fondo por la costa este girando y saliendo en una capa intermedia por la costa oeste.

En los trimestres restantes se observa de forma general el mismo patrón de circulación (flujo entrando por el oeste, saliendo por el este). La intensidad de los vientos del norte disminuye y dominan los vientos del sur. En estos trimestres, la descarga fluvial está en la misma dirección que el viento, ocasionando que el flujo que sale del golfo se extienda en la totalidad del ancho del GU. En general el golfo es un estuario bien estratificado, con valores bien definidos principalmente en la época húmeda respecto a la seca.

Los resultados obtenidos sugieren que la circulación oceánica en la zona centro y sur aparentemente no están siendo moduladas por la variación atmosférica de magnitud y dirección del viento en fases del ENSO. Por lo tanto, al interior del GU al parecer dominan los fenómenos locales. Así mismo, se encontró que en bahía Colombia la circulación no presenta variaciones significativas entre las épocas climáticas del año y los escenarios de viento del ENSO. Sin embargo, los resultados sugieren que en medida que se intensifican los vientos provenientes del sur, en bahía Colombia habrá mayor recirculación de la masa de agua.

Por último, se encontró que la circulación oceánica en todo el GU por debajo de los 10 m de profundidad, es similar durante las épocas climáticas y fenómenos de viento del ENSO. La haloclina se ubica entre 3 m y 10 m de profundidad (variando en ese intervalo dependiendo de la época climática) y por debajo de los 10 m el GU está dominado por el flujo proveniente del mar Caribe.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

De acuerdo a los análisis de los campos de viento, la base de datos de acceso libre CCMP, presentó resultados adecuados y por lo tanto se recomienda su uso para trabajos futuros. Sin embargo, se sugiere utilizar campos de viento de mayor resolución espacial, así como datos de caudal de los demás ríos que desembocan en el GU.

ROMS-Agrif y CROCO resuelven de forma efectiva, estable y precisa la circulación en el GU. Los resultados encontrados en este trabajo deben ser validados con mediciones *in situ*. De esta manera, se tendrá una caracterización más precisa de la circulación del GU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, A., y Bernal, G. (2007). Estimación del campo de transporte de sedimentos en el fondo de Bahía Colombia con base en análisis de tendencia del tamaño de grano. Medellín, Colombia. Avance en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, (16), 41-50, ISSN 0121-5701
- Álvarez, O. Modelación morfo-dinámica de desembocaduras a escala intra-anual (tesis de Maestría). Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Medellín, Colombia. 2011.
- Bissett, W. P., Carder, K. L., Walsh, J. J., y Dieterle, D. A. (1999). Carbon cycling in the upper waters of the Sargasso Sea: II. Numerical simulation of apparent and inherent optical properties, *Elsevier*, 46(2), 271-317.
- Cambon, G., Penven, P., Marchesiello, P., y Debreu, L. (2011). Ocean model ROMS_AGRIF & Processing-tools ROMSTOOLS. Francia. Recuperado de: ftp://ftp.legos.obs-mip.fr/pub/romsagrif/DATA_ROMS/papers/ROMS_PRES_Toulon2011.pdf.
- Centro Nacional de Datos Geofísicos, 2006. Datos de Relieve Global Gridded de 2 minutos (ETOPO2) v2. Centro Nacional de Datos Geofísicos, NOAA. doi: 10.7289 / V5J1012Q.
- Chevillot, P., Molina, A., Giraldo, L., y Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. *CIOH. Boletín Científico*, (14), 79-89.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Quinta generación de reanálisis atmosféricos ECMWF del clima global. Servicio de Cambio Climático de Copernicus Climate Data Store (CDS), *diciembre de 2018*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Escobar, C. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). *INVEMAR. Bol. Invest. Mar. Cost.* 40(2), 327-346, ISSN 0122-976.
- Escobar, C., Velásquez, L., y Posada, F. (2015). Marine Currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*. 31(6), 1363-1374. ISSN 0749- 0208.
- García, C. (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Santa Marta, Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar No 12. 180p. ISBN: 978-958-98104-3-9.

