



Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel

**Circulación de la Bahía del Espíritu Santo, Quintana  
Roo, México**

TESIS

Que para obtener el Título Profesional de  
**Licenciada en Oceanología**

Presenta

**Daniela Palma Lara**

Director

**Dra. Laura Elena Carrillo Bibriezca**

Ciudad Universitaria, Puerto Ángel, Oaxaca, 2018

## Resumen

Los procesos de circulación generados por forzamientos e interacciones físicas que ocurren en las bahías del Caribe Mexicano han sido poco estudiados, en particular en la Bahía del Espíritu Santo, bahía somera localizada en la porción central de la línea costera del estado de Quintana Roo, México, y que forma parte de la Reserva de la Biósfera “Sian Ka’an”. Mediciones *in-situ* en conjunto con el empleo de herramientas de modelado numérico resultan fundamentales en el análisis de la circulación de éste tipo de ambientes costeros. Es por ello que se implementó el modelo numérico Delft3D considerando forzamientos de mareas y 4 condiciones de viento. Con el fin de validar el comportamiento del modelo se realizó un muestreo en el mes de diciembre de 2017, obteniendo datos hidrográficos y variaciones del nivel del mar. La Bahía presentó un comportamiento estuarino con un gradiente horizontal de  $\Delta S \sim 17$  y  $\Delta T \sim 1.6$  °C, y con estratificación en la Boca Norte. Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica mostraron variaciones del nivel del mar promedio de 0.26 m durante mareas vivas y de 0.038 m en mareas muertas, correspondientes al régimen micromareal representativo de la zona. La Bahía, además, mostró el desarrollo de velocidades promedio de  $0.071 \pm 0.058$  m/s y  $0.029 \pm 0.024$  m/s con máximos en las Bocas de la BES de 0.38 m/s durante mareas vivas en el escenario forzado con vientos del Sureste y 0.20 m/s en mareas muertas en el escenario con vientos Nortes. Fue calculado el gasto en ambas bocas mostrando valores máximos  $Q_{\max, BN} = 2647$  m<sup>3</sup>/s y  $Q_{\max, BS} = 375$  m<sup>3</sup>/s, con un tiempo de recambio variable, oscilando entre 40 días. Los resultados generados representan una base para el desarrollo de posteriores trabajos enfocados tanto para el análisis detallado de los procesos físicos asociados con la circulación, así como la posible interacción con procesos biológicos.

**Palabras clave:** Circulación, bahía, modelo numérico, velocidades, gasto, variaciones nivel del mar.

*A Patricia, Humberto y Betito*

*Los amo*

*Al Océano*

## **Agradecimientos**

A la Dra. Laura Carrillo por el apoyo, confianza y asesoría en este proyecto de tesis.

A M. en C. Bárbara Zavala, Dr. Mariana Callejas, Dr. Jorge Castro, Dr. Juan C. Alcérreca y Dr. Cristóbal Reyes por el apoyo, sus revisiones y consejos para que este proyecto por fin llegara a concluir.

Al CEMIE-Océano proyecto 249795 (CONACYT – SENER – FONDO DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA) por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Al Servicio Meteorológico Nacional – CONAGUA por los datos meteorológicos otorgados para este proyecto.

A la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera “Cozumel” CS de RL, por las facilidades otorgadas durante la estancia en la comunidad de María Elena, dentro de la Reserva de la Biósfera de Sian Ka’an.

A la Universidad del Mar, por ser mi casa de estudios, mis profesores y amigos, por todas las enseñanzas escolares y de vida. A la Jefatura de Carrera de Oceanología (M. en C. Bárbara Zavala y Dr. Antonio López) por las facilidades y la ayuda que me brindaron durante todo el proyecto de tesis.

A mis padres, mi hermano y mi familia gracias, por el apoyo, confianza y amor en este camino lleno de mar y arena.

A toda mi familia Umareña. Al team Sverdrup, Caro, Karen y Pablito, a Karla y Jaque, Laura, Malu, Sabdy e Isa, por la amistad, el apoyo y el amor que siempre nos tendremos, amistades infinitas como el mar. A mi familia chetumaleña, Karla, Astrid y Paco por cobijarme en tierras desconocidas. A A.Bell por la compañía y confianza; por los buenos y malos tiempos.

A todas las personas que no menciono, pero que hicieron posible la culminación de este proyecto.

# Índice

Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tablas.....	ix
1 Introducción .....	1
2 Antecedentes.....	3
3 Justificación .....	5
4 Hipótesis .....	6
5 Objetivos.....	6
Generales.....	6
Particulares .....	6
6 Área de estudio.....	7
7 Material y método .....	9
7.1 Trabajo de campo.....	9
7.2 Recopilación de información.....	10
7.3 Simulación Numérica.....	12
7.3.1 Descripción del modelo.....	12
7.3.2 Configuración del modelo .....	13
Dominio del cómputo .....	13
Condiciones iniciales y de frontera .....	14
7.3.3 Validación del modelo .....	17
8 Resultados.....	19
8.1 Muestreo en campo .....	19
8.2 Modelo numérico .....	23
9 Discusiones .....	36
10 Conclusiones.....	41

11	Anexos .....	42
12	Literatura citada .....	54

## Índice de Figuras

Figura 1. Área de estudio Bahía del Espíritu Santo, batimetría y localización de las estaciones de muestreo <i>in situ</i> (puntos azules) y zonas de anclaje de sensores Hobo en la comunidad de María Elena (AME, triángulo rojo) y en la cabeza de la Bahía (ACB, triángulo rojo).....	7
Figura 2. A) CastAway-CTD, instrument de medición de variables termohalinas, B)HOBO Water Level, instrumento de medición de variaciones del nivel del mar anclado en la comunidad de María Elena (Figura 1), C) ADP Sontek, perfilador de corrientes, utilizado en la Boca Norte de la BES9	
Figura 3. Rosa de los vientos con los datos de la serie reconstruida Sian Ka'an para el año 2017 .....	11
Figura 4. Dominio del modelo con batimetría, fronteras abierta propuesta para el modelo numérico (FA) y secciones trasversales utilizadas en el cálculo del gasto (Q – Sección 8.2) .....	14
Figura 5. Principales componentes de marea utilizadas para la zona de estudio. En donde la línea azul representa la componente M2, línea roja S2, línea amarilla N2, línea morada O1 y línea negra la suma de las 4 componentes de marea. ....	16
Figura 6. Validación del modelo numérico de datos de variación del nivel del mar. Serie de tiempo de datos medidos (línea azul) y modelados (línea roja). ....	18
Figura 7. Diagrama TS de los datos de la campaña de muestreo. Los puntos negros corresponden a las estaciones del cuerpo de la bahía (de C1 a C12), los puntos azules corresponden a las estaciones de la boca (de B1 a B6).....	19
Figura 8. Contornos transversales de Salinidad, Temperatura y Sigma-t para el cuerpo de la Bahía, de las estaciones C12 a C1 incluyendo la estación B3.....	21
Figura 9. Contornos transversales de Salinidad, Temperatura y Sigma-t para el cuerpo de la Bahía, de las estaciones B1 a B6. ....	22

Figura 10. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). A) Sw + Mv en Pleamar; B) Sw + Mv en Bajamar; C) Tw + Mm en Pleamar; D) Tw + Mm en Bajamar. ....	25
Figura 11. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Velocidades máximas en Boca Norte durante el cambio de pleamar a bajamar. A) Escenario vientos Alisios + Mv; B) Escenario vientos Alisios + Mm; C) Escenario vientos Nortes + Mv; D) Escenario vientos Nortes + Mm. ....	27
Figura 12. Variaciones del nivel del mar en tres puntos de la BES A) Desfase de onda de marea entre Laguna Arrecifal, Boca Norte y Cabeza de la Bahía. B) Desfase de onda de marea entre Boca Norte y Sur. ....	30
Figura 13. Desfase de la onda de marea considerando los datos de variaciones del nivel del mar registradas por los sensores de presión ubicados en la Boca Norte (AME - Figura 1) y Cabeza de la Bahía (ACB – Figura 1). ....	30
Figura 14. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Flujo bidireccional en Boca Norte. A) Escenario Vientos Nortes + Mm B) Transecto con ADP en Boca Norte. ....	31
Figura 15. Valores de Gasto (Q) para un ciclo de marea en Boca Norte (línea azul) y Boca Sur (línea roja). Se grafican en conjunto con la onda de nivel del mar de cada momento. A) Escenario vientos Nortes + Mv. B) Escenario vientos Nortes + Mm. ....	34
Figura 16. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Generación de giro ciclónico en laguna arrecifal. A) Escenario Vientos Alisios + Mv. B) Escenario Vientos Alisios + Mm. ....	35



## Índice de Tablas

Tabla 1. Amplitud y Fase de las componentes de marea dominantes en la zona de estudio. Tomadas de Kjerfve (1981).....	15
Tabla 2. Escenarios de modelación generados para la validación y distintas condiciones de viento .....	17
Tabla 3. Máximos y Media de velocidades (m/s) durante pleamar y bajamar, y valor máximo por ciclo de marea. La laguna es dividida en 4 zonas representativas, Boca Norte y Sur, Laguna Arrecifal y Cuerpo de la Bahía. ....	28
Tabla 4. Valores calculados de Gasto-Q ( $m^3/s$ ) para la boca Norte y Sur de la BES en pleamar ( $Q_{Pleamar}$ ), bajamar ( $Q_{Bajamar}$ ) y en un ciclo de marea ( $Q_{ciclo\ marea}$ ) bajo condiciones de forzantes de viento y marea. Tiempo de recambio ( $T_t$ ) en días calculado por escenario.....	33

## 1 Introducción

La zona costera es el espacio geográfico en donde se genera la interacción entre el continente, el océano y la atmósfera, y en donde se pueden encontrar diversos cuerpos de agua costeros como las bahías (Spaulding 1994, Dyer 1997). La circulación en estos ambientes se encuentra controlada por las mareas, el estrés de viento y gradientes de densidad (Kjerfve 1994, Escobar 2011).

Dichos gradientes son generados por la interacción entre el agua marina y el agua dulce, lo que origina diferencias de salinidad y temperatura entre masas de agua. En el caso particular de la Península de Yucatán, a excepción de Río Hondo y Río Candelaria, no se cuentan con ríos superficiales, ya que se tiene un suelo kárstico en donde existe una alta permeabilidad que ocasiona filtraciones que alimentan canales subterráneos de agua dulce que van al mar, es por ello que las bahías en esta zona presentan insumos de agua dulce procedentes de aguas subterráneas con aportes superficiales poco significativos (Herrera-Silveira *et al.* 1998).

De igual forma las mareas son de gran relevancia e interés al ser un forzamiento que genera hasta un 70% de la variabilidad en el nivel del mar, lo que origina corrientes que inducen mezcla y un transporte advectivo hacia el océano (David y Kjerfve 1998, Medina-Gómez *et al.* 2016). Aunque las mareas representan un forzante importante en la dinámica de las bahías, estas pueden atenuarse al interior por efectos de la fricción, particularmente ante condiciones con un rango de marea bajo y cuencas someras. Los vientos constituyen un forzamiento al actuar directamente sobre la superficie, generando corrientes residuales y oscilaciones del nivel del mar que inducen alteraciones en el transporte neto de masa. (Casares-Salazar y Mariño-Tapia 2016, Medina-Gómez *et al.* 2016).

La descripción y el entendimiento de los procesos de circulación, forzamientos e interacciones físicas, han sido poco analizados en las bahías de la Península de Yucatán, y particularmente en el Estado de Quintana Roo, a pesar de que éste último cuenta con una de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) más grandes de México, la Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano (RBCM). Colindante con la

RBCM, en la costa central del estado de Quintana Roo, se encuentra la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an, y en ella la Bahía del Espíritu Santo, una bahía que presenta pocos estudios, lo que restringe su entendimiento y que a su vez genera limitantes en la planeación de su conservación y manejo. Es por ello que es importante el estudio de la circulación de esta Bahía ya que proporcionará una descripción general del comportamiento hidrodinámico del sistema.

Una herramienta ampliamente utilizada en el estudio de la circulación en cuerpos de aguas costeros son los modelos numéricos, ya que proveen soluciones generales de la circulación, determinando velocidades de corrientes, facilitando de esta forma la descripción de fenómenos que suceden en la naturaleza a través de simulaciones (Farreras 2004, González-Santamaría 2005, García *et al.* 2014). Entre sus aplicaciones destaca la modelación de la hidrodinámica en diferentes zonas que presentan forzamientos de viento, marea, corrientes inducidas por el oleaje y gradientes de densidad (Deltares 2014).

El presente trabajo tiene el objetivo de contribuir al conocimiento de la hidrodinámica de la Bahía del Espíritu Santo mediante la descripción de la circulación, utilizando un modelo numérico. Esto aportando bases para la conservación y manejo de este ambiente costero, que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano.

## 2 Antecedentes

Entre los trabajos generados para entender la hidrodinámica y circulación en sistemas estuarinos del Caribe Mexicano se encuentran los de González-Vivanco (2009) y Avalos-Cueva *et al.* (2017), quienes estudiaron la circulación de la Bahía Chetumal, una bahía somera ubicada en el sur del estado de Quintana Roo. En el primer caso definen el patrón de circulación de la bahía a partir de forzantes de marea (componente M2) y viento, considerados los principales forzantes en la generación de corrientes. Se observan velocidades máximas de 0.52 m/s, con variaciones de nivel del mar  $<0.5$  m. Bahía Chetumal presenta una circulación dominada por el viento dejando a la marea como un forzante que genera pocas variaciones en el nivel del mar. En el segundo caso, el único forzante utilizado es el viento, a pesar de ello, la circulación coincide con el patrón registrado en muestreos *in situ* en la bahía, por lo que se considera el principal forzante en la ella. Durante la modelación se registran velocidades máximas de 0.13 m/s asociadas a las zonas profundas. Los resultados muestran que la circulación de Bahía Chetumal está asociada con las características batimétricas de esta.

Por otra parte, Casares-Salazar y Mariño-Tapia (2016), estudian los efectos de vientos locales y remotos en la hidrodinámica de la Laguna Celestún, una laguna somera de la península de Yucatán. Con datos *in situ* identifican la atenuación de la onda de marea del 84% de la boca a la cabeza de la laguna por efectos de fricción, además de que la señal de marea presenta un retardo de 7.75 hrs, por lo que forzantes locales y remotos juegan un papel importante en la variabilidad de la circulación. Durante los escenarios de modelación, los efectos locales, en comparación con los efectos remotos, no generan una modificación en la señal de marea y apenas son perceptibles sus efectos en la cabeza de la laguna; mientras que los efectos remotos pueden hacer la diferencia entre el balance, exportar o importar agua a través del sistema. Se destaca la importancia de incluir efectos remotos en los modelos de circulación de cuerpos de agua costeros y no solo considerar los forzantes de marea astronómica y del viento local.

Medina-Gómez (2011) y Medina-Gómez *et al.* (2016) generan un estudio con el objetivo de evaluar los efectos de mareas y vientos en la variabilidad del nivel del mar y patrones de circulación en la Bahía Ascención (BA), una bahía tropical somera ubicada en la costa central del estado de Quintana Roo. A partir de los escenarios generados se observa que la señal de marea se atenúa al interior de la bahía, por lo que los vientos juegan un papel importante en la circulación de la BA. Los vientos provenientes del NE (vientos Alisios) juegan el papel principal en la circulación de la bahía al actuar sobre el eje principal de la bahía. Sin embargo, en conjunto con las descargas de agua dulce, generan una dinámica fundamental para la preservación de la heterogeneidad ecológica de BA.

Los únicos trabajos existentes en la zona de estudio, Bahía del Espíritu Santo, están enfocados a la explotación de langosta, recurso pesquero de gran valor comercial en la zona. De éstos últimos estudios se puede mencionar a Sosa-Cordero *et al.* (1999) y Ley-Cooper *et al.* (2014) quienes señalan que es una bahía somera que forma parte de la Reserva de la Biosfera de Sian Kaán, con 313 km<sup>2</sup> de superficie y con profundidades que van 1-20 m. Esto deja ver la falta de información que se tiene en dicha bahía, y por lo que se considera necesario un estudio de esta zona.

### 3 Justificación

México cuenta con 11592 km de litoral de los cuales aproximadamente 7.4% pertenece al estado de Quintana Roo. Éste estado presenta una alta diversidad de ecosistemas por lo que se han decretado en él 14 áreas naturales protegidas de competencia federal y 8 de competencia estatal que consideran zonas costeras o marinas (Prezas-Hernández 2011, INEGI 2017). A pesar de ello aún presenta problemas en la conservación de sus ecosistemas costeros, como contaminación, actividades turísticas, pesca no regulada, desarrollo costero, infraestructura portuaria (cruceiros), entre otros (Castañeda-López y Contreras-Espinosa 2003, Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2010b), lo que a su vez modifica las múltiples interacciones físicas, químicas y biológicas. Una de las ANP federales en el estado es la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an que alberga a la Bahía del Espíritu Santo, la cual es una zona de importancia pesquera de langosta (*Panulirus argus*) y que a pesar de aportar en algunos periodos del 6 al 12% de la captura anual del estado (Sosa-Cordero 1999) no cuenta con información enfocada a la circulación, la cual es única y define gran parte de las características físicas, químicas y biológicas del medio, lo que a su vez controla procesos como la calidad del agua y eutroficación, transportes de contaminantes y sedimento (Spaulding 1994, Haines 2017). De ahí la importancia de realizar un estudio de las condiciones hidrográficas y circulación en la bahía del Espíritu Santo a partir de muestreos *in situ* realizados en el año 2017 y de la utilización de un modelo numérico. Este estudio es una de las primeras contribuciones en el conocimiento de la circulación de la bahía, se espera que pueda a desarrollar futuras investigaciones para conocer la hidrodinámica, así como aportar bases para desarrollo de estrategias adecuadas para su manejo y conservación.

## **4 Hipótesis**

La circulación en la Bahía Espiritu Santo se encuentra principalmente dominada por los forzamientos de viento y mareas. En el caso de los forzamientos por viento, se espera que los vientos alisios (provenientes del noreste) sean el forzamiento que mayor influencia tenga en la circulación de la Bahía.

## **5 Objetivos**

### **Generales**

Determinar la circulación en la Bahía Espiritu Santo implementando un modelo numérico hidrodinámico con forzamientos de viento y marea.

### **Particulares**

- Implementar el modelo numérico Delft3D a partir de condiciones iniciales y de frontera específicas para la zona de estudio
- Validar el funcionamiento del modelo con datos medidos en el área de estudio
- Generar escenarios de circulación a partir de los forzantes de marea y viento
- Determinar la circulación de las corrientes al interior de la bahía

## 6 Área de estudio

La Bahía del Espíritu Santo (BES) es una bahía somera ubicada en la costa central del estado de Quintana Roo ( $19^{\circ}18'42.79''$  N,  $87^{\circ}35'49.85''$  O). La BES muestra un eje principal que va de noreste a suroeste de aproximadamente 24 km, una superficie de 349 km<sup>2</sup> y una profundidad media de 1.4 m. La bahía presenta comunicación con el Mar Caribe a través de dos bocas, divididas por la isla Chal con una longitud de 6 km. La boca más amplia, al norte de la isla, tiene 2.8 km; otra boca, al sur de la isla, mide 0.84 km. Las profundidades medias en cada boca son 3.6 m y 1.6 m, respectivamente (Figura 1).

