



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ÁREA HIDRÁULICA – COSTAS Y RÍOS**

**EFECTO DE LOS CAMBIOS MORFOLÓGICOS DE LA BOCA SOBRE LA  
HIDRODINÁMICA DE LA LAGUNA LA CARBONERA, YUCATÁN.**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ARIADNA FRANCO VARGAS**

**TUTOR**  
**DR. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA, INSTITUTO DE INGENIERIA,**  
**UNAM.**

**Sisal, Yucatán, Diciembre 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**DEDICATORIA:**

A mis papas Julieta y Angel quiero agradecerles por estar a mi lado durante toda mi trayectoria académica. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para mi éxito y estoy verdaderamente agradecida por eso. Sus sacrificios y esfuerzos para que pudiera estudiar son invaluable. No puedo expresar con palabras cuánto significó para mí saber que estaban ahí, dispuestos a apoyarme en cada paso del camino. Su amor y aliento me impulsaron a esforzarme y alcanzar mis metas.

A mi hermana por sus consejos siempre oportunos que me ayudaron a convertirme en lo que soy.

A mi fiel compañera Connie, por ser una presencia constante en mi vida y por brindarme fortaleza y compañía en los momentos en que me sentía sola.

## **Agradecimientos**

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas y permitirme seguir creciendo como persona y profesional.

Al Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida por su dedicación, paciencia, guía y valiosos consejos que me brindó como tutor durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis profesores en los cursos de maestría, quienes han desempeñado un papel fundamental en mi formación en el campo de la ingeniería de costas.

A Alejandro Paladio, quien ha sido una influencia significativa en mi desarrollo académico y, además, se ha convertido en un buen amigo.

A mis amigos durante mi estadía en el LIPC, Cesar y Betty. Su amistad ha ido más allá de la investigación, convirtiéndose en una relación de confianza. Siempre estuvieron dispuestos a escucharme, a brindarme su perspectiva y a ofrecer su ayuda desinteresada cuando lo necesitaba.

A mis sinodales: el Dr. Alec Torres Freyermuth, el Dr. José López González, el Dr. Roger Pacheco Castro y el Dr. Wilmer Rey Sánchez, por su valioso tiempo, conocimiento y contribuciones en la evaluación de mi trabajo de investigación.

A los técnicos del LIPC, Oc. Camilo Rendón Valdez por su apoyo y motivación tanto en lo académico como fuera de este. Ing. Gonzalo Martín Ruíz por su disposición y apoyo técnico.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

## Resumen

Las lagunas costeras son cuerpos de agua poco profundos que se encuentran paralelos a la costa y que tienen una o más conexiones con el océano. Estas conexiones dan origen a uno o más canales por medio de los cuales existe un intercambio de flujo entre el océano y la laguna. La hidrodinámica dentro de las lagunas esta influenciada por el flujo desigual de agua a través de los canales o bocas de entrada y salida, así como por las variaciones en las mareas. Esta variabilidad en el flujo de agua se debe a la asimetría de mareas y tiene un impacto significativo en la dinámica del agua. En la costa de Yucatán, específicamente en el poblado de Sisal, se encuentra la laguna La Carbonera, limitada al Este y Oeste por un conjunto de ciénagas que se comunican con Chuburná Puerto y la propia localidad, y se conecta con el Golfo de México por una estrecha boca que se formó a consecuencia del huracán Gilberto que azotó las costas en 1988. Esta laguna desempeña un papel importante como socio ecosistema en la vida de la comunidad, gracias a su estrecha relación con las actividades económicas locales. Es notable por su biodiversidad y abundantes recursos naturales y ejerce una influencia significativa en la sustentabilidad económica de los pobladores de Sisal al proporcionar un hábitat esencial para la pesca, el turismo y otros sectores fundamentales. En los últimos años se han desarrollado asentamientos humanos en las áreas cercanas a la laguna, especialmente en su lado oeste, por lo cual la morfodinámica en el sitio se ha visto claramente afectada, con evidente erosión de las playas, razón por lo cual es fundamental estudiar y comprender la hidrodinámica de la laguna y la eficiencia hidráulica de la boca, con el fin de mantener la estabilidad de la zona costera. Con el propósito de investigar la hidrodinámica y morfodinámica de la laguna, se diseñó y construyó un modelo numérico utilizando la plataforma Delft3D FM. La construcción de este modelo conllevó un análisis minucioso que comprendió la recopilación de datos concernientes a niveles de mareas, morfología de la laguna, parámetros de rugosidad y aportes de agua dulce. Una vez que el modelo estuvo debidamente calibrado y validado, se procedió a llevar a cabo simulaciones computacionales en diversos escenarios. Estas simulaciones implicaron la variación controlada de la longitud de la barra, con el propósito de evaluar en profundidad su influencia en los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos que tienen lugar en la boca de La Carbonera. Los resultados obtenidos indicaron que, a medida que la longitud de la barra se incrementa, la laguna exhibe una disminución en su capacidad de importación y muestra una mayor estabilidad en términos de intercambio de agua con el Golfo de México.

Adicionalmente, la inclusión de aportes de agua dulce en nuestra modelación numérica resultó en una mejora significativa en los intercambios de agua dentro de la laguna, especialmente en los rangos de velocidades de flujo y reflujos. Esto contribuyó de manera substancial a un equilibrio hidrodinámico más efectivo.



# Índice

1	INTRODUCCIÓN	13
1.1	Planteamiento del problema	14
1.2	Justificación	15
1.3	Hipótesis	15
1.4	Área de estudio	16
1.4.1	Laguna costera La Carbonera	16
1.4.2	Condiciones Climáticas	20
1.4.3	Condiciones Marinas	20
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivos Generales	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	ANTECEDENTES	22
4	MARCO TEORICO	24
4.1	Lagunas Costeras	24
4.2	Características de las Lagunas Costeras	25
4.3	Importancia de las Lagunas Costeras	25
4.4	Mareas	26
4.4.1	Componentes armónicas	28
4.4.2	Coefficiente de Courtier	29
4.4.3	Prisma de marea	30
4.4.4	Asimetría de mareas	30
4.4.5	Régimen Semidiurno	32
4.4.6	Régimen Mixto	33
4.4.7	Régimen Diurno	34
4.5	Transporte de Sedimentos	34
4.5.1	Formulaciones empíricas	36
5	Metodología	40
5.1	Recolección de datos	40
5.1.1	Marea	40
5.1.2	Flujos en la boca	41
5.1.3	Batimetría	42
5.1.4	Geometría Lagunar	43

5.1.5	Aportes de agua dulce _____	43
5.2	Análisis Armónico _____	43
5.3	Modelación Numérica _____	44
5.3.1	Descripción del modelo Delft3D Modulo Delft3D-FM _____	44
5.3.2	Tiempo de estabilización del modelo _____	52
5.3.3	Calibración _____	53
5.3.4	Validación _____	62
5.3.5	Casos simulados _____	64
5.3.6	Datos de entrada _____	64
5.3.7	Variación de la longitud del spit _____	65
5.3.1	Análisis de transporte de sedimentos _____	67
6	Resultados _____	68
6.1	Marea Real _____	68
6.1.1	Prisma de marea _____	68
6.1.2	Velocidades _____	71
6.1.3	Duraciones _____	75
6.1.4	Amplitudes y fases de marea _____	79
6.1.5	Transporte de sedimentos _____	84
6.2	Marea hipotética _____	89
6.2.1	Prisma de marea _____	90
6.2.2	Velocidades _____	93
6.2.3	Duraciones _____	96
6.2.4	Amplitudes y fases de marea _____	98
6.2.5	Transporte de sedimentos _____	102
7	CONCLUSIONES _____	110
8	Referencias _____	113
	Apéndice A _____	112
	Apéndice B _____	115
	Apéndice C _____	116
	Apéndice D _____	117

## Índice de Figuras

<i>Figura 1-1. Ubicación de la laguna costera La Carbonera. Fuente. Google Earth.</i>	17
<i>Figura 1-2. Crecimiento de la Laguna La Carbonera a través de los años. Fuente. Paladio H, (2020).</i>	18
<i>Figura 1-3. Crecimiento de la barra de arena en dirección Este a Oeste. Fuente. Paladio H, (2022).</i>	19
<i>Figura 4-1 Lagunas costeras por región en México. (Lankford, 1977).</i>	24
<i>Figura 4-2. Régimen de marea. En color rojo se observa el régimen de marea semidiurno, en color amarillo se muestra un régimen amarillo y en azul el régimen semidiurno mixto.</i>	27
<i>Figura 4-3. Rango mareal (m) en distintas zonas costeras de México.</i>	28
<i>Figura 4-4. Marea mixta, donde se puede ver que no hay simetría entre las crestas y los valles. Además, se muestran las aguas altas en color rojo y las aguas bajas en color azul. Tomado de Santamaría-Aguilar et al., (2017).</i>	33
<i>Figura 4-5. Valores de los factores teóricos (<math>e_b</math>, <math>e_s</math>) para la eficiencia del arrastre de fondo en función de la velocidad media del flujo, para diferentes tamaños de partículas, según Bagnold (1966).</i>	37
<i>Figura 5-1 Datos medidos del nivel del mar durante la campaña realizada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en diciembre del 2017 y enero del 2018.</i>	41
<i>Figura 5-2 Magnitud de la velocidad medida con ADCP.</i>	41
<i>Figura 5-3 a) Batimetría obtenida de GEBCO. b) Batimetría obtenida en campaña del II en el año 2016.</i>	42
<i>Figura 5-4. a)) Ejemplo del modelo <math>\sigma</math>. B) Ejemplo del modelo Z (cartesiano).</i>	45
<i>Figura 5-5. Variaciones en la discretización del dominio. a) Malla con océano recortado. b) Malla con canal ubicado sobre el peten definido.</i>	48
<i>Figura 5-6. Discretización de dominio, malla estructurada y malla no estructurada</i>	49
<i>Figura 5-7. Fronteras marcadas con línea roja.</i>	50
<i>Figura 5-8. Volumen de entrada y salida de la laguna a) Malla fina. B) Malla no fina.</i>	51
<i>Figura 5-9 Tiempo de estabilización del modelo basado en serie del nivel del mar.</i>	53
<i>Figura 5-10. Puntos medidos con datos medidos del nivel del mar durante la campaña realizada en 2017-2018 (círculos rojos).</i>	53
<i>Figura 5-11. Datos batimétricos dentro de la laguna La Carbonera.</i>	54
<i>Figura 5-12. Mapa de rugosidades en la Laguna la Carbonera</i>	56
<i>Figura 5-13. Mapa de descargas de agua en la Laguna la Carbonera.</i>	58

<i>Figura 5-14. Calibración: Mar, Barra y Laguna de la campaña realizada del 15 de diciembre del 2017 al 22 de enero del 2018.</i>	59
<i>Figura 5-15. Calibración en Petén: Canal de entrada, canal medio y ojo de agua de la campaña realizada del 15 de diciembre del 2017 al 22 de enero del 2018.</i>	60
<i>Figura 5-16. Coeficiente de sesgo para puntos medidos en la calibración.</i>	62
<i>Figura 5-17. Validación en Petén: datos medidos vs datos modelados de la campaña realizada el 22 de junio del 2016.</i>	63
<i>Figura 5-18 Marea utilizada en la frontera Norte 2017-2018.</i>	64
<i>Figura 5-19 Marea idealizada. a) Componentes armónicas M2 (azul) y M4 (negro). b) Marea hipotética 1(rojo) c) Marea hipotética 2 (magenta).</i>	65
<i>Figura 5-20. Variación de la longitud de spit en diferentes escenarios</i>	66
<i>Figura 6-1. Prisma de mareas en la sección de garganta y boca durante el ciclo de mareas en la laguna La Carbonera.</i>	69
<i>Figura 6-2. Volumen de flujo y reflujos mensual en las secciones de la garganta y boca de la laguna para cada escenario.</i>	70
<i>Figura 6-3. Volumen de flujo neto mensual en las secciones de la garganta y boca de la laguna.</i>	70
<i>Figura 6-4. Relación Flujo-Reflujo por cada escenario. Línea continua representa la sección de la garganta y la línea punteada la sección de la boca.</i>	71
<i>Figura 6-5. Velocidad en la sección Garganta. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.</i>	73
<i>Figura 6-6. Velocidad en la sección Boca. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.</i>	75
<i>Figura 6-7. Duración de flujo y reflujos en la sección Garganta. Las gráficas de barras azules representan el tiempo durante el cual el flujo de agua es predominante, mientras que las gráficas de barras rosas indican el tiempo en el que se produce el reflujos. La línea roja continua representa el nivel del mar.</i>	77
<i>Figura 6-8. Duración de flujo y reflujos en la sección Boca. Las gráficas de barras azules representan el tiempo durante el cual el flujo de agua es predominante, mientras que las gráficas de barras rosas indican el tiempo en el que se produce el reflujos. La línea roja continua representa el nivel del mar.</i>	77
<i>Figura 6-9. Componentes armónicas principales de serie de tiempo 2017-2018.</i>	83

Figura 6-10. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Bagnold, 1966. b) Madsen y Grant, 1976. c) d) y e) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b.	85
Figura 6-11. Transporte de sedimentos en la boca. a) Bagnold, 1966. b) Madsen y Grant, 1976. c) d) y e) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b.	86
Figura 6-12. Valor normalizado en la sección garganta del transporte de sedimentos para todas las formulaciones.	87
Figura 6-13. Valor normalizado en la sección boca del transporte de sedimentos para todas las formulaciones.	88
Figura 6-14. Relación Flujo-Reflujo por cada escenario. Línea continua representa la sección de la garganta y la línea punteada la sección de la boca.	91
Figura 6-15. Relación $V_{\text{Reflujo}}/V_{\text{Flujo}}$ para cada escenario, en la boca y en la garganta. El panel a) corresponde al forzamiento de marea hipotética 1 y el b) al forzamiento de la marea hipotética 2.	92
Figura 6-16. Velocidad en las secciones Garganta y Boca para Marea hipotética 2. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujo.	93
Figura 6-17. Velocidad en las secciones Garganta y Boca para Marea hipotética 2. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujo.	94
Figura 6-18. a) Fase relativa. b) Grado de distorsión. Mareas hipotéticas 1 y 2 en las secciones de garganta (rojo) y laguna (azul). Las líneas continuas representan la marea hipotética 1, y las líneas punteadas la marea hipotética 2.	102
Figura 6-19. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 1.	103
Figura 6-20. Transporte de sedimentos en la sección boca. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 1.	104
Figura 6-21. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 2.	105
Figura 6-22. Transporte de sedimentos en la sección boca. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 2.	106
Figura 6-23. Valor normalizado en la sección garganta del transporte de sedimentos para todas las formulaciones. a) Marea hipotética 1. b) Marea hipotética 2.	108
Figura 6-24. Valor normalizado en la sección boca del transporte de sedimentos para todas las formulaciones. a) Marea hipotética 1. b) Marea hipotética 2.	109

## Índice de Tablas

Tabla 4-1 Regímenes de marea.	27
Tabla 4-2 Componentes armónicas. Tomado de Lopes, A. M., y Machado, J. A. T., (2017).	29
Tabla 4-3. Clasificación de tamaño de sedimentos por Jeffress Williams, Matthew A. Arsenault, Brian J. Buczkowski, Jane A. Reid, James G. Flocks, Mark A. Kulp, Shea Penland, y Chris J. Jenkins, USGS.	35
Tabla 5-1. Coeficientes de fricción de Manning por cobertura vegetal. (Mattocks y Forbes, 2008)	55
Tabla 5-2. Estadísticos de calibración	61
Tabla 5-3. Estadísticos de calibración de las primas de marea	63
Tabla 5-4. Longitudes de spit y ancho de boca	65
Tabla 6-1. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.	72
Tabla 6-2. Duraciones promedio de flujo y reflujo para cada escenario en la boca y en la garganta	77
Tabla 6-3. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.	79
Tabla 6-4. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.	80
Tabla 6-5. Amplitudes y fase por escenario en la boca de la laguna La Carbonera.	80
Tabla 6-6. Amplitudes y fase por escenario en el centro de la laguna La Carbonera.	80
Tabla 6-7 Desfase de las principales componentes armónicas del mar a la entrada de la Laguna	82
Tabla 6-8 Desfase de las principales componentes armónicas de la entrada al centro de la Laguna.	82
Tabla 6-9. Características de señal de mareas hipotéticas.	89
Tabla 6-10. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.	95
Tabla 6-11. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.	95
Tabla 6-12. Duraciones de flujo y reflujo (máxima y promedio) por cada escenario.	97
Tabla 6-13. Duraciones de flujo y reflujo (máxima y promedio) por cada escenario.	97
Tabla 6-14. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.	98
Tabla 6-15. Amplitudes y fase por escenario en la garganta de la laguna La Carbonera.	98
Tabla 6-16. Amplitudes y fase por escenario en el centro de la laguna La Carbonera.	99
Tabla 6-17. Desfase en principales componentes armónicas de la Laguna La Carbonera.	100

*Tabla 6-18. Desfase en principales componentes armónicas de la Laguna La Carbonera.*

---

100

# 1 INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son los espacios de interacción más dinámicos en nuestro planeta, donde convergen la tierra, la atmósfera, el mar y las aguas dulces. Estos lugares de frontera geográfica no solo atenúan las fuerzas del oleaje, el viento y las corrientes, sino que también albergan una riqueza ecológica única, desempeñando un papel fundamental en la economía y la cultura de las comunidades locales (Cruz, C. J., Mendoza, E., Silva, R., y Chávez, V., 2019).

En el contexto de México, la zona costera abarca más de 11,000 kilómetros de litoral, una extensión que alberga una gran diversidad de ecosistemas. Aproximadamente el 68% de estas costas e islas se extienden a lo largo del Océano Pacífico y el Golfo de California, mientras que el 32% restante se adentra en el Golfo de México y el Mar Caribe. Esta vasta región cuenta con una extensión de 500,000 km<sup>2</sup> de plataforma continental, 16,000 km<sup>2</sup> de áreas estuarinas y más de 12,000 km<sup>2</sup> de lagunas costeras (INEEC, 2007).

Las lagunas costeras, como componentes esenciales de estas zonas costeras, desempeñan un papel importante. Estos cuerpos de agua poco profundos, paralelos a la costa, poseen una o más conexiones con el océano, conocidas como bocas. Estas bocas son los puntos críticos de unión donde la dinámica del mar y el agua dulce se entrelazan, creando condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas únicas. Su estabilidad y capacidad para mantener el equilibrio en los intercambios de agua con el océano son esenciales para la salud de los ecosistemas costeros. La hidrodinámica de los sistemas lagunares es altamente compleja, ya que está influenciada por factores como la marea, la topografía local, la descarga de agua dulce y la salinidad. Para abordar esta complejidad, la modelación numérica se presenta como una herramienta determinante. A través de modelos hidrodinámicos, es posible comprender el comportamiento del agua, cómo cambian los niveles de agua en respuesta a las mareas y cómo se transportan los nutrientes y contaminantes a través de estos sistemas.

La modelación de sistemas lagunares costeros plantea desafíos particulares que no se encuentran al modelar cuerpos de agua en sistemas abiertos. Por esta razón, es fundamental contar con un conocimiento detallado de diversos factores, como las condiciones en los límites del sistema lagunar, la topografía y la batimetría de la región a modelar, las variaciones de los niveles de agua en respuesta a las mareas y la influencia de los aportes de agua dulce. Estos elementos son esenciales para obtener resultados precisos en la modelación. (King, 2001).

Dentro de este contexto, se estudió el caso particular de la laguna La Carbonera en la costa de Yucatán, México. Esta laguna costera, rica en biodiversidad y recursos naturales, tiene un papel fundamental en la vida de la comunidad de Sisal, al influir

en actividades económicas locales como la pesca y el turismo. Sin embargo, a pesar de su importancia, la dinámica de la boca de La Carbonera y su influencia en la laguna aún presentan vacíos en el estado del conocimiento.

Este estudio se centra en explorar y abordar estos vacíos, enfocándose en determinar si la laguna La Carbonera presenta una tendencia hacia el flujo o el reflujó, considerando una serie de factores, como las mareas, los aportes de agua dulce y la asimetría de mareas. A través de la modelación numérica, se podrá evaluar la manera en que factores influyen en la hidrodinámica de la laguna y si existe una tendencia predominante hacia el flujo de agua el reflujó desde la laguna hacia el océano. Este análisis nos permitirá comprender mejor la estabilidad y el funcionamiento de La Carbonera en relación con su interacción con el entorno costero.

### **1.1 Planteamiento del problema**

La laguna La Carbonera es un sistema costero caracterizado por la asimetría de mareas y un transporte litoral predominante de Este a Oeste. Esta configuración geográfica ha dado lugar a la formación de un extenso spit, que actúa como barrera natural separando la laguna del Golfo de México. Esta lengua de arena es altamente dinámica y está sujeta a cambios morfológicos constantes debido a la influencia de dos procesos principales: el efecto de las mareas y el oleaje.

El efecto de las mareas controla principalmente el transporte de agua entre la laguna y el Golfo de México. La variación en la amplitud y el ciclo de las mareas influye en los flujos de entrada y salida de agua, lo que afecta directamente a la hidrodinámica y a los periodos de residencia del agua en la laguna.

Por otro lado, el oleaje, aunque no afecta directamente la morfología de la laguna en sí, tiene un impacto significativo en la boca de La Carbonera. Las olas pueden modificar la geometría de la entrada de la laguna, influenciando así la hidrodinámica local y la señal termohalina.

La acumulación de sedimentos a lo largo del spit también tiene consecuencias importantes en la costa ubicada al Oeste de la laguna. En particular, esta acumulación de sedimentos produce un déficit en las playas de esta zona, lo que provoca un retroceso en la línea de costa y una erosión significativa. Este fenómeno es un ejemplo de cómo las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias pueden interactuar para influir en la morfología y la estabilidad de la costa.

Estudios científicos han demostrado que estas interacciones son complejas y que pueden ser influenciadas por muchos factores, incluyendo la topografía, la geomorfología, la hidrología y las condiciones meteorológicas.

En particular, los patrones de transporte litoral y de asimetría de las mareas son factores importantes para comprender los cambios morfológicos en la laguna. Este estudio se enfocará en determinar en qué medida estos factores están relacionados con la evolución morfológica de la laguna. Además, se investigará cómo los cambios en la boca/lengua de la laguna influyen en su hidrodinámica.

## **1.2 Justificación**

Las lagunas costeras funcionan como hábitat para una amplia variedad de especies y también son fundamentales para la vida de las comunidades humanas que dependen de ellas. Las conexiones con el océano a través de las bocas, son importantes para que estos ecosistemas puedan existir.

La laguna La Carbonera, en particular, es un ecosistema de gran importancia debido a su rica biodiversidad y su impacto en las actividades económicas y sociales de la comunidad de Sisal. Esta laguna alberga una diversidad de vida que incluye aves migratorias, reptiles, mamíferos y una notable cantidad de especies de peces, lo que contribuye a la biodiversidad de la región y a la sustentabilidad de la pesca local.

Además, La Carbonera está intrínsecamente vinculada a las actividades de ecoturismo en la comunidad de Sisal, generando ingresos y empleos que benefician a la población local. Sin embargo, el equilibrio natural de este ecosistema enfrenta desafíos significativos. La creciente presión de asentamientos humanos en la zona está alterando la morfología lagunar y amenazando la biodiversidad de la región.

Por esta razón, el presente estudio adopta una postura como una contribución esencial para el entendimiento de los flujos y reflujos en La Carbonera, incluyendo sus intensidades y duraciones, con relación a los cambios morfológicos de la lengua de arena que la separa del Golfo de México. Al comprender cómo estos factores interactúan y afectan la laguna, este proyecto busca proporcionar información valiosa para la conservación de la biodiversidad, la gestión sostenible de los recursos y la toma de decisiones que impactarán tanto a la ecología como a la comunidad de Sisal. En última instancia, se espera que este estudio contribuya a la preservación de La Carbonera como un valioso socio-ecosistema y como fuente de sustento para las generaciones presentes y futuras.

## **1.3 Hipótesis**

Los cambios en la longitud del spit tienen un impacto más significativo en la hidrodinámica de la laguna La Carbonera en comparación con la asimetría de mareas. Se espera que variaciones en la longitud del spit, ya sea su aumento o disminución, modifiquen de manera más notable las velocidades de los flujos de agua, la dirección de los mismos y el tiempo de residencia del agua en la laguna.

Esta hipótesis está basada en la observación de que los cambios en la longitud del spit pueden influir directamente en la geometría de la entrada de la laguna y, por lo tanto, en la dinámica de flujos en la laguna. Se plantea que estas variaciones pueden ser el factor principal que incide en la hidrodinámica de la laguna.

Para probar esta hipótesis, se llevará a cabo un estudio que analice los cambios en la boca de La Carbonera y en la hidrodinámica de la laguna en función de la asimetría de mareas y la longitud del spit.

Se espera que los resultados del estudio demuestren la influencia significativa de los cambios hidrodinámicos en la laguna, al modificar la longitud del spit, asimismo la asimetría de mareas presentará cambios morfodinámicos en la boca de La Carbonera, dado que los flujos de agua y la erosión de sedimentos están directamente relacionados con citada asimetría. Aunque el oleaje también desempeña un papel importante en la morfología de la boca, este estudio se centrará específicamente en la asimetría de mareas, lo que permitirá una comprensión más detallada de su impacto en la laguna.

## **1.4 Área de estudio**

### **1.4.1 Laguna costera La Carbonera**

La laguna costera La Carbonera se encuentra ubicada al noroeste del Estado de Yucatán, limitada geográficamente entre las siguientes coordenadas geográficas: 89°52'5.4" W, 21°14'28.4" N; 89°52'0.51" W, 21°12'59.7" N; 89°54'26.3" W, 21°12'35.1" N y 89°55'7.8" W, 21°13'213.2" N. Está limitada al Este y Oeste por un conjunto de ciénegas que comunican con Chuburná Puerto y Sisal, respectivamente, y se conecta con el Golfo de México a través de una estrecha boca, con las cuales llega a tener intercambios de masas de agua, principalmente durante pleamares de mareas vivas y/o durante eventos extraordinarios de aportes de agua dulce del acuífero. En la Figura 1-1 se observa una imagen tomada de Google Earth (2017) que muestra la laguna. La laguna costera La Carbonera se originó debido al paso del Huracán Gilberto por la península de Yucatán en 1988 (Jerónimo et al., 2012), pasando de una ciénega sin comunicación directa y franca con el mar a una laguna costera. Dicho huracán provocó la ruptura de la barra de arena que separaba el océano de la Ciénega, por lo cual comenzó el intercambio de agua entre ambos cuerpos, dictado principalmente por las mareas (astronómicas y meteorológicas), aportes de agua dulce del acuífero confinado y de escurrimientos superficiales. Esta mezcla de agua dulce y salada favoreció el desarrollo de manglares y petenes (islotos de vegetación de selva mediana).