- Golden Gate Weather Services. s.f. El Niño and La Niña Years and Intensities.
<https://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Lonin, S., Vásquez, J. (2005). Hidrodinámica y distribución de coliformes en el Golfo de Urabá. *CIOH. Boletín científico* No. 23, 101-119, ISSN 0120-0542.
- 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. *CIOH. Boletín Científico* No. 11, 43-58.
- Montoya, L., 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, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.* No. 13, 37-54. ISSN 0121-5701.
- Montoya, L. (2010). Dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión en contaminantes y sedimentos (tesis Doctoral). Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Medellín.
- National Weather Service, Climate Prediction Center (NOAA). Cold & Warm Episodes by Season. s.f.
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Powell T. P., Lewis, C. V. W., Curchitser, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., y Dobbins, E. L. (2006). Results from a three-dimensional, nested biological-physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery, *J. Geophys. Res.*, 111, C07018, doi:10.1029/2004JC002506.
- Restrepo, J., y López, S. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 1-21.
- Roldán, P. (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. Medellín.
- Shchepetkin, A. F., y McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an ocean model with a non-aligned vertical coordinate. *J. Geophys. Res.*, 108, C3, 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J.C. (2005). Regional Ocean Model System: a split-explicit ocean model with a free-surface and topography-following vertical coordinate. *Ocean Modelling* 9, 347-404.
- Velásquez, A., Guevara, J. (2018). Caracterización termohalina de la región central del golfo de Urabá, a partir de la descarga de los ríos (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, sede de Ciencias del Mar, Turbo.
- Velásquez, L. (2013). Modelación del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia (tesis de Maestría). Departamento de Geología, Escuela de Ingeniería. Universidad EAFIT. Medellín.
- Warner, J. C., C. R. Sherwood, H. G. Arango, y R. P. Signell, (2005a). Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method, *Ocean Modelling*, 8, 81-113.
- Warner, J. C., C. R. Sherwood, R. P. Signell, C. K. Harris, & H. G. Arango, (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *Computers & Geosciences*, 34, 1284-1306.
- Zambrano, E. (1986). EL FENÓMENO DE “EL NIÑO” Y LA OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO). *Acta Oceanográfica del Pacífico*. 3(1), 195-203.

ANEXOS

ANEXO I

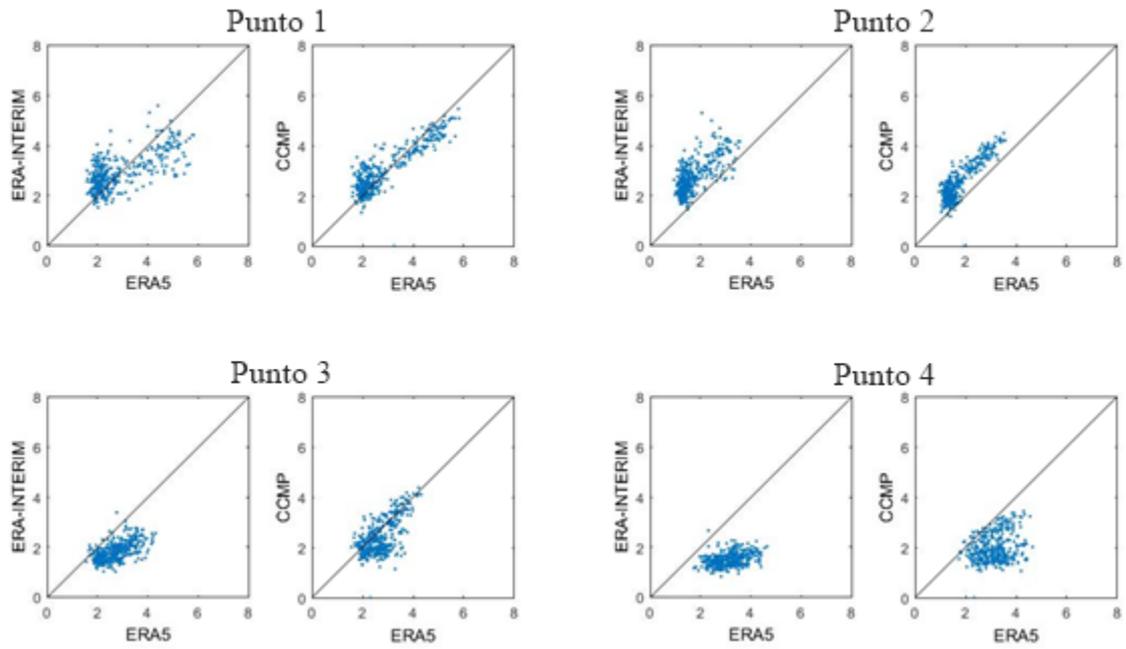


Figura A1. Gráficos de dispersión para correlacionar la base de datos ERA5 con ERA-INTERIM y CCMP en los cuatro puntos de comparación.