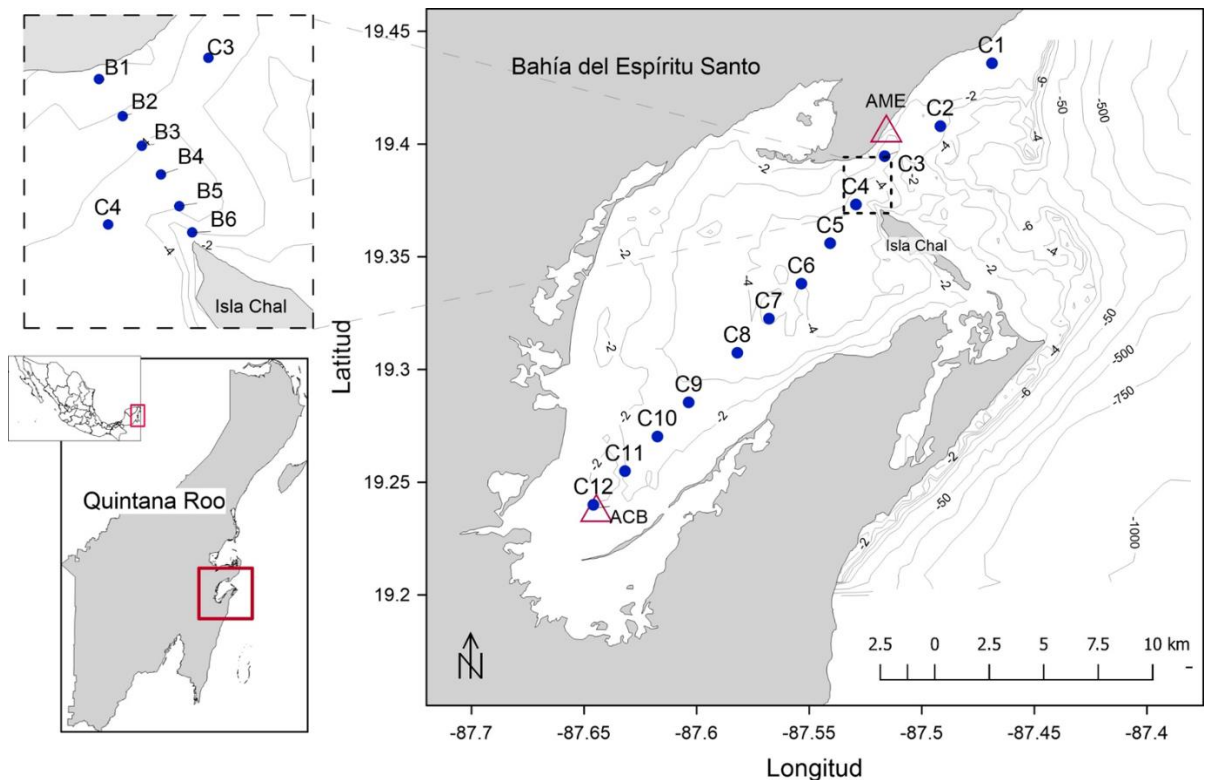


Figura 1. Área de estudio Bahía del Espíritu Santo, batimetría y localización de las estaciones de muestreo *in situ* (puntos azules) y zonas de anclaje de sensores Hobo en la comunidad de María Elena (AME, triangulo rojo) y en la cabeza de la Bahía (ACB, triangulo rojo).

La BES se encuentra dentro de la Reserva de la biosfera Sian Ka'an sobre un subsuelo calcáreo, compuesto en su mayoría por la Formación Carrillo Puerto; en algunas zonas alrededor de la BES se tienen depósitos del tipo lacustre, litoral y



materiales lagunares. El manto freático se presenta cercano a la superficie. Así mismo, la BES forma parte del polígono subzona de uso restringido, en donde se tienen procesos de reproducción y reclutamiento de especies de importancia comercial como la langosta (Zárate-López *et al.* 2006, DOF 2015).

La zona de Sian Ka'an presenta un régimen micromareal (<0.20 m), con marea del tipo mixta-semidiurna. Las principales componentes de marea que dominan son la  $M_2$ ,  $S_2$  y  $N_2$  de la marea semidiurna y la componente  $O_1$  de la marea diurna, con amplitudes de onda que van de 0.023 a 0.074 m (Kjerfve 1981). La BES se encuentra influenciada por la corriente de Yucatán y la masa de agua superficial del Caribe (Caribbean Surface Water-CSW) con salinidades de 34.5 a 36.6 PSU y temperaturas  $\geq 25^\circ\text{C}$ . Aunque la CSW equivale al 4% del volumen de agua de la cuenca del Caribe se considera la masa de agua que mayor influencia podría tener en la Bahía, ya que se presenta en profundidades de 0 a 100 m (Carrillo *et al.* 2016).

La región del Caribe Mexicano se caracteriza por presentar un clima cálido y subhúmedo con una temperatura anual media de  $22^\circ\text{C}$ . Es posible diferenciar tres temporadas, la temporada de estiaje en donde la evaporación es mayor a la precipitación (febrero-mayo), la temporada de lluvias donde la precipitación es mayor que la evaporación (junio-octubre) y la temporada de Nortes que va de noviembre a enero con episodios de vientos de dirección N-NW por lo regular acompañada de bajas temperaturas (Carrillo 2010, Medina-Gómez *et al.* 2014). La precipitación media anual varía de 1200 a 1500 mm. La zona se encuentra bajo el régimen de vientos Alisios que se desarrollan durante la primera mitad del año y que son provenientes del noreste con rapidez media de 3.2 m/s y vientos del Sureste que prevalecen en marzo con rapidez media de 3.3 m/s (Carrillo 2010). Los ciclones tropicales se presentan desde principio de verano hasta finales de otoño, con una media de la velocidad de 100 km/h, presentando vientos que alcanzan los 200 km/h (Carrillo *et al.* 2009, Rosengaus-Moshinsky *et al.* 2014).

## 7 Material y método

Se realizó una campaña de observaciones en la zona de estudio con el fin de obtener datos hidrográficos y variaciones del nivel del mar, utilizando los instrumentos CastAway-CTD, sensor HOBO y ADP Sontek (Sección 7.1). Para fines del modelo fue necesario realizar una recopilación de información batimétrica y datos de viento (Sección 7.2). La descripción, configuración y validación del modelo son explicadas en la sección 7.3.

### 7.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó durante los días 9 y 10 de diciembre de 2017. Se obtuvieron perfiles de salinidad y temperatura en 18 estaciones pertenecientes al cuerpo y boca norte de la bahía con un CastAway-CTD (Figura 1, Figura 2-A, Anexo A). Los datos de salinidad y temperatura fueron descargados del instrumento con el software del fabricante CastAway-CTD y graficados. Los perfiles transversales generados son presentados en la sección de Resultados (sección 8.1), además de ser utilizados en la validación del modelo numérico (sección 7.3.3).

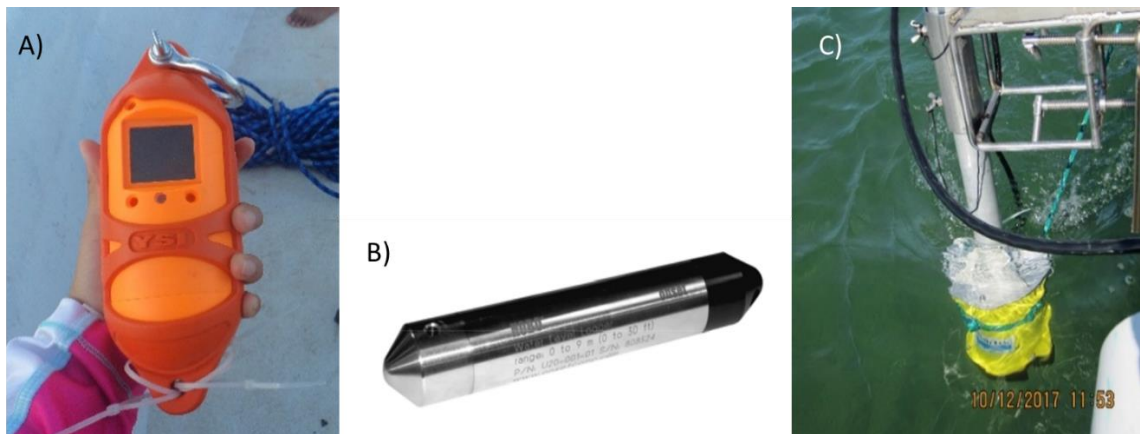


Figura 2. A) CastAway-CTD, instrument de medición de variables termohalinas, B)HOBO Water Level, instrumento de medición de variaciones del nivel del mar anclado en la comunidad de María Elena (Figura 1), C) ADP Sontek, perfilador de corrientes, utilizado en la Boca Norte de la BES

Fueron anclados dos sensores modelo HOBO Water Level U20-001-01 (Figura 2-B). El primero en el muelle de la población María Elena cercano a la Boca Norte

de la Bahía del Espíritu Santo en las coordenadas 19.40709°N -87.51585°W (Figura 1, AME), a una profundidad de 80 cm, programado para tomar datos cada minuto. El segundo sensor fue anclado en la cabeza de la Bahía, en las coordenadas 19.2386°N -87.64453°W (Figura 1, ACB), a una profundidad de ~1.0 m. De manera general el procesamiento de los datos consistió en realizar la extracción de datos del instrumento para después. La serie de tiempo de variación del nivel del mar del sensor AME es utilizada en la validación del modelo numérico (Sección 7.3.3), mientras que resultados del segundo sensor (ACB) son presentados en la sección 8.2.

Se realizaron mediciones de corrientes con un perfilador acústico de corrientes ADP SonTek (Acoustic Doppler Profiler) (Figura 2-C). Se realizó un transecto en la Boca Norte de la BES a una velocidad promedio de 5 nudos. Los datos generados por el instrumento fueron almacenados en un archivo dentro del software del fabricante Current Surveyor. La gráfica generada es presentada en la sección 8.2 – Figura 14. Información complementaria al trabajo de campo puede ser consultada en el informe técnico de la salida de campo (Carrillo *et al.* 2017)

## **7.2 Recopilación de información**

La batimetría de la BES se obtuvo a partir de la digitalización de la carta náutica de la SEMAR publicada en 2006 (Carta S.M. 931.1). El levantamiento batimétrico mostrado en la carta náutica se efectuó en 2003 por la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. Un total de 2079 puntos fueron obtenidos a través de la digitalización, los cuales incluyen a la Bahía del Espíritu Santo y la zona marina adyacente a esta. La BES presenta una profundidad media de 1.4 m; con profundidades de 0.4 m en las zonas más someras y de hasta 40 m en el canal de entrada a la laguna arrecifal. Las profundidades caen abruptamente pasando la barrera arrecifal alcanzando hasta 800 m de profundidad en 3 km, aproximadamente (Figura 1).

Los datos de magnitud y dirección del viento fueron obtenidos de la estación meteorológica Sian Ka'an II administrada por el SMN-CONAGUA para los meses enero a octubre de 2017. No se contó con los datos de noviembre y diciembre por

lo que la serie fue completada con los datos de la estación meteorológica de Cozumel administrada por el SMN-CONAGUA ubicada a 117.0km de la estación de Sian Ka'an. Con ese fin, en ambas series de datos se identificaron datos faltantes y se eliminaron datos inconsistentes o con errores. Se generaron series sintéticas complementando los espacios sin información. Para ello se empleó una regresión ponderada local (Loess, por sus siglas en inglés) de suavizados de los datos (smoothing-process). El proceso de suavizado se considera local porque cada valor suavizado se determina mediante puntos de datos vecinos definidos dentro del intervalo, para lo cual Loess utiliza un polinomio cuadrático como modelo en la regresión en la cual el polinomio se ajusta utilizando los mínimos cuadrados ponderados, dando más peso a los puntos cercanos al punto cuya respuesta está siendo estimada y menos peso a los puntos más lejanos. Al ser completadas las series de tiempo se obtuvo el coeficiente de correlación entre la estación de Sian Ka'an con la de Cozumel, el cual fue de  $r = 0.72$ . Se realizó un ajuste de curvas a los datos de agosto a octubre, con el fin de reconstruir la serie a partir de las funciones polyfit y polyval de MatLab para los meses noviembre y diciembre de 2017 de la serie de Sian Ka'an. La velocidad y dirección predominante en la serie reconstruida fue de 0.82 m/s y  $99.88^\circ$  respectivamente (Figura 3).

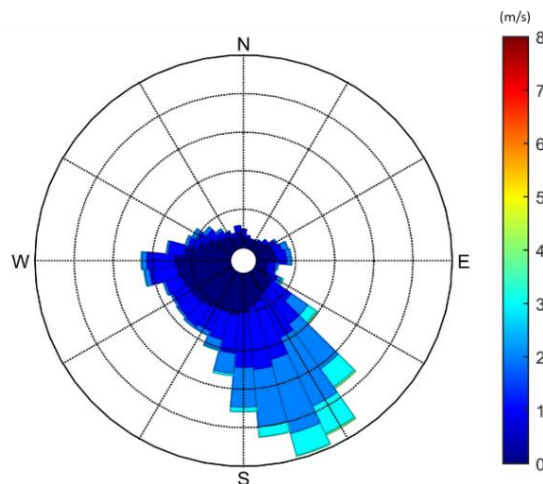


Figura 3. Rosa de los vientos con los datos de la serie reconstruida Sian Ka'an para el año 2017

### 7.3 Simulación Numérica

Delft3D es un software de simulación hidrodinámica que ha sido aplicado de forma satisfactoria en múltiples ambientes oceánicos y costeros en México (e.g. García *et al.* 2014, Ruíz-Sarrazola 2015, Casares-Salazar y Mariño-Tapia 2016, Medina-Gómez *et al.* 2016, Ruíz-Martínez *et al.* 2016). Delft3D es un software de acceso público con una interfaz gráfica disponible lo que lo hace versátil (Betancur-Pérez 2013). La descripción del modelo, así como la configuración y validación se presentan en las siguientes secciones.

#### 7.3.1 Descripción del modelo

El modelo Delft3D es un software integrado para la modelación numérica bidimensional y tridimensional de la hidrodinámica, fenómenos de transporte, morfología, oleaje, calidad del agua. Tiene la capacidad de integrar la interacción entre procesos a partir del cálculo de flujos no estacionarios considerando la implementación de diversos forzamientos (e.g. marea, viento, oleaje, corrientes) (Deltares 2014).

Las ecuaciones de gobierno dictaminantes implementadas en el modelo corresponden a las ecuaciones de Navier-Stokes con integración de los términos de transporte, bajo los supuestos de las aproximaciones de Boussinesq y aguas someras (Eqs. 1 y 2).

$$\text{Eq (1)} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f v + \frac{\tau_{bx}}{\rho_w(d+\eta)} - \frac{F_x}{\rho_w(d+\eta)} - \zeta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\text{Eq (2)} \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f u + \frac{\tau_{by}}{\rho_w(d+\eta)} - \frac{F_y}{\rho_w(d+\eta)} - \zeta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0$$

En donde  $d$  es la profundidad del agua bajo el plano de referencia (m),  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $F_x$  y  $F_y$  son las componentes cartesianas de fuerzas externas (N/m<sup>2</sup>),  $u$  y  $v$  es la velocidad promediada (m/s),  $\rho_w$  es la densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>),  $\zeta$  es el coeficiente de difusión (viscosidad turbulenta) (m<sup>2</sup>/s),  $\eta$  son las variaciones de nivel del mar (m),  $g$  es la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $\tau_{bx}$  y  $\tau_{by}$  son las componentes cartesianas del esfuerzo cortante de fondo (N/m<sup>2</sup>).

Las ecuaciones son resueltas a través del método de diferencias finitas y la discretización del dominio a partir de mallas estructuradas ortogonales en coordenadas rectilíneas o curvilíneas (Deltares 2014). Para cada celda en el dominio se describen los niveles del agua (centro de la celda), profundidad (nodo) y componentes de la velocidad (centro de las caras de las celdas) en la dirección  $x$  ( $u$ ) y en la dirección  $y$  ( $v$ ). Dicho sistema de mallado y cómputo es conocido como Arakawa tipo C, comúnmente empleado en mallas ortogonales. Las ventajas en la utilización de esta celda es que disminuye el error y minimiza el esfuerzo computacional (Castanedo y Medina 2002, Luijendijk 2001, Ruíz-Sarrazola 2015).

Es importante destacar que la exactitud y precisión de la solución de cualquier sistema de ecuaciones diferenciales, ya sea analítica o por métodos numéricos, depende de las condiciones de frontera; es decir, la cercanía de la solución del sistema a los valores reales buscados depende de los datos que se ingresen al modelo matemático. En la presente simulación numérica se hace un esfuerzo para obtener datos de calidad y se propone un monitoreo de larga duración para un mejor resultado en la aproximación a la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

### 7.3.2 Configuración del modelo

El modelo es implementado en modo bi-dimensional (barotrópico). La configuración del modelo se realizó utilizando el módulo FLOW del modelo Delft3D, el cual presenta una interfaz para la introducción de datos. Los datos son seleccionados a partir de las características de la BES (batimetría, línea de costa, condiciones de temperatura y salinidad).

#### *Dominio del cómputo*

La discretización del dominio consideró una malla estructurada curvilínea con 13354 celdas y 13859 nodos, con una resolución espacial de 102 m en las bocas norte y sur (los sitios de interés), 170 m en el cuerpo de la bahía y 302 m en la frontera abierta. Se delimitó el dominio de cálculo en función de la profundidad y la batimetría de la zona, considerando profundidades máximas de hasta 46.3 m

en la frontera abierta e inferiores a 1.0 m en las zonas más someras de la bahía (Figura 4).

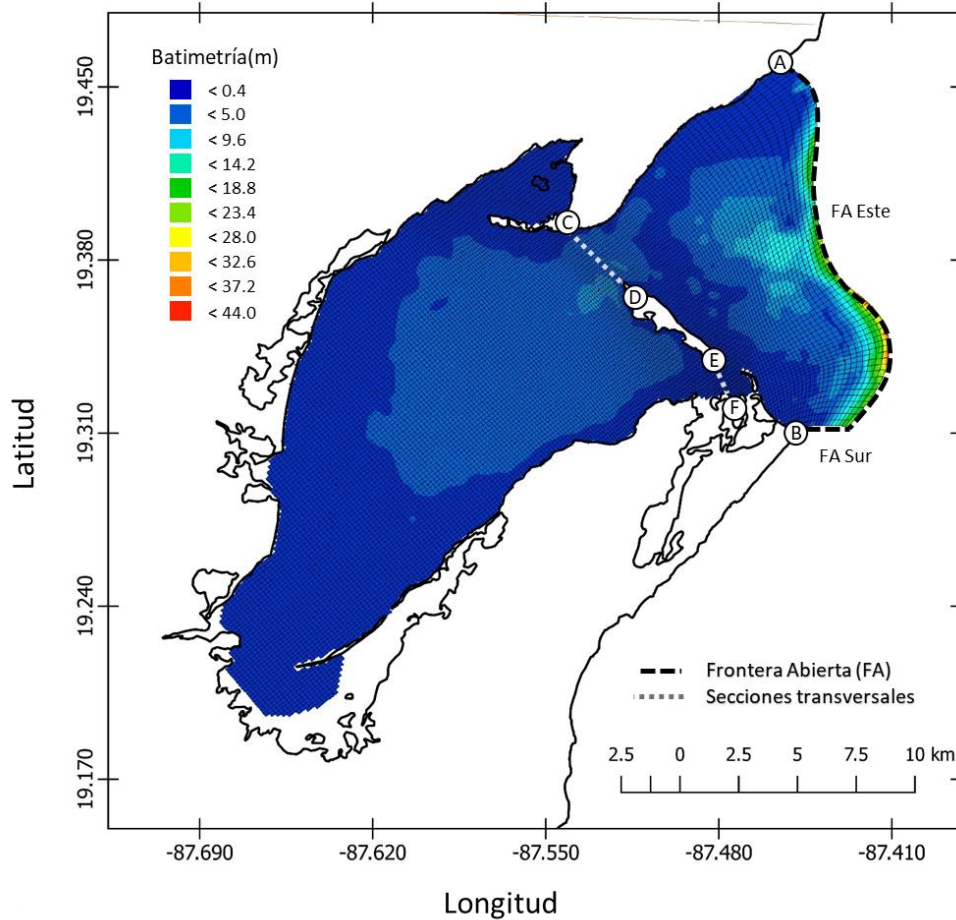


Figura 4. Dominio del modelo con batimetría, fronteras abierta propuesta para el modelo numérico (FA) y secciones trasversales utilizadas en el cálculo del gasto (Q – Sección 8.2)

#### *Condiciones iniciales y de frontera*

Se estableció el nivel del mar en 0 m para comenzar con la fase ascendente de la marea. Para la salinidad y temperatura se consideraron los valores de 26.6 y 26.1 °C, respectivamente. Dichos valores corresponden al promedio obtenido durante las mediciones desarrolladas en la campaña de muestreo (Sección 7.2). El término de Rugosidad utilizado es el de Manning con un valor de 0.03, mientras

que el valor de viscosidad turbulenta fue de  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , ambos valores fueron seleccionados siguiendo el criterio y metodología de Casares-Salazar y Mariño-Tapia (2016) y Medina-Gómez *et al.* (2016).

Las condiciones de frontera implementadas en el modelo numérico son del tipo cerrado y abierto. La frontera cerrada es coincidente con la línea de costa y hacia el interior de la Bahía del Espíritu Santo. En la frontera cerrada las velocidades se establecen en cero. Por otra parte, la condición de frontera abierta considera A ( $19^{\circ}27'34''\text{N}$ ,  $87^{\circ}27'16''\text{O}$ ) y B ( $19^{\circ}18'44''\text{N}$ ,  $87^{\circ}26'48''\text{O}$ ) como el punto inicial y final, sin embargo, esta se encuentra dividida en dos partes, frontera Este y frontera Sur. La frontera Este se encuentra ubicada a 8.0 km de distancia de la boca y mide 17 km; bordea el límite interno de la barrera arrecifal con el fin de evitar valores altos de profundidad ante el supuesto de aguas someras del modelo (FA Este - Figura 4). La frontera Sur mide 2.7 km (FA Sur - Figura 4). El forzamiento considerado se introdujo a través de la frontera abierta asumiéndose una variación de la superficie libre con los niveles de marea astronómicas a partir de las cuatro componentes de marea dominantes para la zona de estudio (Sección 6). La amplitud y fase de las componentes de marea se presentan en la Tabla 1 y se representan en la Figura 5. Para la frontera abierta, se impusieron condiciones de salinidad de 35 y temperatura de  $26.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , correspondientes a los valores promedio de la estación C1 (estación más próxima a la frontera, Figura 1).