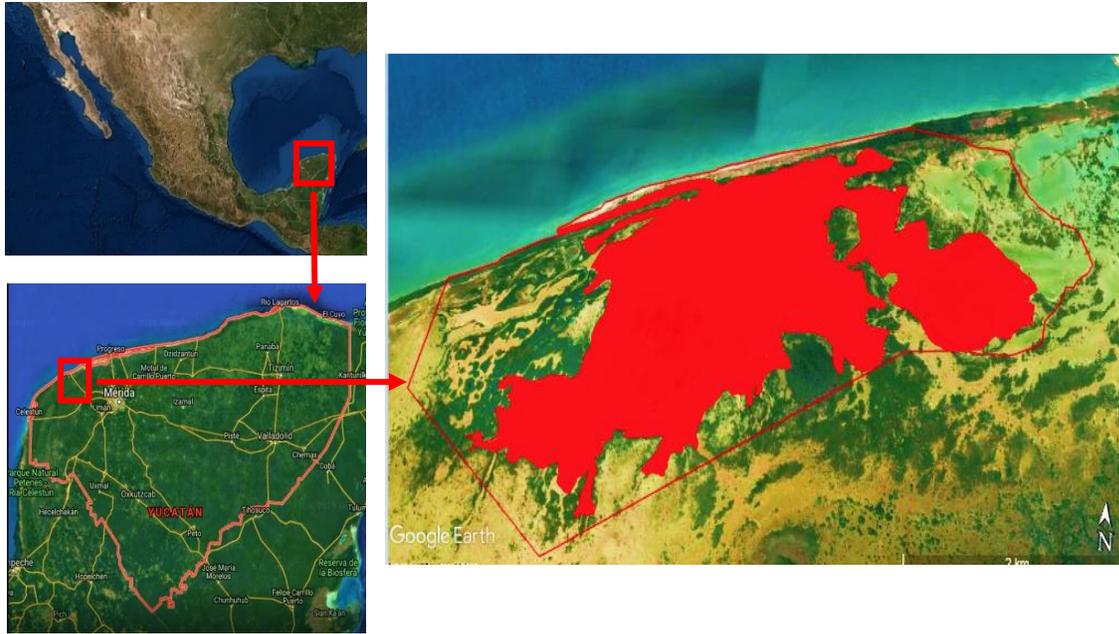
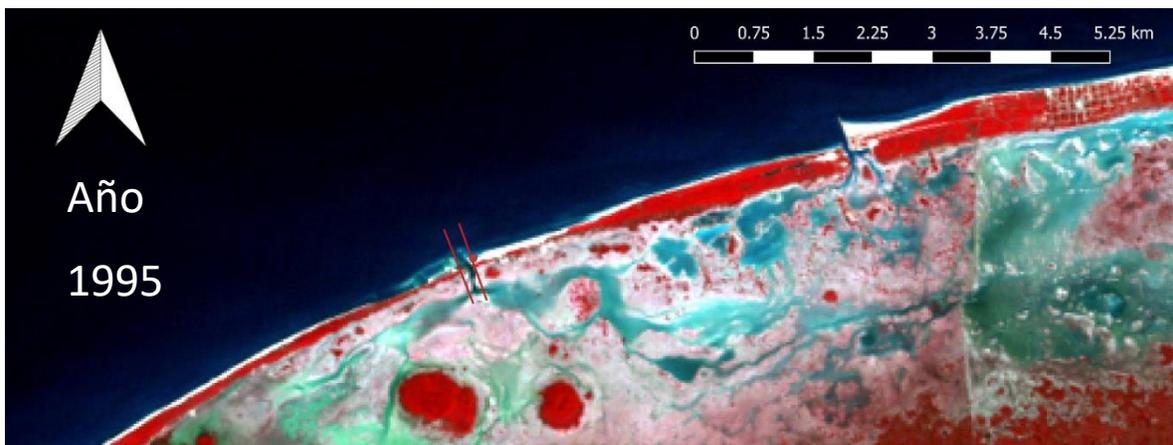


Figura 1-1. Ubicación de la laguna costera La Carbonera. Fuente. Google Earth.

En los años posteriores a la ruptura, se observó el crecimiento de una lengua, debido a la acumulación de sedimentos por el transporte litoral que, en la zona, el cual es predominantemente de Este a Oeste. El crecimiento de esa lengua ha sido en promedio de 100 m por año de manera cíclica, con un ancho que varía de 20 a 130 metros. (Paladio, Salles, Arriaga y López-González, J., 2022). Ver Figura 1-2.



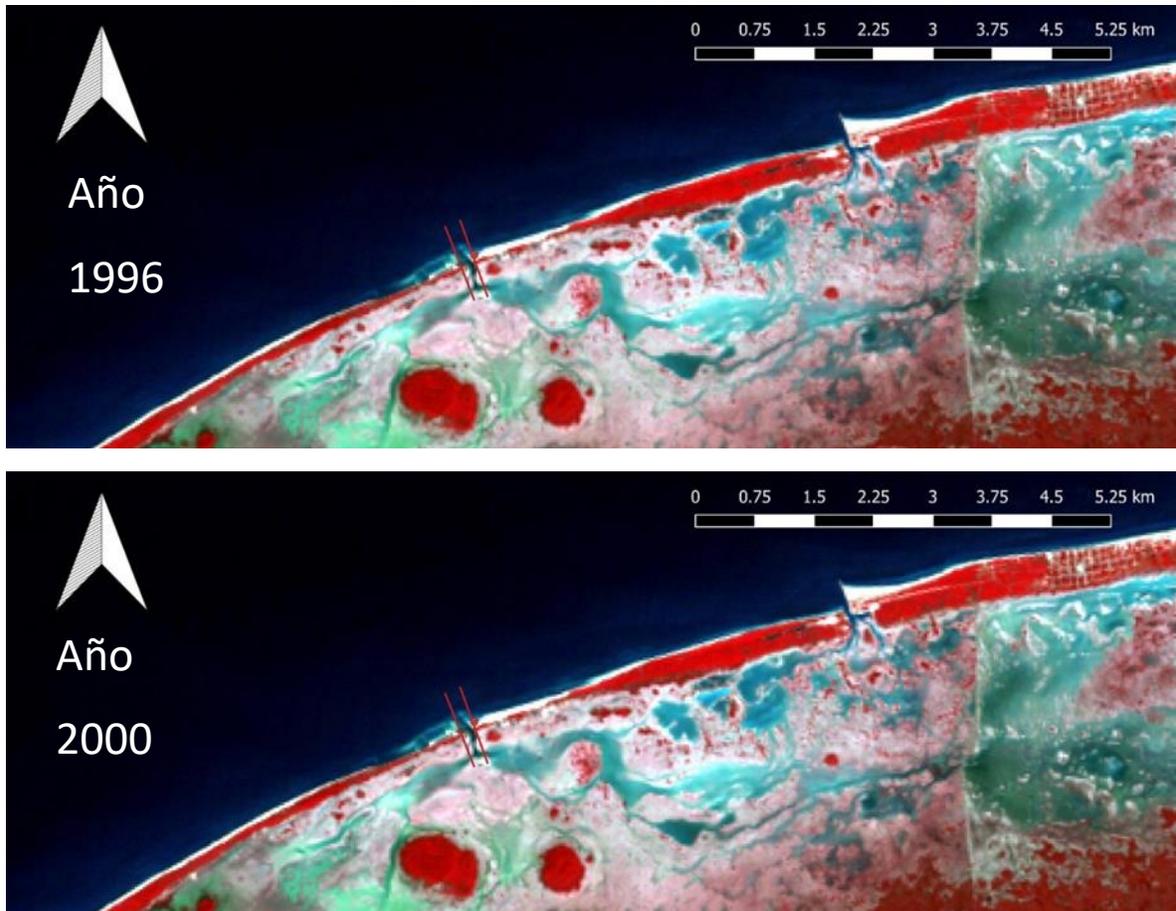


Figura 1-2. Crecimiento de la Laguna La Carbonera a través de los años. Fuente. Paladio H, (2020).

La Carbonera, a pesar de no tener límites terrestres bien definidos, se considera como una laguna costera de aproximadamente 7.5 km<sup>2</sup> de área. El frente costero de la laguna está conformado por una barra de arena a ambos lados de la boca, además de que del lado Este de la boca crece permanentemente hacia el Oeste, enfrente de la boca, una “lengua” de longitud variable. En la Figura 1-3 podemos observar una serie de ortomosaicos tomados en campañas realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde se muestran los cambios que ha sufrido la barra del año 2016 al año 2020.

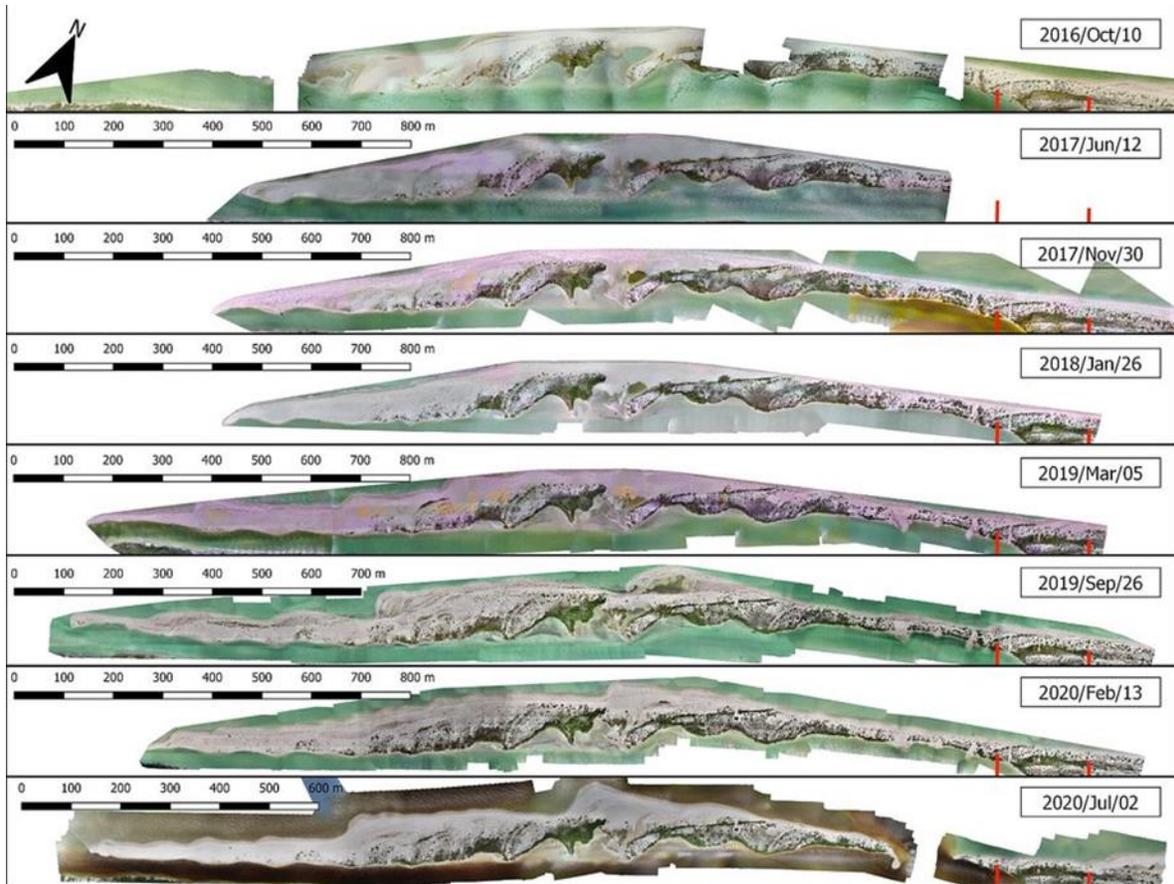


Figura 1-3. Crecimiento de la barra de arena en dirección Este a Oeste. Fuente. Paladio H, (2022).

Como características generales de la laguna se tiene que el canal que conecta al océano con la laguna tiene profundidad variable con un máximo de 1.8 metros en la bocana.

En el frente costero, la batimetría es relativamente poco profunda debido a la existencia de una plataforma continental que se extiende del Golfo al Caribe, la cual tiene una pendiente muy suave del orden de 1:1000. El material con el que se forma es mayormente de rocas sedimentarias depositadas sobre un basamento paleozoico (Carranza et al. 1979). Por otra parte, la batimetría dentro de la laguna es somera, alcanzando los 50 cm como máximo en tiempo de pleamares.

El mayor flujo de agua subterránea es variable y ocurre en la época de lluvias junio-octubre el cual se estima puede alcanzar valores de es de  $9\text{m}^3/\text{s}$ , sumando los petenes y los aportes difusos.

Los suelos presentes en el interior de la Laguna tienen un alto contenido de arcilla y materia orgánica. La playa está compuesta por arena media carbonatada que va desde 0,2 a 2,0 mm en la zona de surf.

### **1.4.2 Condiciones Climáticas**

El clima de la Península de Yucatán tiene tres estaciones características: 1) cálido y seco (marzo - mayo), 2) temporada de lluvias (junio - octubre) y 3) temporada de invierno con lluvias cortas presentes ocasionalmente (noviembre - febrero) (Schmitter et al. 2002) debido a los nortes. Las temperaturas promedio mensual es de 27.5°C con un rango de 18°C a 37°C.

Las tasas de evapotranspiración superan las tasas promedio de precipitación. La recarga del acuífero promedio es alta oscilando entre los 937 y 995 mm/año. (Gondwe et al. 2010).

### **1.4.3 Condiciones Marinas**

En primavera-verano por la mañana, se presentan vientos suaves de la dirección sureste (brisas terrestres) que no generan oleaje significativo en la costa, es decir, olas que son lo suficientemente grandes como para tener un impacto notable en las condiciones marítimas, como la navegación y la dinámica de la costa. Por la tarde, la dirección del viento cambia al noreste (brisas marinas) que generan oleaje y corrientes en la misma dirección con velocidades que oscilan entre 3.5 y 8 m/s y alturas de ola significativa  $H_s < 1\text{m}$ . En invierno, las brisas marinas se combinan con los eventos "Nortes" debido a que la zona se encuentra expuesta a frentes fríos que viajan de Norteamérica hacia el sur con vientos intensos del noroeste generando un importante régimen de oleaje en esa dirección con velocidades que superan los 10m/s y alturas de ola significantes  $H_s > 2\text{m}$  y periodo pico  $T_p > 7\text{s}$ . El régimen de mareas es diurno con rangos mareales en tiempo en mareas vivas de 0.8 m y en tiempo de mareas muertas de 0.1m. (Medellín, Torres-Freyermuth, 2018).

Los ciclones tropicales o huracanes pasan aproximadamente 0.16 veces por año presentando sobreelevaciones del mar de hasta 1.5m. (Appendini et al., 2018).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Generales**

Analizar la interrelación entre la asimetría de mareas y los cambios morfológicos en la boca/lengua de la laguna La Carbonera sobre su hidrodinámica, con el fin de determinar cómo estos factores interactúan y afectan la dinámica del sistema costero.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar el efecto de la asimetría de mareas en la morfología de la boca de la laguna La Carbonera.
- Examinar la influencia de la longitud del spit en la hidrodinámica de la laguna.
- Determinar la interacción entre la asimetría de mareas y la longitud del spit en la dinámica de la laguna.
- Identificar posibles tendencias o patrones en la evolución de la boca de La Carbonera a lo largo del tiempo.
- Evaluar el impacto potencial de los cambios morfológicos en la boca de la laguna en la dinámica costera.

### 3 ANTECEDENTES

A principios del siglo XX, los investigadores comenzaron a darse cuenta de que las lagunas costeras son ecosistemas importantes desde una perspectiva ecológica. Esta conciencia marcó el comienzo del estudio de estas lagunas. A lo largo del tiempo, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de técnicas avanzadas de observación y modelado que han mejorado significativamente nuestra comprensión de la dinámica de las corrientes de marea y las tasas de intercambio de agua en estos sistemas. Tecnologías como modelos numéricos, sistemas de teledetección y sensores han permitido recopilar datos más precisos y detallados sobre las lagunas costeras y sus procesos.

Un área de investigación fundamental en el estudio de lagunas costeras es la hidrodinámica, que se enfoca en comprender cómo se mueve y fluye el agua en estos cuerpos de agua. Con el paso del tiempo los avances en la investigación de la hidrodinámica han proporcionado un conocimiento más profundo de los mecanismos que influyen en la calidad del agua, la geometría y la función de los ecosistemas dentro de estas lagunas.

En el contexto de la región costera de Yucatán, lugar de interés ya que cuenta con distintos sistemas lagunares, se realizó un estudio por Batllori y Febles en 2007 en el cual determinaron que era de gran la importancia entender la variabilidad de los sedimentos en suspensión en este tipo de cuerpos de agua. La dinámica de los sedimentos en suspensión es fundamental para la investigación en curso, especialmente debido a los cambios continuos que ocurren en la morfología de los spits y las playas en esta región. Los autores destacaron que los patrones de distribución de los sedimentos en suspensión pueden estar significativamente influenciados por las condiciones de las mareas y los procesos sedimentarios. Sin embargo, su estudio se centró en observar patrones y comportamientos sedimentarios en la región costera, sin cuantificar de manera específica el transporte de sedimentos. Mas adelante, investigadores han planteado el estudio de sistemas lagunares en la península de Yucatán, a continuación, se muestran algunas de las investigaciones realizadas.

Estudio de la Laguna Carbonera Wilmer Rey (2012):

El estudio realizado por el Dr. Wilmer Rey en la laguna de La Carbonera se centró en evaluar y modelar la hidrodinámica de esta. Citado estudio reveló que la asimetría de las mareas y la forma del banco de arena (spit) desempeñan un papel esencial en la forma en que fluye el agua en la laguna. Sin embargo, aunque se comprende la influencia individual de la asimetría de las mareas o la morfología del spit, el estudio no abarco a detalle la interacción entre estos dos factores y cómo afectan de manera conjunta a la dinámica general de La Carbonera.

Estudio de Chelem de Leonardo Tenorio (2015):

La investigación de Leonardo Tenorio se enfoca en la hidrodinámica de cuerpos de agua costeros altamente friccionales, como Chelem. Es importante señalar que la laguna de Chelem comparte muchas características con la laguna La Carbonera, ya que ambas están conectadas al golfo a través de una estrecha boca y son muy someras. Los sistemas con estas características experimentan variaciones notables en las condiciones hidrológicas a diferentes escalas temporales. El estudio de Tenorio destaca la importancia de la interacción entre la aceleración de la marea y el gradiente de densidad longitudinal en la circulación submareal. Sus hallazgos revelan que, en áreas altamente friccionales como Chelem, la influencia de la marea es dominante durante las mareas vivas, mientras que, en mareas muertas, el gradiente de densidad controla la circulación. Esto proporciona información sobre cómo los forzamientos de marea afectan la circulación en sistemas costeros y sirve como base para la presente investigación, ya que está relacionada con la dinámica de mareas y el transporte de sedimentos en cuerpos de agua costeros.

Estudio de Pacheco-Castro, R., Salles, P., Canul-Macario, C., y Paladio-Hernández (2021):

Por último, el estudio realizado por Pacheco, Salles y Paladio muestra la importancia de comprender la interacción entre las fuentes de agua dulce, como los ojos de agua que se encuentran presentes en los sistemas lagunares del estado de Yucatán y el sistema lagunar en sí. En el estudio realizaron con detalle el ojo de agua que se encuentra en la laguna costera La Carbonera. Este, descarga agua dulce en la laguna costera en lugar de bajo el mar, como sucede con los manantiales submarinos.

El análisis del ojo de agua reveló que la intrusión de agua salada ocurre durante las mareas bajas, lo cual es un fenómeno contrario a lo que generalmente se observa en los manantiales submarinos de la península de Yucatán. El estudio identificó las fuerzas impulsoras detrás de este proceso, que incluyen diferencias de densidad y gradientes de presión. Estas fuerzas son influenciadas por mecanismos como las mareas, la fricción en la laguna y la forma en que el acuífero se encuentra confinado. Además, el estudio exploró otros mecanismos que pueden influir en estas interacciones.

Durante el desarrollo de esta investigación, la modelación numérica será una herramienta de gran utilidad para observar la variabilidad hidrodinámica generada por este ojo de agua y para comprender su posible función dentro del sistema lagunar.

## 4 MARCO TEORICO

### 4.1 Lagunas Costeras

Los entornos de las lagunas costeras se derivan de interacciones complejas entre varios factores los cuales son: marinos, terrestres y atmosféricos. La mayoría de estas se formaron como resultado de la transgresión marina del Cuaternario, que comenzó hace aproximadamente 18,000 años y terminó hace unos 5,000 años, cuando el nivel medio del mar alcanzó valores cercanos a los de la actualidad. Por otro lado, la formación de las islas barrera ocurrió debido a la interacción de sedimentos fluviales que fueron transportados en su mayoría en el periodo de deshielo y a los procesos de erosión o acreción generados por la dinámica costera. (Ward y Wilson, 1974, Lankford, 1976).

Las lagunas costeras ocupan aproximadamente el 13% de las costas del mundo (Barnes, 1980), lo que representa el 27,9% de la costa de África, el 22.8% en América del Norte, el 16.9% en Asia, el 13.3% en América del Sur, el 11,7% en Australia y el 7.4% en Europa.

En México, Lankford (1977) determinó la existencia de 123 lagunas a lo largo de la costa y las clasificó en 7 regiones. Para su clasificación localizó aquellas que mostraran características similares, por ejemplo; Relieve Costero, Valles, Ríos o Desagües Terrestres, Vertientes y características de precipitación, oleaje y marea. Las regiones presentadas son: Región A y D (Pacífico), Región B y C (Golfo de California), Región E y F (Golfo de México) y Región G (Caribe). Las 123 Lagunas Costeras en México se muestran en la Figura 4-1 y el Apéndice A, donde se muestran las Regiones costeras a las que pertenecen, el numero con el que se identifican y el nombre.



Figura 4-1 Lagunas costeras por región en México. (Lankford, 1977).

## **4.2 Características de las Lagunas Costeras**

Las lagunas costeras son cuerpos de agua poco profundos, es decir, raramente mayor de 2 m (Pérez-Rufaza et al., 2011), por lo general con un eje longitudinal paralelo a la línea de costa. Están separadas del océano por islas barreras o formaciones de dunas que generalmente se forman por la deriva de sedimentos de transporte litoral. A través de estas se produce el intercambio de agua, océano-laguna o viceversa mediante una o más entradas de marea, o bocas.

De manera natural se encuentran en estado de equilibrio dinámico, experimentando una evolución geomorfológica a largo plazo (Jewell & Fortunato, 2012). Las principales fuerzas responsables de esta evolución son las tasas de transporte de sedimentos. En la parte interna de estas, pueden existir desembocaduras de ríos o descargas de agua dulce, por esta razón, generalmente son ambientes salobres, con un gradiente salino que disminuye hacia las zonas de aporte de agua dulce (ríos, manantiales...). La gran mayoría de las lagunas en zonas tropicales están circundadas por una espesa vegetación de manglar, la cual, por defoliación, aporta gran cantidad de materia orgánica al sistema. El fondo es fangoso con alto contenido de materia orgánica en proceso de descomposición.

## **4.3 Importancia de las Lagunas Costeras**

Estos ecosistemas desempeñan un papel importante en el ciclo de sedimentos, intercambiando material entre la tierra y el mar, a menudo, actuando como sumideros de sedimentos. (Friedrichs-Aubrey, 1988). Dependiendo de la hidrodinámica costera, las características morfológicas de la zona y la geometría lagunar, la barrera que separa el océano de la laguna, cambia y define su tamaño hasta llegar al punto de equilibrio. De no encontrarse un equilibrio, el sistema terminaría teniendo gran acumulación de sedimentos lo que llevaría al cierre de la boca.

Además, tienen relevancia ecológica y socio-económica dado que en ellas se encuentran diversos hábitats acuáticos que se han adaptado a vivir en esos ambientes. También contribuyen al abastecimiento de acuíferos, la atenuación del impacto del cambio climático global y la regulación del sistema hidrológico.

La urbanización, el turismo, la agricultura y la acuicultura, junto con la contaminación y la eutrofización, ha puesto preocupaciones sobre las propiedades de erosión, los canales de envío inestables y, en general, el deterioro de la calidad ambiental lo que las convierte en sistemas altamente sensibles.

#### 4.4 Mareas

Las mareas en una laguna costera son la variación temporal en la posición vertical de la superficie libre del agua, con respecto a un nivel de referencia arbitrario, causada por cualquier fenómeno o conjunto de fenómenos internos o externos. Los fenómenos que causan la marea en las lagunas costeras son principalmente:

- a) Astronómicos: interacción de fuerzas gravitacionales de planetas y astros sobre la masa de agua.

La marea astronómica se aproxima por la Ec 1:

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad \text{Ec.1}$$

dónde

$a_0$  = Nivel medio del mar;

$N$  = Número de componentes consideradas;

$a_i$  = Amplitud de la onda de la componente  $i$ ;

$\omega_i$  = Frecuencia angular de la onda de la componente  $i$ ;

$t$  = Instante en el que se calcula la marea;

$\phi_i$  = Angulo de desfase de onda en el instante  $i$ .

- b) Meteorológicos: vientos y gradientes de presión atmosférica en la región local o en zonas oceánicas adyacentes, evaporación, y precipitación.
- c) Gradientes de densidad: producto de gradientes de salinidad y/o de temperaturas horizontales o verticales.
- d) Causas locales u otras: morfología, fricción, dimensiones de la cuenca, efecto de Coriolis, y afluentes.

Si la tierra fuera una esfera perfecta sin grandes continentes, todas las áreas del planeta experimentarían dos mareas altas y bajas de igual proporción cada día lunar. Sin embargo, los continentes bloquean el paso de las mareas a medida que la tierra gira. Por esta razón se establecen patrones complejos dentro de cada cuenca oceánica que a menudo difieren mucho de los patrones de marea de las cuencas oceánicas adyacentes o de otras regiones de la misma cuenca oceánica (Sumich, JL, 1996).

Tres patrones básicos de mareas ocurren a lo largo de las principales costas de la tierra. En general, la mayoría de las áreas tienen dos mareas altas y dos mareas bajas cada día. Cuando las dos máximas y las dos mínimas tienen aproximadamente la misma altura, el patrón se denomina marea semidiurna, como es el caso en parte del Océano Pacífico mexicano. Si las mareas altas y bajas difieren en altura, el patrón se denomina marea mixta. Por último, algunas áreas, como el Golfo de México, tienen solo una marea alta y una baja cada día. Esto se

llama marea diurna. En la Figura 4-2 se muestran los regímenes de marea para las distintas cuencas oceánicas.

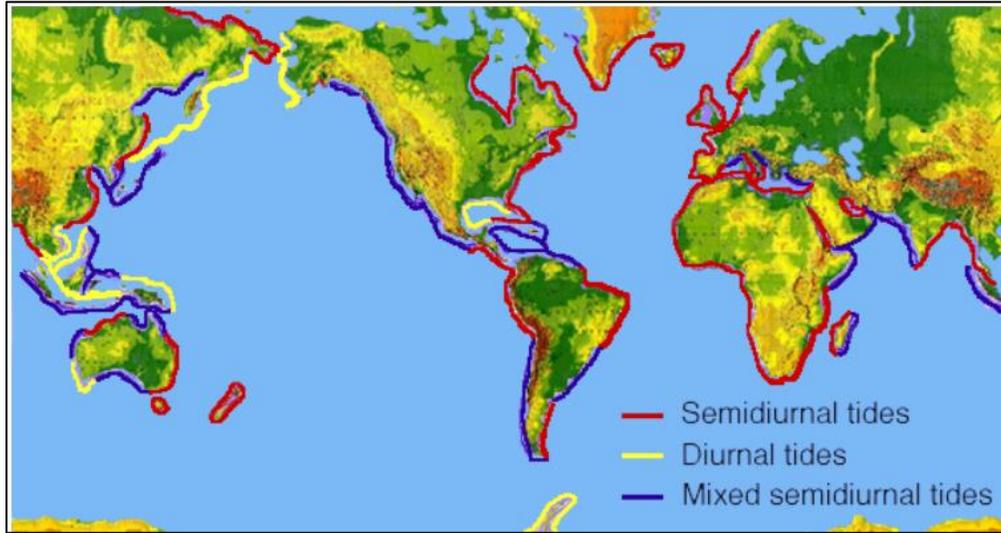


Figura 4-2. Régimen de marea. En color rojo se observa el régimen de marea semidiurno, en color amarillo se muestra un régimen amarillo y en azul el régimen semidiurno mixto.

Las corrientes de marea son una fuente de energía importante en las lagunas costeras, particularmente en las entradas y canales, para la erosión y transporte de sedimentos. Davies (1964, 1972) y Hayes (1979), distinguieron en estos cuerpos de agua 5 tipos de regímenes mareales mostrado en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Regímenes de marea.

Clasificación	Rango
Micromareal	<1m
Mesomareal bajo	1-2m
Mesomareal alto	2-3.5m
Macromareal bajo	3.5-5m
Macromareal alto	>5m

En el caso particular de México, el rango mareal no alcanza a ser Macromareal. A continuación, se muestra gráficamente en la Figura 4-3, los rangos mareales que se tienen en las diferentes costas mexicanas.