ANEXO II

Tabla A2. Índice ONI para clasificación de los fenómenos ENSO, tomados del centro de predicción del clima de la NOAA

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8

ANEXO III

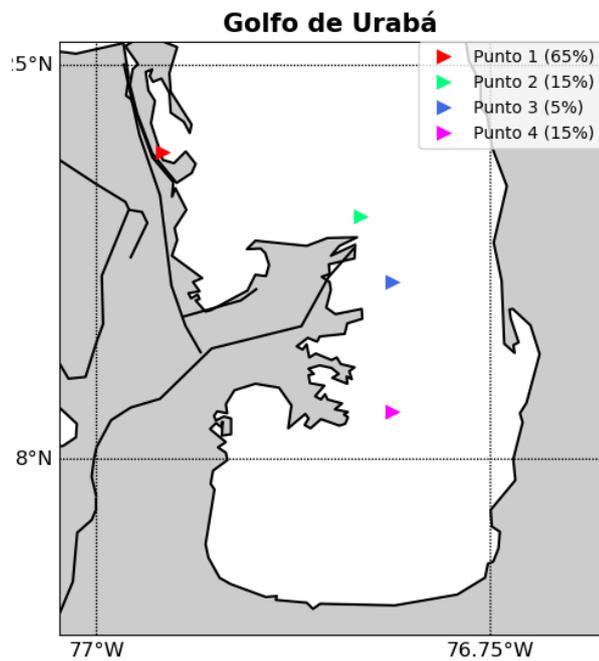


Figura A3-1. Mapa de ubicación de los cuatro puntos de descarga de caudal para la malla gruesa.

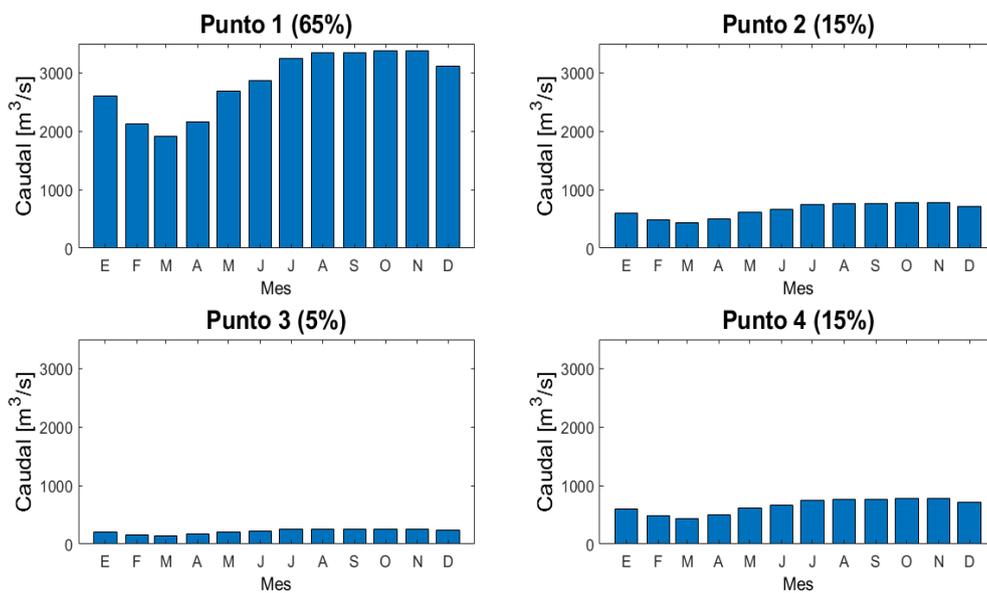


Figura A3-2. Caudal mensual distribuido en los cuatro puntos de descarga considerados para la malla gruesa.