Tabla 1. Amplitud y Fase de las componentes de marea dominantes en la zona de estudio. Tomadas de Kjerfve (1981)

Componente de Marea	Amplitud de onda (cm)	Fase ( $^{\circ}$ )
Semidiurna		
M2	7.4	77
S2	2.8	37
N2	2.3	62
Mixta		
O1	3.1	9



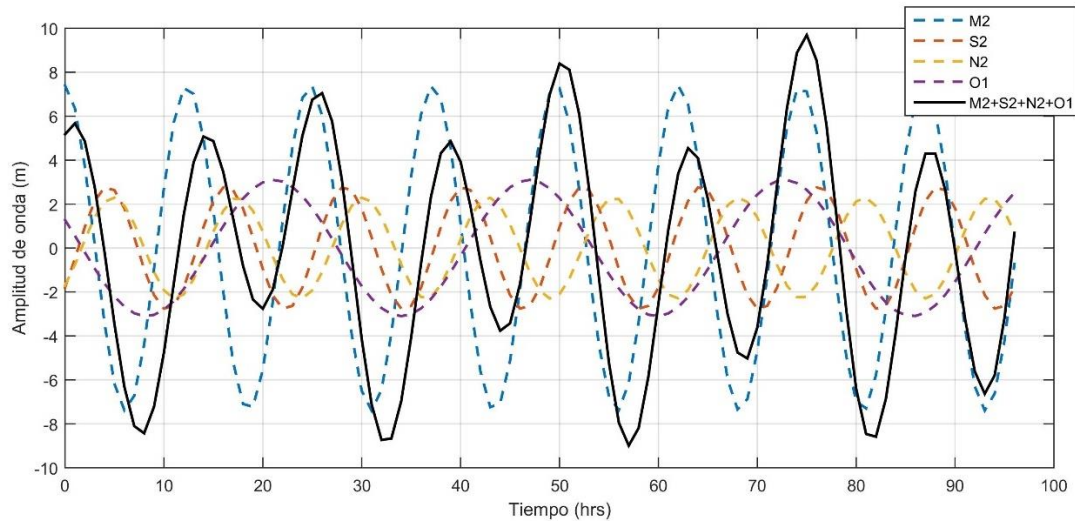


Figura 5. Principales componentes de marea utilizadas para la zona de estudio. En donde la línea azul representa la componente M2, línea roja S2, línea amarilla N2, línea morada O1 y línea negra la suma de las 4 componentes de marea.

Adicional a los forzamientos de marea, y las condiciones de temperatura y salinidad, se consideró el forzamiento del viento, para lo cual se empleó la serie de tiempo de vientos reconstruida a partir de las mediciones de las estaciones meteorológicas de Sian Ka'an II y Cozumel proporcionadas por el SMN-CONAGUA (Sección 7.1.2). Ante lo expuesto en la sección 6, la zona de estudio se caracteriza por presentar tres patrones representativos de viento: vientos del Sureste, vientos Alisios y vientos Nortes. Dichos patrones de viento fueron localizados en la serie anual de viento, con la condición de un comportamiento lo más cercano a lo continuo por un mínimo de 4 días, y extraídos para después generar archivos independientes que serían cargados en los diferentes escenarios del modelo. Para un mayor entendimiento del comportamiento del sistema con los forzantes de viento, los periodos antes y después de la condición patrón se sustituyen con el valor promedio de rapidez y dirección del viento. Cada serie de viento tenía una duración de 12 días (duración de cada simulación), los primeros 5 días contenían el valor promedio de velocidad (tiempo de estabilización del modelo), seguidos de la condición patrón de viento (vientos del Sureste, Alisios o Nortes, 4 a 5 días) y finalizando con un periodo de 2 a 3 días del valor promedio.

Para analizar la circulación en la BES se plantean los siguientes escenarios con los forzamientos de viento y marea, durante mareas vivas y muertas:

Tabla 2. Escenarios de modelación generados para la validación y con distintas condiciones de viento

Escenarios	Forzante Viento	Periodo de simulación (2017)	Duración
Validación	Serie de tiempo	01 – 20 diciembre	20 días
Sw + Mv	Vientos del Sureste	01 – 12 febrero	12 días
Sw + Mm	Vientos del Sureste	09 – 20 febrero	12 días
Tw + Mv	Vientos Alisios	03 – 14 marzo	12 días
Tw + Mm	Vientos Alisios	11 – 22 marzo	12 días
Nw + Mv	Vientos Nortes	06 – 17 diciembre	12 días
Nw+ Mm	Vientos Nortes	15 – 26 diciembre	12 días
Mv	No	01 – 12 febrero	12 días
Mm	No	09 – 20 febrero	12 días

Sw- Vientos Sureste; Tw- Vientos Alisios; Nw- Vientos Nortes; Mv- Mareas vivas; Mm- Mareas muertas

### 7.3.3 Validación del modelo

Con el fin de validar el modelo en el área de estudio se realizó una simulación que contempla el periodo de muestreo en campo realizado durante diciembre de 2017. Los resultados obtenidos de variación del nivel del mar son comparados con los obtenidos durante la campaña (Sección 7.1). Para ello es calculado el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson, el coeficiente de determinación  $r^2$  y el error a partir de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) Eq (3).

$$\text{Eq (3)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_{OBS} - x_{MOD}]^2}$$

En donde  $X_{MOD}$  y  $X_{OBS}$  pertenecen a los  $N$  valores resultado del modelo numérico y los datos observados respectivamente (Medina-Gómez *et al.* 2016).

Para los datos de variaciones del nivel de mar se obtuvo un valor de  $r = 0.84$ , es decir que, existe una correlación entre los datos medidos y modelados del 84%,

con un valor de RMSE de 0.04 m. Adicionalmente la Figura 6 muestra la variación del nivel del mar de los datos medidos y modelados, mostrando la correlación que existe entre ambas series de tiempo.

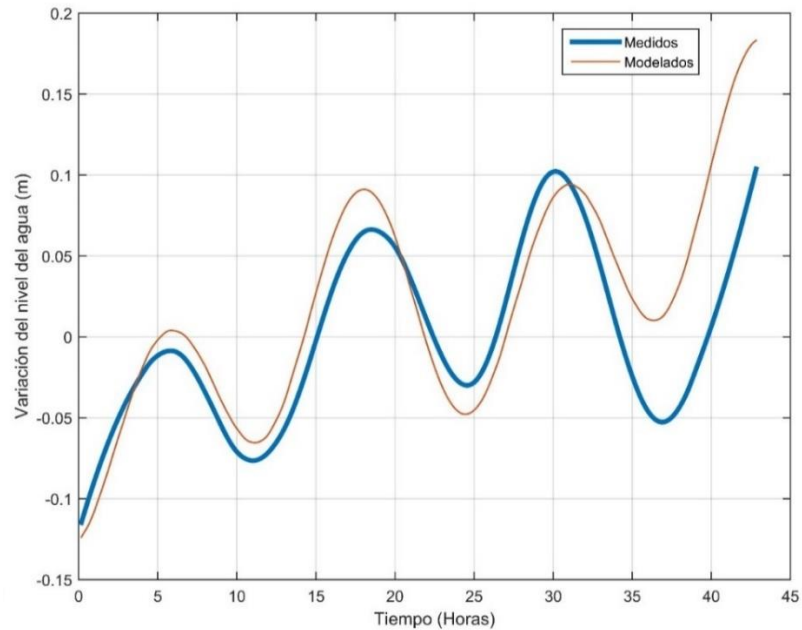


Figura 6. Validación del modelo numérico de datos de variación del nivel del mar. Serie de tiempo de datos medidos (línea azul) y modelados (línea roja).

El coeficiente de determinación indica que el modelo reproduce en un 70% la variabilidad de los datos obtenidos en campo, lo cual se ve reflejado en el RMSE ya que obtiene un error de ~20% en el modelo. Ante lo expuesto, se concluye que el modelo logra reproducir la variabilidad del nivel del mar de la BES en un 70%, por lo que se procedió a realizar los escenarios planteados de circulación de la bahía.

## 8 Resultados

### 8.1 Muestreo en campo

A partir de los datos obtenidos con el CastAway-CTD se generó un diagrama TS en el cual es posible visualizar los datos de las 18 estaciones de muestreo (Figura 7). Se presentan valores promedio de salinidad de  $28.1 \pm 3.3$ , temperatura  $25.7 \pm 0.3$  °C y  $\sigma\text{-t}$   $17.9 \pm 2.4$ , para todas las estaciones de muestreo. Es claramente visible una diferenciación entre las estaciones del interior del cuerpo de la bahía (puntos negros) con las estaciones de la Boca Norte de la Bahía (puntos azules). Los perfiles verticales representativos de Boca y cuerpo de la BES correspondientes a salinidad, temperatura y densidad se presentan en el Anexo B.

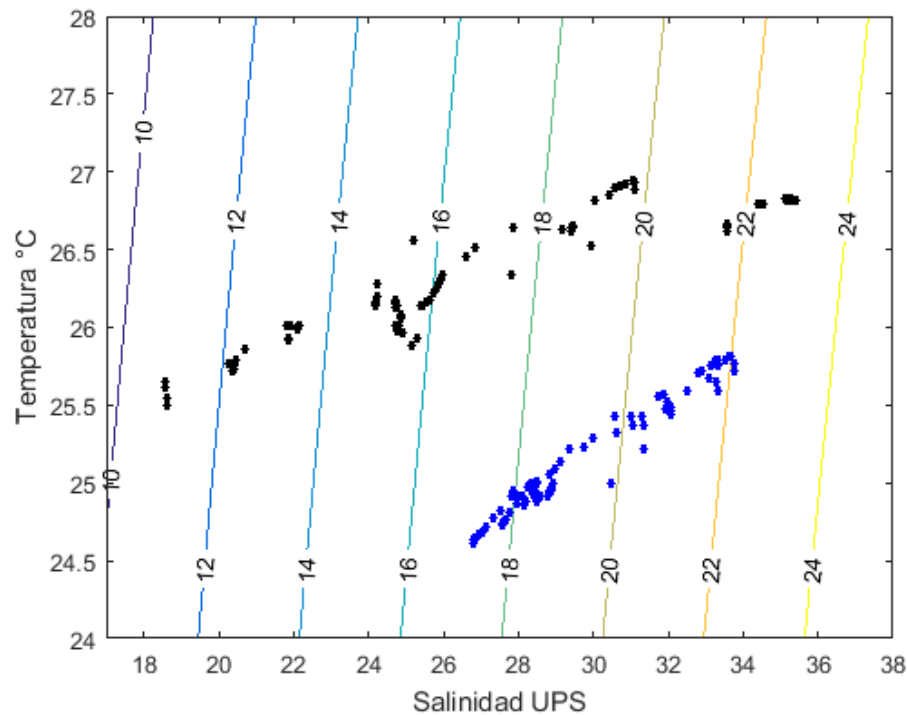


Figura 7. Diagrama TS de los datos de la campaña de muestreo. Los puntos negros corresponden a las estaciones del cuerpo de la bahía (de C1 a C12), los puntos azules corresponden a las estaciones de la boca (de B1 a B6).

De los transectos correspondientes al cuerpo y Boca Norte de la Bahía se graficó la estructura de la salinidad, temperatura (°C) y densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), expresada por la anomalía  $\sigma\text{-t}$ . El transecto del cuerpo de la bahía incluye las estaciones de

C1 a C12 de oeste a este. El transecto de la Boca Norte, incluye las estaciones B1 a B6 y va de norte a sur.

En el transecto del cuerpo de la Bahía (Figura 8) la salinidad presentó gradientes horizontales que van de 18.5 a 35.4, con valores máximos en la zona adyacente al océano (laguna arrecifal) y mínimos en la cabeza de la bahía. La temperatura presentó gradientes horizontales de 25.4 a 27.0 °C, con valores bajos cercanos a la cabeza de la bahía y los más altos en la laguna arrecifal y Boca de la BES, mientras que los valores de sigma-t variaron de 10.8 a 23.1 (Figura 8-C), la densidad presenta un comportamiento similar al de salinidad por lo que la densidad en la columna de agua se encuentra determinada por la salinidad. Los perfiles se mantienen verticalmente homogéneos con excepción de la estación C4, en donde es claramente visible un perfil estratificado, con mayor salinidad y temperatura en el fondo y valores más bajos en la superficie. La estación C4 presentan la máxima profundidad de toda la BES registradas durante el muestreo *in situ* (6.8 m).

Para el transecto de la boca (Figura 9) es claramente visible un perfil estratificado en donde la salinidad presenta un comportamiento análogo al de densidad y por lo cual se describen en forma paralela. En ambos casos se observa una marcada estratificación vertical indicando un flujo en el fondo de agua más salada (33.8) y de mayor densidad (sigma-t = 22.2); y un flujo en la superficie con menor salinidad (26.7) y densidad (sigma-t = 17.2). La estratificación es observable en la mayoría de los perfiles con excepción del perfil B6. En el caso del perfil de temperatura se muestra una estratificación, con valores mínimos en la superficie de 24.6 °C y máximos en el fondo de 25.8°C, mostrando el gradiente máximo a 2-3 m de profundidad, aproximadamente.

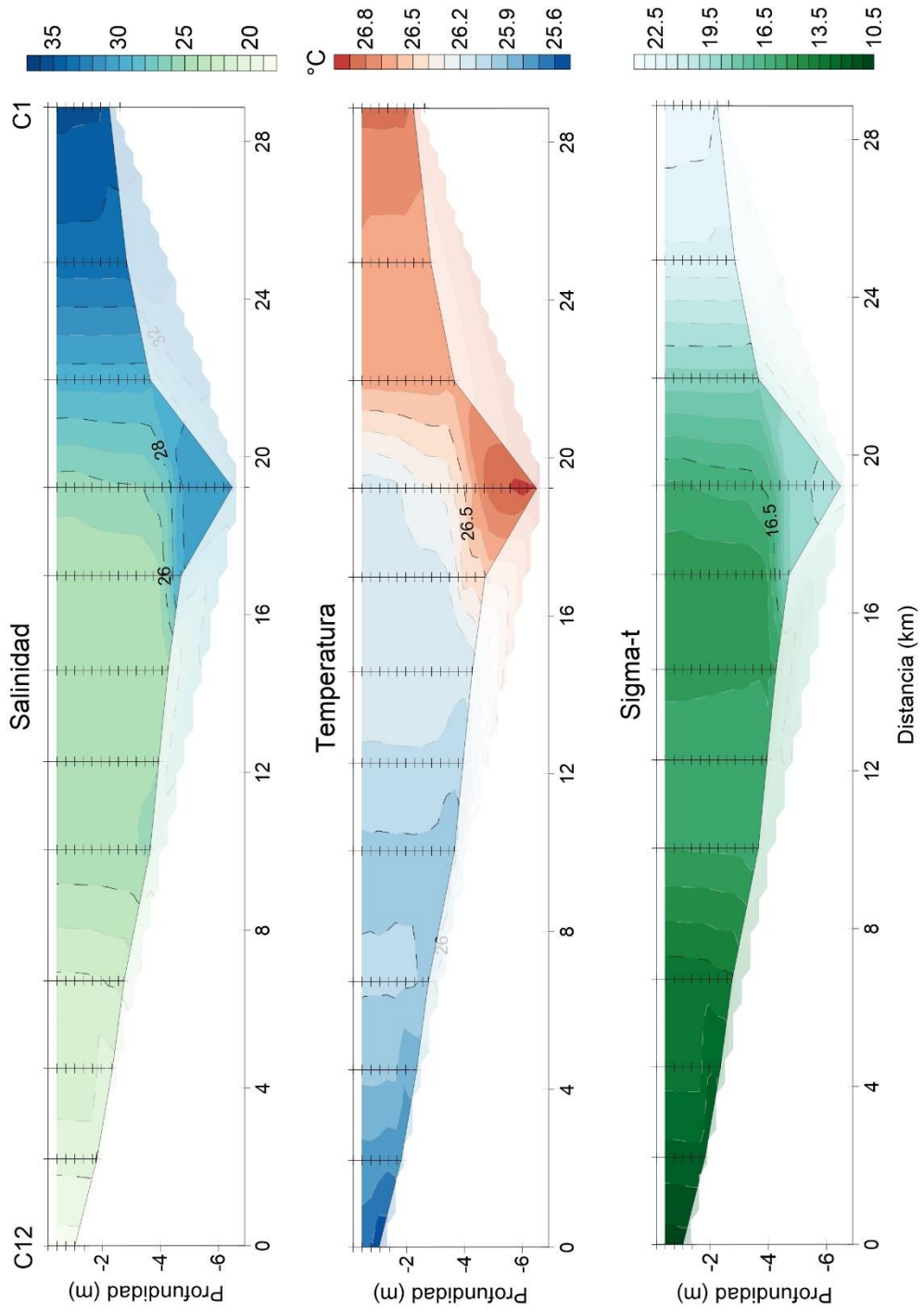


Figura 8. Contornos transversales de Salinidad, Temperatura y Sigma-t para el cuerpo de la Bahía, de las estaciones C12 a C1 incluyendo la estación B3

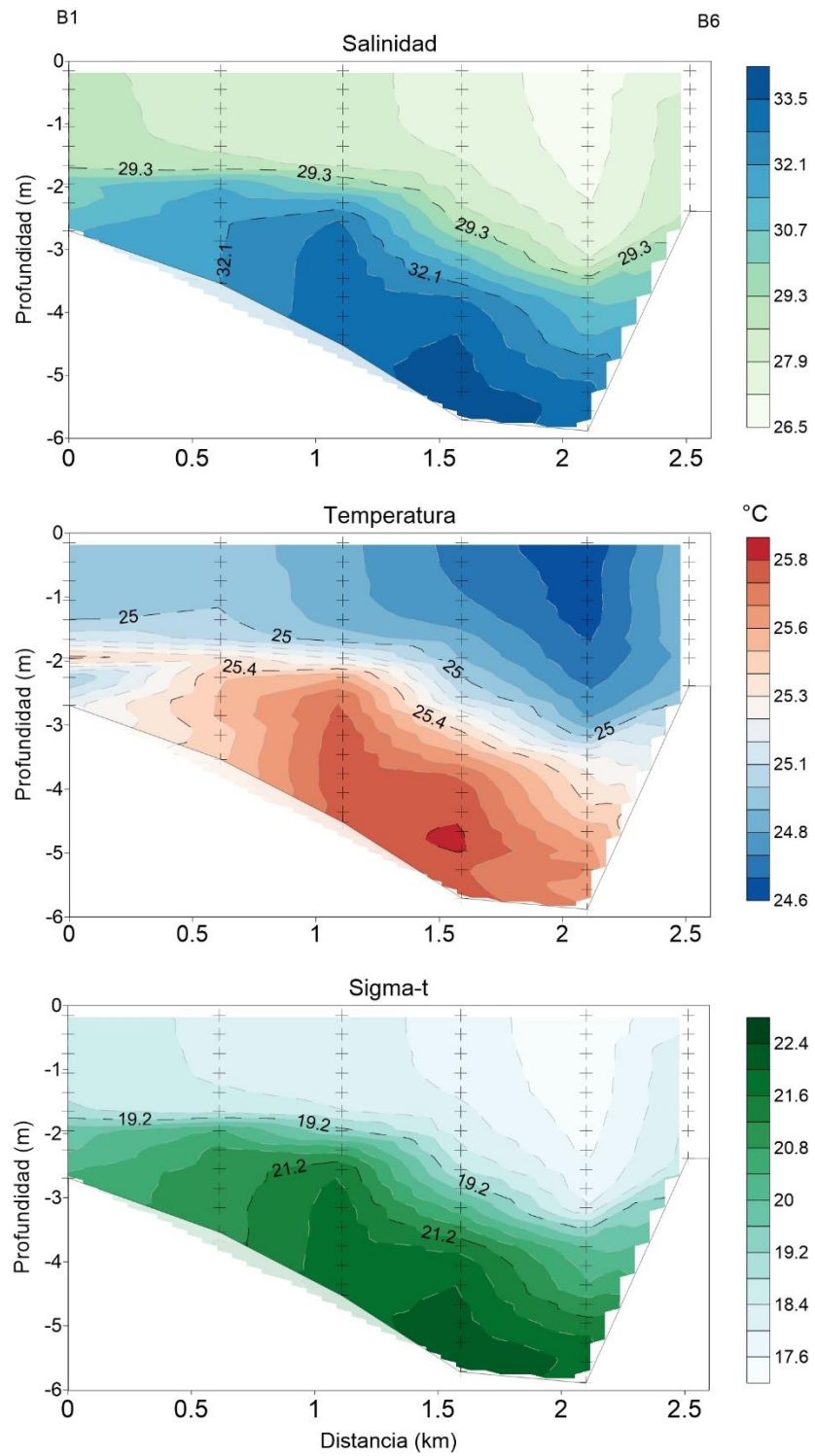


Figura 9. Contornos transversales de Salinidad, Temperatura y Sigma-t para el cuerpo de la Bahía, de las estaciones B1 a B6.