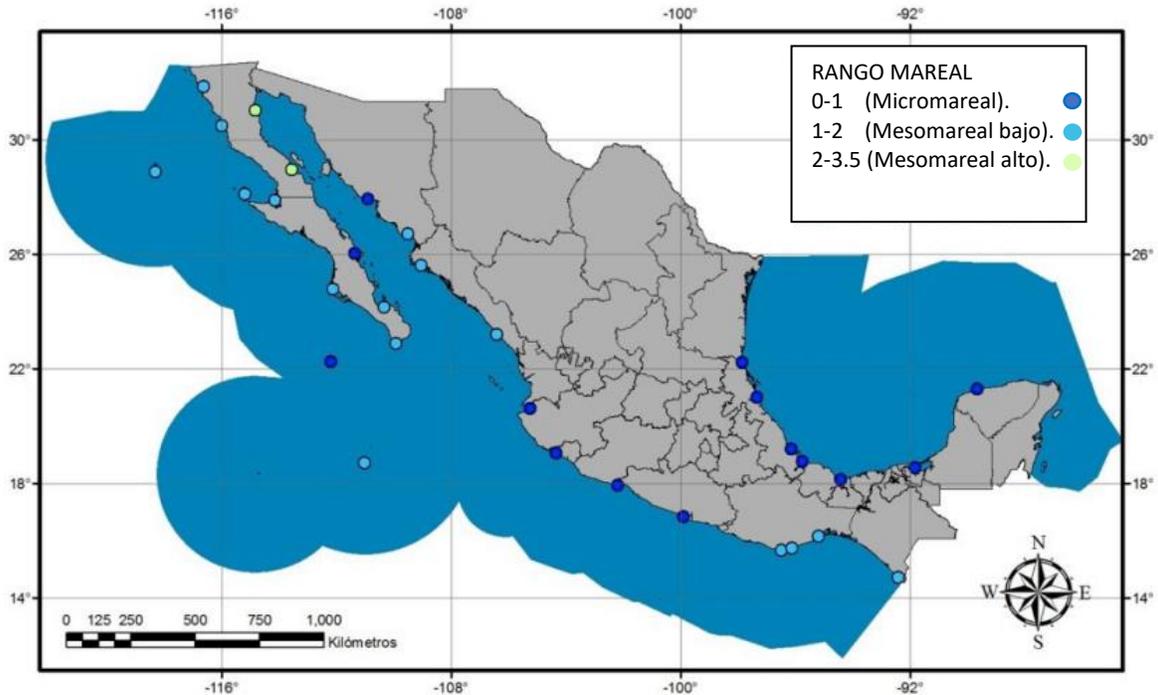


Figura 4-3. Rango mareal (m) en distintas zonas costeras de México.

Además, Hayes (1975) fue el primero en reconocer la importancia sobre la influencia que la amplitud de la marea ejerce sobre la entrada de marea y la morfología de la isla barrera. Usando la clasificación del rango de mareas de Davies (1964) y suponiendo energía de oleaje moderada (con una altura de ola significativa,  $H_s$ , de 60-150 cm), demostró que a lo largo de las costas de micromareas (rango de marea,  $TR < 1\text{m}$ ) las islas de barrera son largas y continuas con pocas entradas de marea, y a lo largo de las costas mesomareales ( $1 < TR < 3.5\text{ m}$ ) las barreras son cortas y anchas con numerosas entradas de marea.

#### 4.4.1 Componentes armónicas

Hay cientos de movimientos periódicos de la Tierra, el Sol y la Luna que son identificados por la astronomía. Cada uno de estos movimientos en un conjunto de constantes armónicas es un valor matemático que describe el efecto que el movimiento cíclico del sistema Tierra, Sol y Luna tiene sobre las mareas. Hay 37 que normalmente tienen el mayor efecto (i.e., la mayor amplitud) sobre las mareas y se utilizan como componentes armónicos de marea para predecir las condiciones de marea para una ubicación. Se pueden calcular a través del análisis de los datos de marea recopilados en un lugar. Se utiliza un mínimo de 30 días de datos para capturar un ciclo lunar completo y un mínimo de 1 año para observar las 37 componentes con una incertidumbre baja. La Tabla 4-2 muestra estos componentes seguido de su símbolo, periodo y velocidad. Están ordenados por armónicos más grandes, semidiurnos, diurnos y por último los de periodo más largo.

Tabla 4-2 Componentes armónicas. Tomado de Lopes, A. M., y Machado, J. A. T., (2017).

Name	Symbol	Period (h)	Speed (°/h)
<i>Higher Harmonics</i>			
Shallow water overtides of principal lunar	$M_4$	6.210300601	57.9682084
Shallow water overtides of principal lunar	$M_6$	4.140200401	86.9523127
Shallow water terdiurnal	$MK_3$	8.177140247	44.0251729
Shallow water overtides of principal solar	$S_4$	6	60
Shallow water quarter diurnal	$MN_4$	6.269173724	57.4238337
Shallow water overtides of principal solar	$S_6$	4	90
Lunar terdiurnal	$M_3$	8.280400802	43.4761563
Shallow water terdiurnal	$2''MK_3$	8.38630265	42.9271398
Shallow water eighth diurnal	$M_8$	3.105150301	115.9364166
Shallow water quarter diurnal	$MS_4$	6.103339275	58.9841042
<i>Semi-Diurnal</i>			
Principal lunar semidiurnal	$M_2$	12.4206012	28.9841042
Principal solar semidiurnal	$S_2$	12	30
Larger lunar elliptic semidiurnal	$N_2$	12.65834751	28.4397295
Larger lunar evectional	$\nu_2$	12.62600509	28.5125831
Variational	$MU_2$	12.8717576	27.9682084
Lunar elliptical semidiurnal second-order	$2''N_2$	12.90537297	27.8953548
Smaller lunar evectional	$\lambda_2$	12.22177348	29.4556253
Larger solar elliptic	$T_2$	12.01644934	29.9589333
Smaller solar elliptic	$R_2$	11.98359564	30.0410667
Shallow water semidiurnal	$2SM_2$	11.60695157	31.0158958
Smaller lunar elliptic semidiurnal	$L_2$	12.19162085	29.5284789
Lunisolar semidiurnal	$K_2$	11.96723606	30.0821373
<i>Diurnal</i>			
Lunar diurnal	$K_1$	23.93447213	15.0410686
Lunar diurnal	$O_1$	25.81933871	13.9430356
Lunar diurnal	$OO_1$	22.30608083	16.1391017
Solar diurnal	$S_1$	24	15
Smaller lunar elliptic diurnal	$M_1$	24.84120241	14.4920521
Smaller lunar elliptic diurnal	$J_1$	23.09848146	15.5854433
Larger lunar evectional diurnal	$\rho$	26.72305326	13.4715145
Larger lunar elliptic diurnal	$Q_1$	26.86835	13.3986609
Larger elliptic diurnal	$2Q_1$	28.00621204	12.8542862
Solar diurnal	$P_1$	24.06588766	14.9589314
<i>Long Period</i>			
Lunar monthly	$M_m$	661.3111655	0.5443747
Solar semiannual	$S_{sa}$	4383.076325	0.0821373
Solar annual	$S_a$	8766.15265	0.0410686
Lunisolar synodic fortnightly	$M_{sf}$	354.3670666	1.0158958
Lunisolar fortnightly	$M_f$	327.8599387	1.0980331

#### 4.4.2 Coeficiente de Courtier

El coeficiente de Courtier se utiliza para identificar el régimen de marea que hay en una región particular. Se obtiene a partir de la relación existente entre las amplitudes de los principales componentes armónicos de la serie temporal de marea. A continuación, se muestra la expresión matemática que lo representa es la Ec.2

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad \text{Ec.2}$$

dónde:

$F$  = Coeficiente de Courtier

$H_{K_1}$  = Amplitud (m) de la componente diurna lunisolar.

$H_{O_1}$  = Amplitud (m) de la componente lunar diurna.

$H_{M_2}$  = Amplitud (m) de la componente lunar principal semidiurna.

$H_{S_2}$  = Amplitud (m) de la componente solar principal.

A partir de este coeficiente, las mareas pueden clasificarse de la siguiente forma:

Si:  $0 < F < 0.25$  Régimen semidiurno.

Si:  $0.25 < F < 1.50$  Régimen mixto semidiurno.

Si:  $1.50 < F < 3.00$  Régimen mixto diurno.

Si:  $3.00 \leq F$  Régimen diurno.

#### **4.4.3 Prisma de marea**

El prisma de marea es la cantidad de agua que entra y sale de un estuario o bahía, con la entrante (o flujo) y saliente (o reflujo) de la marea, excluyendo cualquier contribución de las entradas de agua dulce, (Real Academia de la Ingeniería, 2018). Se puede medir como el volumen de la marea entrante y la contribución del caudal del río se calcula a partir de la diferencia de los volúmenes de flujo y reflujo. Se puede determinar a partir del sondeo del gasto en una sección. Esto a través de la integral del caudal en el tiempo.

El prisma de marea es una métrica importante para una laguna costera, ya que las duraciones y velocidades de flujo y reflujo pueden ser distintas (ej., flujo más corto e intenso y reflujo más largo y suave, o viceversa), lo cual afecta en mayor grado la configuración morfológica de la laguna costera. Es un indicador de los procesos hidrodinámicos que operan en esta. En lagunas poco profundas, donde el prisma de marea forma una gran proporción del agua durante mareas altas, hay mayor transporte de sedimento a través de la boca. Por el contrario, en lagunas profundas donde el prisma de marea es pequeño, el flujo de agua tiene a tener menos circulación, (Jewell, S. A., Walker, D. J., y Fortunato, A. B. 2012).

Es importante ya que el prisma de marea tiene una relación directa con el transporte longitudinal que ayuda a determinar la estabilidad de las bocas en las lagunas costeras (observando si esta puede o no cerrarse).

#### **4.4.4 Asimetría de mareas**

El estudio de la asimetría de mareas en las lagunas costeras a través de los años ha tomado relevancia debido a que se relaciona con (a) los flujos (intensidades y duraciones) y calidad el agua y (b) la estabilidad de las bocas y consecuentemente de las playas adyacentes.

La asimetría de las mareas es un factor clave en la geomorfología de las lagunas costeras. Los sistemas dominados por flujos llenan el estuario / laguna, mientras que los sistemas dominados por reflujos arrojan sedimentos hacia el mar (Aubrey y Speer, 1985; Torres-Mota et al., 2014). Cuando la duración de la marea descendente excede la de la marea ascendente que conduce a corrientes de flujo más fuertes, se define al sistema con "dominancia al flujo", mientras que se define con "dominancia al reflujos" cuando la duración de la marea descendente es menor que el de la marea creciente, que conduce a corrientes de reflujos más fuertes, (Speer y Aubrey, 1985).

La asimetría de marea se caracteriza por una desigualdad en las duraciones de flujo y reflujos y, por lo tanto, las velocidades máximas de las corrientes del ciclo de mareas. La diferencia de fase entre la componente armónica principal y su primer subarmónico dicta la dirección de la asimetría (es decir, dominancia de flujo o reflujos), mientras que la proporción de amplitudes de estos componentes armónicos refleja el grado de distorsión (Friedrichs y Aubrey, 1988).

Subarmónicos (frecuencias armónicas que son múltiplos enteros de una frecuencia constituyente principal) y mareas compuestas (armónicos creados a partir de sumas o diferencias de dos frecuencias) surgen principalmente de la distorsión de mareas astronómicas en aguas poco profundas. Los mecanismos físicos responsables de esta distorsión están representados por: I) No linealidades en las ecuaciones de movimiento; II) Profundidad variable en el tiempo y ancho de boca en la ecuación de continuidad; III) Fricción cuadrática; IV) Profundidad variable en el tiempo en el término de fricción y V) aceleración advectiva en la ecuación del momento [Parker, 1991].

Las diferencias en los tiempos de duración del flujo y reflujos son debidas en parte a la fricción de fondo, ya que al propagarse la onda de marea a lo largo del cuerpo lagunar, enfrenta escenarios caracterizados cada uno por la fricción de fondo distinta. Por un lado, el flujo (de bajamar a pleamar) experimenta la mayor fricción cuando la columna de agua es pequeña y por esta razón la fricción es importante. Por otro lado, cuando ocurre el reflujos, al ser mayor la columna de agua, la fricción juega un papel menor en la dinámica. Debido a la menor fricción experimentada en el reflujos, las velocidades durante este periodo suelen ser mayores, y por conservación de masa, la duración del periodo de flujo de marea es mayor, respecto al periodo de reflujos.

La mayor parte de estudios que investigan la hidrodinámica de las mareas y la asimetría en las entradas de las lagunas y estuarios, lo han hecho en regiones donde domina el régimen semidiurno (Speer y Aubrey, 1985; Dronkers J., 1986; Friedrichs y Aubrey, 1988). Sin embargo, para regímenes de mareas mixtas y

diurnas hay menor conocimiento, aunque se ha determinado que hay una serie de causas y características únicas que la provocan.

#### 4.4.5 Régimen Semidiurno

Los regímenes semidiurnos están caracterizados por tener como fuente principal de asimetría la interacción de la principal marea semidiurna  $M_2$  con su primer subarmónico, el cuarto diurno lunar  $M_4$  (Speer y Aubrey, 1985). Existen 2 parámetros no lineales, a través de los cuales podemos caracterizar la asimetría de mareas. Estos son la velocidad de fase relativa y la relación de amplitud (Ecs. 3 y 4) mostradas a continuación. Ambos parámetros se encuentran relacionados con la ecuación de onda.

$$Fase\ relativa = 2\varphi_{M_2} - \varphi_{M_4} \quad Ec.3$$

$$Relación\ de\ amplitud = \frac{a_{M_4}}{a_{M_2}} \quad Ec.4$$

A través de los años se han desarrollado diversos estudios (Aubrey, 1985; Friedrichs, 1988; Brown y Davies, 2010), en los que se ha analizado el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de estuarios debidos a la presencia de la asimetría de mareas. Se estableció que en el caso de mareas semidiurnas existe un patrón para clasificar si un estuario es dominado por flujo/reflujo.

Si la fase relativa estudiada en la ecuación 3 presenta un comportamiento que va de " $180 < 2M_2 - M_4 < 360$ " el estuario es "dominado por reflujo" con reflujos más cortos y mayores velocidades. Y si " $0 < 2M_2 - M_4 < 180$ ", entonces es estuario es "dominado por flujo" y presenta flujos más cortos y corrientes de mayor velocidad. (Friedrichs, 1988).

Además, Aubrey (1985), encontró que un estuario con reflujo más fuerte que las corrientes de flujo (dominado por reflujo) tiende a representar una configuración más estable. Y por el contrario un estuario que presenta flujos más cortos e intensos que las corrientes de reflujo (con predominio del flujo) puede ser incapaz de eliminar los sedimentos que ingresan con eficacia. Por otro lado, Brown y Davies (2010), determinaron que la acumulación de llanuras de arena promueve la duración del reflujo asimetría y la fricción del fondo promueve la asimetría de la duración del flujo por marea. Posteriormente Friedrichs (1988), estudio la distorsión de las mareas y determinó que esta se da por una combinación de 2 efectos principales los cuales son: (1) la interacción de fricción entre la marea y el fondo del canal (reflejada en  $a/h =$  amplitud de la marea / profundidad del canal) (2) el almacenamiento intermareal (medido por  $V_s / V_c =$  volumen de almacenamiento intermareal / volumen de canales al nivel medio del mar). En su investigación encontró que canales poco profundos disminuyen la velocidad de propagación de agua a través del estuario interior,

acortando el flujo, mientras que el almacenamiento intermareal extenso ralentiza la propagación de agua, acortando el reflujó.

#### 4.4.6 Régimen Mixto

Las mareas asimétricas también se producen a través de la interacción de componentes diurnos y semidiurnos, principalmente mediante la combinación de mareas diurnas lunares  $K_1$  y lunisulares  $O_1$  con  $M_2$ , Jewell et al., (2012).

La relación de fase entre los constituyentes diurnos y semidiurnos dicta la dirección de la asimetría al determinar si el agua alta (HHW) precede o sigue al agua más baja (LLW). En la Figura 4-4 se muestra una onda de marea mixta, la cual da una descripción de aguas altas y aguas bajas, así como vaciante y llenante.

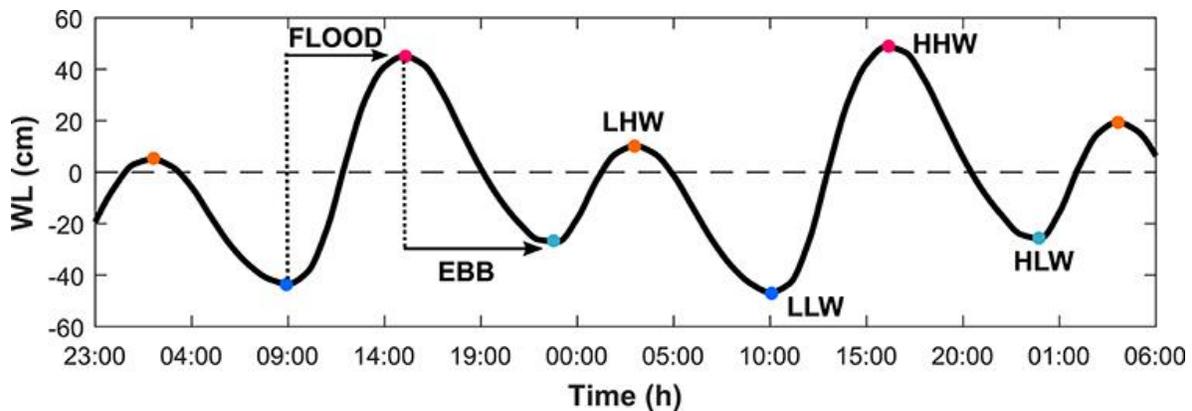


Figura 4-4. Marea mixta, donde se puede ver que no hay simetría entre las crestas y los valles. Además, se muestran las aguas altas en color rojo y las aguas bajas en color azul. Tomado de Santamaría-Aguilar et al., (2017).

La asimetría de mareas en este tipo de régimen se atribuye a las componentes armónicas  $K_1$  y  $K_2$ . El uso de la relación de amplitud de mareas  $M_4/M_2$ , comúnmente aplicada en mareas de regímenes semidiurnos para cuantificar la magnitud de la asimetría de mareas, se demuestra que no es válido en el estudio de mareas mixtas. (Jewell, Walker and Fortunato, 2012). En un estudio de un sistema lagunar con mareas de régimen tipo mixto realizado (Jewell, Walker and Fortunato, 2012), encontraron que la entrada se comporta como un filtro de frecuencia, por lo que la forma de marea diurna predomina dentro de la laguna.

Para sistemas dominados por reflujó la relación entre la marea  $K_1$  y su primer armónico,  $K_2$ , produce una tendencia al reflujó de las mareas oceánicas, así como un ciclo de 13,66 días, atribuible a las interacciones de las mareas  $K_1$ ,  $O_1$  y  $M_2$ .

#### **4.4.7 Régimen Diurno**

La asimetría en los regímenes diurnos ha sido examinada por Ranasinghe y Pattiaratchi (2000), ellos observaron que la fase de marea principal afectaba la asimetría de duración y concluyeron que la asimetría de entrada de marea era una consecuencia directa del forzamiento oceánico que variaba con el ángulo de fase entre los constituyentes. La fase entre estos constituyentes principales no se fija dentro de un estuario, ya que la respuesta de  $K_1$  y  $O_1$  a la fricción cuadrática difiere en presencia de  $M_2$ , (Godin y Martínez, 1994) y la celeridad de cada constituyente depende de la frecuencia (Godin, 1985). Sin embargo, el grado de predominio del flujo / reflujo con respecto al transporte de sedimentos y el impacto morfológico subsiguiente (a través del transporte neto de sedimentos dentro o fuera del sistema) no se puede determinar utilizando las elevaciones de las mareas oceánicas. Esto se debe a que el transporte de sedimentos varía a medida que aumenta la potencia de la velocidad de marea. (Bagnold, 1963).

#### **4.5 Transporte de Sedimentos**

El transporte de sedimentos que se desarrolla en ambientes como las lagunas costeras tiene 3 principales agentes físicos que determinan si el movimiento de material al interior o al exterior de este. Estos agentes son:

- Mareas
- Oleaje
- Flujos de agua (a través de manantiales, arroyos, ojos de agua, etc.)

La marea es el más importante ya que es determinante en el movimiento del material. El rango de esta es fundamental en establecer en qué medida se dará el intercambio de sedimentos.

Durante periodos de tormenta el oleaje puede remover del fondo una cantidad importante de sedimentos en la boca de las lagunas costeras, los cuales a su vez pueden ser llevados al interior de esta a través de las mareas de inundación. Por otro lado, las corrientes longitudinales también son de gran importancia ya que modifican la estructura de las playas colindantes, tanto por acreción como por erosión. El grado de cambio se ve afectado por el número de entradas de marea y su tamaño.

Por último, los flujos de agua dentro de la laguna, sobre todo en lagunas someras, son de gran importancia. Esto ya que regulan las velocidades de flujos de las corrientes en flujo y reflujo, creando un equilibrio en el intercambio de agua que evita que la laguna se llene de sedimento.

En estos cuerpos de agua, el material fino tiende a moverse suspendido siguiendo el flujo de agua. La deposición suele ocurrir durante los periodos de poco movimiento o flujo. Por su parte, el material grueso se mueve sobre el lecho marino, (Farreras, 2006).

En términos generales, la distribución de los sedimentos se da por los gradientes de energía y la batimetría. Por ejemplo, los sedimentos con texturas gruesas son comunes en las bocas y desembocaduras, donde las velocidades de corriente son máximas, mientras que los sedimentos finos se encuentran en las orillas donde las velocidades son cercanas a cero. A continuación, se presenta la Tabla 4-3, en la que se observa la clasificación de los sedimentos de acuerdo a su tamaño.

Tabla 4-3. *Clasificación de tamaño de sedimentos por Jeffress Williams, Matthew A. Arsenault, Brian J. Buczkowski, Jane A. Reid, James G. Flocks, Mark A. Kulp, Shea Penland, y Chris J. Jenkins, USGS.*

Nombre del sedimento	Tamaño de grano (mm)	Tamaño de grano ( $\phi$ )
Arena muy gruesa	1 a 2	0 a 1
Arena gruesa	0.5 a 1	1 a 0
Arena media	0.25 a 0.5	2 a 1
Arena fina	0.125 a 0.25	3 a 2
Arena muy fina	0.0625 a 0.125	4 a 3
Limo	0.0039 a 0.0625	8 a 4
Arcilla	<0.0039	> 8

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes métodos para la estimación del transporte de sedimentos.

En un inicio se comenzó con el uso de métodos empíricos, los cuales a través de la observación podían relacionar el comportamiento de las variables requeridas. Después se continuo por medio de formulaciones cuantitativas, las cuales utilizaron modelos matemáticos, simplificando las ecuaciones y obtuvieron resultados aproximados para la interacción fluido-sedimento, con las cuales fue posible evaluar el potencial del transporte de sedimento como:  $Q_{total}$ ,  $Q_{fondo}$  y  $Q_{suspensión}$ . Mas adelante, con la llegada de equipos de medición se comenzó a realizar la medición directa, por medio de muestreadores convencionales. Finalmente, con los avances tecnológicos llegaron nuevas tecnologías con las cuales se obtienen mediciones con más precisión como: turbidímetro, diferencia de presiones, difracción laser, los sensores acústicos y por último los modelos numéricos, los cuales dan resultados con menos porcentaje de error ya que resuelven las ecuaciones numéricas sin simplificaciones.

## 4.5.1 Formulaciones empíricas

### 4.5.1.1 Bagnold (1966)

Para la evaluación del caudal sólido Bagnold (1966) trata el proceso de transporte desde un punto de vista de la física. Considera que el arrastre total es igual al arrastre de fondo más el arrastre en suspensión de material proveniente del fondo. Además, considera las velocidades del fluido en cada punto, el peso sumergido de las partículas, la fuerza necesaria que debe ejercer el fluido para levantarlas y arrastrarlas, e introduce factores de corrección para tomar en cuenta las velocidades del fluido y esfuerzos que no sigan la misma dirección. Por esta razón solo puede ser utilizado para materiales friccionantes (arenas y gravas) y cuyos diámetros sean mayores de 0.015 mm.

La expresión para calcular el arrastre total se muestra en la siguiente ecuación:

$$g_{BT} = g_B + g_{BS} \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

$g_{BT}$  = Transporte total;

$g_B$  = Transporte en el fondo;

$g_{BS}$  = Transporte en suspensión; y

$$g_B = \frac{e_b \cdot W}{\tan \alpha} \quad \text{Ec. 5.1}$$

$$g_{BS} = e_s \cdot W(1 - e_b) \quad \text{Ec. 5.2}$$

en donde  $\alpha$  es el ángulo de reposo de las partículas sólidas,  $e_b$  es el factor de eficiencia asociado al transporte por el fondo y  $e_s$  el asociado al transporte en suspensión.

La ecuación anterior es aplicable a flujo laminar y turbulento. Si el flujo es laminar el segundo término de la ecuación 5 desaparece, debido a que el arrastre en suspensión está en función de la turbulencia del fluido. Bagnold (1966) demuestra que para un flujo turbulento el factor ( $e_b$ ) está en función de la velocidad media del fluido ( $\mathbf{v}$ ) y del diámetro de las partículas ( $D_{50}$ ), como se ilustra en la Figura 4-5.

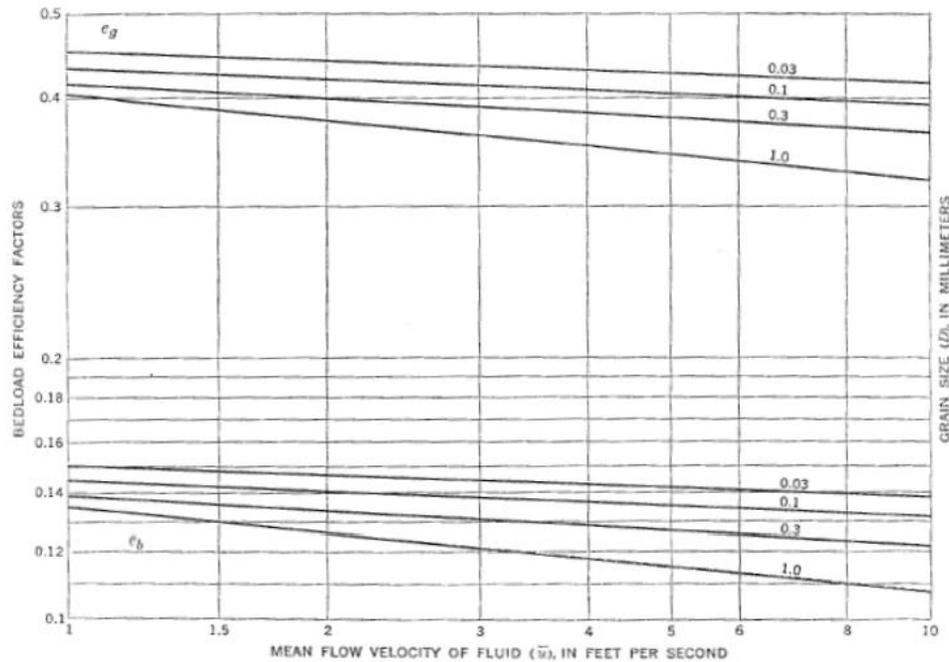


Figura 4-5. Valores de los factores teóricos ( $e_b$ ,  $e_s$ ) para la eficiencia del arrastre de fondo en función de la velocidad media del flujo, para diferentes tamaños de partículas, según Bagnold (1966).

#### 4.5.1.2 Madsen y Grant (1976)

Grant y Madsen (1976) desarrollaron un modelo que dio como resultado el valor cuantitativo de transporte de sedimento debido al oleaje, fuera de la zona de rompiente. El proceso consistió en calcular el esfuerzo cortante máximo en el fondo que está asociado con el movimiento de un fluido oscilatorio. Este esfuerzo lo relacionaron con las fuerzas de arrastre que actúan sobre un grano de sedimento en la interface sedimento-liquido. Con los datos mencionados anteriormente determinaron el inicio del movimiento de la partícula, para un flujo estacionario unidireccional, a través del criterio de Shields modificado. Para el cálculo de la velocidad del transporte de sedimentos, una vez que excede el esfuerzo cortante crítico de fondo utilizaron el factor de fricción de onda. Se realizaron experimentos en flujo puramente sinusoidal, para predecir las tasas netas de transporte de sedimentos en el ambiente costero. Encontraron que el transporte neto de sedimentos en este entorno dominado por las olas, surge de las diferencias en la velocidad a la que los sedimentos se transportan de un lado a otro con el movimiento de las olas. Estas diferencias son consecuencia de efectos de segundo orden, como la asimetría de las ondas, la transmisión de masa inducida por las ondas y las corrientes superpuestas inducidas por las mareas o el viento.