ANEXO IV

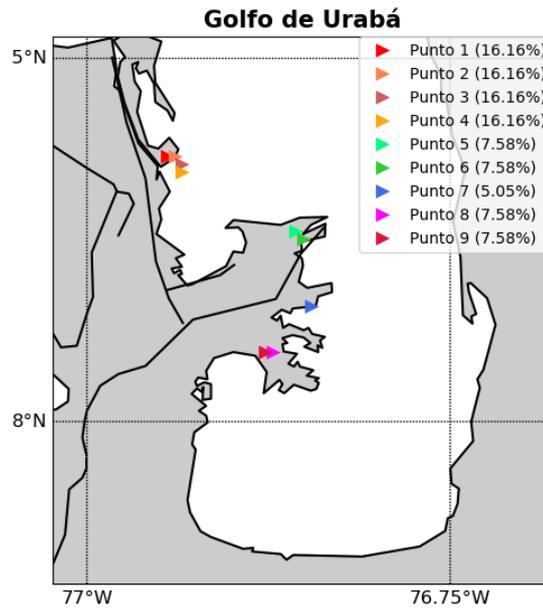


Figura A4-1. Mapa de ubicación de los nueve puntos de descarga de caudal para la malla fina.

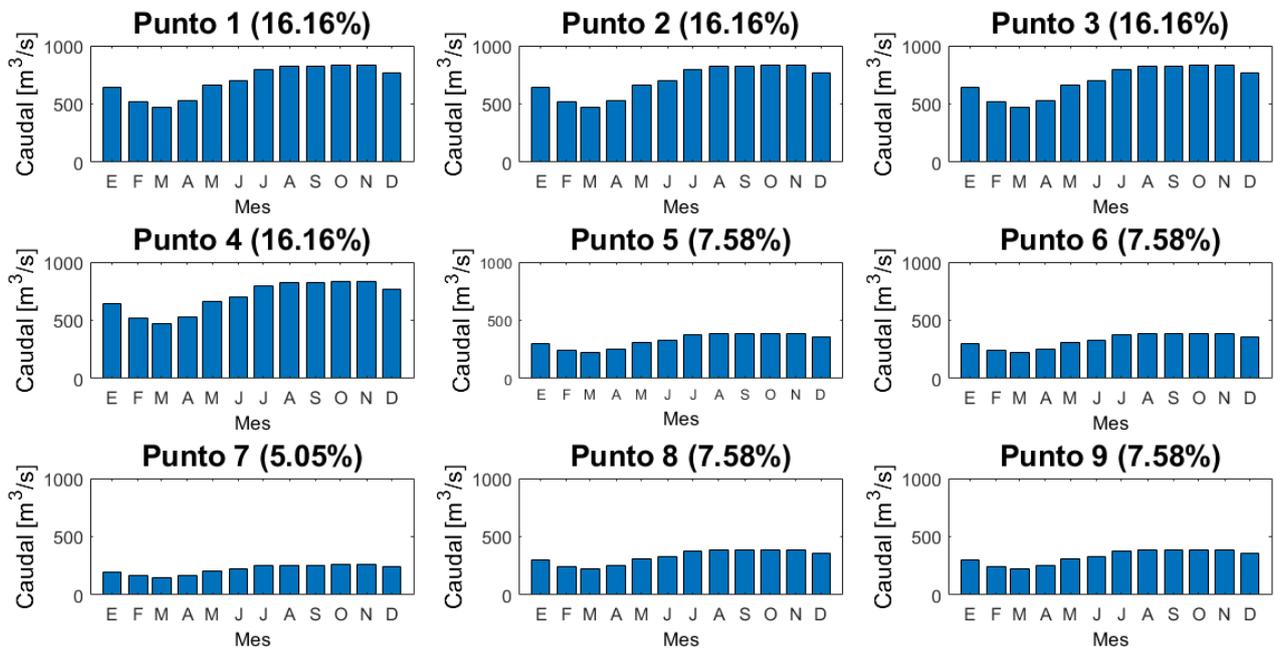


Figura A4-2. Caudal mensual distribuido en los nueve puntos de descarga considerados para la malla fina