## 8.2 Modelo numérico

De los datos obtenidos por el modelo numérico fueron calculados los valores promedio de la magnitud de la velocidad de la corriente para toda la bahía, obteniéndose magnitudes promediadas en la vertical de  $V = 0.071 \pm 0.058$  m/s para mareas vivas y  $0.029 \pm 0.024$  m/s para mareas muertas, considerando todas las condiciones de viento.

A partir de la distancia entre pleamar y bajamar, se calculó la altura de la onda de marea, mareas vivas y muertas, obteniendo valores promedio de  $\eta = 0.26$  m y  $0.038$  m, respectivamente. El prisma de marea (P), a partir del producto de rango de marea por el área de la cuenca, resultó de  $89.4 \times 10^6$  m<sup>3</sup> en mareas vivas y  $13.0 \times 10^6$  m<sup>3</sup> en mareas muertas.

La estructura vertical de los campos de salinidad y de temperatura a partir de los escenarios modelados de circulación en la BES, asociados a los puntos máximos de pleamar y bajamar (con respecto a las variaciones del nivel del mar en la laguna arrecifal), se muestran en el Anexo C. En dichos perfiles, se observa una columna de agua verticalmente homogénea y con gradientes horizontales mínimos de salinidad y temperatura en las estaciones cercanas a la cabeza de la bahía, las magnitudes de la velocidad son bajas, con un promedio de  $V < 0.04$  m/s y  $V = 0.01$  m/s para mareas vivas y muertas, respectivamente (Tabla 3). Las diferencias de temperatura entre la laguna arrecifal y el cuerpo de la bahía oscilan entre  $0.4$  °C, mientras que la salinidad presenta un gradiente horizontal a lo largo de toda la Bahía, con diferencias entre la laguna arrecifal y la cabeza de hasta  $5.5$ . La intrusión de agua de mar tiene una influencia de hasta  $14$  km hacia adentro de la Bahía. En todos los escenarios se muestra un mismo patrón, durante la pleamar se tiene una mayor intrusión de agua salina que durante la bajamar, además de presentar un gradiente mayor en pleamar ( $\sim 5.4$ ) que en bajamar ( $\sim 5.0$ ) (Anexo C). El gradiente máximo y mínimo se presenta en el escenario forzado con vientos Alisios durante la pleamar de mareas vivas ( $5.5$ ) y muertas ( $4.8$ ) respectivamente. En el escenario de vientos del Sureste no se presentan variaciones en los valores de salinidad y temperatura de mareas vivas a muertas, por lo que los perfiles



tienen el mismo comportamiento en cada momento de la marea (pleamar y bajamar). En el caso del escenario forzado solo con mareas, se presentan las variaciones máximas de salinidad entre mareas vivas y muertas ( $\Delta S = 0.5$ ), por arriba de los escenarios forzados con viento y mareas.

Para cada escenario de circulación forzado con viento y marea, las mayores variaciones de nivel del mar entre pleamar y bajamar (con respecto a la laguna arrecifal) durante mareas vivas se presentaron en el escenario forzado con vientos del Sureste ( $\eta = 0.27$  m), mientras que las variaciones máximas en mareas muertas corresponden al escenario con Nortes ( $\eta = 0.045$  m) (Figura 10). El escenario sin condición de viento mostró una mayor variación de nivel del mar durante mareas vivas con  $\eta = 0.28$  m, mientras que en mareas muertas fue de  $\eta = 0.043$  m. Este último valor máximo durante mareas muertas de  $\eta$  se encuentra muy cercano al máximo obtenido y por encima de los valores máximos para los escenarios forzados con vientos Alisios ( $\eta = 0.023$  m) y vientos del Sureste ( $\eta = 0.042$  m).

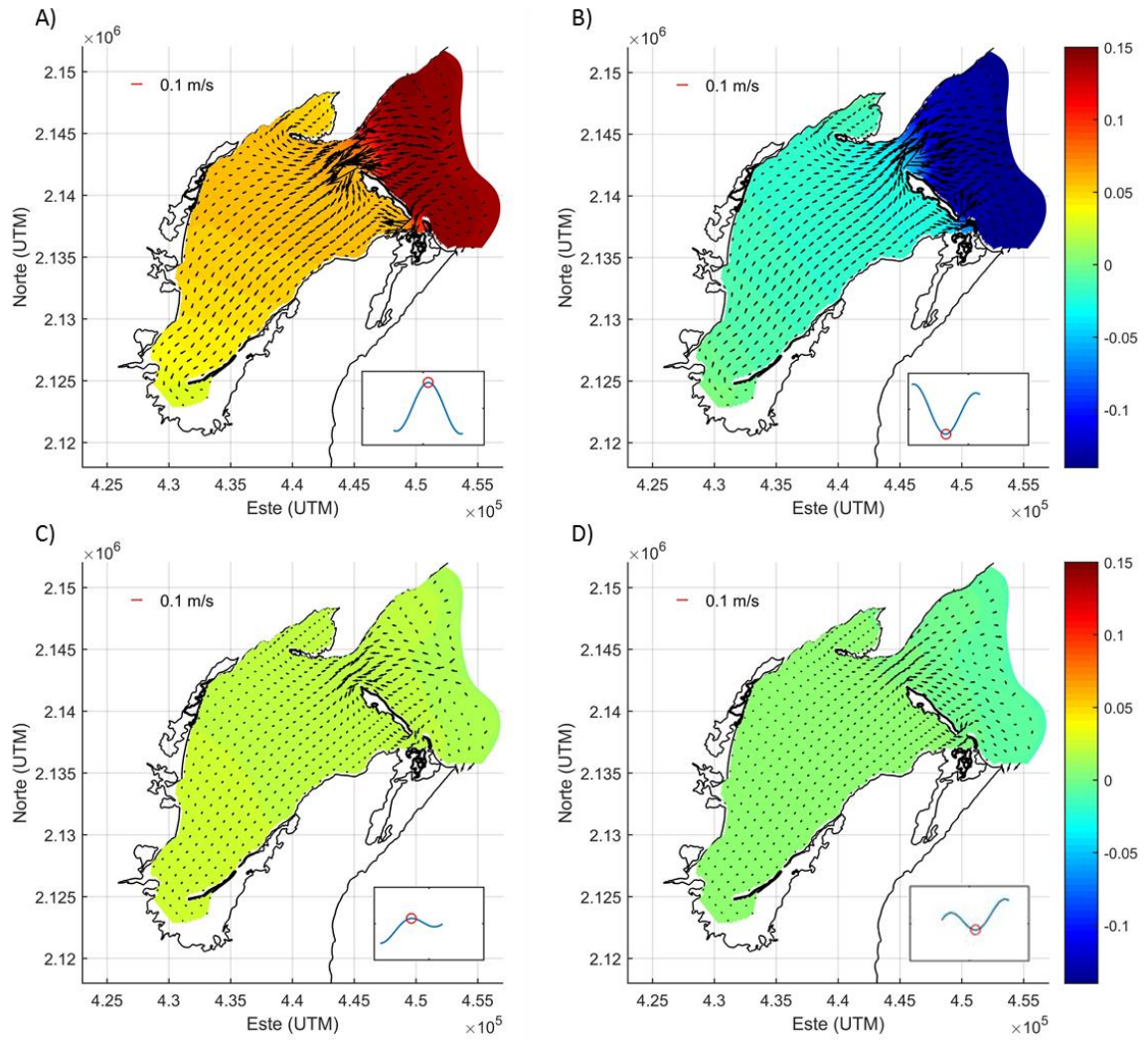


Figura 10. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores).  
 A) Sw + Mv en Pleamar; B) Sw + Mv en Bajamar; C) Tw + Mm en Pleamar; D) Tw + Mm en Bajamar.

La Bahía del Espíritu Santo responde a los cambios de marea, en pleamar y bajamar. Se detectaron áreas de baja energía como la cabeza de la bahía, mientras que las bocas norte y sur presentaron las máximas velocidades. Por ello la BES fue dividida en 4 zonas representativas para su análisis: laguna arrecifal, Boca Norte, Boca Sur y cabeza de la bahía. Para cada zona se calculó la media, y el valor máximo de la magnitud de la velocidad para pleamar y bajamar. Las magnitudes máximas se obtuvieron en la Boca Norte y la Boca Sur de la bahía, mientras que en la laguna arrecifal y la cabeza de la bahía se presentan velocidades de menor magnitud. En las Bocas, los máximos valores de velocidad durante un ciclo de marea se observaron en el punto medio entre pleamar y bajamar (Tabla 3) (Figura 11). Las magnitudes de las velocidades que se alcanzaron en el cuerpo de la bahía siempre estuvieron por debajo de las otras zonas ( $V < 0.04$  m/s). Por otra parte, para el escenario con vientos del sureste durante mareas vivas, la Boca Norte y la Boca Sur mostró las máximas magnitudes de las velocidades con  $V = 0.371$  m/s y  $0.377$  m/s, respectivamente, y para mareas muertas el escenario de Nortes presentó las máximas velocidades en ambas bocas,  $V = 0.19$  m/s y  $0.20$  m/s, para Boca Norte y Sur. Es importante resaltar que el escenario que no presentó forzamientos de viento mostró valores superiores de velocidad tanto en condiciones de mareas vivas y muertas con respecto a los tres escenarios forzados con vientos (Nortes, Alisios y Surestes) (Tabla 3).

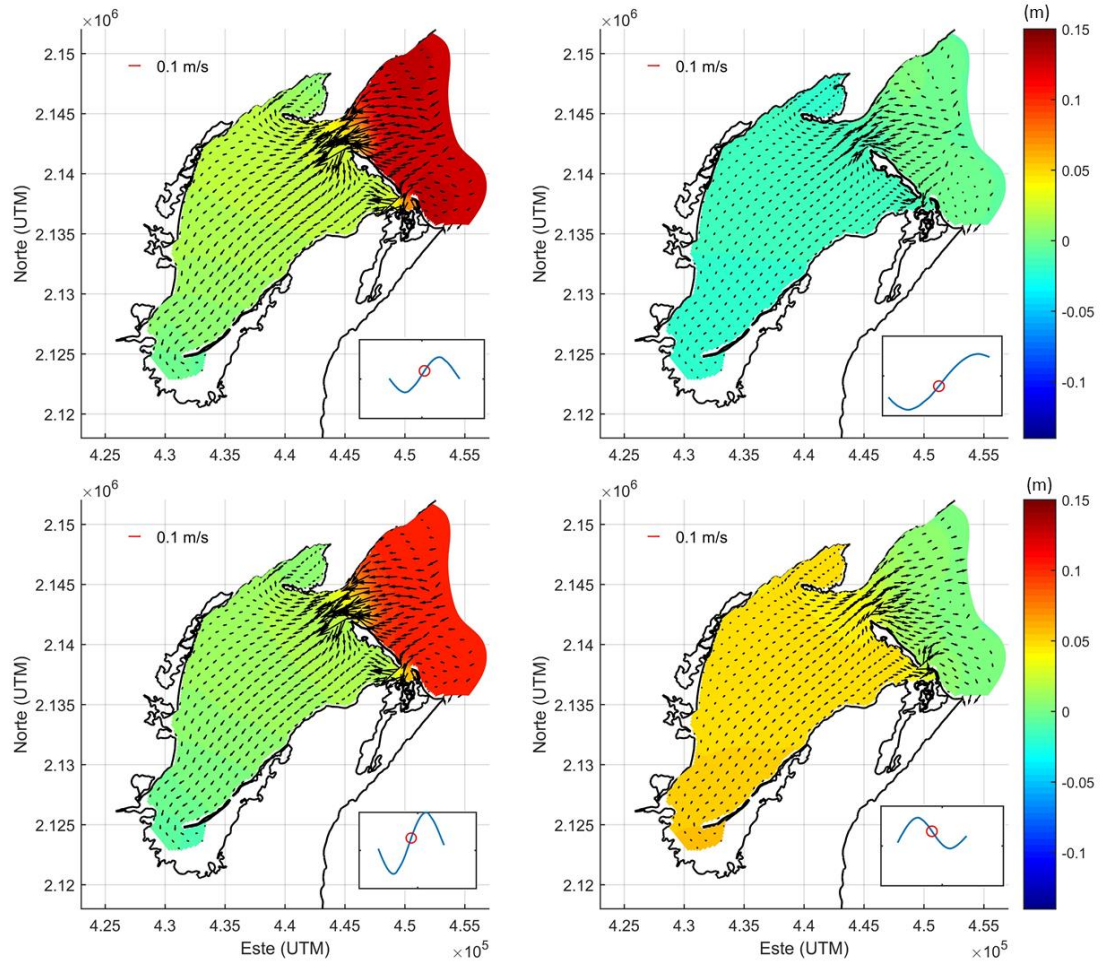


Figura 11. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Velocidades máximas en Boca Norte durante el cambio de pleamar a bajamar. A) Escenario vientos Alisios + Mv; B) Escenario vientos Alisios + Mm; C) Escenario vientos Nortes + Mv; D) Escenario vientos Nortes + Mm.

Tabla 3. Máximos y Media de velocidades (m/s) durante pleamar y bajamar, y valor máximo por ciclo de marea. La laguna es dividida en 4 zonas representativas, Boca Norte y Sur, Laguna Arrecifal y Cuerpo de la Bahía.

Escenario	Zona	Pleamar		Bajamar		Max por ciclo
		Max	Media	Max	Media	
Sw + Mv	Boca Norte	0.35	0.19	0.35	0.18	0.37
	Boca Sur	0.35	0.06	0.34	0.06	0.38
	Laguna Arrecifal	0.28	0.09	0.27	0.09	0.30
	Cuerpo Bahía	0.21	0.04	0.18	0.04	0.22
Sw + Mm	Boca Norte	0.12	0.06	0.12	0.06	0.16
	Boca Sur	0.10	0.02	0.12	0.02	0.16
	Laguna Arrecifal	0.10	0.03	0.10	0.04	0.12
	Cuerpo Bahía	0.07	0.01	0.06	0.01	0.09
Tw + Mv	Boca Norte	0.34	0.19	0.31	0.16	0.36
	Boca Sur	0.34	0.06	0.30	0.05	0.38
	Laguna Arrecifal	0.27	0.09	0.24	0.09	0.29
	Cuerpo Bahía	0.20	0.04	0.16	0.04	0.22
Tw + Mm	Boca Norte	0.11	0.06	0.09	0.05	0.16
	Boca Sur	0.09	0.02	0.09	0.02	0.15
	Laguna Arrecifal	0.11	0.03	0.10	0.03	0.12
	Cuerpo Bahía	0.07	0.01	0.05	0.01	0.09
Nw + Mv	Boca Norte	0.30	0.17	0.29	0.15	0.33
	Boca Sur	0.30	0.05	0.28	0.05	0.34
	Laguna Arrecifal	0.24	0.08	0.22	0.08	0.27
	Cuerpo Bahía	0.18	0.04	0.15	0.03	0.20
Nw + Mm	Boca Norte	0.13	0.07	0.15	0.08	0.20
	Boca Sur	0.11	0.02	0.15	0.03	0.19
	Laguna Arrecifal	0.10	0.04	0.11	0.05	0.14
	Cuerpo Bahía	0.08	0.01	0.08	0.02	0.11
Mv	Boca Norte	0.34	0.19	0.35	0.19	0.37
	Boca Sur	0.34	0.06	0.35	0.06	0.37
	Laguna Arrecifal	0.28	0.09	0.27	0.10	0.29
	Cuerpo Bahía	0.20	0.04	0.18	0.04	0.21
Mm	Boca Norte	0.12	0.06	0.12	0.06	0.16
	Boca Sur	0.10	0.02	0.12	0.02	0.16
	Laguna Arrecifal	0.10	0.03	0.10	0.04	0.12
	Cuerpo Bahía	0.07	0.01	0.06	0.01	0.09

El comportamiento analizado de las variaciones del nivel del mar extraídas del modelo numérico en las diferentes zonas (Laguna arrecifal, Boca Norte, Boca Sur y Cabeza de la Bahía), mostraron un desfase de onda entre la Laguna arrecifal y la Cabeza de la Bahía. La onda que entra a la Laguna arrecifal tuvo un desfase promedio de aproximadamente 2 hrs 40 min con respecto a la cabeza de la Bahía (Figura 13-A). Por otra parte, el desfase de onda entre la Cabeza y la Boca Norte de la BES es de 1 hr 40 min (Figura 12-A). Este comportamiento igualmente observado en los datos *in situ*, presenta un desfase 1 hr 10 min (Figura 13).

De igual forma y para todos los escenarios simulados, las Bocas presentan un desfase de onda de 30 a 40 min entre ellas, siendo la Boca Sur la primera en reaccionar al cambio en el sentido de la onda de marea, mientras que la Boca Norte tiene una reacción más lenta a dicho cambio (Figura 12-B). Al presentarse este fenómeno, es visible que la Boca Sur desempeña un papel importante en el sistema, ya que funciona como la primera salida o entrada (dependiendo el caso) de agua al sistema, a diferencia de la Boca Norte, que al presentar una reacción más lenta se genera un canal bidireccional en el recambio de agua. Esta situación que se vio reflejada en el muestreo en campo y capturada por las mediciones de ADP, en donde una porción de la Boca Norte se encontraba con un flujo entrante mientras la otra mitad presentaba un flujo hacia afuera (Figura 14).

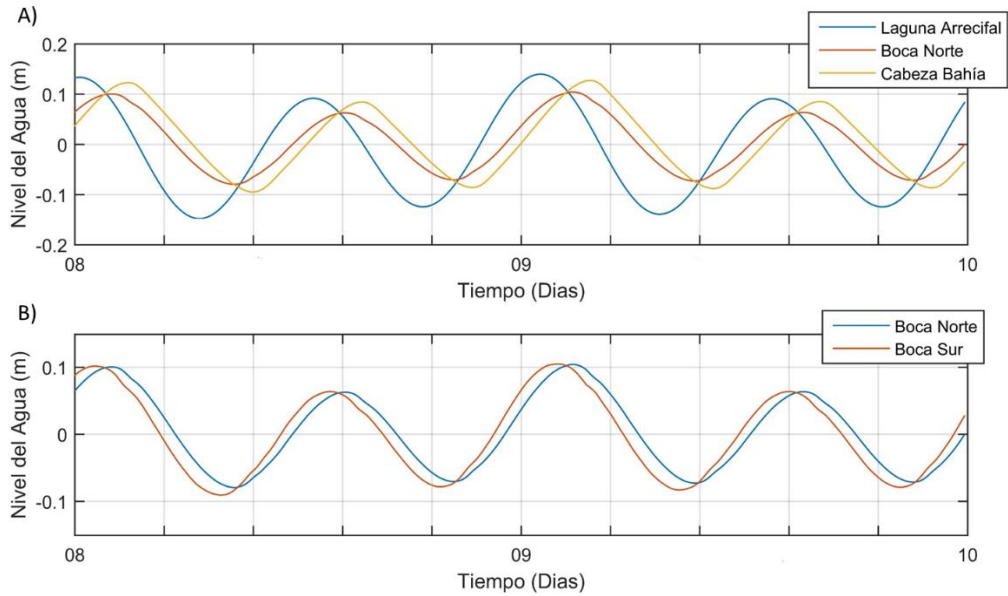


Figura 12. Variaciones del nivel del mar en tres puntos de la BES A) Desfase de onda de marea entre Laguna Arrecifal, Boca Norte y Cabeza de la Bahía. B) Desfase de onda de marea entre Boca Norte y Sur.

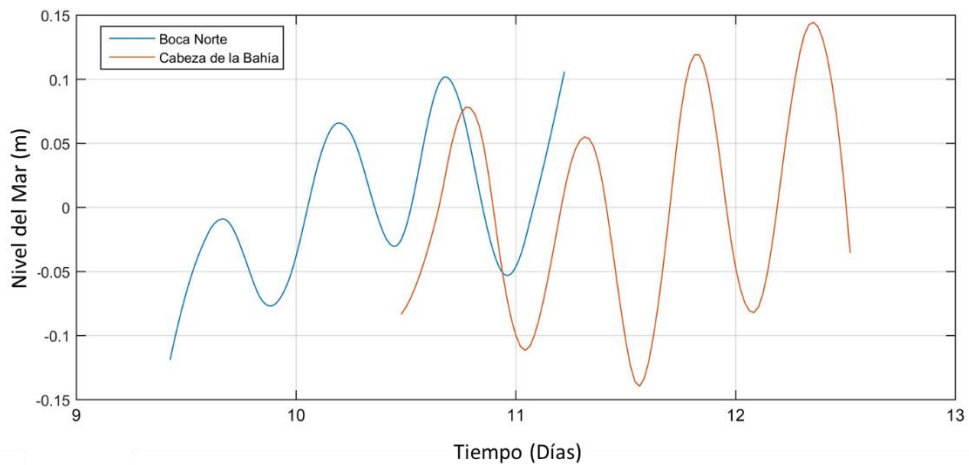


Figura 13. Desfase de la onda de marea considerando los datos de variaciones del nivel del mar registradas por los sensores de presión ubicados en la Boca Norte (AME - Figura 1) y Cabeza de la Bahía (ACB – Figura 1).