Los resultados obtenidos se limitan a sedimentos no cohesivos y a condiciones de oleaje razonablemente bien comportadas. La expresión que calcula el arrastre se muestra en la siguiente ecuación:

$$q = 12.5 \psi^3 d_{50} \omega_f \quad \text{Ec. 6}$$

donde:

$q$  = Transporte total;  $\psi$  = Parámetro de Shields modificado;

$D_{50}$  = Diámetro de la partícula;

$\omega_f$  = Velocidad de caída de la partícula; y

$$\psi = \frac{u_*^2}{(S-1)gD_{50}} \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$u_* = \left( \frac{\tau_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$S = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \text{Ec. 6.3}$$

$$\omega_f = \frac{g(\rho_s - \rho)}{18\nu} D_{50}^2 \quad \text{Ec. 6.4}$$

donde  $u_*$  es la velocidad de corte,  $S$  la densidad específica,  $g$  la constante gravitacional,  $\tau_b$  el esfuerzo cortante en el fondo y  $\nu$  la viscosidad cinemática.

#### 4.5.1.3 Van Rijn (1984)

Van Rijn (1984) desarrolló una fórmula de transporte que permite el cálculo de la carga de sedimento en suspensión y de fondo a partir de la altura de salto, la velocidad de las partículas y la concentración de carga fondo describiendo la concentración cercana al lecho y la distribución vertical de las concentraciones de sedimentos sobre la profundidad. El método se probó en una variedad de condiciones de flujo y sedimento utilizando datos de laboratorio y de campo y demostró que funciona bien. Esta función fue desarrollada para partículas entre 0,2 y 2,0 mm. La expresión que calcula el arrastre se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_b = 0.053 ((S - 1)g)^{0.5} (D_{50}^{1.5})(D^*)^{-0.3} \times (T)^{2.1} \quad \text{Ec. 7}$$

donde:

$q_b$  = Transporte total;

$S$  = Densidad específica;

$g$  = Constante gravitacional;

$D_{50}$  = Diámetro de la partícula;

$D$  = Parámetro de la partícula o número de Yailin;

$T$  = Parámetro de condición de transporte; y

$$D_* = D_{50} \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 7.1}$$

$$T = \frac{(u^*)^2 - (u^*_{*c})^2}{u^*_{*c}{}^2} \quad \text{Ec. 7.2}$$

$$u^*_{*c} = \left( \frac{\tau_c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 7.3}$$

donde  $s$  la densidad específica,  $g$  la constante gravitacional,  $\nu$  la viscosidad cinemática,  $u^*$  es la velocidad de corte,  $u^*_{*c}$  es la velocidad de corte crítica y  $\tau_c$  el esfuerzo cortante crítico en el fondo.

#### 4.5.1.4 Van Rijn (2007a,b)

A partir de 1984, el método de Van Rijn se mejoró gradualmente y se extendió a condiciones de flujo costero con flujo de marea cuasi-estacionario combinado y ondas superficiales. En 2007, propuso una fórmula simplificada y mejorada, esta se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_b = \alpha_b \rho_s U h \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2} M^\eta \quad \text{Ec. 8}$$

donde:

$q_b$  = Transporte total;

$\alpha_b = 0.005$ ;

$\rho_s$  = Densidad del sedimento;

$U$  = Velocidad promedio;

$D_{50}$  = Diámetro de la partícula;

$h$  = Profundidad del agua;

$\eta = 2.4$ ;

y el parámetro  $M_e$  es:

$$M = \frac{U - U_{cr}}{[(s-1)gd_{50}]^{0.5}} \quad \text{Ec. 8.1}$$

Sin embargo, se observó que los valores de  $\alpha_b$  y  $\eta$  arrojaban tasas de transporte de carga de fondo, que son sistemáticamente demasiado grandes para velocidades  $>1$  m/s y demasiado pequeñas para velocidades  $<1$  m/s. Por lo tanto, ambos coeficientes se recalibraron utilizando datos de transporte de carga de fondo medidos resultando  $\alpha_b = 0.015$  y  $\eta = 1.5$ .

## 5 Metodología

Las características hidrodinámicas (flujos y niveles de agua) de la zona en la que se encuentra ubicada la laguna La Carbonera requirieron instrumentación especializada para su medición. Los aparatos utilizados fueron sensores de marea y un correntómetro acústico ADCP. Una vez recolectados estos datos, se procedió a utilizar un modelo numérico que pudiera simular el comportamiento hidrodinámico de la laguna y a evaluar cualitativamente la morfología de la misma. La simulación numérica abarca, del lado marino, 7 km mar adentro y 2.5 km a cada lado de la boca, y el cuerpo lagunar. La parte topográfica no se simuló debido a que el modelo utilizado solo toma en cuenta las partes inundables y lo demás lo toma como pared.

### 5.1 Recolección de datos

#### 5.1.1 Marea

Se solicitaron los datos de los niveles de marea en el océano al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), debido a su extenso historial de mediciones continuas durante más de 10 años. Por otro lado, para la zona lagunar, se recolectaron los niveles de marea mediante una campaña realizada desde diciembre de 2017 hasta enero de 2018. Durante esta campaña, se utilizaron sensores RBR y ONSET que registran de forma interna la presión y temperatura. Además, se tomó la medida de la presión atmosférica utilizando un sensor de la marca ONSET. Los puntos de muestreo corresponden a los ubicados en la Figura 5-1, que incluyen los siguientes lugares: Mar, Barra, Laguna, Entrada del canal, Mitad de canal y Ojo de agua.





Figura 5-1 Datos medidos del nivel del mar durante la campaña realizada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en diciembre del 2017 y enero del 2018.

### 5.1.2 Flujos en la boca

Se utilizó un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler o Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) modelo RiverRay (de la empresa Teledyne RD Instruments) para medir las velocidades de las corrientes en la bocana de la laguna de la Carbonera. El ADCP mide la magnitud de la velocidad y dirección utilizando el efecto Doppler (cambio observado en la frecuencia de una onda cualquiera resultante del movimiento relativo entre la fuente y el observador) transmitiendo pulsos sonoros de frecuencia fija y escuchando el eco que retorna de las partículas en suspensión (sedimentos y plancton).

Se efectuaron 2 campañas de muestreo de 25 horas, la primera de ellas fue del 22 al 23 de agosto de 2016, y la segunda – que fue la que se utilizó para este estudio fue del 22 al 23 de septiembre de 2016. En la Figura 5-2 se muestra un ejemplo de un transecto realizado, en él se observan las velocidades y la profundidad a lo largo del canal (línea negra más gruesa).

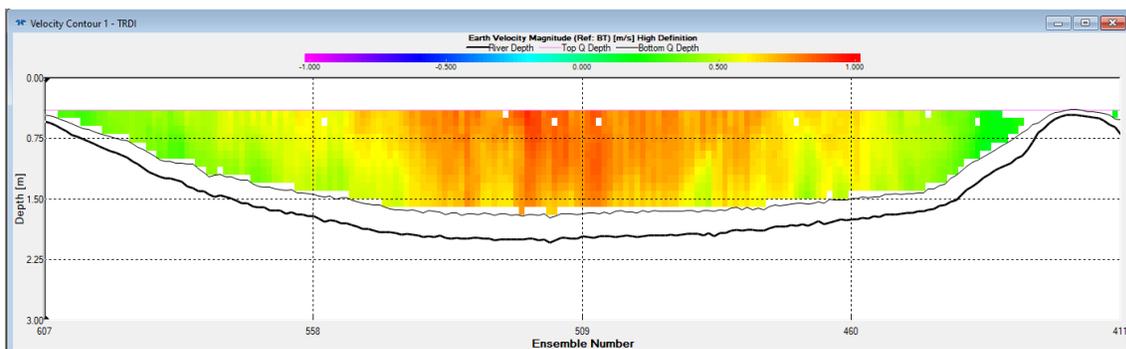


Figura 5-2 Magnitud de la velocidad medida con ADCP.

### 5.1.3 Batimetría

La batimetría en la parte del océano fue extraída de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO). Este es un modelo global del terreno con una resolución de 30 segundos de arco, el cual se generó a partir de una extensa base de datos batimétricos colectados por buques e interpolados con batimetría derivada de altimetría satelital. Por otro lado, la batimetría en la zona del canal fue tomada de 2 campañas realizadas por el Instituto de Ingeniería, con ecosonda y GPS y con una frecuencia de muestreo a cada 1 s. La primera el 23 de septiembre de 2016 y la segunda el 12 de junio de 2017. En la Figura 5-3 se muestran las batimetrías obtenidas para el océano y para el canal que conecta el océano con la Laguna.

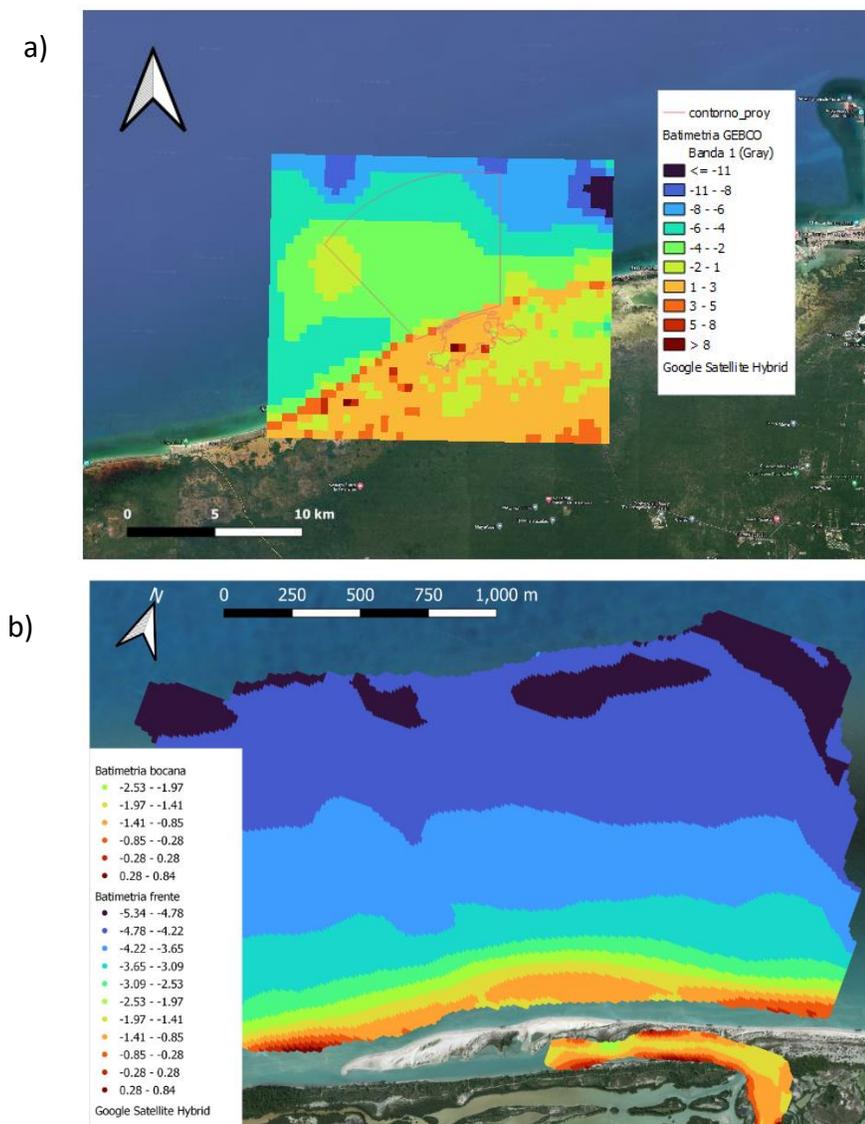


Figura 5-3 a) Batimetría obtenida de GEBCO. b) Batimetría obtenida en campaña del II en el año 2016.

Por último, debido a que la batimetría en la zona lagunar es muy complicada de obtener se dejó con un valor constante de 40 cm, la cual es una aproximación aceptable, de acuerdo a las observaciones vistas en campo.

#### **5.1.4 Geometría Lagunar**

Debido a que la laguna “La Carbonera” no se encuentra bien definida y que dependiendo de la temporada (temporada de lluvias/secas) puede tener mayor o menor extensión, con o sin comunicaciones con los humedales y ciénegas adyacentes, se utilizó la herramienta Google Earth ® para delimitar manualmente el contorno de la laguna.

#### **5.1.5 Aportes de agua dulce**

Los aportes de agua dulce a través de los múltiples ojos de agua que se encuentran en la laguna La Carbonera, forman parte esencial de la hidrodinámica de esta. La presencia de descargas de agua dulce por afluentes es típica de las lagunas costeras estuarinas. Los efectos más importantes de la presencia de estas descargas de agua dulce son: inducir descargas de intercambio de agua entre el afluente y la laguna, influir en la rapidez de renovación del agua de la laguna, y modificar el transporte de materia por difusión turbulenta y por dispersión.

Del trabajo realizado para su tesis de maestría (“Evaluación hidrodinámica y modelación numérica de la Laguna la Carbonera, Yucatán”), el Dr. Wilmer Rey Sánchez determinó que el aporte es de 1 m<sup>3</sup>/s en la zona del ojo de agua. Sin embargo, esta aportación varía con respecto al comportamiento de la marea, es decir en mareas muertas, el ojo absorbe agua en lugar de aportar Pacheco-Castro, R., Salles, P.\*, Canul-Macario, C., Paladio-Hernández, A. (2021).

### **5.2 Análisis Armónico**

El método más preciso para la estimación de las amplitudes y fases de las distintas componentes de la marea astronómica es el análisis armónico. Se basa en el conocimiento de que la marea observada está formada por un número de componentes armónicas cuyos períodos han sido perfectamente establecidos y que coinciden con los períodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre Tierra-Sol-Luna. En el análisis armónico clásico, el forzamiento de las mareas se modela como un conjunto de líneas espectrales, es decir, la suma de un conjunto finito de sinusoides a frecuencias específicas. Estas frecuencias se especifican mediante varias combinaciones de sumas y diferencias de múltiplos enteros de 6 frecuencias fundamentales que surgen de los movimientos planetarios (Godin, 1972). Se puede usar un ajuste de mínimos cuadrados para determinar la fase relativa y la amplitud de cada frecuencia. Estos datos de fase y amplitud pueden ser

utilizados para (a) compararse con datos similares en otros lugares para comprender las características de la dinámica de las mareas en cada sitio, (b) sintetizar series temporales de efectos de marea en otros lugares con fines predictivos, o (c) alimentar modelos hidrodinámicos.

Para el análisis armónico realizado en este trabajo, se utilizó la herramienta T\_TIDE el cual es un paquete de rutinas en Matlab® que se puede usar para realizar un análisis armónico clásico con correcciones nodales, inferencia y una variedad de opciones especificadas por el usuario. También se pueden hacer predicciones utilizando los constituyentes analizados.

## **5.3 Modelación Numérica**

### **5.3.1 Descripción del modelo Delft3D Modulo Delft3D-FM**

El software Delft3D fue desarrollado por la empresa Deltares y la Universidad Tecnológica de Delft y permite la modelación hidrodinámica a régimen no permanente del flujo. Dicho programa incorpora también los efectos de las mareas, los vientos, la presión atmosférica, las diferencias de densidad (debido a la salinidad y temperatura), olas y turbulencias. Además, permite la simulación del flujo en dos y tres dimensiones con o sin transporte de sedimentos, teniendo en cuenta la morfología variable o fija. El esquema numérico de resolución es en diferencias finitas, utilizando coordenadas rectangulares o curvilíneas.

Delft3D cuenta con un módulo hidrodinámico D-Flow Flexible Mesh. Este módulo es capaz de combinar el uso de celdas curvilíneas que brindan un mejor rendimiento en términos de velocidad y precisión computacional en áreas topográficamente complejas (como áreas intermareales).

En canales más profundos, pueden ocurrir altas velocidades de flujo con direcciones de flujo uniformes, que se pueden modelar de manera más eficiente con celdas curvilíneas en comparación con un sistema de cuadrícula triangular. Las áreas intermareales (que comprenden canales, arroyos y llanos intermareales) se pueden modelar utilizando la técnica de cuadrícula curvilínea para los canales y celdas triangulares para los llanos. Esta técnica tiene la ventaja de mejorar la precisión y la eficiencia del modelo en estas áreas. Debido a las características de la zona y con el fin de encontrar mejores resultados, se eligió trabajar con este módulo para reducir el margen de error.

En aguas someras se realiza una simplificación que incluye la suposición de un fluido incompresible, la eliminación de los términos de difusión e inerciales, parametrizando la fricción del fondo y despreciando la variación del fluido en la

columna de agua a través de la integración en la vertical, lo que nos da un modelo bidimensional.

### 5.3.1.1 Ecuaciones de gobierno

El modelo hidrodinámico (Módulo D-Flow Flexible Mesh) resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible en aguas poco profundas asumiendo las Hipótesis de Boussinesq. Deltares Systems. (2022)

En la dirección horizontal, D-Flow Flexible Mesh utiliza mallas ortogonales no estructuradas. Se admiten dos referencias de coordenadas: coordenadas cartesianas y coordenadas esféricas. El uso de estas coordenadas mejora los límites de un río, un estuario o una línea costera en los que por lo general son curvos y no son representados suavemente en una cuadrícula estructurada.

En la dirección vertical utiliza dos sistemas de coordenadas: el modelo- $\sigma$  y el modelo-z (cartesiano).

Las ecuaciones gobernantes del software se describen en términos del modelo- $\sigma$ . Con este sistema se obtiene una mejor resolución de la batimetría ya que como se ha mencionado antes, la cuadrícula se encuentra acoplada a los bordes tal como se puede observar en la Figura 5-4, donde se muestra la diferencia de utilizar ambas coordenadas.

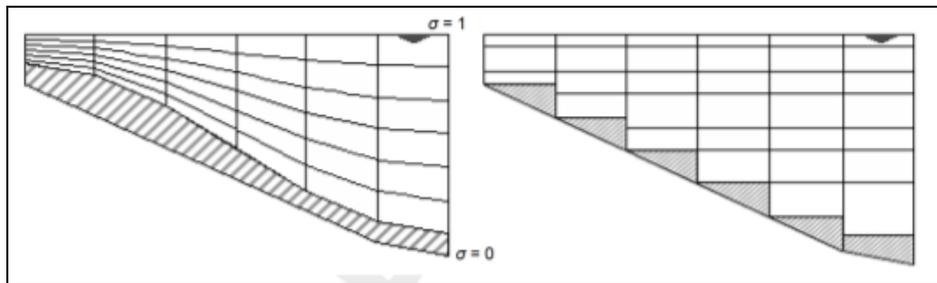


Figura 5-4. a) Ejemplo del modelo  $\sigma$ . B) Ejemplo del modelo Z (cartesiano).

Ecuaciones hidrodinámicas:

#### 1. Ecuación de continuidad para flujo bidimensional

La ecuación de continuidad promediada en la profundidad es derivada por la integración de la ecuación de continuidad para fluidos incompresible  $\nabla \cdot \bar{u} = 0$  sobre la profundidad total, tomando en cuenta la condición de borde cinemática de la superficie del agua y nivel del fondo, es descrita por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \frac{\partial [(d+\zeta)]}{\partial y} = Q \quad \text{Ec. 9}$$

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad \text{Ec. 10}$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma \quad \text{Ec. 11}$$

donde los coeficientes  $G_{\xi\xi}$  y  $G_{\eta\eta}$  se usan para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares en unidades de metros.  $\zeta$  es el nivel del agua por encima del plano de referencia en metros. Los símbolos  $\xi$  y  $\eta$  son coordenadas horizontales curvilíneas que representan la longitud y la latitud respectivamente.  $d$  = es la profundidad debajo de algún plano de referencia horizontal en metros.  $H$  = es la profundidad total del agua ( $H = d + \zeta$ ) en metros y  $U$  y  $V$  son las velocidades promedio en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$  respectivamente en m/s.

Por otro lado,  $Q$  está dada por las contribuciones debido a la descarga de agua por precipitación o evaporación.

$$Q = H \int (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad \text{Ec. 12}$$

Con  $q_{in}$  y  $q_{out}$  las fuentes locales y sumideros de agua por unidad de volumen (l/s) respectivamente,  $P$  es el termino de fuentes de precipitación no local y  $E$  es el termino de sumideros debido a la evaporación no local (Delft-3D, 2011).

## 2. Ecuaciones de Momentum en la Dirección Horizontal

Las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$  están dadas por las expresiones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{\partial+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - f v = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad \text{Ec. 13}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{\partial+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + \\ F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad \text{Ec. 14}$$

donde  $P_\eta$  y  $P_\xi$  son los gradientes de presión,  $F_\eta$  y  $F_\xi$  son las fuerzas que representan el desbalance de los esfuerzos horizontales de Reynolds,  $M_\eta$  y  $M_\xi$  representan las contribuciones externas debido a cambios de momentum (como la presencia de estructuras hidráulicas),  $v_v$  es la viscosidad turbulenta vertical.  $u$  y  $v$  son las velocidades del flujo en la dirección  $x$  o  $y$  en m/s,  $\omega$  es la velocidad en la dirección  $\sigma$  (sistema de coordenadas) en m/s,  $w$  es la velocidad del flujo en la dirección  $z$  en m/s.  $f v$ ,  $f v$  representan el parámetro de Coriolis (1/s) y por último  $\rho_0$  es la densidad de referencia del agua en Kg/ m<sup>3</sup>.

### 3. Velocidad vertical (Calculada a partir de continuidad)

La velocidad vertical  $\omega$ , adaptada en un sistema de coordenadas  $\sigma$ , es calculada desde la ecuación de continuidad expresándose de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad \text{Ec. 15}$$

donde  $\omega$  es la velocidad vertical relativa al plano  $\sigma$ .

### 4. Ecuaciones de Momentum en la Dirección Vertical

Bajo el supuesto de aguas poco profundas, la ecuación de momento vertical es reducida a una ecuación de presión hidrostática, donde las aceleraciones verticales debido a los efectos boyantes y a variaciones repentinas en la topografía del fondo no son consideradas en el cálculo. Entonces se tiene:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad \text{Ec. 16}$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad tomada como 9.81 m/s,  $\rho$  es la densidad del agua tomada en Kg/ m<sup>3</sup> y  $H$  es la profundidad total del agua en metros.

### 5. Esfuerzo cortante en el fondo

$$\tau_b = \frac{\rho_0 g \bar{U} |U|}{C_{2D}^2} \quad \text{Ec. 17}$$

donde  $|\bar{U}|$  es la magnitud de la velocidad horizontal y  $C_{2D}^2$  es el coeficiente de Chezy.

### 6. Resistencia al Flujo: Formas de fondo

$$h_d = 0.11 \varepsilon H \left( \frac{D_{50}}{H} \right)^{0.3} \left( 1 - e^{-\frac{T}{2}} \right) (25 - t) \quad \text{Ec. 18}$$

donde  $h_d$  es la altura del fondo,  $\varepsilon$  es el coeficiente de calibración y  $T$  es el parámetro adimensional de corte de fondo

#### 5.3.1.2 Intervalo de tiempo

En Delft-3D el número de Courant es un indicador de la estabilidad del modelo. Las directrices para el número de Courant se basan en la referencia del tiempo inicial y final del modelado. Para lugares con grandes diferencias en la geometría del fondo, el número de Courant no debe superar el valor de 10.

La expresión que calcula el número de Courant-Friedrichs-Lewy está definida por la siguiente ecuación:

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{(\Delta x, \Delta y)} \quad \text{Ec. 19}$$

donde  $\Delta t$  es el paso de tiempo,  $g$  es la aceleración de gravedad,  $H$  es el tirante medio,  $\{ \Delta x, \Delta y \}$  es un valor característico de las dimensiones de la malla en ambas direcciones, comúnmente el valor mínimo.

### 5.3.1.3 Discretización del dominio

Se aplicó una metodología para la definición de la resolución y calidad de una combinación de malla estructurada con una malla no estructurada ajustando los elementos triangulares para que estos se aproximaran a una forma equilátera. Se utilizó esta técnica de mallado dada la uniformidad del fondo en la parte estructurada ahorrando de esta manera tiempo computacional.

Por otro lado, la parte no estructurada se adapta mejor al contorno de la línea costera marina y lagunar. Se probaron diferentes mallas (con mayor o menor resolución) en las cuales se fue variando el número de elementos, buscando la resolución de la malla computacional más adecuada. También se realizaron una serie de modificaciones en el dominio del modelo, con el fin de encontrar el mallado óptimo. Dentro de las variaciones efectuadas se encuentran:

- Acortar o alargar el dominio de la malla en la zona marítima.
- Incrementar la densidad de nodos en el canal que se encuentra ubicado en el petén.

A continuación, en la Figura 5-5 se muestran las variantes antes mencionadas en el mallado.

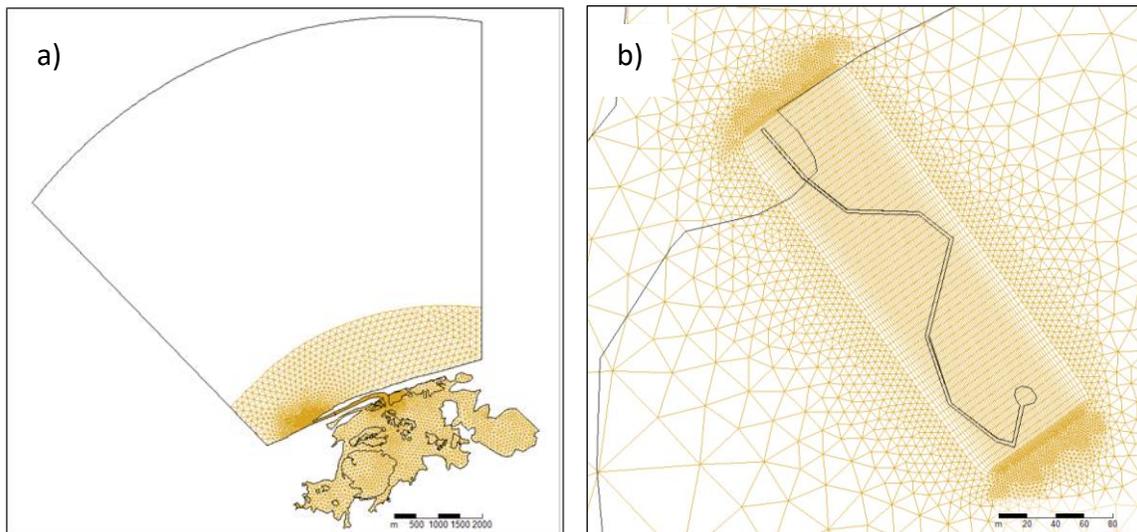


Figura 5-5. Variaciones en la discretización del dominio. a) Malla con océano recortado. b) Malla con canal ubicado sobre el peten definido.

Tras estas actualizaciones, se obtuvo un dominio de mallado que constó de un total de 10,350 elementos y 5,757 nodos. Cada elemento en la malla tenía un tamaño variable que se ajustó de acuerdo a las características de la zona en la que se encontraba. Para lograr una mayor resolución en las áreas con mayor dinámica o complejidad geométrica, se utilizaron elementos más pequeños. En la parte del océano, se emplearon elementos de aproximadamente 700 metros por lado, mientras que en la parte costera se utilizaron elementos de unos 150 metros por lado. En el canal, se decidió utilizar una mayor resolución, lo que resultó en una disminución en el tamaño de cada elemento a aproximadamente 10 metros. En cuanto a los elementos de la laguna, se fijó un tamaño de unos 90 metros por lado. La Figura 5-6 muestra la malla final obtenida después de los ajustes realizados.