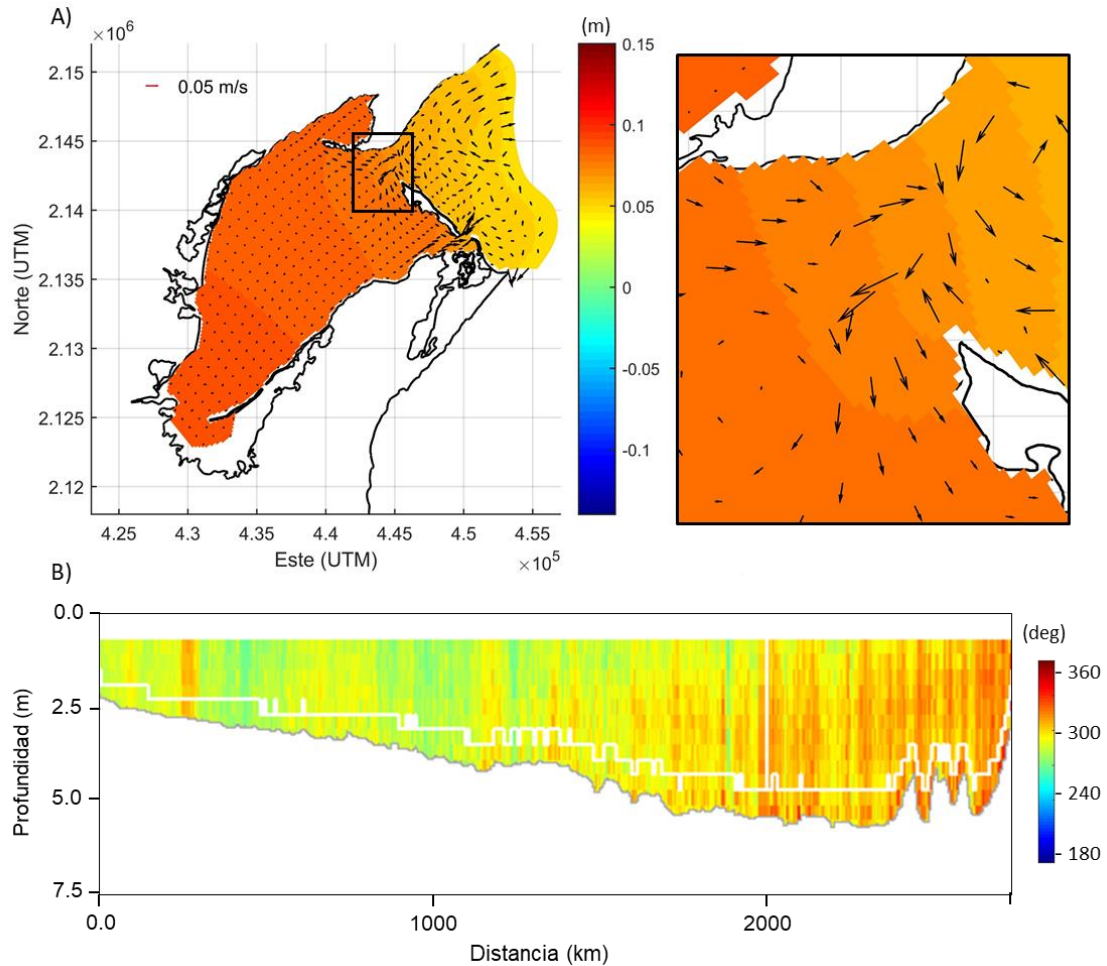


Figura 14. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Flujo bidireccional en Boca Norte. A) Escenario Vientos Nortes + Mm B) Transecto con ADP en Boca Norte.

De acuerdo a los resultados observados, las bocas son las zonas de mayor dinámica que reaccionaron de manera inmediata al cambio de marea generando entrada o salida de agua con las máximas magnitudes de la velocidad del sistema lagunar. Derivado de lo anterior se calculó el gasto ( $Q$ ) para dimensionar la importancia de cada boca en la entrada y salida de agua durante un ciclo de marea (para la pleamar y bajamar máximas durante mareas vivas y muertas) y el tiempo de recambio ( $T_t$ ) (por temporada de vientos) el cual indica que tiempo necesario para remplazar el volumen del agua de la BES por el volumen de entrada por ambas bocas. A fin de determinar el gasto, se consideró la sumatoria del producto



de la velocidad ( $u_i$ ) por el área transversal al flujo ( $A_i$ ) de cada una de las celdas (i) en el dominio de cómputo y que integran la Boca Norte o la Bocas Sur ( $Q = \sum u_i A_i$ ). La velocidad  $u_i$  corresponde a la componente  $u$  en sentido perpendicular al área  $A_i$ . Las secciones transversales se encuentran ilustradas en la Figura 4, en donde la boca Norte se encuentra dividida en 20 segmentos a partir de las coordenadas C (19°23'35.23" N, 87°32'17.98"O) y D (19°22'14.62" N, 87°31'02.11"O), mientras que la boca Sur en 6 segmentos a partir de las coordenadas E (19°20'07.37" N, 87°28'52.20"O) y F (19°19'38.27" N, 87°28'39.76"O). Los valores de  $Q$  en pleamar y bajamar, y  $Q$  en un ciclo de mareas se presentan en la Tabla 4. El signo positivo (+) corresponde a la entrada de agua, mientras que el signo negativo (-) indica salida de agua de la BES. El cálculo del tiempo de recambio se realizó a partir de la ecuación:  $T_t = V/Q_t$  en donde  $V$  es el volumen constante de la BES y  $Q_t$  es la suma de los gastos por boca obtenida en un ciclo de marea, los cuales varían para cada escenario de circulación.

El mayor gasto en la Boca Norte y la Boca Sur se presentó durante mareas vivas cuando la BES es forzada con vientos del Sureste, con  $Q_{\max, BN} = 2647 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{\max, BS} = 375 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente (Tabla 4). En todos los escenarios los valores de  $Q$  en un ciclo de marea de mareas vivas indican entrada de agua por la Boca norte, mientras que la Boca sur muestra valores negativos lo que indica salida de agua. Esto significa que por la Boca Norte entra más agua de la que sale, mientras que la Boca Sur, se tiene una mayor salida de agua que de entrada. El único escenario que difirió con este comportamiento fue el escenario de Tw+Mv, en donde ambas bocas presentaron valores positivos indicando acumulación dentro de la BES (Tabla 4). Los tiempos de recambios más grandes se presentan en el escenario Sw+Mm, mientras que el recambio más rápido de tiene en el escenario Tw+Mv. Esto indica que las condiciones de viento en la BES modifican claramente los tiempos de recambio, situación retomada en la sección 9. En el escenario forzado únicamente con mareas, la suma de  $Q_{\text{ciclo marea}}$  entre bocas presenta valores relativamente cercanos a cero, lo que podría indicar un equilibrio entre el

flujo de salida y entrada de la BES, sin embargo, el tiempo de residencia va de 89 a 273 días.

Los valores de gasto durante un ciclo de marea son graficados (Figura 15), mostrando que la onda de gasto se encuentra deformada ya que difiere de la forma sinusoidal, indicando una no linealidad en la descarga de agua, de igual forma es apreciable que el Q máximo y mínimo difieren de la pleamar y bajamar de la onda de marea.

Tabla 4. Valores calculados de Gasto-Q ( $m^3/s$ ) para la boca Norte y Sur de la BES en pleamar ( $Q_{Pleamar}$ ), bajamar ( $Q_{Bajamar}$ ) y en un ciclo de marea ( $Q_{ciclo\ marea}$ ) bajo condiciones de forzantes de viento y marea. Tiempo de recambio ( $T_t$ ) en días calculado por escenario.

Escenario	Zona	$Q_{Pleamar}$	$Q_{Bajamar}$	$Q_{ciclo\ marea}$	$T_t$
Sw + Mv	Boca Norte	1194.83	-1053.58	119.72	35
	Boca Sur	277.86	-272.03	-3.25	
Sw + Mm	Boca Norte	405.72	-145.09	31.76	358
	Boca Sur	58.92	-70.16	-20.44	
Tw + Mv	Boca Norte	1225.42	-1109.26	211.14	18
	Boca Sur	252.37	-247.41	7	
Tw + Mm	Boca Norte	212.81	-187.79	172.14	24
	Boca Sur	2.90	-63.76	-5.02	
Nw + Mv	Boca Norte	1067.32	-920.04	142.28	29
	Boca Sur	219.04	-220.20	-1.64	
Nw + Mm	Boca Norte	429.33	-318.65	-56.84	46
	Boca Sur	49.08	-82.48	-30.51	
Mv	Boca Norte	1180.29	-1166.38	57.44	89
	Boca Sur	268.79	-265.89	-12.09	
Mm	Boca Norte	418.86	-252.13	34.43	273
	Boca Sur	46.43	-71.76	-19.6	

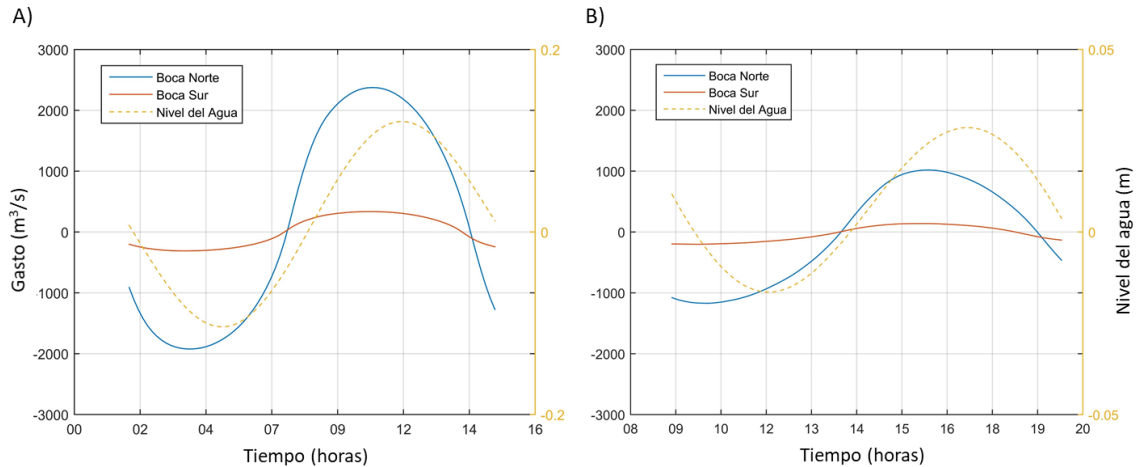


Figura 15. Valores de Gasto ( $Q$ ) para un ciclo de marea en Boca Norte (línea azul) y Boca Sur (línea roja). Se grafican en conjunto con la onda de nivel del mar de cada momento. A) Escenario vientos Nortes + Mv. B) Escenario vientos Nortes + Mm

En todos los escenarios se observó una recirculación con un giro ciclónico en la laguna arrecifal cercano a la boca norte, a una distancia  $\sim 3$  km, que se forma particularmente durante el recambio de agua de pleamar a bajamar. Presentó un diámetro de aproximadamente 3 km, con magnitudes de velocidad menores a  $V = 0.05$  m/s en la periferia, y menores a  $V = 0.01$  m/s en el centro del giro. En mareas vivas, el giro tiene una corta duración (10-20 min), mientras que en mareas muertas el giro se mantiene por más tiempo (20-30 min) dejando un remanente de canales que atraviesan en forma sinusoidal la laguna arrecifal (Figura 16). El giro se ve alimentado por la intensificación de velocidades de la Boca Sur y por el desfase de la onda de marea entre Bocas, mientras que su ubicación es próxima a la presencia de un montículo en el fondo marino (Figura 1).

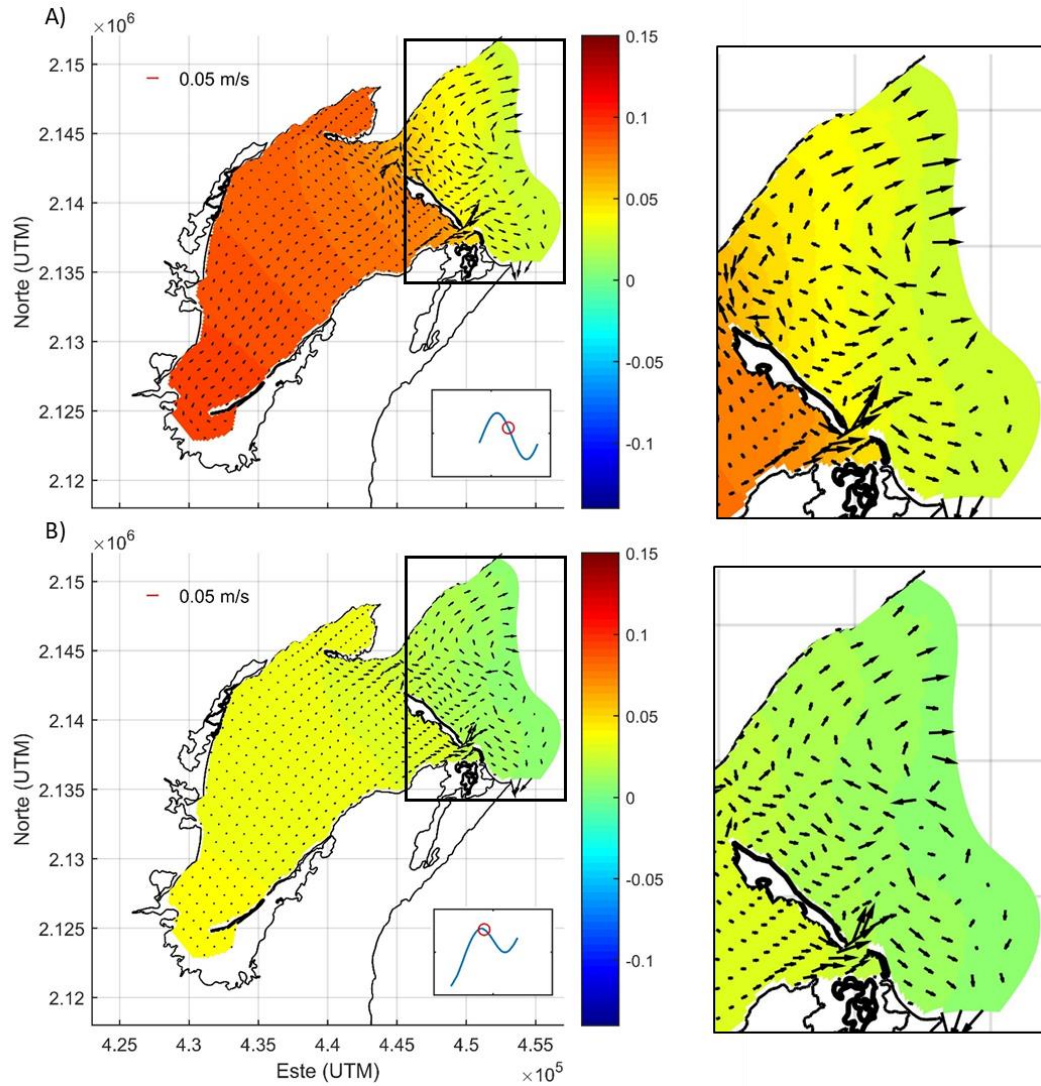


Figura 16. Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores). Generación de giro ciclónico en laguna arrecifal. A) Escenario Vientos Alisios + Mv. B) Escenario Vientos Alisios + Mm

## 9 Discusiones

El comportamiento estuarino a lo largo de la Bahía del Espíritu Santo es del tipo parcialmente mezclado, con gradientes de salinidad ( $\Delta S \sim 17$ ) y temperatura ( $\Delta T \sim 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), similar a lo reportado para Bahía Ascensión ( $\Delta S \sim 20$ ,  $\Delta T \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), esta última ubicada al norte de BES, y ambas dentro de la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an (Medina-Gómez *et al.* 2014).

El perfil del cuerpo de la BES presentó un gradiente horizontal con perfiles verticales homogéneos con excepción de las estaciones C3 a C5, pertenecientes a la sección de la boca norte, y que presentan una estratificación con un gradiente de salinidad y temperatura ( $\Delta S \sim 4$  y  $\Delta T \sim 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Figura 8) menor que el de la sección longitudinal de la Boca Norte ( $\Delta S \sim 7$  y  $\Delta T \sim 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Figura 9). Estas diferencias pueden ser atribuibles a las condiciones de marea y viento presentes. Durante el muestreo de la boca (10 de diciembre de 2017) la marea se encontraba en la transición hacia el flujo, con la presencia de vientos Nortes, mientras que en el muestreo del cuerpo (09 de diciembre de 2017) la marea estaba en el inicio del reflujó. Estas variaciones se ven reflejadas en los perfiles de salinidad generados por el modelo numérico (Anexo C), ya que la intrusión salina varía dependiendo de las condiciones de marea que se presenten.

La estructura lateral de un estuario se encuentra determinada por los gradientes de presión e influenciada por la rotación terrestre (Coriolis) y efectos friccionales, con estos últimos se genera una clasificación de los estuarios en términos del número adimensional Ekman (Ek) (Valle-Levinson *et al.* 2003). En el caso particular de la boca Norte, es observable un flujo de intercambio originado por las diferencias entre el agua proveniente de la bahía y la del océano, generando una estructura lateral probablemente dominada por efectos rotacionales, lo que podría suponer un número de Ekman de 0.01 a 0.1.

La simulación numérica de la circulación de la Bahía del Espíritu Santo bajo forzantes de marea y tres condiciones de viento típicas para la zona de estudio mostraron variaciones de nivel del mar que van de 0.02 a 0.28 m, valores que se encuentran dentro del régimen micromareal representativo de la zona de estudio

(Kjerve 1981). De acuerdo al modelo numérico, la Bahía responde predominantemente al cambio de marea y en diferente proporción a los forzantes de viento. Durante la validación del modelo fue posible observar fluctuaciones en la señal del nivel del mar obtenida en campo que no son reproducidas por el modelo numérico, pudiéndose tratar de efectos remotos (cambios en el nivel del mar atribuibles al transporte de Ekman). Estos efectos remotos deben ser estudiados por separado, ya que el intercambio entre la Bahía y el océano en frecuencias submareales es causado principalmente por estos efectos (Wong 1987, Wong y Valle-Levinson 2002).

Para el escenario forzado únicamente con mareas se alcanzaron velocidades y variaciones de nivel del mar por encima de las obtenidas en los escenarios con viento (vientos del sureste, alisios y nortes). En el escenario de vientos provenientes del Sureste se encontró que las velocidades y el nivel del mar no tuvieron variaciones en comparación con el escenario forzado solo con mareas. Por lo anterior, este tipo de vientos (dominantes durante el mes de marzo) no generan modificación en la circulación de la BES, comportamiento similar al señalado por Medina-Gómez (2011) para Bahía Ascensión.

Por otro lado, para el escenario con vientos provenientes del NE (Alisios) las velocidades, durante la pleamar en mareas vivas y muertas, tienen un comportamiento similar al de solo con mareas, mientras que en bajamar, las velocidades presentan un decremento del ~11% en mareas vivas y de un ~25% en mareas muertas. Para el nivel del mar durante mareas vivas y muertas se tiene un decremento del ~7% y ~46%, respectivamente, con respecto a los escenarios forzados sin viento. Los vientos Alisios generan un decremento en las variaciones del nivel del mar y en las velocidades de la BES, que se presenta con mayor magnitud en la bajamar de mareas vivas y muertas. Este resultado puede estar relacionado con la orientación que la BES presenta, ya que los vientos Alisios actúan directamente sobre el eje principal de la Bahía generando un apilamiento de agua (set-up) en la dirección de propagación del viento (Farrera 2004). Dicho efecto no genera aportaciones en la variación de la velocidad y modificación del

nivel del mar en condiciones de pleamar, sin embargo, en condiciones de bajamar, la onda de marea está dirigida en oposición al gradiente de presión generado por el viento, lo que posiblemente ocasiona los decrementos observados. En condiciones de vientos sostenidos del NE se puede generar un flujo neto en dirección contraria al viento local que en interacción con los flujos de agua dulce provoquen una recirculación de la BES, de la cabeza hacia el cuerpo de la bahía (Thattai *et al.* 2003). De ser así, la circulación y condiciones termohalinas se verían modificadas por esta dinámica (Medina-Gómez *et al.* 2016).