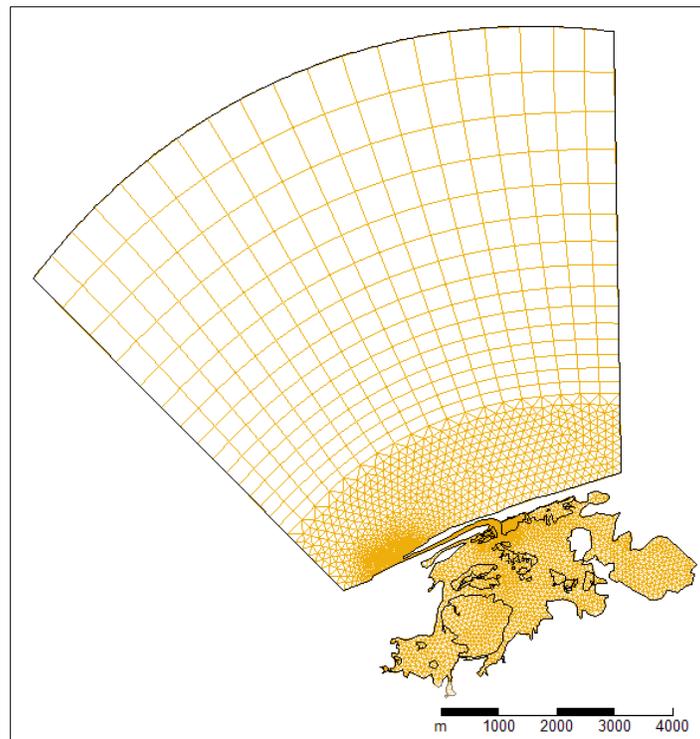


Figura 5-6. Discretización de dominio, malla estructurada y malla no estructurada

#### 5.3.1.4 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son los valores que se asignan a los campos de un sistema en los bordes o límites de los dominios. Estas condiciones son importantes para la modelación, ya que definen el comportamiento que tendrán las variables del modelo en las fronteras hidráulicas del sistema. Es decir, cómo se comportará el sistema en las zonas más externas o lejanas al área de estudio. Es esencial considerar el impacto que tendrán estas condiciones en el resto del sistema para asegurar que los resultados esperados sean precisos y no se produzcan

divergencias en el sistema. Existen tres tipos principales de condiciones de frontera en los modelos matemáticos y de simulación: Dirichlet, Neumann y mixto o de Robin. Cada uno de ellos establece una forma diferente de especificar los valores de las variables dependientes en los límites del dominio del modelo. La condición de frontera de tipo Dirichlet se utiliza cuando se necesita fijar el valor de las variables dependientes en el contorno. Esto significa que el valor de la variable en el límite del dominio se especifica de manera exacta. La condición de frontera de tipo Neumann se utiliza cuando se necesita fijar el valor de las derivadas de las variables dependientes en el contorno. Esto significa que, en lugar de fijar el valor exacto de la variable en el límite del dominio, se fija la tasa de cambio o gradiente de la variable en ese punto. Por último, la condición de frontera mixta o de Robin es una combinación de las dos anteriores. Se utiliza cuando se necesita especificar tanto el valor de la variable en el límite del dominio como su tasa de cambio o gradiente.

En esta investigación, se decidió utilizar condiciones de frontera tipo Neumann homogénea. Esto se debe a que se necesitaba que el contorno del dominio simulara una frontera abierta, es decir, una frontera donde no se aplican condiciones de contorno específicas, sino que se asume que no hay flujo de material a través de ella. En la Figura 5-7 se pueden ver las fronteras antes señaladas.

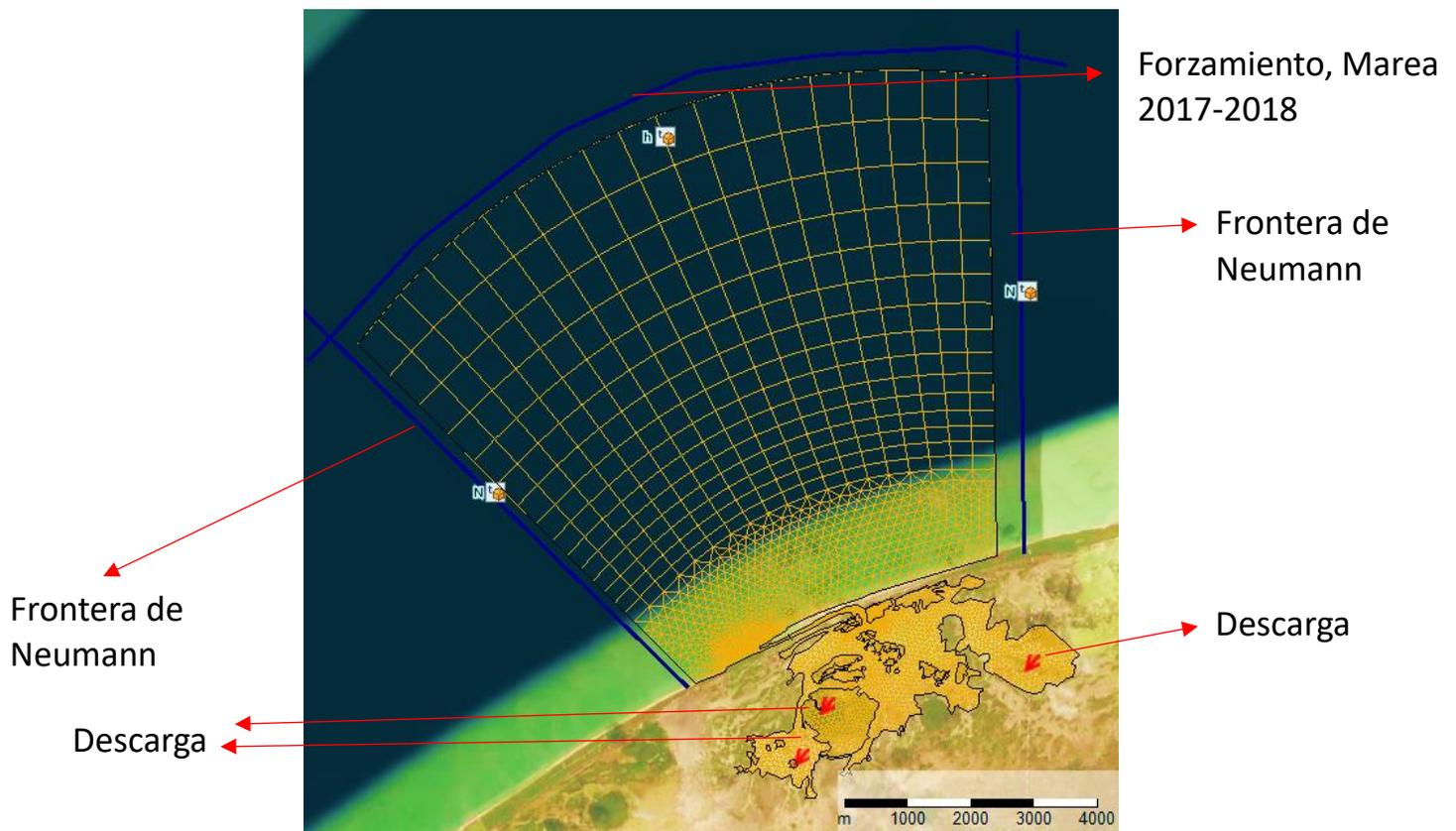


Figura 5-7. Fronteras marcadas con línea roja.

### 5.3.1.5 Ley de la conservación de la masa

La conservación de la masa es un principio fundamental en mecánica de fluidos que establece que la cantidad de masa en un sistema no puede ser creada ni destruida, lo que significa que la masa de una parcela de fluido se debe conservar. Esto es importante porque permite entender cómo se mueve y se distribuye el fluido en un sistema. En modelos numéricos, este principio puede tener problemas de aproximación cuando se resuelven las ecuaciones de gobierno, especialmente si la malla computacional no se implementó correctamente. Por esta razón, antes de comenzar el proceso de calibración de un modelo, se procedió a examinar la conservación de la masa en el sistema. Para esto se realizaron 2 propuestas de modelo. El primero con una malla fina sobre el ojo de agua y el segundo con una malla no fina. En ambos casos se utilizó como datos de frontera la componente armónica  $K_1$ , para toda la serie de tiempo que fue de 2 semanas. Además, se propuso una rugosidad uniforme en todo el sistema que fue de  $\eta=0.2$  y los datos de viscosidad turbulenta y difusividad fueron los que trae el modelo por defecto. El volumen obtenido se muestra en la Figura 5-8.

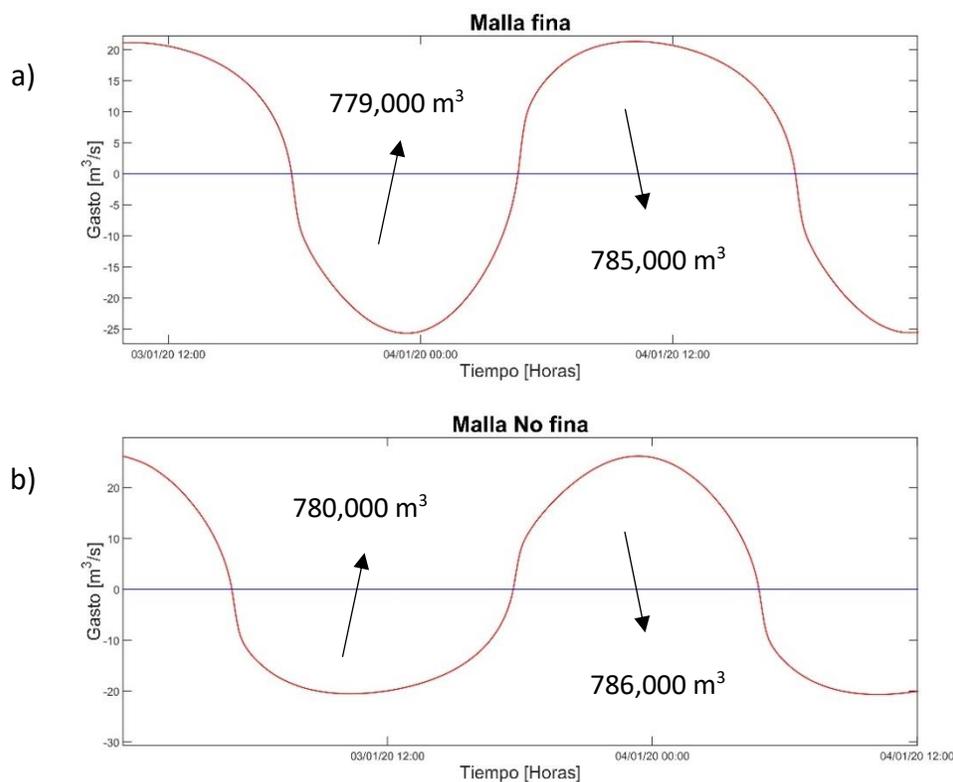


Figura 5-8. Volumen de entrada y salida de la laguna a) Malla fina. B) Malla no fina.

Como se observa en ambos casos, la suma del volumen de agua que entra y sale no es igual a cero, lo cual es esperado ya que la integral del gasto con respecto al tiempo se está calculando solo como una aproximación por el método de trapecios.

A pesar de esto, se concluye que la solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas se encuentra calibrada, lo que significa que los resultados obtenidos son aceptables y que el modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento del flujo de agua en la laguna. Además, se observa que la resolución de la malla en el petén no es un factor determinante en la solución de las ecuaciones, ya que en ambos casos se cuenta con el mismo error.

### 5.3.2 Tiempo de estabilización del modelo

Cuando se utilizan modelos numéricos para simular el comportamiento del fluido, es necesario asegurarse de que el método numérico utilizado sea consistente, convergente y estable para que los resultados obtenidos sean aceptables y confiables. Un método numérico consistente significa que la solución numérica debe aproximarse a la solución exacta del problema cuando el tamaño de la malla se reduce hacia cero. Por otro lado, que sea convergente significa que la solución numérica debe converger a una solución única y estable a medida que se refinan las mallas. Por último, que sea estable significa que pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales o en los parámetros del modelo no deben producir cambios drásticos e inesperados en la solución. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las soluciones numéricas no son convergentes y se necesita un tiempo de estabilización para que la solución se repita con un margen de error aceptable. En el caso de estudio, el tiempo de estabilización se determinó al observar la serie de niveles del mar y velocidades en la

Figura 5-9. Se puede observar que, durante un día y medio la señal es irregular debido a que el modelo está estabilizándose. Después de este tiempo, la señal se vuelve estable y se considera que el modelo ha alcanzado la estabilidad.

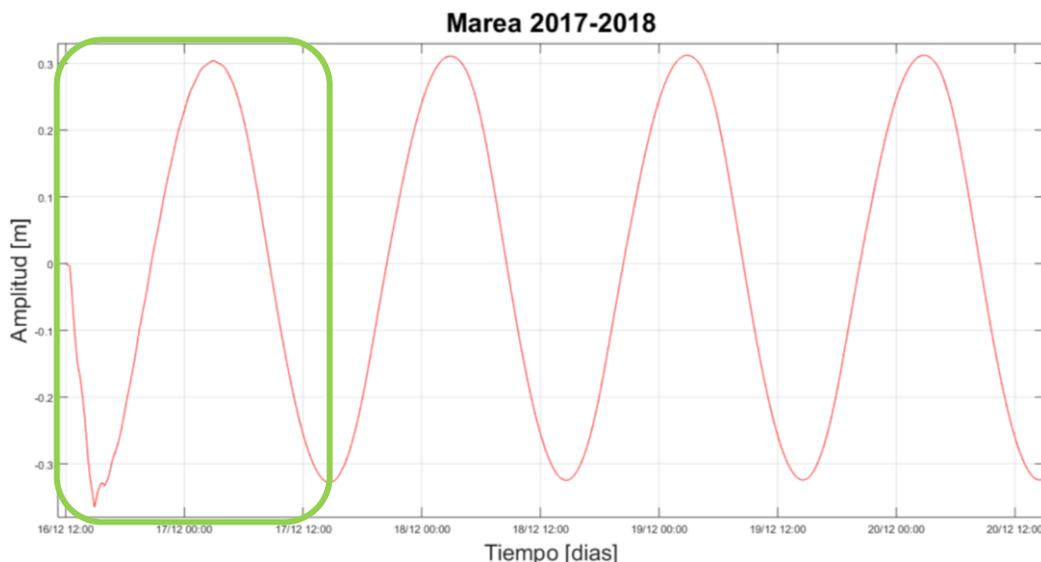


Figura 5-9 Tiempo de estabilización del modelo basado en serie del nivel del mar.

### 5.3.3 Calibración

Los modelos numéricos son un conjunto de expresiones matemáticas que buscan representar la realidad de un problema, aunque esta realidad no se muestre completamente debido a su complejidad.

La calibración de un modelo numérico es necesaria antes de comenzar con un proceso de simulación. A menudo se formula como un problema de optimización. Para resolver este problema, es necesario conocer a fondo las variables que se encuentran involucradas en la modelación, con el fin de poder ajustarlas de modo que los resultados que arroje el modelo sean muy parecidos a los datos de que se tengan medidos en la realidad.

La calibración del modelo numérico Delft3d-FM se realizó comparando niveles de agua medidos contra modelados. Los datos de nivel medidos fueron obtenidos de la campaña del 15 de diciembre del 2017 al 22 de enero del 2018 en 6 puntos ubicados estratégicamente dentro de la laguna (Figura 5-10). El método por el cual se realizó la calibración fue variando parámetros como batimetría, rugosidad, viscosidad turbulenta y difusividad.

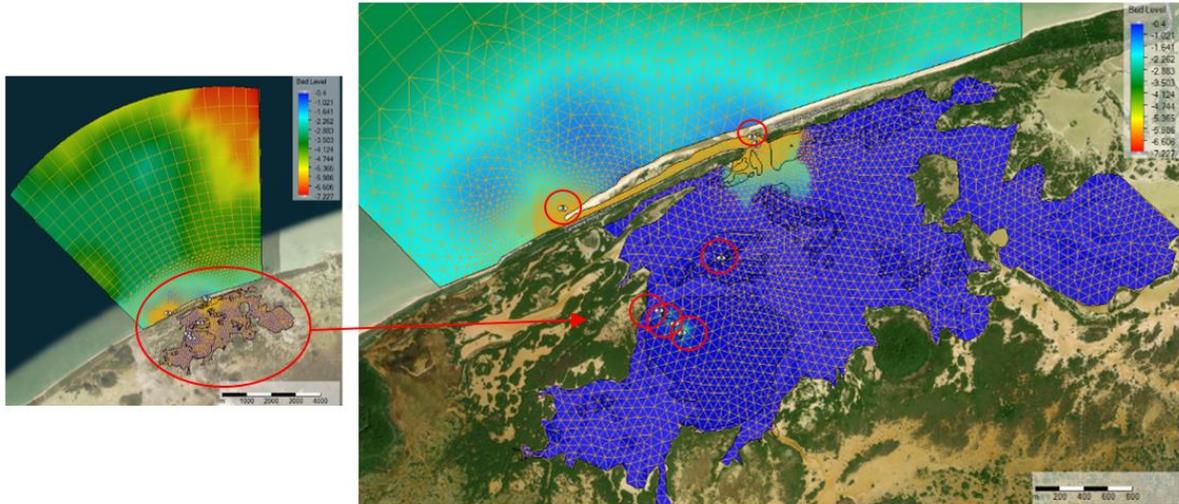


Figura 5-10. Puntos medidos con datos medidos del nivel del mar durante la campaña realizada en 2017-2018 (círculos rojos).

A continuación, se da una breve explicación del procedimiento de calibración para cada parámetro antes mencionado, así como una introducción a lo que este, está representando en el modelo.

### 5.3.3.1 Batimetría

Los datos batimétricos dentro de la laguna La Carbonera no han sido registrados de manera extensiva en ninguna campaña, esto debido a las características del lugar (fondo compuesto por lodos y zonas muy someras). Por esta razón, la primera etapa de calibración consistió en 6 simulaciones, con distintas configuraciones de batimetría dentro de la laguna. La primera prueba se realizó con una profundidad de 20 cm y se fue incrementando cada 10 cm hasta llegar a los 70 cm. Con esto, se logró observar el comportamiento de los niveles de agua con los distintos cambios de batimetría.

Se observó que los mejores resultados se obtenían con una profundidad uniforme de 40 cm para la laguna. Por otro lado, de acuerdo a observaciones en campo, para el canal que conduce al ojo de agua, ubicado dentro del Petén, las profundidades fueron de 1 m y para el punto donde está ubicado el ojo de agua se dejó en una profundidad de 2 m como se puede observar en la Figura 5-11.

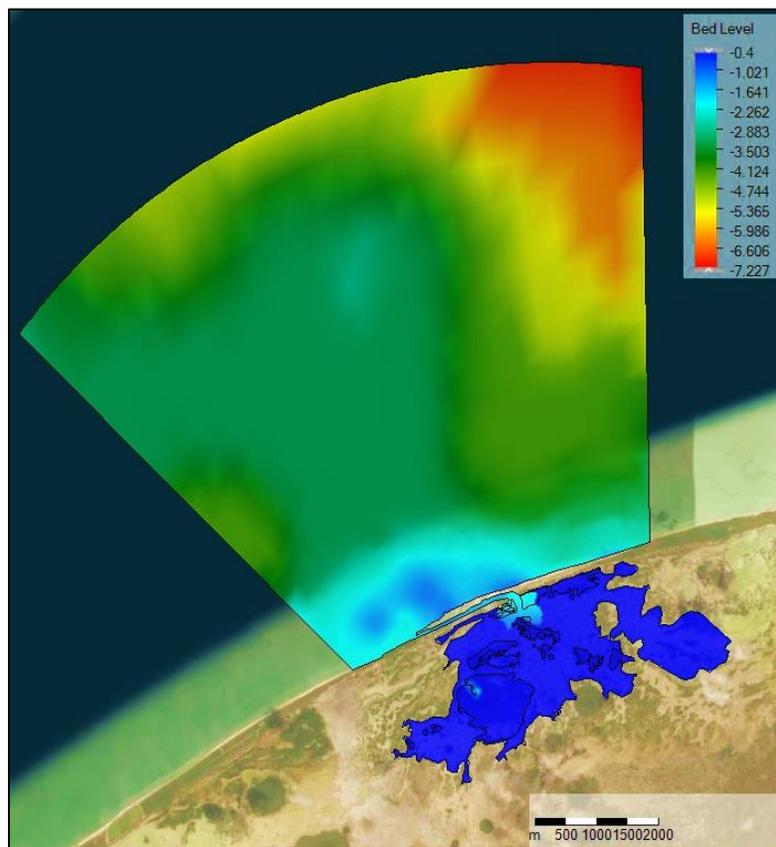


Figura 5-11. Datos batimétricos dentro de la laguna La Carbonera.

### 5.3.3.2 Rugosidad

El terreno y la vegetación ejercen esfuerzos cortantes sobre el flujo que pasa, es decir resistencia al flujo. La magnitud del esfuerzo cortante del lecho se caracteriza a menudo por medio del coeficiente de rugosidad del tipo Chézy, Manning o White-Colebrook. Dentro del flujo de la corriente principal, los esfuerzos cortantes están determinados en gran medida por las condiciones locales del lecho aluvial (composición del lecho y características de la forma del lecho). En otras áreas, como las llanuras aluviales de los ríos y en las áreas intermareales de los estuarios, la resistencia al flujo está determinada por una combinación de vegetación y un lecho aluvial o incluso un lecho no aluvial. Para este parámetro, se realizaron varias pruebas utilizando el coeficiente de rugosidad de Manning. El valor de este coeficiente para cada tipo de cobertura terrestre se obtuvo a partir de investigaciones ya publicadas. Arcement y Schneider (1989) publicaron un estudio en el cual analizaron el coeficiente de rugosidad en llanuras aluviales densamente vegetadas. Con base en esta publicación, Mattocks y Forbes (2008) construyeron una tabla de datos (Ver Tabla 5-1 ) que consta de 29 clases de cobertura terrestre con el nombre de la clase y el coeficiente de fricción  $n$  de Manning.

Tabla 5-1. Coeficientes de fricción de Manning por cobertura vegetal. (Mattocks y Forbes, 2008)

Nombre de clase	Coefficiente de manning [n]
Aguas abiertas	0.02
Hielo/nieve perenne	0.01
Desarrollado - Espacio abierto	0.02
Desarrollado - Intensidad baja	0.05
Desarrollado - Intensidad media	0.1
Desarrollado - Alta intensidad	0.15
Tierra estéril (roca / arena / arcilla)	0.09
Orilla no consolidada	0.04
Bosque caducifolio	0.1
Bosque siempre verde	0.11
Bosque Mixto	0.1
Exfoliante enano	0.04
Arbusto / matorral	0.05
Pastizales / herbáceos	0.034
Juncia / Herbácea	0.03
Líquenes	0.027
Musgo	0.025
Pasto / Heno	0.033
Cultivos	0.037
Humedales leñosos	0.1
Humedal boscoso palustre	0.1
Humedal de matorrales / arbustos palustres	0.048
Humedal boscoso estuarino	0.1
Humedal de matorrales / arbustos estuarinos	0.048
Humedales herbáceos emergentes	0.045
Humedal Palustre Emergente (Persistente)	0.045
Humedal estuarino emergente	0.045
Fondo acuático palustre	0.015
Lecho acuático estuarino	0.015

Para la calibración del modelo, se utilizaron diferentes valores de rugosidad correspondientes a cada tipo de zona, como se muestra en el Apéndice B. A continuación, se muestra la Figura 5-12 con las rugosidades finales con las que se calibro el modelo.

1. **Zona marítima:** Profundidad máxima de 7m. Es la zona que se ve menos afectada por la onda de marea y por lo tanto tiene el menor coeficiente de fricción (0.02)
2. **Canal principal:** Profundidad máxima de 2.5m. Con esta profundidad, la onda de marea comienza a sentir el fondo y las paredes del canal, por lo tanto, un mayor coeficiente de fricción (0.025)
3. **Laguna costera:** La profundidad de la laguna es somera, por lo tanto, es una zona más rugosa (0.03)
4. **Petenes:** Profundidad variable. Dado que los petenes tienen gran cantidad de vegetación que impiden el paso de agua de manera libre, se usó un mayor coeficiente de rugosidad para estas zonas (0.04)

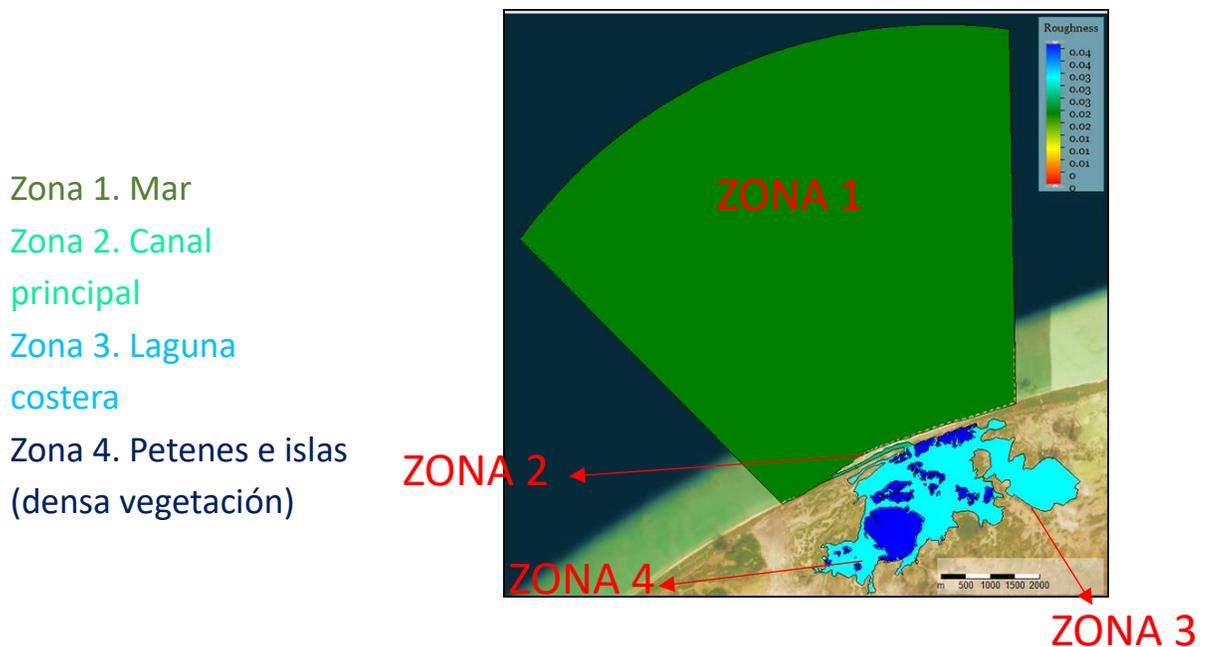


Figura 5-12. Mapa de rugosidades en la Laguna la Carbonera

Para evaluar la influencia de los valores de rugosidad en el modelo, se realizó un análisis detallado de la correlación y el error cuadrático medio (RMS) al variar dichos valores por zonas. Tomando en consideración los resultados que presentaron mayor precisión se realizaron 2 tablas, las cuales se muestran en el Apéndice C.

Además, en el Apéndice D se presentan las modelaciones correspondientes a las diferentes rugosidades calibradas para cada zona. Estas modelaciones se

graficaron y se compararon visualmente con los datos observados, lo que permitió identificar las configuraciones de rugosidad que mejor se ajustaron a las condiciones reales. En dicho apéndice, se incluyen gráficos que representan los niveles del flujo obtenidos para cada valor de rugosidad utilizado en el modelo.

#### **5.3.3.3 Viscosidad Turbulenta**

La viscosidad horizontal turbulenta en un modelo numérico representa los procesos que ocurren en pequeñas escalas temporales y espaciales no resueltas explícitamente por su sistema. Dado que se presenta un modelo con un paso de tiempo constante, la escala espacial será la única que cambie.

El modelo de Smagorinsky, aproxima el coeficiente de viscosidad de remolino a partir de las estructuras de flujo local y parametriza la viscosidad de remolino, centrándose solo en disipar energía a una velocidad físicamente adecuada. Basándose en este modelo (Maulik y San. 2016), determinaron que las viscosidades de remolino que se encuentran entre los valores 0.12 y 0.18 dan un comportamiento más universal en las simulaciones de la dinámica del océano, tanto en experimentos de una como de dos capas. Para la calibración de este parámetro se eligió como viscosidad turbulenta el valor de  $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### **5.3.3.4 Difusividad**

La tasa de difusividad horizontal o dispersión lateral es clave para comprender la dispersión de trazadores y contaminantes en el océano, y es un parámetro elusivo, pero crucial, en los modelos numéricos de circulación. Sin embargo, la dificultad de parametrizar la mezcla horizontal se agrava en el océano costero poco profundo, lo que apunta a la necesidad de mediciones más directas (Bogucki y Jones, 2005). Toman un enfoque remoto que es particularmente útil en regiones costeras poco profundas o con batimetría compleja. Dentro de sus resultados encuentran que la tasa de difusividad de remolino horizontal estimada en un puerto con características parecidas a la Carbonera fue de  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### **5.3.3.5 Descarga de agua dulce y precipitación**

Debido a que los aportes de agua dulce son significativos en la hidrodinámica de la zona, aparte de agregar  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  en el ojo de agua se agregaron descargas en la frontera sur del modelo, para representar de manera aproximada los aportes de agua dulce de otros petenes menores, así como aportes difusos del acuífero confinado y escurrimiento superficial. Para la calibración la descarga agregada fue de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . La Figura 5-13 muestra las zonas en las cuales fueron colocadas dichas descargas.

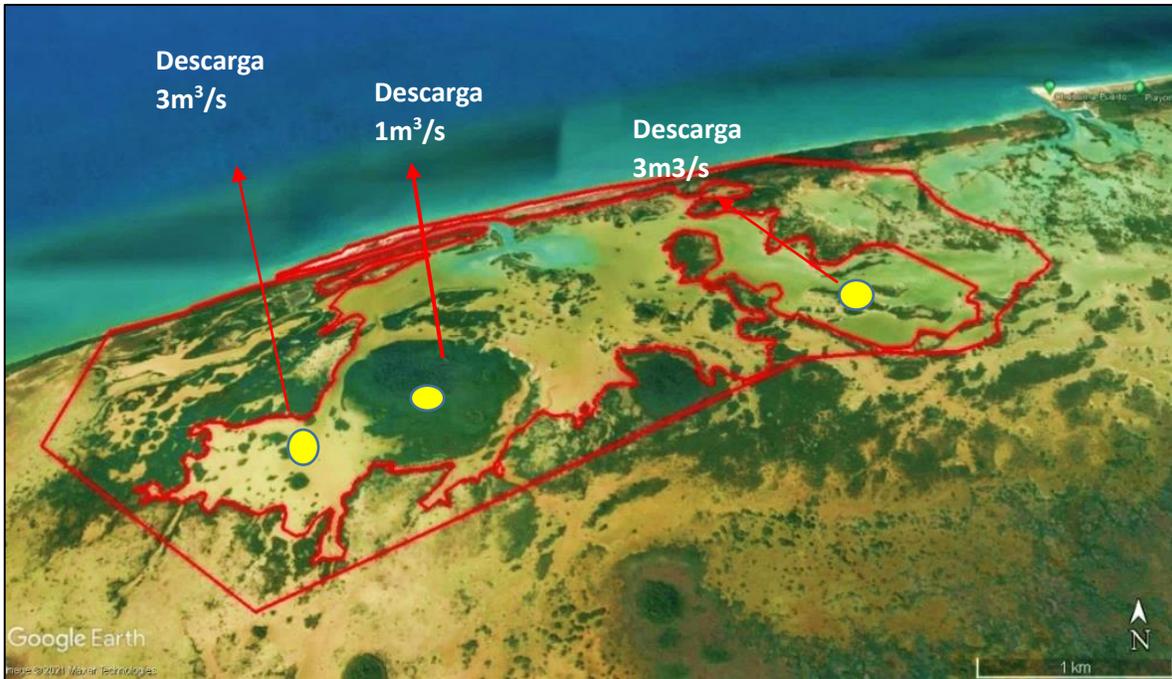


Figura 5-13. Mapa de descargas de agua en la Laguna la Carbonera.

Para corroborar que la calibración realizada estuviera en un rango aceptable se utilizaron 3 estadísticos los cuales fueron el coeficiente de correlación, el error cuadrático y el coeficiente de sesgo. La ecuación para calcular el error cuadrático se muestra a continuación.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n_m - n_s)^2} \quad \text{Ec. 20}$$

donde  $n_m$  es el nivel del mar medido,  $n_s$  es el nivel del mar modelado y  $n$  es el número total de datos.

A continuación, en la Figura 5-12 y Figura 5-13, se observa la calibración obtenida en los 6 puntos mostrados anteriormente. Un dato importante de observar es que la modelación sobreestima las pleamares, este comportamiento es más evidente para la segunda figura. Esto se debe a que no se está considerando la variabilidad del aporte de agua dulce como es realmente porque no hay información suficiente al respecto. Por lo tanto, se utilizó fue un aporte de agua dulce estimado.

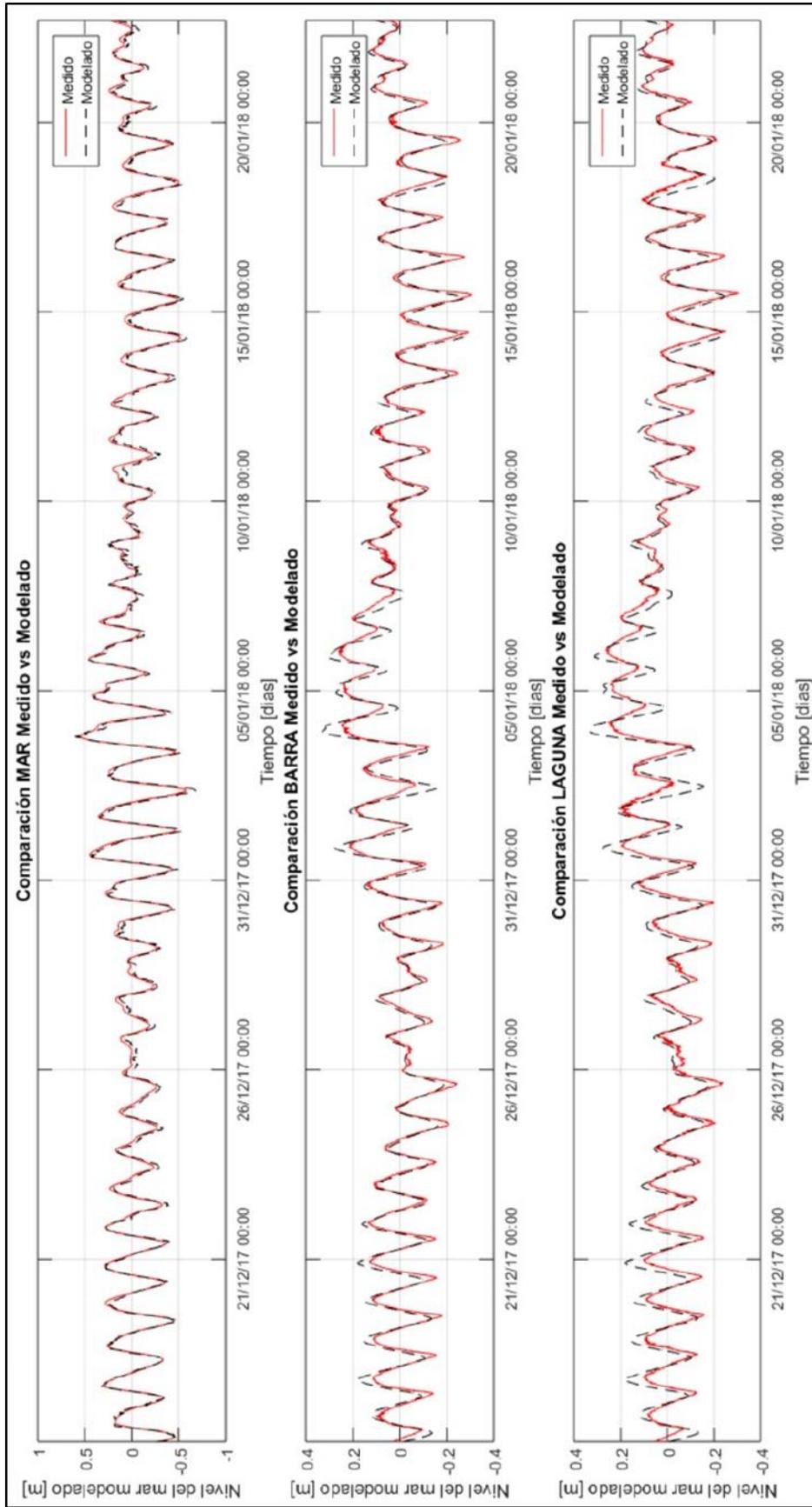


Figura 5-14. Calibración: Mar, Barra y Laguna de la campaña realizada del 15 de diciembre del 2017 al 22 de enero del 2018.

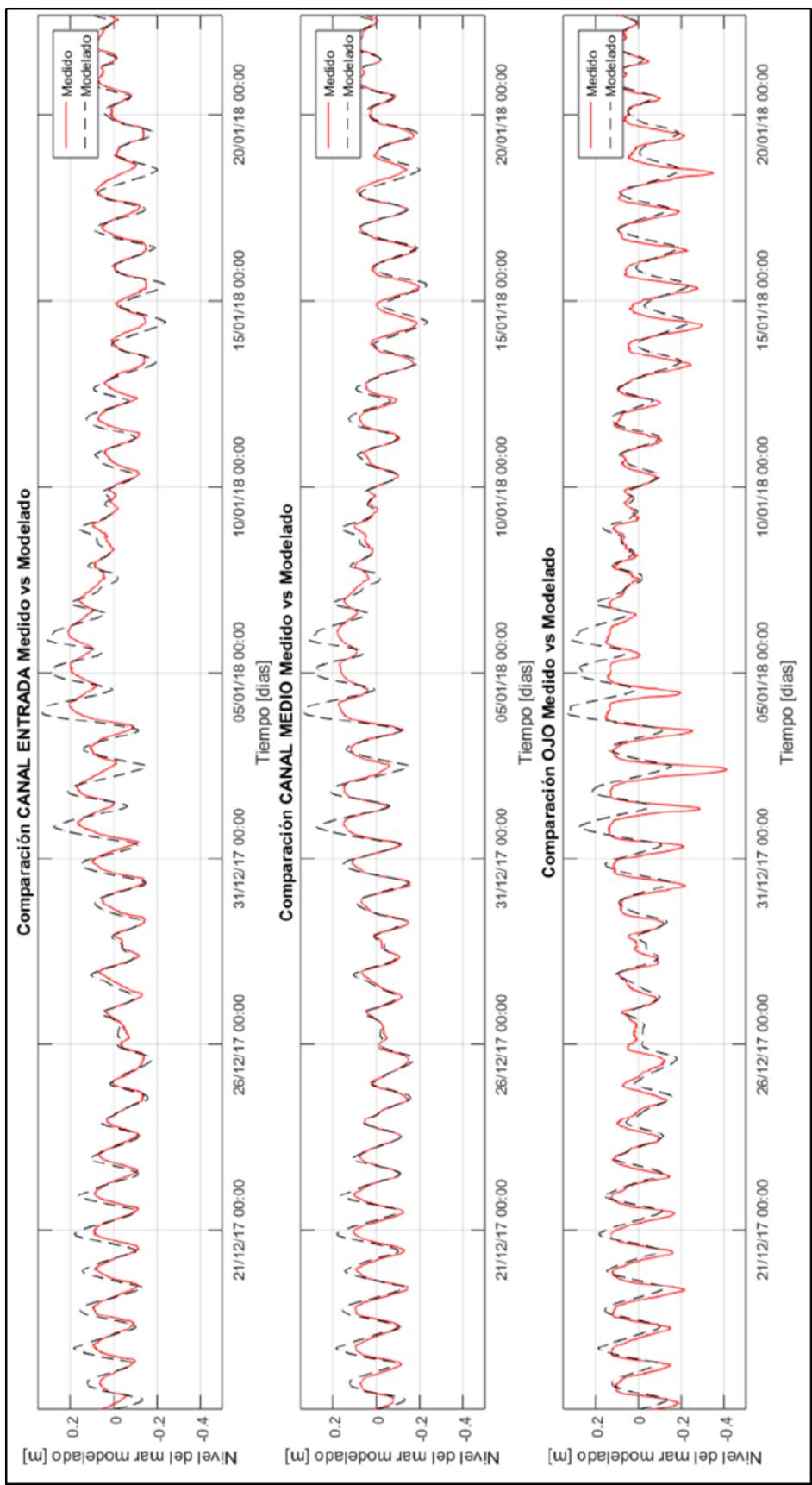


Figura 5-15. Calibración en Petén: Canal de entrada, canal medio y ojo de agua de la campaña realizada del 15 de diciembre del 2017 al 22 de enero del 2018.

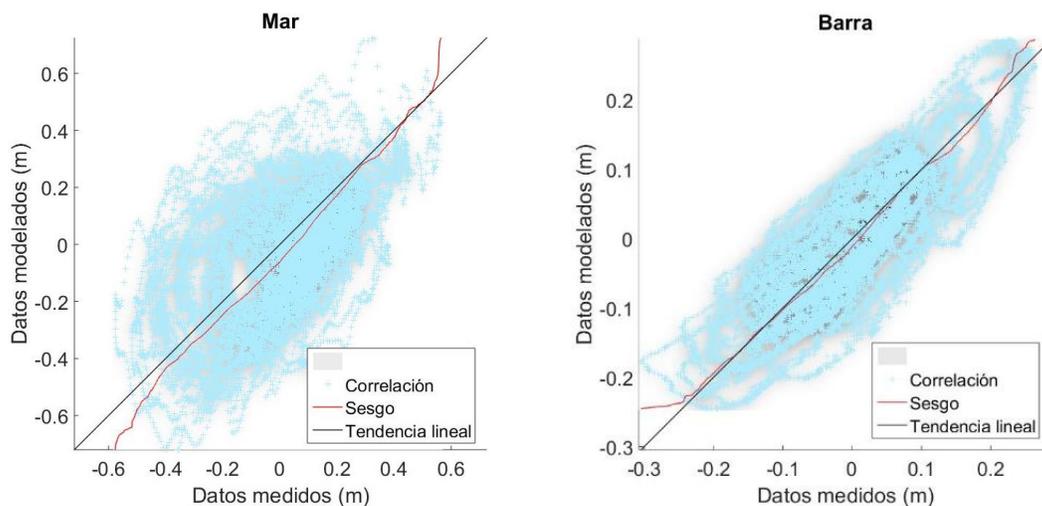
La Tabla 5-2 presenta los resultados de los estadísticos de calibración, incluyendo el error cuadrático medio (RMS) y el coeficiente de correlación, para cada una de las estaciones de medición.

Tabla 5-2. Estadísticos de calibración

	Punto medido	RMS (m)	Coefficiente de Correlación
	Mar	0.04	0.98
	Bocana	0.03	0.95
	Isla	0.04	0.91
Petén	Entrada canal	0.03	0.91
	Canal medio	0.03	0.96
	Ojo	0.04	0.82

En esta etapa final del análisis, se realizó un gráfico del coeficiente de sesgo para evaluar si el modelo numérico Delft3d-FM estaba mostrando una tendencia sistemática a subestimar o sobreestimar los resultados. El coeficiente de sesgo es una medida estadística que indica la dirección y magnitud de cualquier sesgo en los datos.

En la Figura 5-16 se presenta este gráfico, donde se puede observar una nube de puntos que representa la correlación entre los datos obtenidos y los resultados del modelo. Esta nube de puntos permite visualizar la relación entre las mediciones y las predicciones del modelo. Además, se traza una línea roja en el gráfico para indicar la presencia de sesgo. Si la línea roja se desvía de la línea diagonal (correspondiente a una relación perfecta entre los datos y el modelo), indica que hay una tendencia de subestimación o sobreestimación en los resultados.



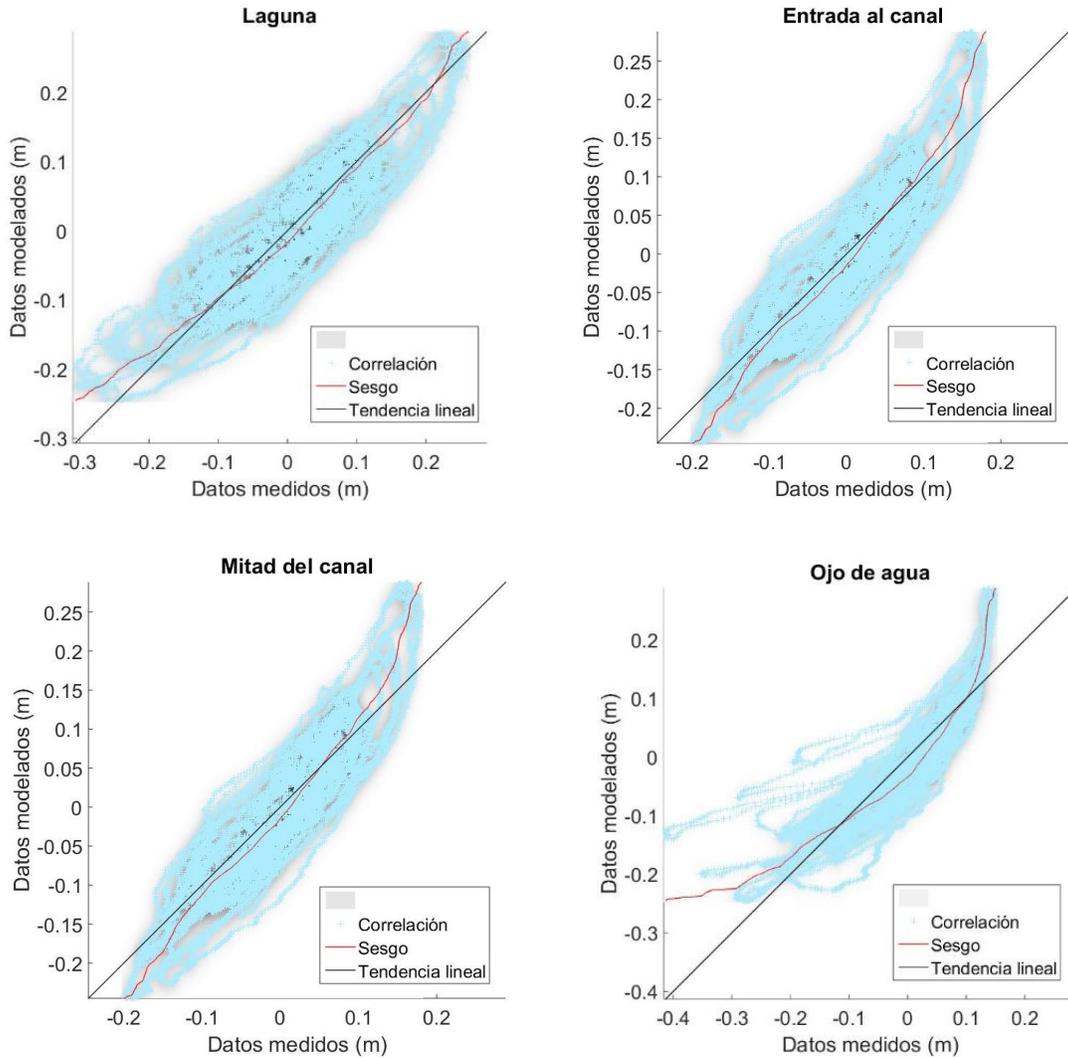


Figura 5-16. Coeficiente de sesgo para puntos medidos en la calibración.

En general, el error medio cuadrático y los coeficientes de correlación son aceptables para la calibración realizada. El ojo de agua es el que tiene un mayor sesgo debido a la falta de datos de aportes de agua.

### 5.3.4 Validación

Una vez calibrado el modelo, se procedió con la validación del mismo. La validación generalmente se establece mediante pruebas de referencia. Esto se hace para medir la concordancia entre los datos medidos y los modelados.

Para probar que el modelo se encontraba validado, se simuló un evento diferente al de la calibración (es decir una campaña realizada en septiembre del 2016 donde se midió flujo durante un ciclo diurno de marea), tomando en cuenta los valores de

los parámetros ya calibrados. Para la validación del modelo fue necesario colocar 2 m<sup>3</sup>/s más de aporte de agua dulce debido a los aportes adicionales de otros petenes menores y a que es tiempo de lluvias y por lo tanto hay más entrada de agua.

Después, como en la calibración, se realizó la comparación, sólo que esta vez lo que se comparó fueron los gastos a través de la boca de la Laguna. En la Figura 5-17 se pueden observar los resultados de esta comparación.



Figura 5-17. Validación en Petén: datos medidos vs datos modelados de la campaña realizada el 22 de junio del 2016.

En la Tabla 5-3 se muestran los prismas de marea medidos y modelados, así como el error asociado y por último la cuarta columna contiene el porcentaje de error entre lo medido y lo calculado.

Tabla 5-3. Estadísticos de calibración de las primas de marea

	Medido	Modelado	ERROR %
	Volumen (m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	
Sale	-1,757,866	-1,669,917	4.7
Entra	1,182,989	1,131,018	4.4
Diferencias	-568,877	-538,899	5.3

Los resultados muestran que los errores son menores a 5.5%, lo cual se considera aceptable. Algo interesante que podemos notar con estos datos es que hay aproximadamente 30% de mayor volumen hacia fuera (reflujo) que hacia adentro (flujo), lo cual tiene que ver con los diversos aportes de agua dulce.

### 5.3.5 Casos simulados

Una simulación es la imitación del funcionamiento de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. Las simulaciones requieren el uso de modelos; el modelo representa las características o comportamientos clave del sistema o proceso seleccionado. La simulación de diferentes eventos es conveniente ya que así se realiza un análisis más completo del problema. Se tomaron en cuenta para estas simulaciones una marea real y una marea idealizada. Ambas mareas tuvieron como objetivo analizar los cambios de amplitud y de fase en la onda de marea al ser propagada sobre el cuerpo lagunar. Por otro lado, se analizaron también los patrones de circulación presentes en la zona.

### 5.3.6 Datos de entrada

Para la primera prueba se utilizó como forzamiento del modelo los datos de marea recolectados en el apartado 5.1.1, los cuales se presentan en la Figura 5-18.

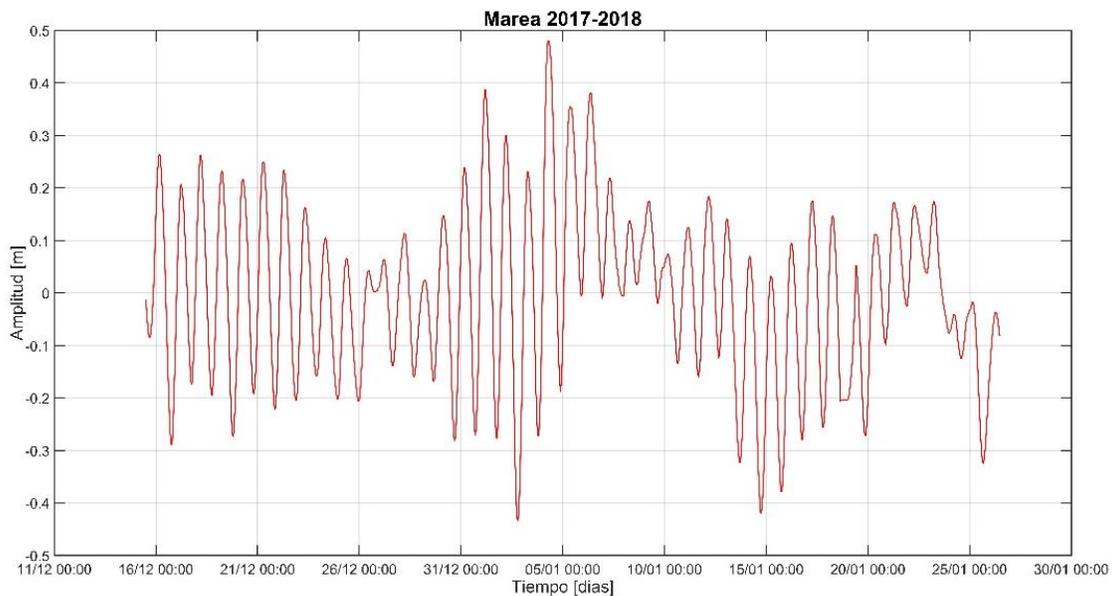


Figura 5-18 Marea utilizada en la frontera Norte 2017-2018.

Para la segunda prueba se introdujo una marea hipotética con el armónico  $M_2$  con 20 cm de amplitud y  $0^\circ$  de fase y el primer subarmónico  $M_4$  con una amplitud de 10 cm y  $-90^\circ$  de fase. En la tercera prueba la marea idealizada fue igual a la segunda solo que en este caso las fases fueron de  $0^\circ$  para ambos componentes armónicos. A continuación (Figura 5-19) se muestran las mareas idealizadas 2 y 3.

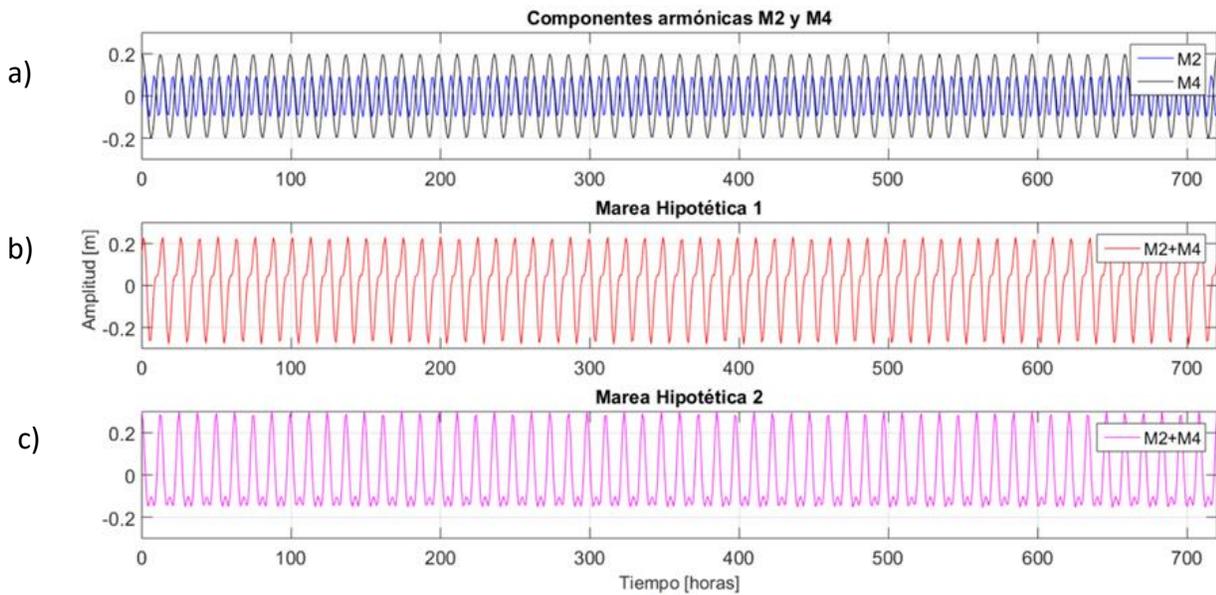


Figura 5-19 Marea idealizada. a) Componentes armónicas M2 (azul) y M4 (negro). b) Marea hipotética 1(rojo) c) Marea hipotética 2 (magenta).