A pesar de que Medina-Gómez *et al.* (2016) considera a los vientos Alisios como el principal forzante en el transporte de agua en Bahía Ascensión, para la BES dicho comportamiento difiere, siendo más relevante el efecto de las mareas como principal generador de la circulación en la BES. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las características de cada sistema, Bahía Ascensión es un cuerpo de agua más ancho, de mayor profundidad (promedio de 2.3 m) y sin rasgos geomorfológicos que modifiquen significativamente la circulación, mientras que BES es más angosta, con profundidades promedio de 1.4 m y una isla barrera paralela a las formaciones arrecifales.

Resultados del modelo para la condición de Nortes indican que este forzamiento genera una disminución en las velocidades y variaciones del nivel del mar durante mareas vivas en contraste con el escenario sin vientos (~11% para el nivel del mar y ~15% para velocidades). En mareas muertas las variaciones del nivel del mar y velocidades se encuentran por arriba de las reportadas para el escenario forzado sin vientos (~5% para el nivel del mar y hasta ~25% para velocidades). Los vientos provenientes del norte en mareas muertas se suman a los efectos de la marea, lo que podría ser atribuible a la dirección en que los vientos arriban a la BES, contrario a lo que ocurre en escenario de vientos Alisios.

Diferentes autores (Guo y Valle-Levinson 2008, García *et al.* 2015, Medina-Gómez *et al.* 2016) mencionan que los forzantes locales de viento en conjunto con la marea aportan en gran medida a la circulación de cuerpos costeros. Es por ello que resulta interesante observar un comportamiento de atenuación tanto en

velocidades como en nivel del mar en los escenarios con vientos locales actuando sobre la BES, a diferencia de los escenarios forzados solo con mareas. Casares-Salazar y Mariño-Tapia (2016) observaron que el aporte de los vientos locales sobre el efecto de las mareas genera un decremento en variaciones del nivel del mar, mientras que, en las velocidades a lo largo de la laguna, el efecto de los vientos locales es despreciable. Esto podría significar que los forzantes de viento no contribuyen de forma importante en las velocidades y variaciones del nivel del mar generadas por los forzantes de marea (Casares-Salazar y Mariño-Tapia 2016). Sumado a este efecto, las condiciones de viento reconstruidas para el área de estudio presentan magnitudes promedio menores a 1 m/s, lo que posiblemente contribuye a una atenuación en el efecto de viento sobre la BES.

Wong y Trowbridge (1990) mencionan que la interacción entre efectos locales de vientos y la variabilidad de baja frecuencias (mareas) puede ser de forma no lineal y afectar significativamente la respuesta de la marea en un estuario por efectos de fricción. Es por ello que la geomorfología de la BES proporciona una dinámica especial, por ejemplo, se observó que los cambios batimétricos de la laguna arrecifal pueden propiciar la generación de giros ciclónicos de corta duración. La existencia de la Isla Chal, que divide en dos bocas angostas la boca de la Bahía genera una dinámica más compleja en comparación con cuerpos de agua con una entrada (Serrano *et al.* 2013). La intensificación de velocidades sigue la batimetría de la Bahía por lo que las máximas velocidades se presentan en las Bocas, las cuales disminuyen conforme se adentra al cuerpo como consecuencia de los efectos de fricción (Graham *et al.* 1981, David y Kjerfve 1998, Waterhouse *et al.* 2010). La onda de marea presenta un aumento de ~25% en la amplitud de onda hacia la Cabeza de la Bahía con respecto a la amplitud en la boca Norte. Este fenómeno observado y analizado por Serrano *et al.* (2013) lo atribuye a cambios morfológicos (ancho y profundidad) de la bahía a medida que la onda se propaga hacia el interior del sistema. Asociado a esto se observa un desfase de onda entre la Boca Norte y la cabeza (ca. 1 hr 40 min) (Sección 8.2), que también es reproducido por el modelo numérico, aunque con una subestimación de 30 min, posiblemente atribuido al factor de fricción empleado.



El flujo de agua o gasto ( $Q$ ) en las bocas de la BES y tiempos de residencia ( $T_t$ ) se ven afectados por las condiciones de viento. En los casos de vientos Alisios y vientos Nortes, se genera una mayor entrada de agua con excepción de vientos nortes con mareas muertas. Esto se puede ver reflejado en los tiempos de residencia relativamente bajos obtenidos para vientos provenientes del N-NE, donde el recambio del volumen total en función de las entradas de agua es de  $T_t < 30$  días, similar a lo reportado para Bahía Ascensión ( $T_t = 45$  días) (Medina-Gómez *et al.* 2016). Sin embargo, ante condiciones de vientos del Sureste la BES alcanza un  $T_t$  de hasta un año, no obstante, es de considerar que ésta y otras condiciones de viento y marea interactúan entre sí, por lo que sería conveniente evaluar la variabilidad de  $Q$  y  $T_t$  durante un ciclo anual.

Es importante considerar que no se están considerando las entradas de agua dulce, superficiales y/o subterráneas, las cuales pudieran generar estratificación en el cuerpo estuarino de la BES, esta simplificación, aunado a la consideración de un modelo barotrópico, limitan la explicación de la circulación estuarina en los resultados obtenidos.

El modelo sugiere un patrón de la circulación barotrópica de la Bahía ante distintas condiciones de viento y marea, generando resultados poco esperados para este sistema (al comparar con estudios antecedentes en la zona), dejando ver que Bahía del Espíritu Santo presenta procesos dependientes de la geomorfología y la fricción de fondo. Es por ello que se propone el seguimiento en el monitoreo de la BES, la generación de series de tiempo de larga duración, mediciones *in situ* a fin de complementar y mejorar el conocimiento de la circulación en el sistema, para diferentes temporadas del año, e integrar condiciones baroclínicas, así como la inclusión y análisis del efecto de entradas de agua dulce.

## 10 Conclusiones

La Bahía del Espíritu Santo es un cuerpo de agua semicerrado que presenta condiciones estuarinas. La circulación en este sistema costero responde de manera diferente a los forzantes de viento y marea con respecto a las condiciones batimétricas.

En el escenario forzado solo con marea la Bahía presenta las máximas velocidades y variaciones del nivel del mar. En el caso de vientos provenientes del N-NE se presenta una disminución en el nivel del mar y velocidades, probablemente atribuible a la interacción entre la direccionalidad de los vientos locales con la onda de marea. Las velocidades mostraron una atenuación hacia el interior de la Bahía. Se registró un desfase y un incremento en la amplitud de onda entre la Boca Norte y la cabeza de la Bahía como consecuencia de la fricción de fondo. El tiempo de residencia en vientos provenientes del N-NE es menor que en condiciones de vientos del Sureste y escenarios forzados solo con mareas.

Los resultados de este trabajo representan las primeras contribuciones a la descripción y entendimiento de los procesos de circulación de la Bahía del Espíritu Santo. En el área de estudio se desarrollan actividades de interés comercial (e.g. pesca de langosta) y de conservación (al encontrarse dentro de la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an) por lo que se espera que el conocimiento de los procesos físicos aquí analizados ayude en la toma de decisiones ante problemáticas y/o manejo que se presenten en la BES y de sus recursos. Siendo de gran relevancia el seguimiento en el monitoreo de éste sistema lagunar.

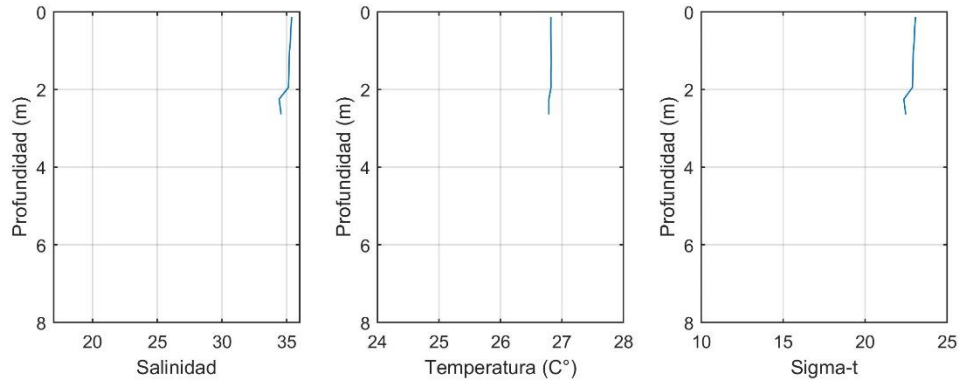
## 11 Anexos

**Anexo A- Localización de las estaciones de muestreo del muestreo en campo. Estaciones “C” pertenecientes al transecto transversal de la BES, estaciones “B” pertenecientes al transecto de la Boca Norte.**

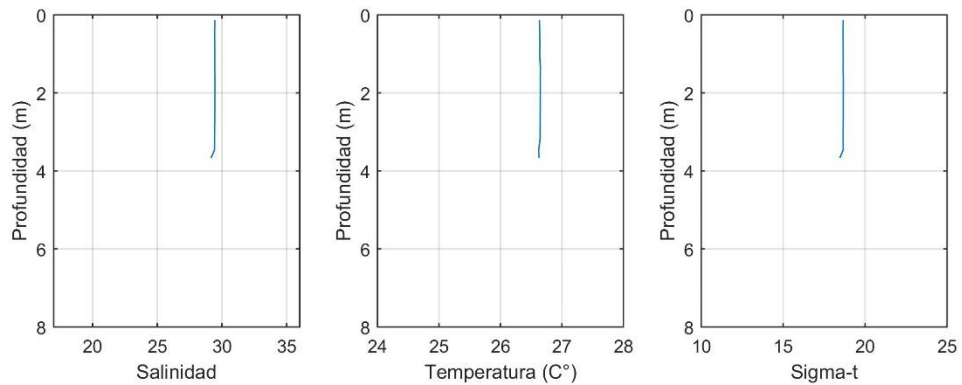
Estación	Lance	Latitud	Longitud
C1	1	19.4358937	-87.468873
C2	2	19.4079855	-87.491746
C3	4	19.394571	-87.516427
C4	5	19.3732235	-87.529269
C5	7	19.3560388	-87.540638
C6	9	19.3381574	-87.553459
C7	10	19.3225541	-87.567959
C8	11	19.3074153	-87.581961
C9	12	19.2854711	-87.603481
C10	13	19.2703691	-87.617456
C11	14	19.2549061	-87.631828
C12	15	19.2400595	-87.645794
B1	17	19.3918286	-87.530432
B2	18	19.3871124	-87.527396
B3	19	19.38329	-87.524932
B4	20	19.3796156	-87.522501
B5	21	19.3756069	-87.52015
B6	22	19.3722245	-87.518502

**Anexo B- Perfiles verticales de salinidad, temperatura (°C) y sigma-t para las estaciones C1, C3, C4, C5, C8, C10 y C12 del cuerpo de la Bahía, y estaciones B2 y B4 de la Boca Norte de la Bahía.**