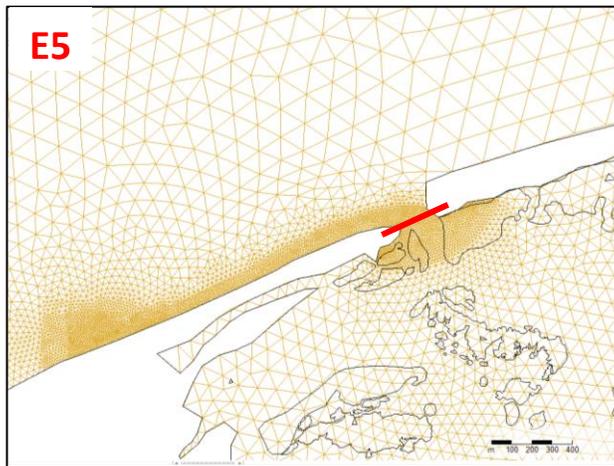
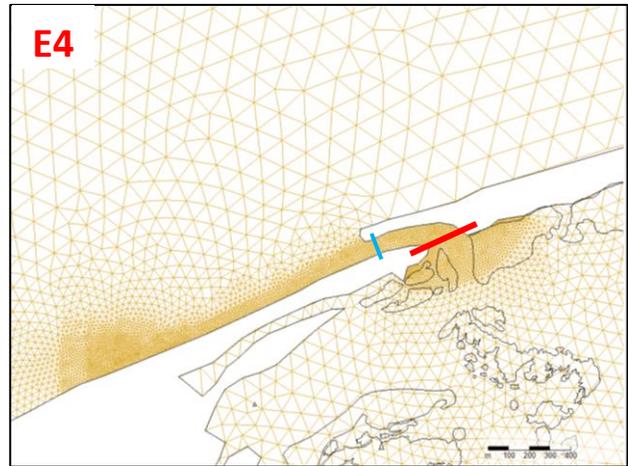
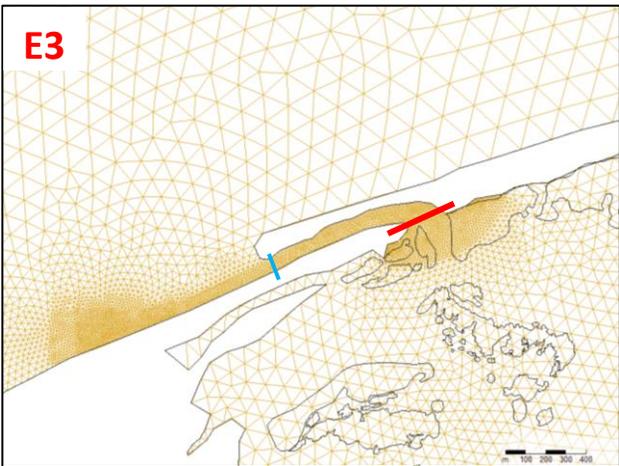
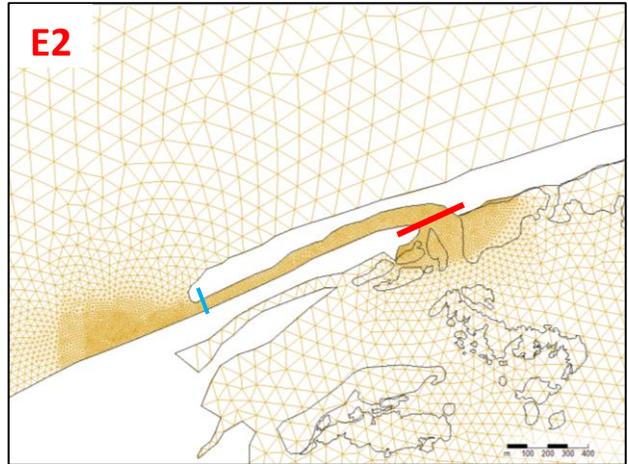
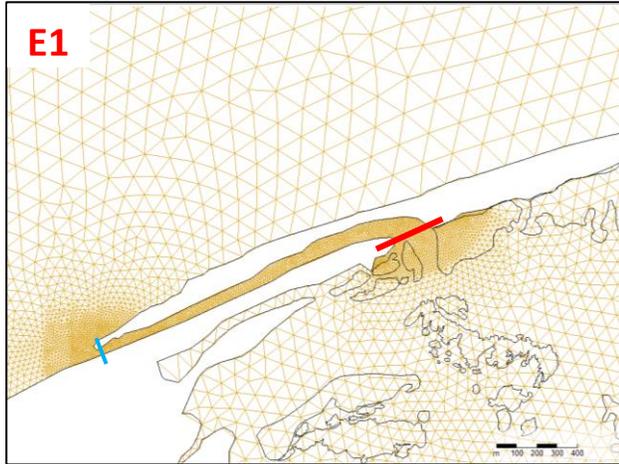
### 5.3.7 Variación de la longitud del spit

Para el estudio hidrodinámico de la laguna la Carbonera en función de la longitud del spit se propusieron 5 escenarios, los cuales consistieron en variar la longitud del spit que conecta el océano con la laguna. Esta variación se simuló removiendo gradualmente la barra de arena. Las longitudes del spit para cada simulación y el ancho de las bocanas se muestran en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Longitudes de spit y ancho de boca

Escenario	Longitud del spit (km)	Ancho de la boca (m)	Cota (m)
E1	1.6	32	1+600
E2	1.2	56	1+200
E3	0.88	69	0+8800
E4	0.43	75	0+430
E5	Sin Spit	162	0+000

En la Figura 5-20 se observan los diferentes escenarios de variación geométrica para las simulaciones, donde se va reduciendo el tamaño de la lengua hasta llegar al escenario 5 donde el intercambio de agua del océano con la laguna se da de forma directa. Las diferentes secciones de la boca están marcadas en color azul y las secciones de la garganta marcadas en color rojo.



Sección garganta



Sección Boca



Figura 5-20. Variación de la longitud de spit en diferentes escenarios

### 5.3.1 Análisis de transporte de sedimentos

Se realizaron dos análisis: uno para evaluar la eficiencia hidráulica en la boca de una laguna, tomando en cuenta la asimetría de las mareas y la longitud del spit. Para lograrlo, se realizó una simulación hidrodinámica para estudiar los flujos y corrientes en la zona. Por otro lado, se llevó a cabo una evaluación del potencial de transporte de sedimentos en cinco escenarios diferentes. Para lograr esto, se utilizaron cinco formulaciones teóricas de transporte de sedimentos en cada uno de los escenarios simulados. Estas formulaciones fueron desarrolladas por diversos autores en diferentes años, siendo la más antigua de 1966 y la más reciente de 2007.

1. Bagnold (1966)
2. Madsen y Grant (1976)
3. Van Rijn (1984)
4. Van Rijn (2007a)
5. Van Rijn (2007b)

En las próximas secciones, se examinará el transporte de sedimentos en dos secciones específicas de interés, la garganta y la boca; ver Figura 5-20. Para ello, se utilizará la velocidad calculada en cada paso de tiempo. Además, se incluirá una comparación normalizada de las formulaciones en flujo y refluo para poder analizar la variación entre ellas de manera relativa.

## 6 Resultados

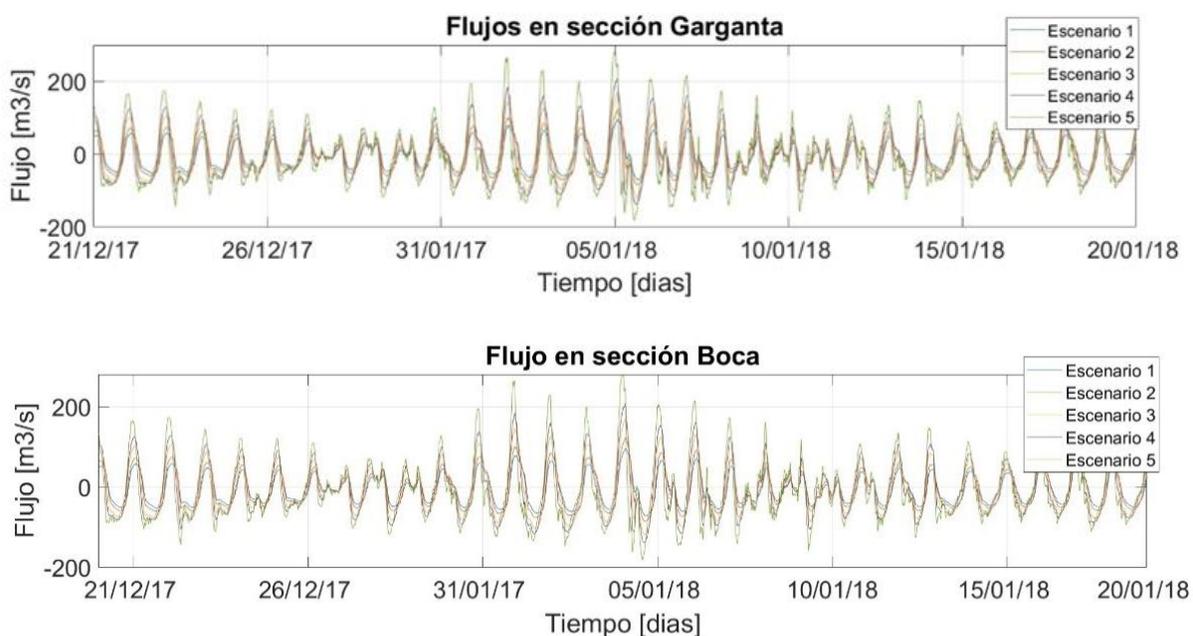
### 6.1 Marea Real

#### 6.1.1 Prisma de marea

El prisma de mareas es una herramienta fundamental utilizada en el estudio del flujo de agua, como las lagunas costeras. Estas lagunas se ven afectadas por el ciclo de las mareas, lo que influye en el movimiento y comportamiento del agua en su boca o entrada. Durante las mareas vivas, que corresponden a los periodos de mayor diferencia entre las mareas alta y baja, el nivel del agua en el océano es notablemente más alto. Esto tiene como consecuencia un flujo más intenso de agua hacia la laguna a través de su boca.

En contraste, durante las mareas muertas, que son periodos en los que la diferencia entre las mareas alta y baja es mínima, el nivel del agua en el océano es más bajo. Esto genera una presión diferencial entre el océano y la laguna, lo que provoca que el agua deba salir de la laguna para equilibrar las presiones. En este caso, el flujo de agua será más pronunciado en sentido contrario, desde la laguna hacia el océano, a medida que el agua busca equilibrar las presiones.

La laguna La Carbonera, mencionada en la Figura 6-1, es un ejemplo de cómo se manifiesta este comportamiento. En la figura, es posible observar cómo los niveles del agua varían a lo largo del ciclo de las mareas, mostrando la influencia de las mareas vivas y muertas en el flujo de agua dentro y fuera de la laguna.



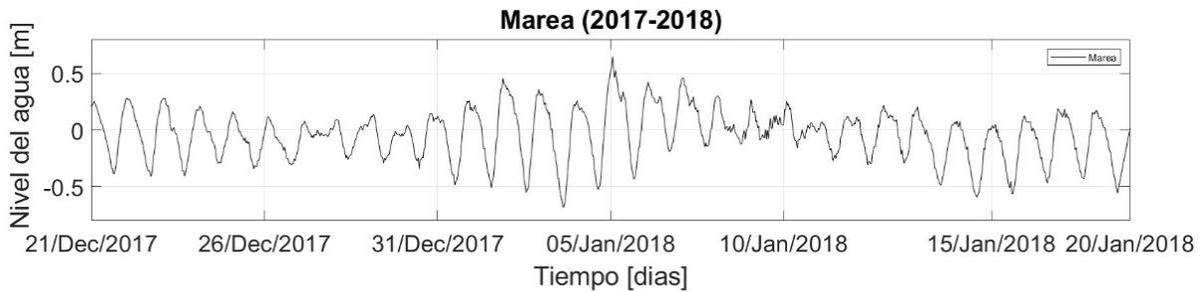


Figura 6-1. Prisma de mareas en la sección de garganta y boca durante el ciclo de mareas en la laguna La Carbonera.

Es importante entender cómo se comporta el flujo de agua a través de la boca de la laguna para determinar si la laguna está importando o exportando sedimentos y cómo esto afecta la dirección del transporte de sedimentos y la eficiencia del sistema. En este caso de estudio, se analizó un ciclo lunar completo en dos secciones transversales, una colocada sobre la garganta y otra sobre la boca de cada escenario. De estas secciones se obtuvieron series de gastos a cada 10 minutos, las cuales se integraron en el tiempo para calcular los volúmenes bajo la curva y obtener el prisma de marea neto.

La Figura 6-2 y la Figura 6-3 muestran los resultados obtenidos, con los volúmenes de flujo y reflujos para el ciclo mensual en cada escenario y la Figura 6-3 muestra el volumen neto (flujo más reflujos) en las secciones de la garganta y boca. Los valores negativos corresponden al agua que sale de la laguna (reflujo), mientras que los valores positivos representan el flujo de agua que entra a la laguna. Cada ciclo diario tiene un comportamiento diferente en el prisma de mareas, por lo que es importante analizar un ciclo completo para obtener una visión más completa del sistema.

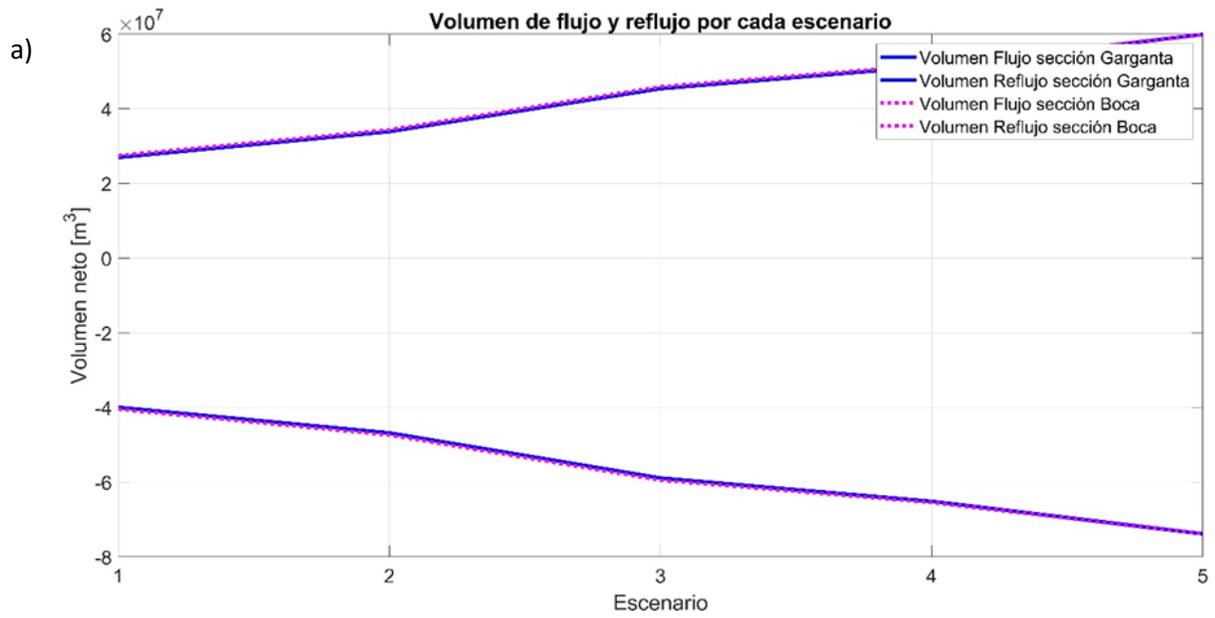


Figura 6-2. Volumen de flujo y reflujos mensuales en las secciones de la garganta y boca de la laguna para cada escenario.

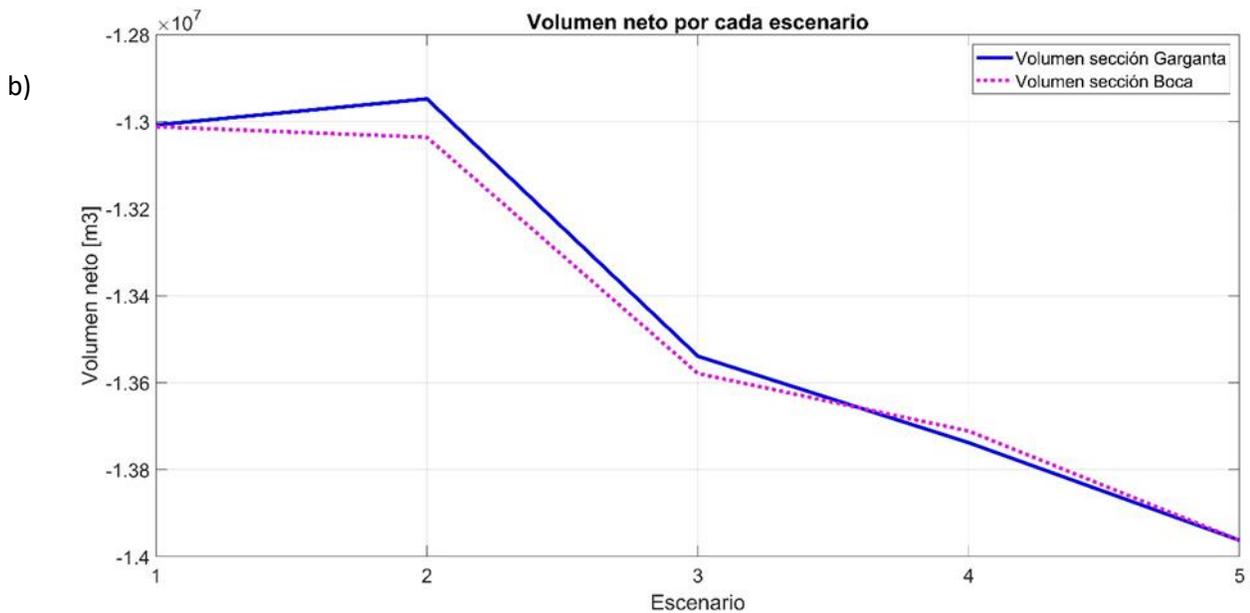


Figura 6-3. Volumen de flujo neto mensual en las secciones de la garganta y boca de la laguna.

De la imagen (a) se observa que los volúmenes de reflujos siempre son mayores que los de flujo, lo cual es el reflejo del importante aporte de agua dulce al sistema. Además, es claro que conforme la longitud de la lengua va disminuyendo (de escenario 1 a 5), el volumen en ambos sentidos aumenta de manera importante, llegando a duplicarse en el caso del flujo. De hecho, por cada 100 m que aumenta

la lengua, el volumen que transita por la boca disminuye en promedio 3.1% para el flujo y 2.6% para el reflujo. Lo anterior se debe a una menor eficiencia hidráulica, i.e., mayor fricción, conforme la longitud del canal de la boca aumenta del escenario 5 (sin lengua) al escenario 1 (lengua larga). Por otro lado, en la imagen (b) se observa que cuando la longitud del spit es más larga, se pierde mayor energía debido a la fricción del canal, es por eso que cuanto menor es la longitud de la lengua, el intercambio de volumen es mayor.

Partiendo de los volúmenes calculados en las 2 secciones, se obtuvo la relación de  $V_{\text{Reflujo}}/V_{\text{Flujo}}$ , para determinar en qué medida el volumen de reflujo era más grande que el volumen de flujo y analizar el cambio de estos con las diferentes secciones. El resultado se presenta en la Figura 6-4.

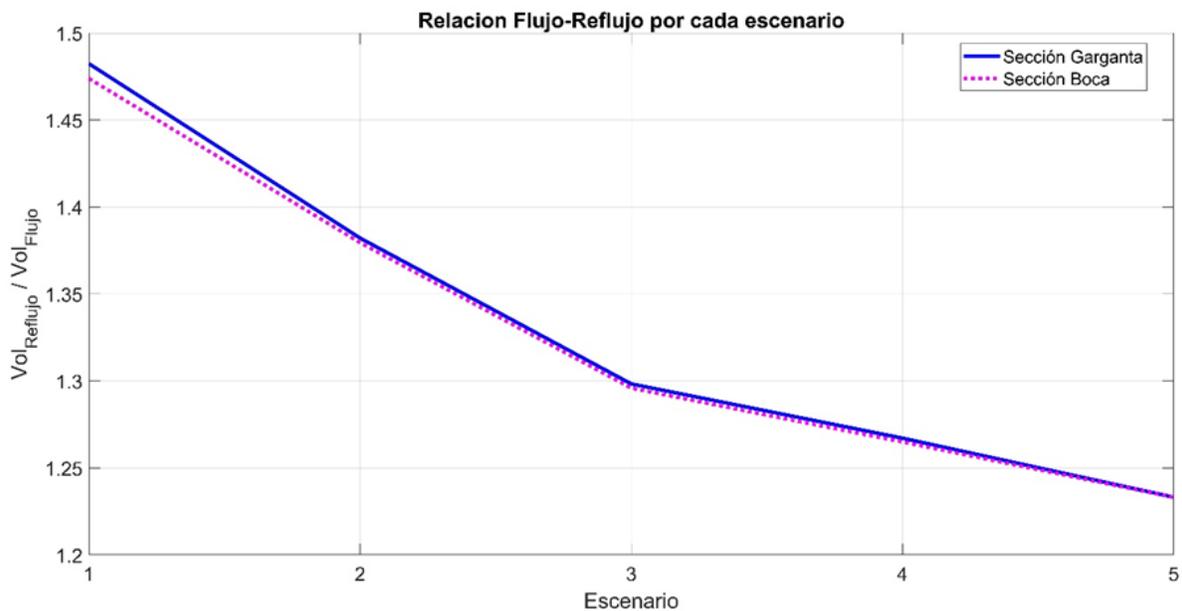


Figura 6-4. Relación Flujo-Reflujo por cada escenario. Línea continua representa la sección de la garganta y la línea punteada la sección de la boca.

Al observar los datos, se puede notar que a medida que la longitud de la lengua que conecta la laguna con el océano disminuye, la proporción de salida de agua de la laguna en relación a la entrada de agua también disminuye. Esto significa que cuando la lengua es más corta, la laguna tiende a ser menos exportadora, es decir, menos agua sale de la laguna hacia el océano en comparación con la cantidad de agua que entra desde el océano hacia la laguna.

### 6.1.2 Velocidades

A medida que las corrientes ingresan a la laguna, pierden velocidad, y por ende disminuye la turbulencia en el fondo. Ambos efectos hacen que aumente la

sedimentación (primero las partículas gruesas) y hacia el interior se transportan partículas más finas. Si la velocidad de las corrientes es inferior a 20 cm/s, las partículas pequeñas (0.0625 mm) se sedimentan rápidamente, mientras que, si la velocidad es superior a los 20-40 cm/s las partículas permanecen temporalmente en suspensión (Odum et al., 1979, 1984); por consiguiente, en donde los procesos dinámicos ejercen una alta energía no se favorece la deposición de sedimentos finos (por lo general derivados de materia orgánica).

La dirección del transporte de sedimentos a través de la entrada se rige por el sentido de dominancia de flujo/reflujo. Por otro lado, la magnitud de las velocidades de flujo/reflujo es la encargada de determinar el volumen neto de transporte de sedimentos durante largos períodos. Los volúmenes de transporte de sedimentos son muy sensibles a la amplitud de las mareas. A continuación, se muestra la Tabla 6-1 que resume las velocidades medias y máximas de corriente en dos secciones, junto con un análisis de las velocidades registradas en un modelo numérico para diferentes escenarios en las secciones de garganta (Figura 6-5) y boca (Figura 6-6). En ambas figuras se destacan las velocidades máximas y mínimas promedio tanto de flujo como de reflujo.

Tabla 6-1. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.

Escenario	Sección Garganta				Sección Boca			
	Velocidades Medias [cm/s]		Velocidades Máximas [cm/s]		Velocidades Medias [cm/s]		Velocidades Máximas [cm/s]	
	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo
1	9.63	-10.23	28.43	-20.08	42.73	-54.13	117.31	-129.57
2	11.80	-12.31	35.27	-24.15	33.38	-43.99	90.03	-108.84
3	21.18	-21.03	61.44	-47.45	31.62	-35.25	89.31	-94.52
4	20.74	-21.11	62.02	-49.50	40.59	-41.61	114.27	-121.04
5	23.80	-21.29	80.85	-65.31	23.80	-21.29	80.85	-65.31

### **Sección Garganta**

Los resultados muestran que a medida que aumenta la longitud del spit, las velocidades máximas de flujo y reflujo disminuyen. Esto se debe a que la barra de arena crea una barrera física que reduce el flujo de agua, lo que disminuye la velocidad de flujo y reflujo en la zona.

En particular, el escenario 1, donde la barra de arena tiene 1.6 km de longitud, muestra velocidades máximas de flujo de 28 cm/s y velocidades máximas de reflujo de 20 cm/s, mientras que el escenario 5, donde el intercambio de agua entre el océano y la laguna es directo, tiene velocidades máximas de flujo de 80 cm/s y velocidades máximas de reflujo de 65 cm/s. Esto sugiere que el flujo y reflujo de

agua se ven afectados por la presencia de la barra de arena, y que el intercambio directo de agua con el océano permite una mayor velocidad de flujo y reflujos. Además, se encontró que el incremento en las velocidades máximas de reflujos es mayor que el incremento en las velocidades máximas de flujo. Esto sugiere que los aportes de agua dulce mejoran los intercambios de agua en la zona. Es probable que esto se deba a que el agua dulce es menos densa que el agua salada, lo que crea una corriente de convección que mejora el flujo y reflujos de agua.

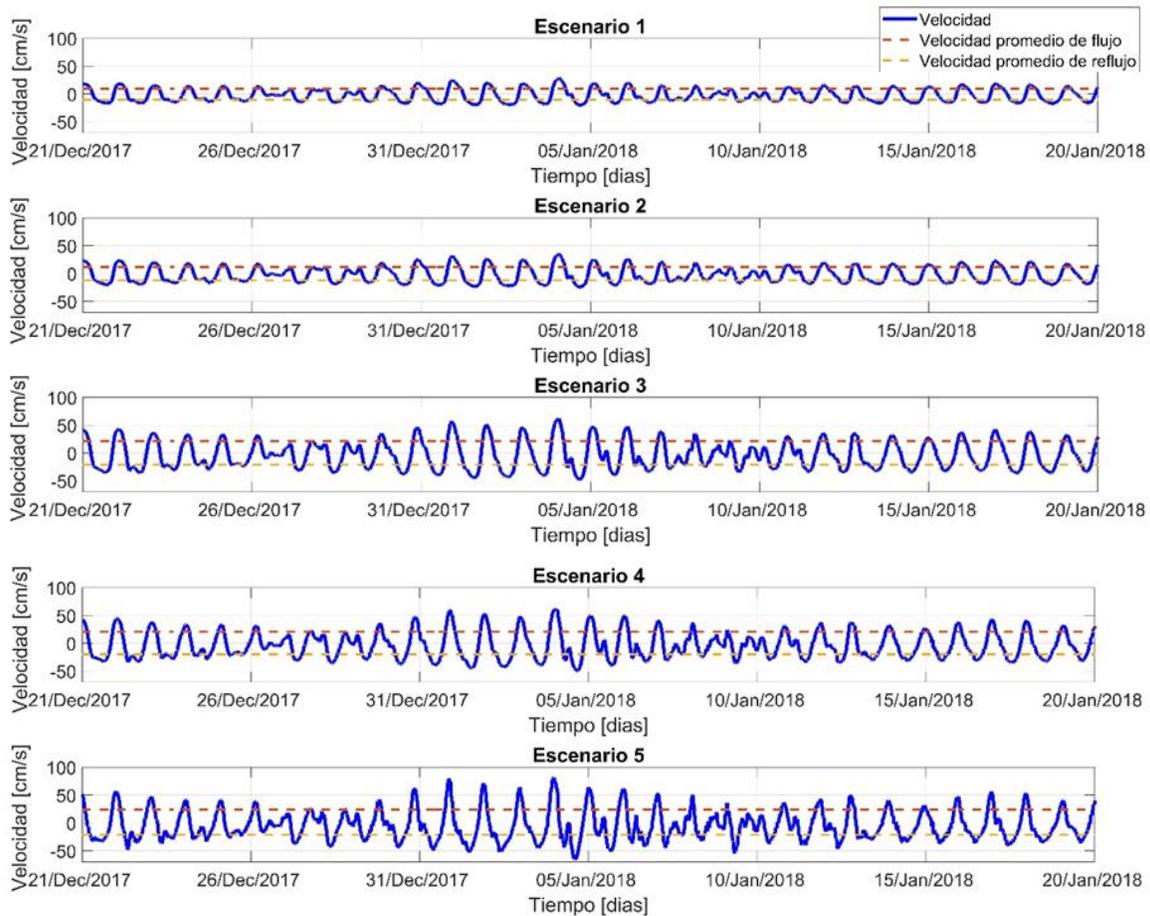


Figura 6-5. Velocidad en la sección Garganta. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.