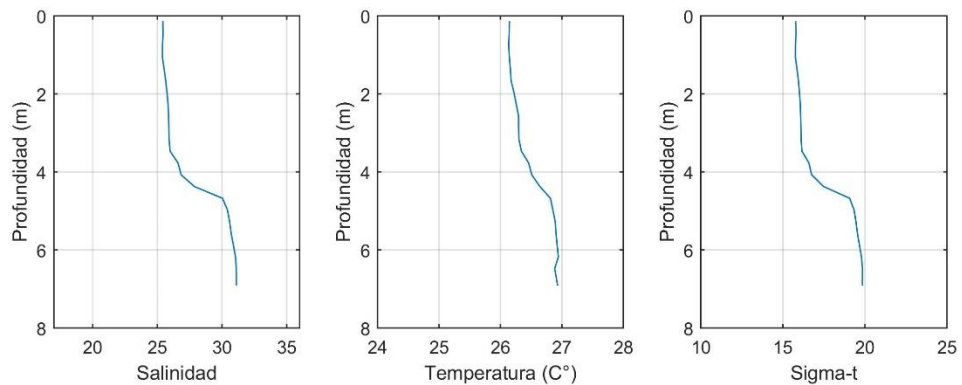
**Estación C1**



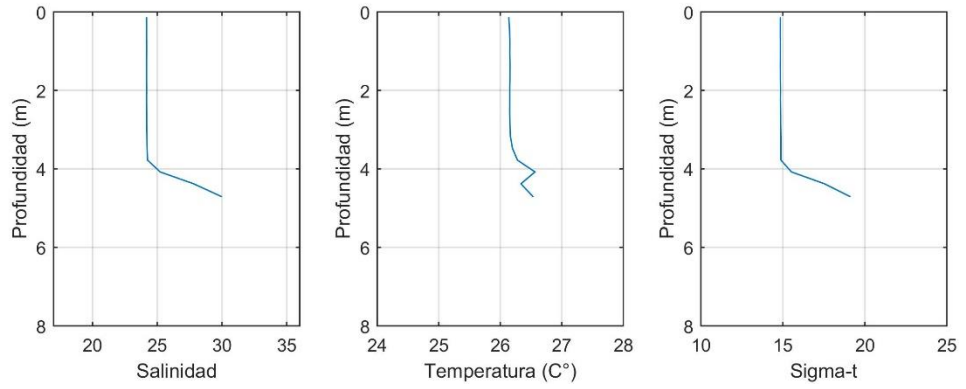
**Estación C3**



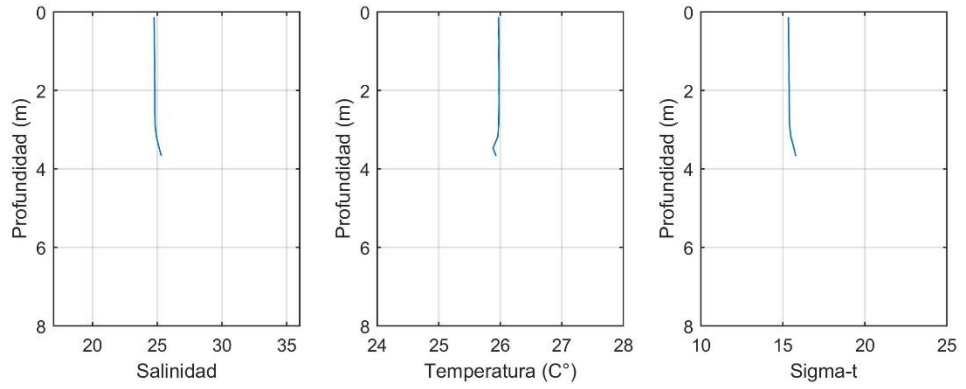
**Estación C4**



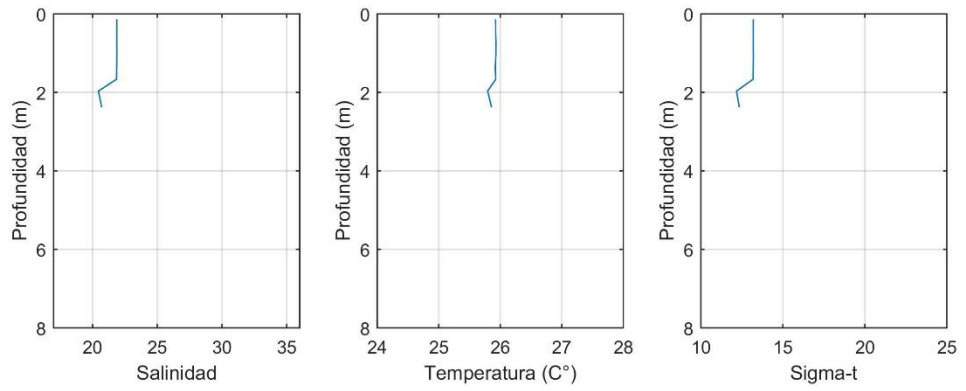
### Estación C5



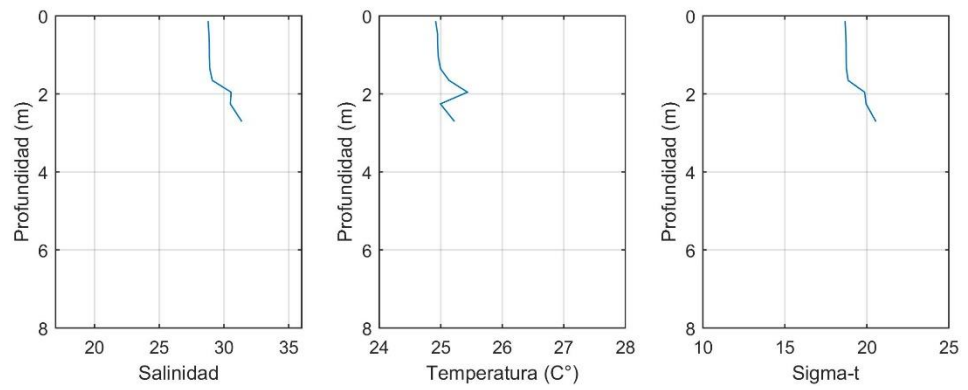
### Estación C8



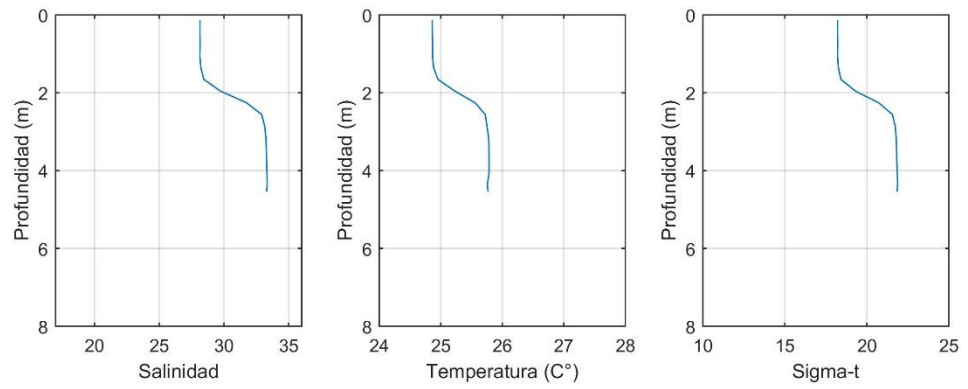
### Estación C10



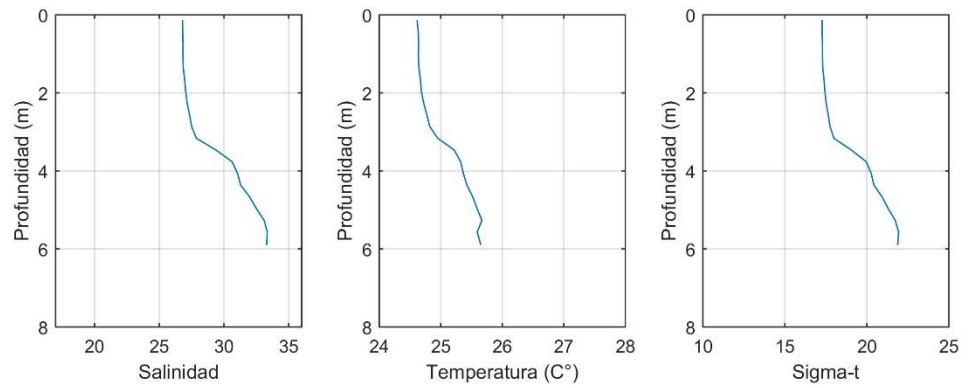
### Estación B1



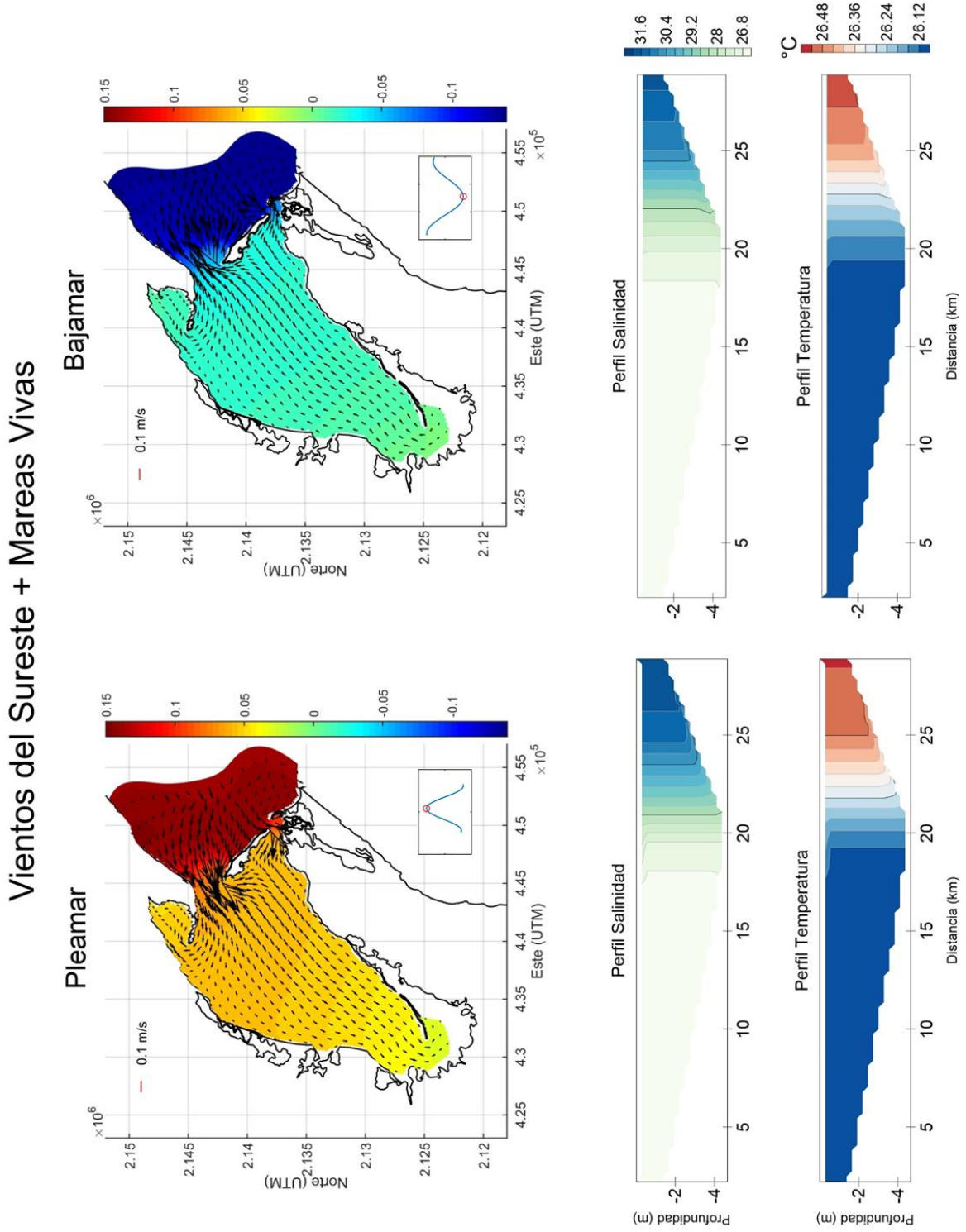
### Estación B3



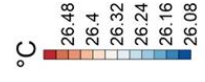
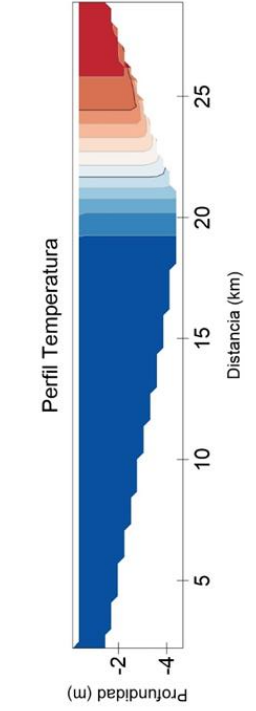
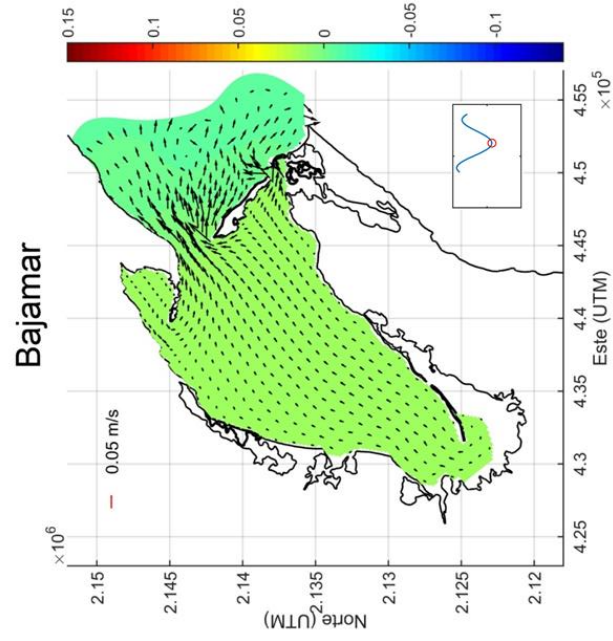
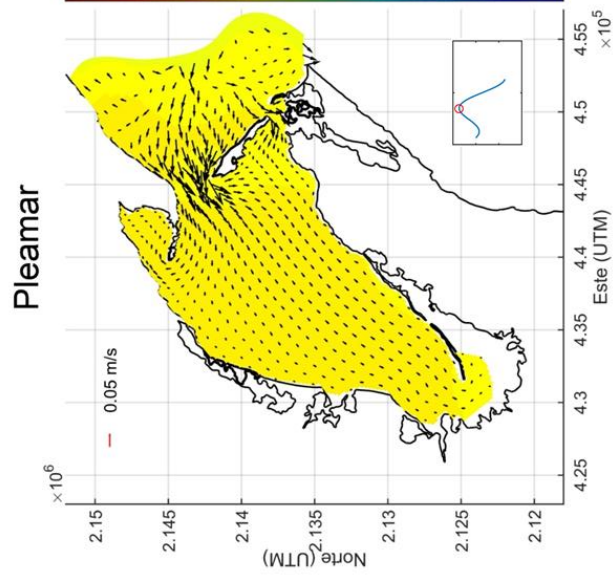
### Estación B5



**Anexo C- Escenarios modelados de circulación (Variaciones del nivel del mar (m; barra lateral) y corrientes (m/s; vectores)) y perfiles transversales de salinidad y temperatura (°C), asociados a los puntos máximos de pleamar y bajamar.**

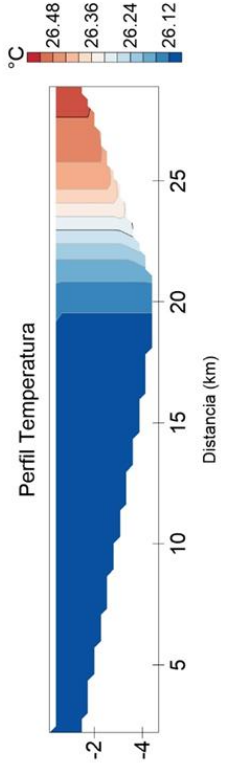
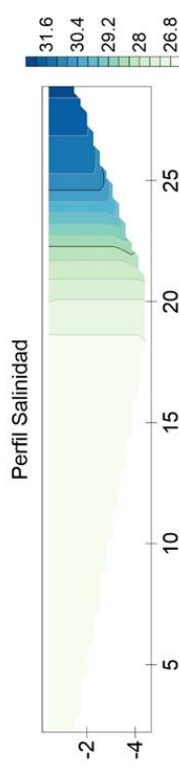
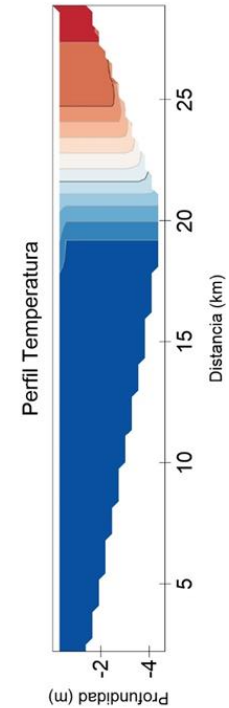
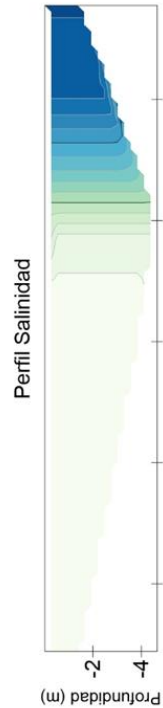
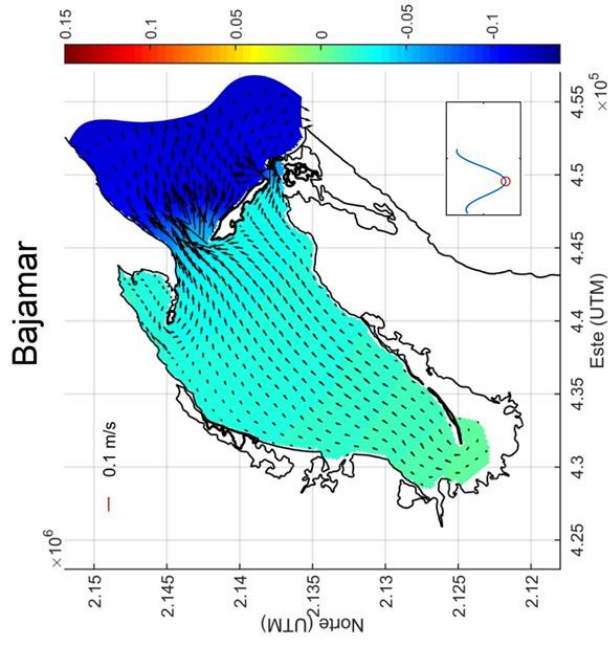
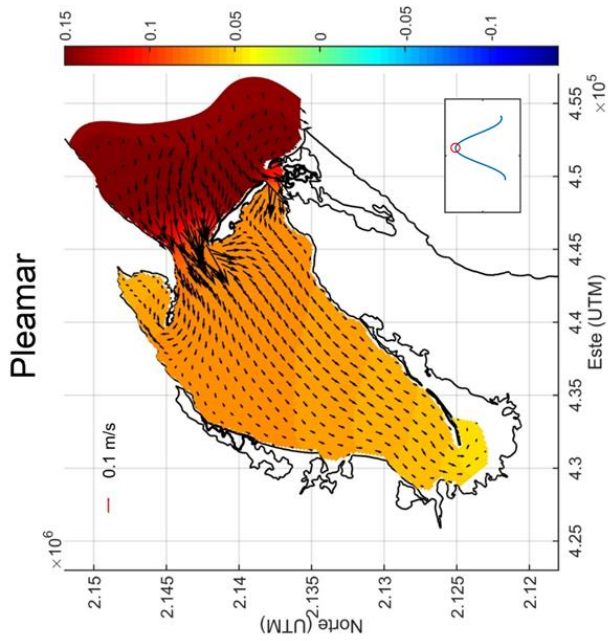


# Vientos del Sureste + Mareas Muertas

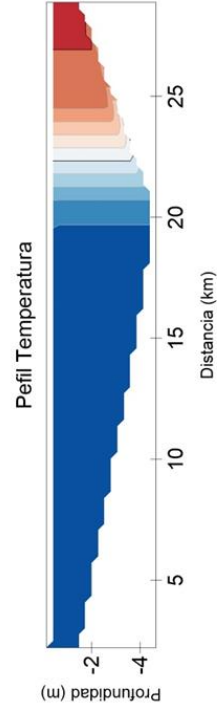
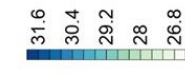
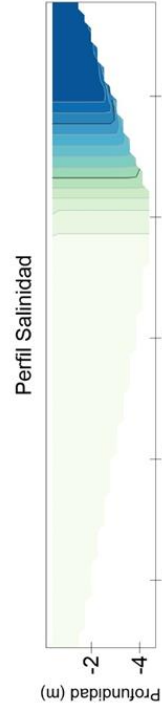
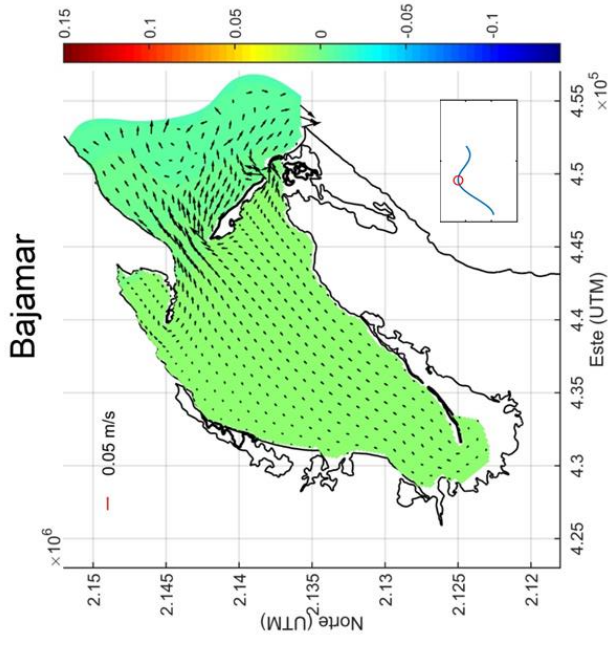
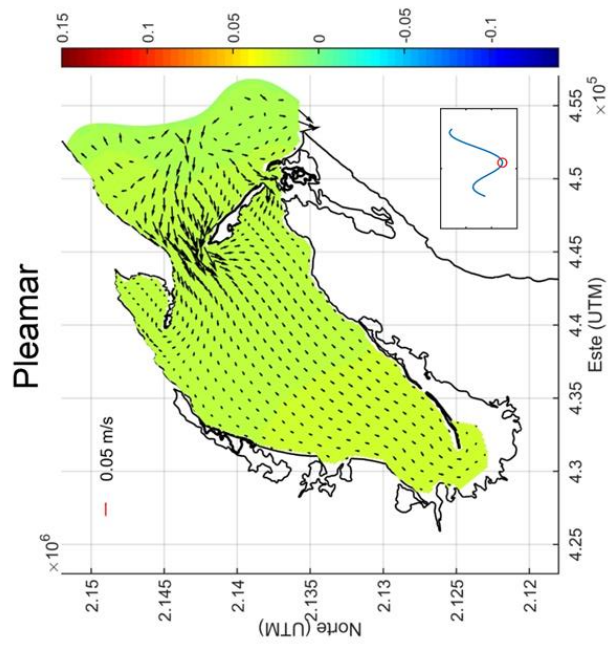




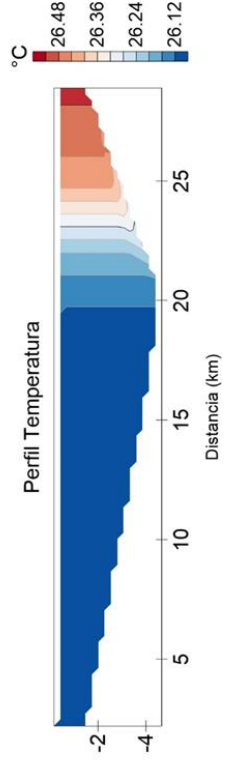
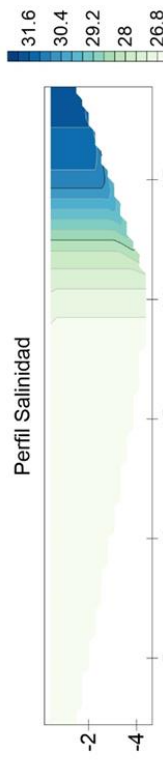
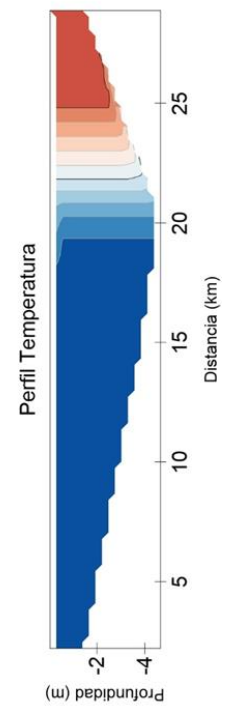
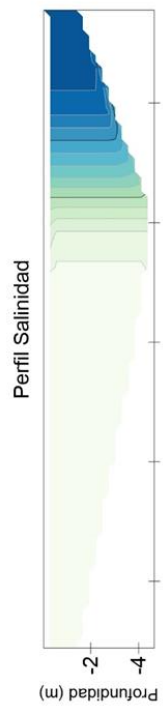
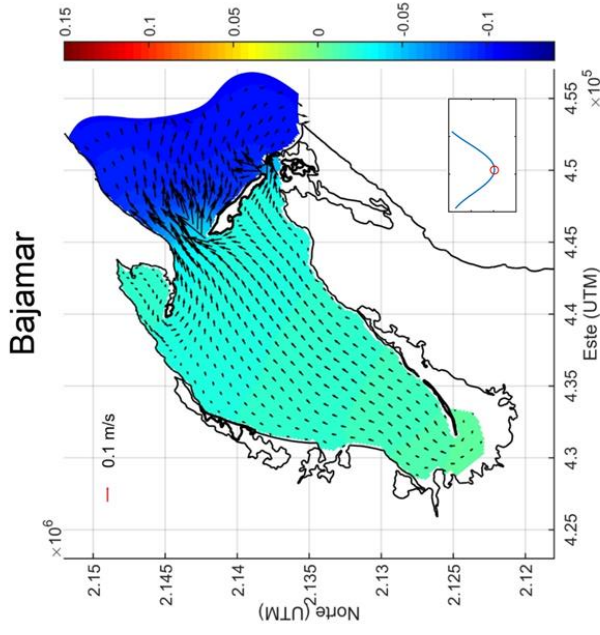
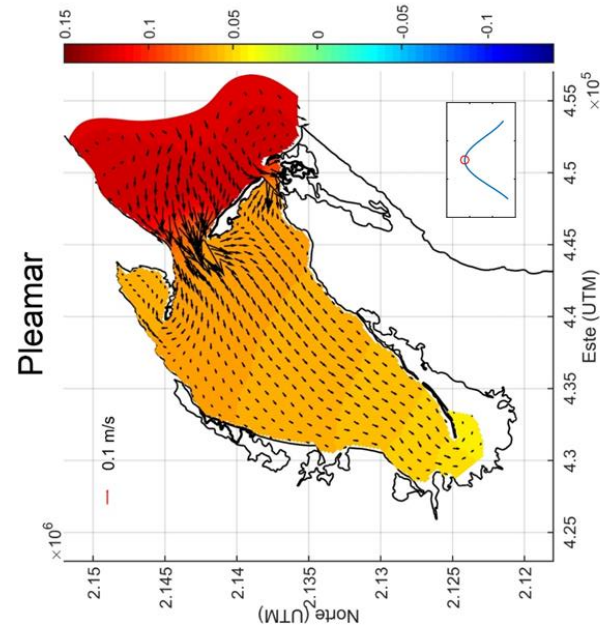
# Vientos Alisios + Mareas Vivas



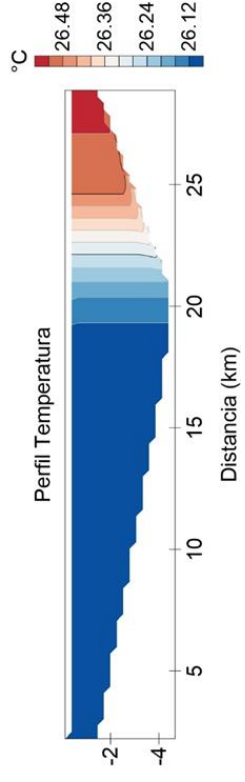
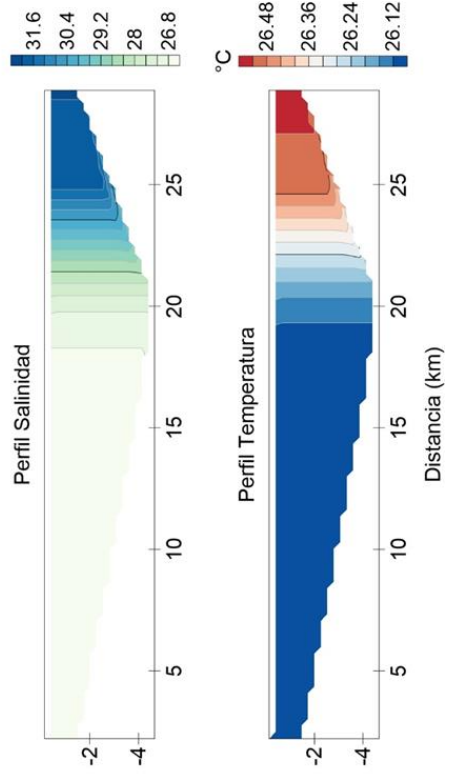
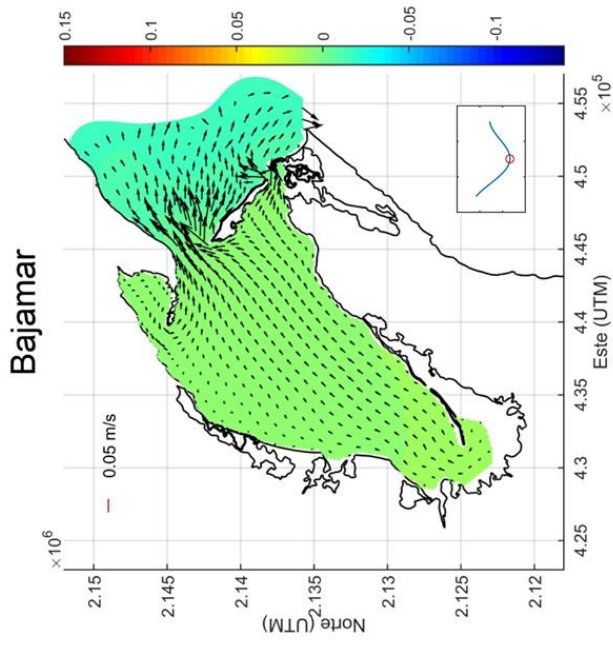
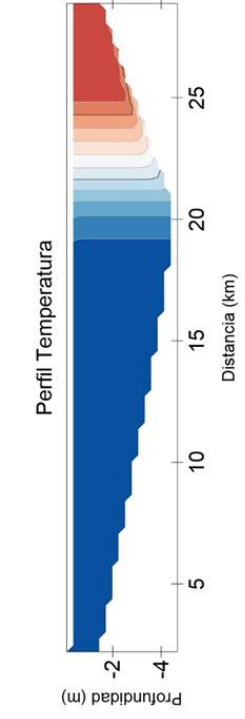
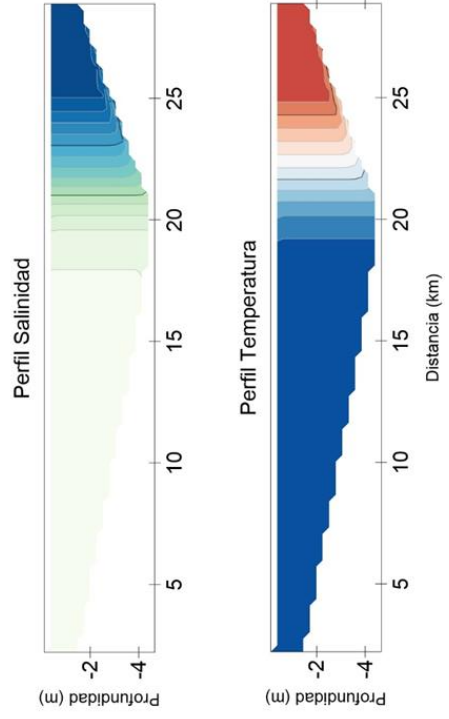
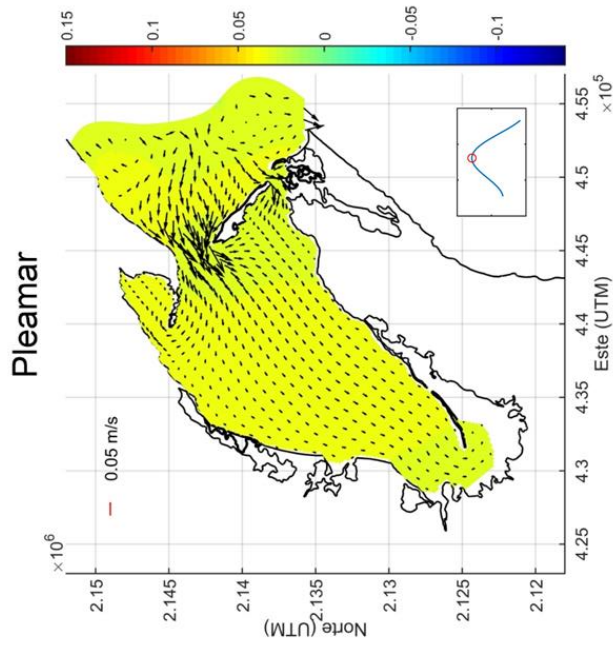
# Vientos Alisios + Mareas muertas



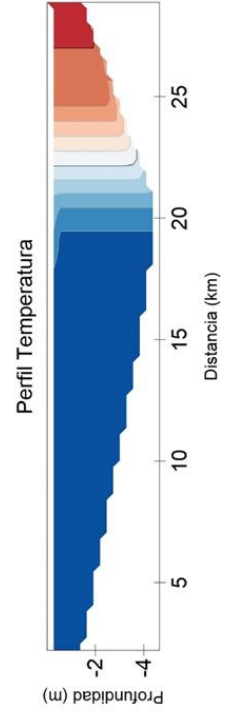
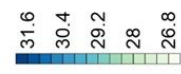
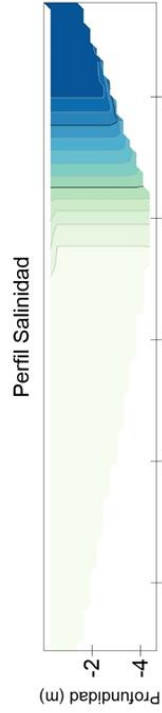
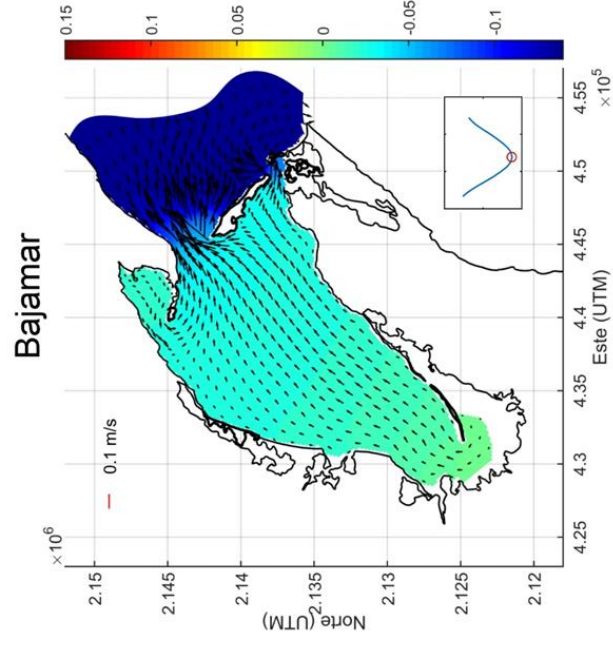
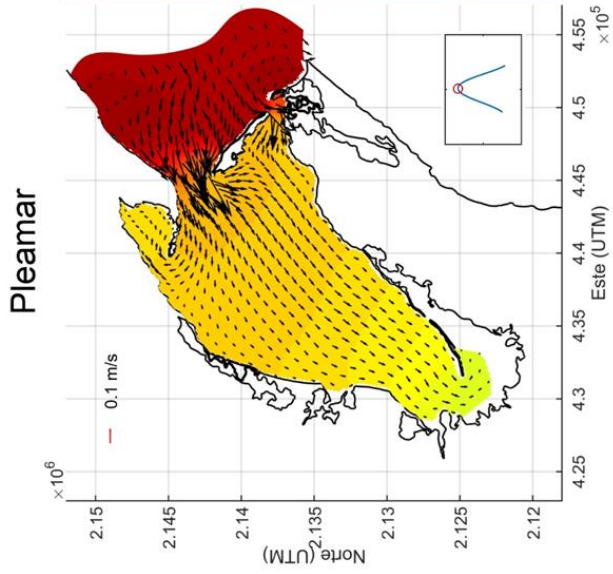
# Vientos Nortes + Mareas Vivas



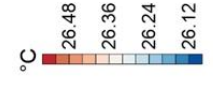
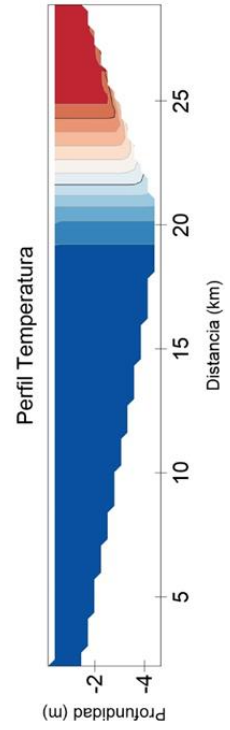
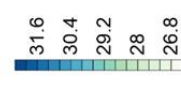
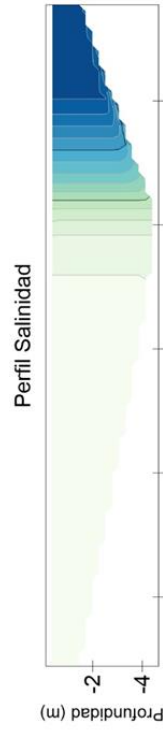
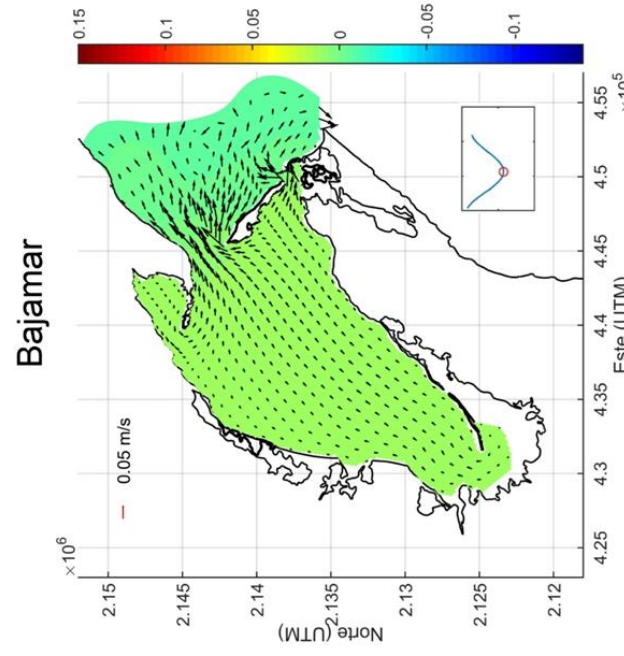
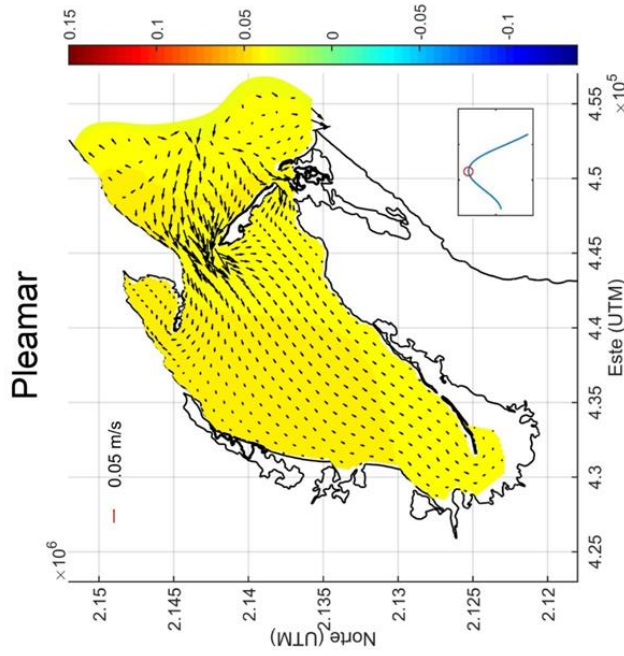
# Vientos Nortes + Mareas Muertas



# Mareas Vivas



# Mareas Muertas



## 12 Literatura citada

- Avalos-Cueva, D., E., Palacios-Hernández, L., Carrillo y L. González-Vivanco. 2017. Utilización de herramientas numéricas para entender la dinámica en bahías, caso de estudio Bahía Chetumal, Quintana Roo. *Ra Ximhai*, vol. 13 (3): 267-290.
- Betancur-Pérez, G.A. 2013. Metodología para la selección de modelos hidrodinámicos tridimensionales. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.
- Carrillo, L., Palacios-Hernández, E., Ramírez, A.M., Morales-Vela, J.B. 2009. Características hidrometeorológicas y batimétricas. Pp. 12-20. En: Espinoza-Ávalos, J., Islebe, G., Hernández-Arana, H. (eds) *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe*. ECOSUR, México. 252 pp.
- Carrillo, L. 2010. Calidad de agua en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. Primer Informe de Proyecto. Revisión bibliográfica de aspectos oceanográficos y calidad del agua. México, Octubre 2010. 22 pp.
- Carrillo, L., E.M. Johns, R.H. Smith, J.T. Lamkim, J.L. Largier. 2016. Pathways and hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 2: Water masses and thermohaline structure. *Continental Shelf Research* 120 (2016): 41-58.
- Carrillo, L., Palma-Lara, D., Callejas, M., Alcérreca-Huerta, J.C. 2017. Datos hidrográficos de la Campaña Bahía del Espíritu Santo, Quintana Roo, México. Informe Técnico de campaña Oceanográfica ECOSUR. México. 25 pp.
- Casares-Salazar, R. y I., Mariño-Tapia. 2016. Influence of the remote forcing and local winds on the barotropic hydrodynamics of an elongated coastal lagoon. *Journal of Coastal Reserch*, vol. 32 (1): 116-130.

- Catanedo, S. y Medina, R. 2002. Análisis de los modelos 3D para la simulación de flujo en aguas de transición. *Ingeniería del agua*. Vol. 9 (4): 467-481.
- Castañeda-López, O. y Contreras-Espinosa, F. 2003. El centro de documentación “Ecosistemas litorales mexicanos” como una herramienta de diagnóstico. *ContactoS* 48: 5-17.
- David, L. y Kjerfve, B. 1998. Tides and currents in a two inlet coastal lagoon: Laguna de Términos, México. *Continental Shelf Research* 18:1057-1079.
- Deltares 2014. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments; User Manual, Version 3.15.34158.WL\Delft Hydraulics. Deltares; Delft, The Netherlands. <http://www.deltares.nl>.
- DOF. 2015. Diario Oficial de la Federación, Cuarta sección. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Viernes 23 de enero de 2015.
- Dyer, K. 1997. *Estuaries: A physical introduction*. 2a ed, John Wiley & Sons, England, 195 pp.
- Enríquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., Capurro-Filigrasso, L. 2013. Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research* 69 (2013) 101-109.
- Escobar, C. 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.
- Farreras, S. 2004. *Hidrodinámica de lagunas costeras*. CICESE, México. 189 pp.
- García, M., Ramírez, I., Verlaan, M. y Castillo, J. 2014. Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintin Bay, B.C., Mexico. Validation and calibration using OpenDA. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 273 (2015): 428–437.



- González-Santamaría, R. 2005. Modelación para la circulación de corrientes para el Golfo de México. Generación de escenarios hidrodinámicos. Tesis de maestría. Escuela superior de ingeniería y arquitectura. IPN. México.
- González-Vivanco, L. 2009. Simulación numérica de la Bahía de Chetumal Q. Roo, México. Tesis de maestría. Universidad de Guadalajara. México.
- Graham, D., Daniels, J., Hill, J., Day, J. 1981. A preliminary model of the circulation of laguna de Términos, Campeche, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología- UNAM*. 8:51-61
- Guo, X., Valle-Levinson, A. 2008. Wind effects on the lateral structure of density-driven circulation in Chesapeake Bay. 28 (2008) 2450-2471.
- Haines, P. 2017. Anticipated response of coastal lagoons to sea level rise.
- Herrera-Silveira, J., Ramírez, J., Zaldivar, A. 1998. Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected coastal lagoons of Yucatán, México. *Aquatic ecosystem health and management* 1. 353-372.
- Herrera-Silveira, J y Morales-Ojeda, S. 2010a. Subtropical karstic coastal lagoon assessment, southeast Mexico. The Yucatan peninsula case. pp 307-333. En: Kennish, M. y Paerl, H. (eds). *Coastal Lagoons: Critical habitats of environmental change*. CRC Press. Taylor and Francis Group. 568 pp.
- Herrera-Silveira, J. y Morales-Ojeda, S. 2010b. Lagunas costeras. En: Durán R. y M. Méndez (Eds). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 pp.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 405 p.
- Kjerfve, B. 1994. Coastal Lagoons. Pp: 1-8. In: Kjerfve, B. (ed) *Coastal lagoon processes*. Elsevier Oceanography Series, volume 60, 577 pp.

- Kjerfve, B. 1981. Tides of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research* 86:4243-4247.
- Kjerfve, B. y Magill K.E. 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88: 187-199.
- Lara-Lara, J., J. Arreola-Lizárraga, L. Calderón-Aguilera, V. Camacho-Ibar, G. de la Lanza-Espino, A. Escofet-Giansone, M. Espejel-Carbajal, M. Guzmán-Arroyo, L. Ladah, M. López-Hernández, E. Meling-López, P. Casasola-Barceló, H. Reyes-Bonilla, E. Ríos-Jara, J. Zertuche-González. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. Pp. 109-134. En: *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.
- Ley-Cooper, K., De Lestang, S., Phillips, B. y Lozano-Álvarez, E. 2014. An unfished area enhances a spiny lobster, *Panulirus argus*, fishery: implications for management and conservation within a Biosphere Reserve in the Mexican Caribbean. *Fisheries Management and Ecology*.
- Lonin, S. y Escobar, C., 2009. Aspectos sobre modelación numérica de la evolución morfológica en el Mar Caribe. Pp. 189-203. En: Alcántara-Carrió, J., Correa-Arango, I., Isla Mendy, F., Alvarado-Ortega, M., Klein A., Cabrera-Hernández A., Sandoval-Barlow R. (eds) *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*. Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología para el desarrollo. Manuales CYTED. 297 pp.
- Luijendijk, A. 2001. Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements. MSc thesis, Delft University of Technology.
- Medina-Gómez, I. 2011. Characterization of a karst coastal ecosystem in the Mexican Caribbean: assessing the influence of coastal hydrodynamics and submerged groundwater discharges on seagrass. Tesis de doctorado. Texas A&M University.

- Medina-Gómez, I., B. Kjerfve, I. Mariño, J. Herrera-Silveira. 2014. Sources of Salinity Variation in a Coastal Lagoon in a Karst Landscape. *Estuaries and Coasts* (2014) 37:1329–1342
- Medina-Gómez, I., C. Enríquez, B. Kjerfve, I. Mariño, J. Herrera-Silveira. 2016. Hydrodynamic Variability in a Microtidal Coastal Bay Geographically Susceptible to North East Trade Winds. *Gulf and Caribbean Research* 27 (1): 52-65.
- Prezas-Hernández, B. 2011. Áreas Naturales protegidas de Quintana Roo. Cap 7. Conservación de la Biodiversidad. Pp: 300-309. En: Pozo, C., Armijo-Canto, N., Calmé, S. (eds). *Riqueza Biológica de Quintana Roo: un análisis para su conservación*. Tomo I. ECOSUR, CONABIO, Gobierno de Quintana Roo, PPD. México, D.F.
- Ruiz-Martínez, G., I. Mariño-Tapia, E. Mendoza-Baldwin, R. Silva-Casarín, C. Enríquez-Ortiz. 2016. Identifying Coastal Defence Schemes through Morphodynamic Numerical Simulations along the Northern Coast of Yucatan, Mexico. *Journal of Coastal Research: Volume 32, Issue 3*: 651-669.
- Ruíz-Sarrazola, D. 2015. Metodología para simular la dinámica marina en el mar Caribe usando DELFT3D. Tesis de maestría. Universidad EAFIT. Colombia.
- Sánchez, O. 2007. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Pp: 11-36. En: *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. INE, CONABIO, México.
- Serrano, D., Ramírez-Félix, E., Valle-Levinson, A. 2013. Tidal hydrodynamics in a two-inlet coastal lagoon in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* 63(2013):1-12
- Sosa-Cordero, E., Ramírez-González, A. y Domínguez-Viveros, M. (1999). La Explotación de Langosta *Panulirus argus* en Bahía Espíritu Santo,

Quintana Roo, México: Un Estudio Descriptivo. Proceedings of the 45th Gulf and Caribbean Fisheries Institute Charleston, 45:820-839

Spaulding, M. 1994. Modeling of circulation and dispersion in Coastal Lagoons. Pp: 103-131. En: Kjerfve, B. (ed) Coastal lagoon processes. Elsevier Oceanography Series, volume 60, 577 pp.

Thattai, D., Kjerfve, B., Heyman, W. 2003. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the inner Gulf of Honduras, western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4:985-995.

Valle-Levinson, A., Reyes, C., Sanay, R. 2003. Effects of Bathymetry, Friction, and Rotation on Estuary–Ocean Exchange. *American Meteorological Society*. Vol. 33:2375-2393.

Waterhouse, A., Valle-Levinson, A., Winant, C. 2010. Tides in a system of connected estuaries. *Journal of physical oceanography*. 41:946-959.

Wong, K. 1987. Tidal and subtidal variability in Delaware's inland Bay. *Journal of physical oceanography*. Vol. 17:413-422.

Wong, K., Valle-Levinson, A. 2002. On the relative importance of the remote and local wind effects on the subtidal exchange at the entrance to the Chesapeake Bay. *Journal of marine research*, vol 60:477-498.

Wong, K., Trowbridge, J. 1990. Some observational evidence on the effect of atmospheric forcing on tidal variability in the upper Delaware Bay. *Journal of geophysical research*. Vol 95, No. C9, 16,229:16240.

Zarate-López, J., Loaeza-García, J., Wingartz-García, J., Mata-Hernández, L. 2006. Carta geológico-minera Bahía Ascensión E16-2-5 Quintana Roo, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, México. Servicio Geológico Mexicano.