Por otro lado, se observa que conforme la longitud del spit disminuye las velocidades máximas de flujo y reflujos siempre aumentan, lo cual sugiere que el transporte de sedimentos en la garganta es mayor cuanto menor es la lengua, y dado que el flujo máximo es mayor al reflujos, esto provoca que la laguna importe sedimentos, siendo más inestable a largo plazo.

Continuando con el análisis, las velocidades medias están en un rango de 9 a 21 cm/s para flujo y de 10 a 21 cm/s para reflujo. Aunque en general, con una longitud de spit más corta la velocidad va aumentando, en el caso de la velocidad media se observa sobre todo en velocidad de flujo una disminución de esta, del escenario 3 al 4. Esto sucede debido a que en el punto en que se colocó la sección transversal 4 para el análisis hay un aumento en la profundidad. Considerando este aumento y el incremento en el ancho de la sección, por continuidad provoca la disminución de la velocidad debido al aumento del área de la sección.

También podemos observar que en los escenarios 3 y 5 las velocidades de reflujo son menores que las de flujo. Este suceso ocurre cuando la fricción y la constricción se juntan y de esta manera las velocidades bajan. Por último, las velocidades medias en los escenarios 3, 4 y 5 son mayores a 20 cm/s por lo cual según la literatura las partículas se encuentran en suspensión. Con una barra más larga, las velocidades disminuyen por la fricción presente, lo que lleva a un menor transporte de sedimentos en los escenarios 1 y 2.

### **Sección Boca**

Las velocidades máximas en la sección boca son mayores que en la sección garganta debido a la geometría de la laguna, donde la boca es más estrecha y profunda, y por lo tanto presenta un mayor gradiente hidráulico. Como se puede ver en la tabla 7, conforme la longitud del spit disminuye, los anchos cada vez son mayores. Para esta sección las velocidades máximas de flujo se encuentran en un rango de 117 (E1) a 80 cm/s (E5) es decir 1.4 veces más grande en el escenario 1 que el en 5. En reflujo los valores van de 129 a 65 cm/s con un total de 1.9 veces más grande el escenario 1 que el 5. Contrario a lo que sucede en la sección garganta, aquí no se observa una tendencia en el incremento/decremento de las velocidades de flujo y reflujo. Esto sucede debido a la relación que existe entre el ancho del canal en cada sección transversal, la profundidad y la fricción.

En el escenario 4, las velocidades de flujo en la sección boca aumentan en comparación con los otros escenarios debido a la combinación que se da entre la profundidad (mayor) y la disminución del ancho del canal en esa sección. Es importante destacar que, aunque la profundidad es un factor importante en el comportamiento hidrodinámico de las lagunas costeras, otros factores como la topografía del fondo, la fricción y la presencia de mareas también pueden influir en las velocidades de flujo.

Las velocidades medias muestran una tendencia similar a las velocidades máximas, siguiendo el mismo patrón en relación a la disminución del ancho del canal y la profundidad en la sección de la boca. Sin embargo, es importante destacar que

contrario a lo visto en la sección garganta, la boca presenta velocidades medias más grandes de reflujos que de flujo. La razón de esto es la constricción que se da conforme la longitud del spit va aumentando. Este hecho sugiere que la presencia de la barra en la sección de la boca favorece que la laguna sea exportadora y por lo tanto más estable a largo plazo, funcionando la lengua como un sistema de protección.

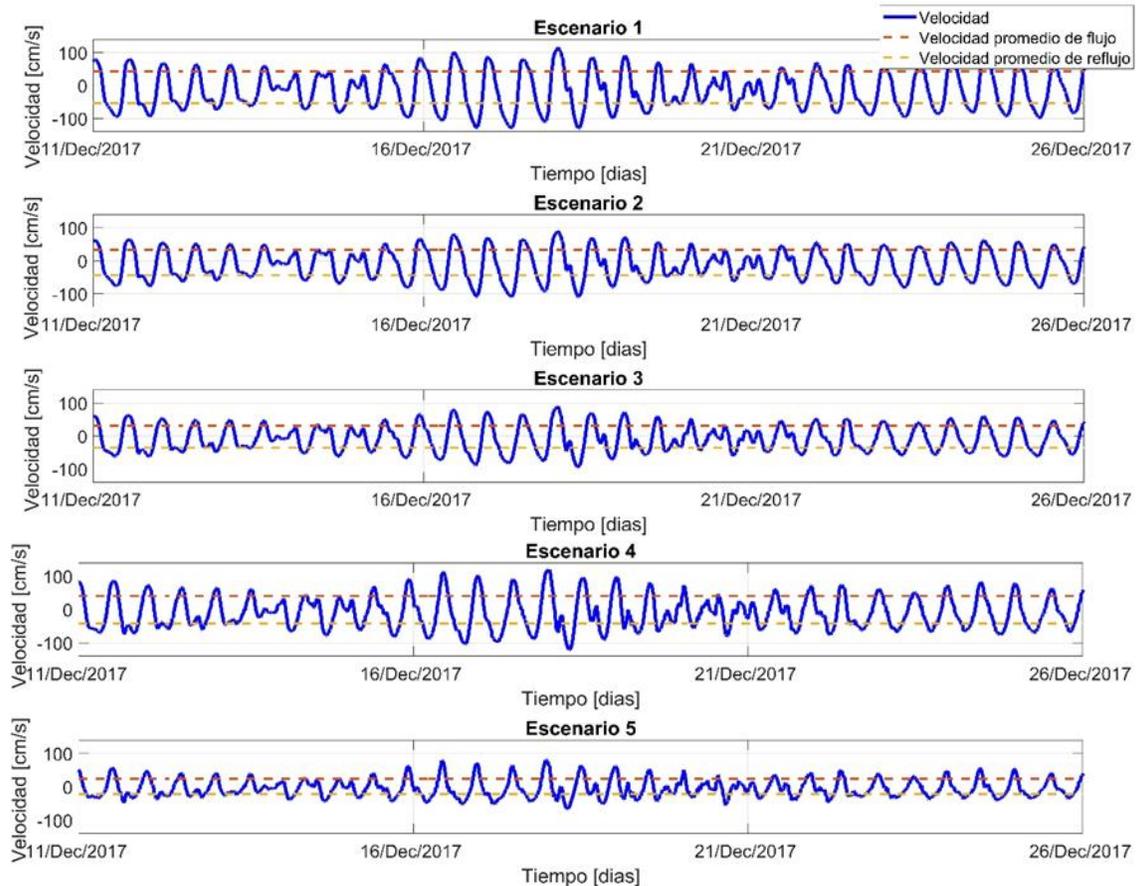


Figura 6-6. Velocidad en la sección Boca. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.

### 6.1.3 Duraciones

Es fundamental tener en cuenta la duración del flujo y el reflujos en una laguna costera debido a que, como se ha explicado en capítulos previos, cuando la duración de uno es mayor que la del otro, se produce una asimetría de mareas que puede afectar la forma y la dinámica de la boca de la laguna, por el transporte de sedimentos que ocurre. Este fenómeno se presenta habitualmente cuando no hay un aporte significativo de agua dulce.

No obstante, en el caso de La Carbonera, hay una cantidad significativa de agua dulce entrando en la laguna (ver sección 5.5.1.5), lo cual significa que es necesario analizar tanto las duraciones como las velocidades del flujo y el reflujo juntos, para determinar si la laguna tiene una tendencia neta a importar o exportar sedimento.

En la sección 6.1.2 se analizaron las velocidades, mientras que en la y Figura 6-7 se muestran las duraciones de los ciclos lunares para cada situación, tanto en la boca como en las secciones de garganta.

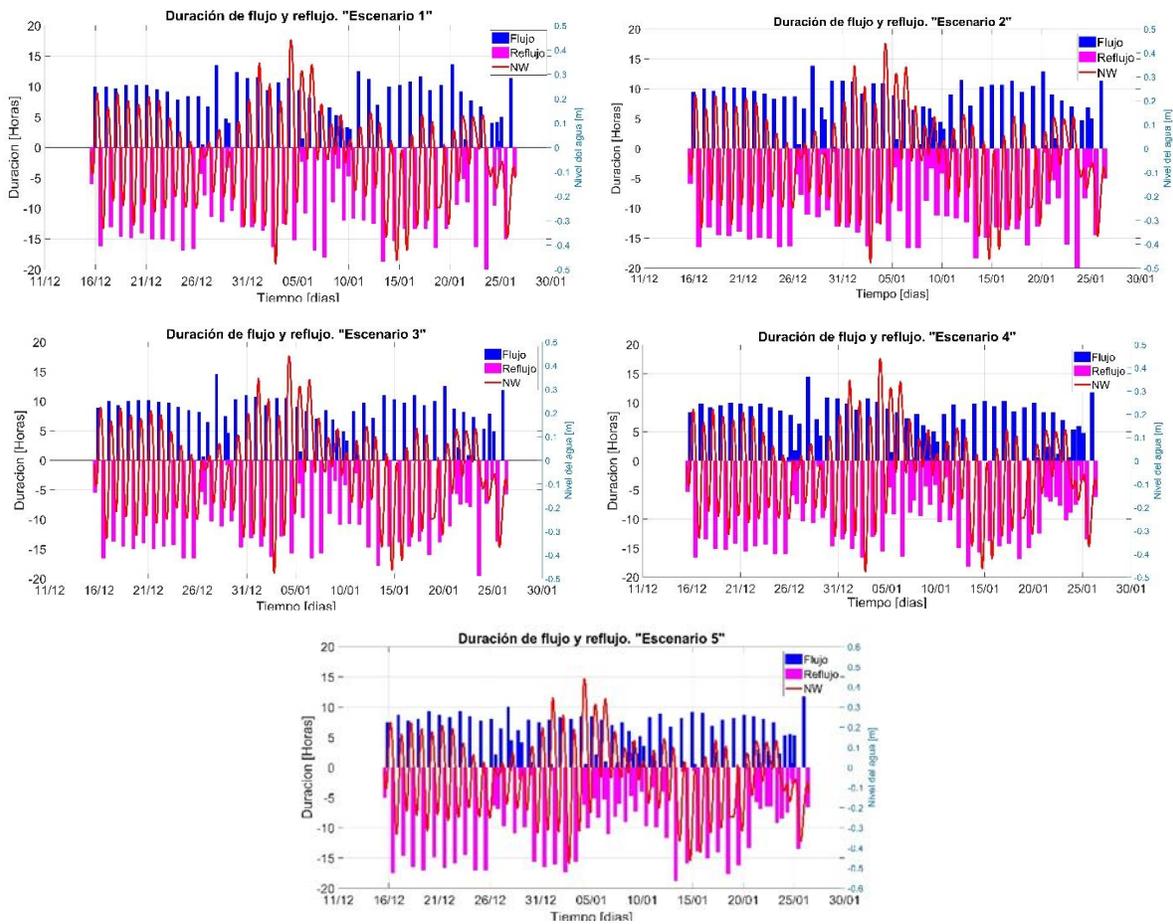


Figura 6-7. Duración de flujo y reflujo en la sección Garganta. Las gráficas de barras azules representan el tiempo durante el cual el flujo de agua es predominante, mientras que las gráficas de barras rosas indican el tiempo en el que se produce el reflujo. La línea roja continua representa el nivel del mar.

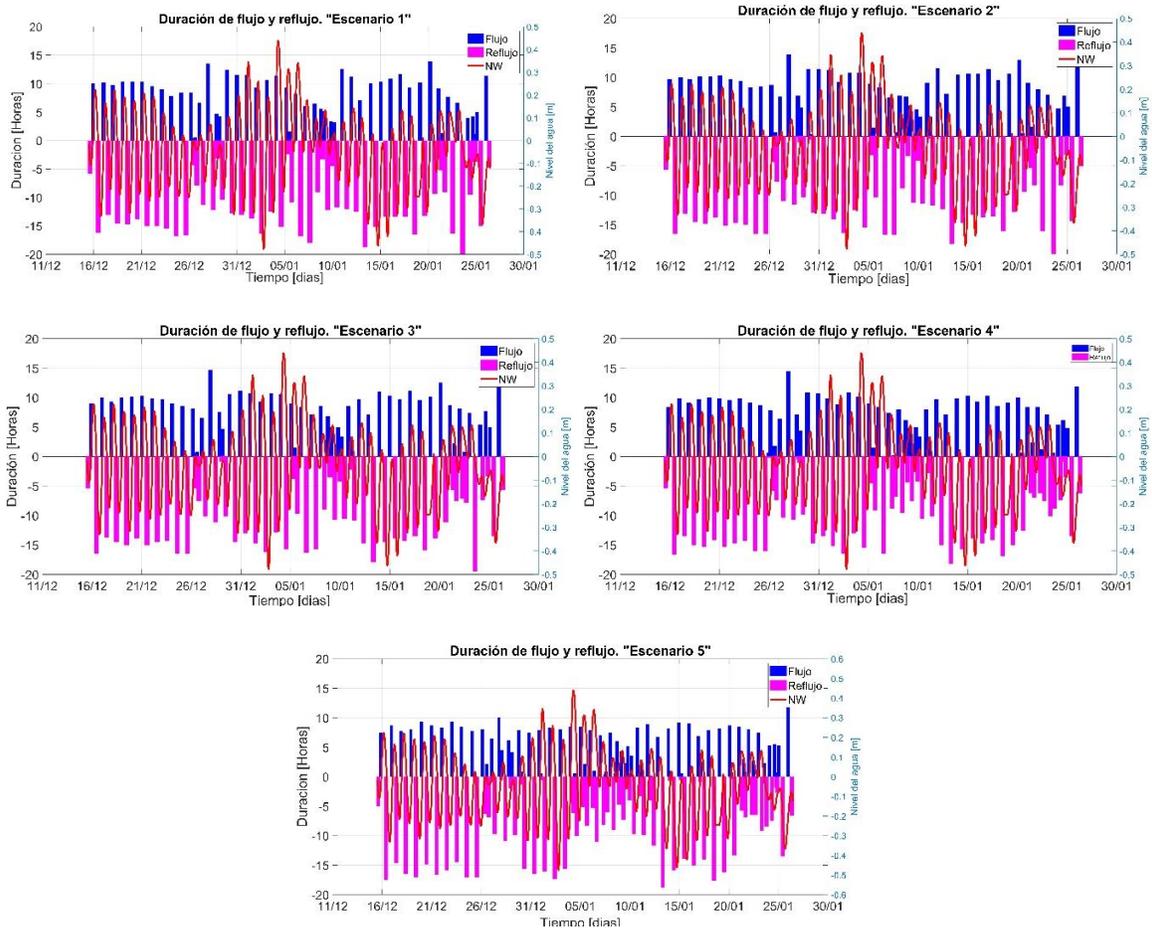


Figura 6-7. Duración de flujo y reflujos en la sección Boca. Las gráficas de barras azules representan el tiempo durante el cual el flujo de agua es predominante, mientras que las gráficas de barras rosas indican el tiempo en el que se produce el reflujos. La línea roja continua representa el nivel del mar.

En la Tabla 6-2 se resumen las duraciones promedio de flujo y reflujos para cada escenario.

Tabla 6-2. Duraciones promedio de flujo y reflujos para cada escenario en la boca y en la garganta

Escenario	GARGANTA				BOCA			
	Marea Viva		Marea Muerta		Marea Viva		Marea Muerta	
	Flujo	Reflujos	Flujo	Reflujos	Flujo	Reflujos	Flujo	Reflujos
1	9.7	13.2	3.2	5.1	9.5	14.8	3.3	7.6
2	9.5	13.4	3.9	5.3	9.4	14.5	2.7	7
3	9.4	13.7	4	5.8	9.4	13.8	4.03	6.7
4	8.6	14	4.7	5.8	9.3	13.5	4.08	5.9
5	8.3	14.8	5	5.2	8.3	14.8	5	5.2

Observando los resultados mostrados en la tabla y analizándola con las velocidades vistas en la tabla 8, la mayor velocidad de flujo y reflujo en la boca que en la garganta reduce la duración del flujo y el reflujo en la boca y aumenta la duración en la garganta. Por otro lado, la mayor velocidad de reflujo en la boca puede estar succionando más agua de la laguna, lo que aumenta la duración de la marea muerta en la boca y reduce la duración en la garganta.

Además, como se puede ver, en ambos casos se comienza con duraciones de flujo y reflujo del mismo orden y conforme la lengua va disminuyendo, estas duraciones empiezan a tener un comportamiento desigual provocando una asimetría de mareas. Con esto se demuestra que la presencia de la barra produce una menor asimetría de las duraciones de flujo y reflujo.

A parte de la existencia del spit o lengua, otro motivo por el cual ocurre esta diferencia de duraciones entre flujo y reflujo es la presencia de los aportes de agua dulce sobre la laguna. En efecto, en la sección de la garganta, considerando la relación entre duraciones y velocidades del flujo y reflujo se observa que, aunque los ojos de agua aporten una cantidad considerable de agua a la laguna (el volumen de reflujo es en promedio 30% que el volumen de flujo; ver sección 6.1.1), no por ello el reflujo sale más rápido. Esto se observa en todos los escenarios, donde se observan reflujos con más duración en cualquier escenario modelado. Estos reflujos, conforme disminuye la longitud de la lengua presentan duraciones cada vez menores, contrario a las velocidades donde van en aumento con menor longitud de barra. La razón por la cual las velocidades son más pequeñas con longitudes de barra mayores, está relacionada directamente con lo somera que es la Laguna la Carbonera. El agua entra más rápido y al momento de vaciarse esta misma tarda más en salir, de esta manera se vuelve más inestable y como los reflujos son más largos y con menor velocidad empieza a acumularse sedimento sobre la barra.

Por otro lado, en la sección de la boca se observa un comportamiento de duraciones similar al analizado en la sección de la garganta. Sin embargo, las velocidades en ambas secciones no mostraron similitud. Por lo tanto, con esto se concluye que, aunque las velocidades estén regidas por el gradiente de presión, la fricción y la constricción del área por la que fluye el agua, en la duración estos dos últimos parámetros no parecen tener una repercusión importante en el comportamiento. En cambio, la duración se rige en mayor medida por los aportes de agua dulce y es por esto que la longitud de la barra no es un factor importante.

En la Tabla 6-3 se presenta un resumen en el que se muestra el promedio de las duraciones de flujo y reflujo en ciclos de marea muertas y vivas, para cada escenario.

Tabla 6-3. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.

Sección	Escenario	Duración de Flujo + Reflujo por ciclo de Mareas Vivas (hrs)	Duración de Flujo + Reflujo por ciclo de Mareas Vivas (hrs)	Sección	Escenario	Duración de Flujo + Reflujo por ciclo de Mareas Vivas (hrs)	Duración de Flujo + Reflujo por ciclo de Mareas Vivas
Garganta	1	22.9	8.3	Boca	1	24.3	10.9
	2	22.9	9.2		2	23.9	9.7
	3	23.1	9.8		3	23.2	10.73
	4	22.6	10.5		4	22.8	9.98
	5	23.1	10.2		5	23.1	10.2

Como se puede ver, aunque la marea en la región está dominada por la componente armónica K1 la cual tiene un periodo de 23.93 horas, en ninguna de las secciones se obtiene este periodo de la suma de duración de flujo + duración de reflujo. Otro punto a observar es que en el caso de mareas muertas se ven ciclos con menor duración que en los ciclos de mareas vivas.

La razón por la que esto ocurre es debido a que se está introduciendo como forzamiento del modelo una marea real, la cual está conformada por varias componentes armónicas que provocan un comportamiento no lineal de la marea y que además se ve afectado de igual manera por los aportes de agua dulce.

#### 6.1.4 Amplitudes y fases de marea

Como se estudió en capítulos anteriores, una vez que la onda de marea se propaga desde el fondo del mar hacia la costa y luego dentro de la laguna, debido a la fricción, las amplitudes disminuyen y las fases aumentan. Debido a esto se realizó un estudio en donde se obtuvieron las amplitudes y los desfases de la marea (en grados y en horas) para la zona norte, la boca y el centro de la laguna.

Para la extracción de las componentes armónicas de importancia que se encuentran en el área de estudio se realizó un análisis armónico de la señal de marea con el programa t\_tide. A continuación, se muestra la Tabla 6-4 en la cual podemos observar las amplitudes y fases de la señal en la frontera norte del modelo. Los rangos de amplitud que hay en la zona de estudio se encuentran entre 0.21 m y 0.01 m.

Después se realizó el mismo análisis para los puntos que se encuentran ubicados en la garganta (de cada escenario) y en el centro lagunar (ver Figura 5-1). La Tabla 6-5 y la Tabla 6-6, muestran las amplitudes y las fases de las principales componentes armónicas para cada uno de los escenarios.

Tabla 6-4. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.

<b>OCEANO</b>			
<b>Componente Armónica</b>	<b>Periodo (horas)</b>	<b>Amplitud (m)</b>	<b>Fase (°)</b>
K1	23.93	0.21	26
O1	25.82	0.16	21
M2	12.42	0.07	281
MSF	354.37	0.06	93
Q1	26.87	0.06	350

Tabla 6-5. Amplitudes y fase por escenario en la boca de la laguna La Carbonera.

<b>Garganta</b>	<b>Escenario 1</b>		<b>Escenario 2</b>		<b>Escenario 3</b>		<b>Escenario 4</b>		<b>Escenario 5</b>	
<b>Comp. Armónica</b>	<b>Amplitud (m)</b>	<b>Fase (°)</b>								
K1	0.1	92	0.12	83	0.17	65	0.19	55	0.22	39
O1	0.06	72	0.08	63	0.12	46	0.14	37	0.16	22
M2	0.02	1	0.02	350	0.04	314	0.05	299	0.07	279
MSF	0.06	80	0.06	82	0.06	93	0.06	97	0.06	99
Q1	0.02	56	0.02	48	0.03	35	0.03	24	0.04	4

Tabla 6-6. Amplitudes y fase por escenario en el centro de la laguna La Carbonera.

<b>C. LAGUNA</b>	<b>Escenario 1</b>		<b>Escenario 2</b>		<b>Escenario 3</b>		<b>Escenario 4</b>		<b>Escenario 5</b>	
<b>Comp. Armónica</b>	<b>Amplitud (m)</b>	<b>Fase (°)</b>								
K1	0.09	95	0.12	85	0.16	68	0.17	59	0.19	43
O1	0.06	75	0.08	65	0.11	49	0.12	40	0.13	23
M2	0.01	14	0.02	358	0.03	331	0.04	323	0.05	300
MSF	0.06	80	0.06	81	0.05	86	0.05	84	0.06	82
Q1	0.02	57	0.02	50	0.03	36	0.03	24	0.04	4

Los cambios en la longitud de la barra de arena tienen un efecto significativo en el comportamiento de las ondas en la laguna. Al examinar los distintos escenarios, se observó que cuando la barra de arena tiene la máxima longitud (escenario 1), las

amplitudes de cada componente en la garganta disminuyen al menos un 50% en comparación con el valor en la frontera del modelo. Sin embargo, a medida que la longitud de la barra disminuye, las amplitudes y fases de la onda se acercan cada vez más al valor en la frontera.

Este resultado demuestra que la variación de la longitud de la barra de arena afecta significativamente el comportamiento de la onda, generando amplitudes más pequeñas debido a la energía que se pierde por la fricción del agua al fluir por el canal, en contraste con una onda que viaja sin la presencia del canal (escenario 5).

Una vez que la onda pasa por la garganta y llega al centro de la laguna, se observó una disminución aún mayor en las amplitudes de las componentes armónicas, aunque en menor proporción debido a la menor distancia recorrida a pesar de la somera profundidad de la laguna.

Al analizar las amplitudes en la boca y en el centro de la laguna, se encontró que las componentes con períodos más cortos experimentaron una mayor variación en la amplitud. Por ejemplo, la componente M2 con un período de 12.42 horas, aumentó su amplitud en un 250% al pasar de un escenario con barra completa a uno sin barra. Por otro lado, la componente MSF con un período de 354.37 horas, mantuvo una amplitud casi constante, independientemente de la longitud del spit, debido a su gran longitud en comparación con las dimensiones de la laguna.

En cuanto a las fases, se observó una clara disminución para todas las componentes, excepto para la MSF, lo que indica que la variación en la longitud de la barra de arena también afecta la fase de la onda.

Después de obtener las amplitudes y las fases de la señal, se obtuvieron los desfases de cada componente antes mencionada. Primero del océano a la garganta y después de la garganta al centro de la laguna.

La Tabla 6-7 y la Tabla 6-8 muestran los desfases obtenidos entre los transectos Garganta-Océano y Centro de la laguna-Garganta, respectivamente. En general, se observa que los desfases de la onda disminuyen para cada componente a medida que la onda se propaga desde la frontera norte del modelo hacia la entrada de la laguna (garganta). Sin embargo, una vez que la onda entra en la laguna, los desfases de la onda se vuelven no lineales con la disminución de la longitud de la barra, aunque para estos puntos de análisis, los desfases son menores que en el punto garganta-océano.

En particular, la componente lunisolar sinódica quincenal (MSF) presenta un desfase de más de 330 horas para todos los escenarios, lo que está relacionado con la no linealidad de la marea.

A diferencia de la mayoría de las componentes que experimentan un adelanto de la onda, la MSF sufre un retraso en el tiempo, por lo que se realizó una conversión a adelanto para poder observar mejor la tendencia.

Tabla 6-7 Desfase de las principales componentes armónicas del mar a la entrada de la Laguna

DEFASE Océano- Garganta	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
Comp. Armónica	Desfase									
	(°)	(Horas)								
K1	65	4.35	57	3.76	38	2.56	28	1.89	12	0.82
O1	51	3.65	42	3.03	25	1.81	16	1.13	1	0.06
M2	81	2.78	69	2.38	33	1.15	18	0.63	358	12.34
MSF	347	341.85	349	343.62	361	354.92	364	358.44	367	361.03
Q1	66	4.92	58	4.34	45	3.33	34	2.55	14	1.08

Tabla 6-8 Desfase de las principales componentes armónicas de la entrada al centro de la Laguna.

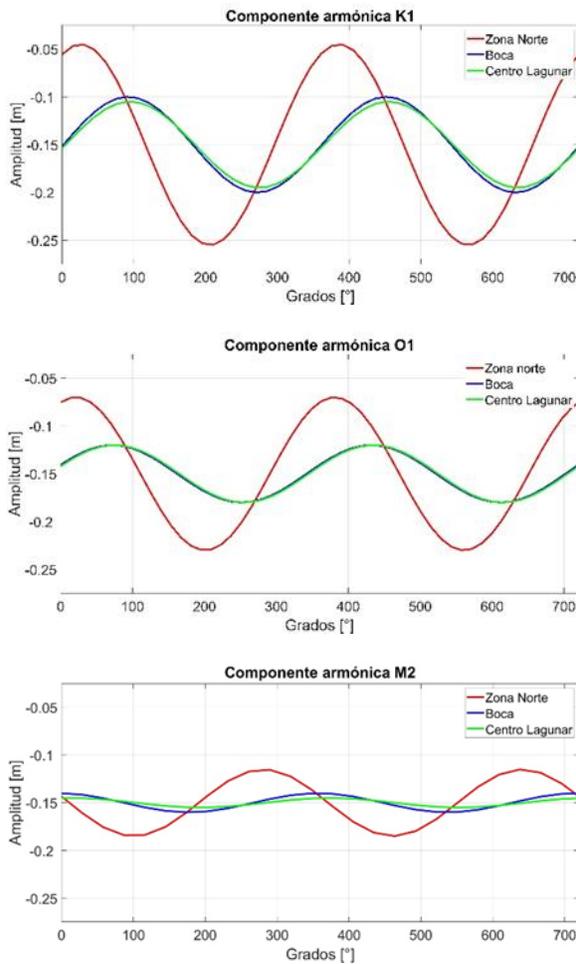
DEFASE Centro de laguna – Garganta	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
Comp. Armónica	Desfase									
	(°)	(Horas)								
K1	3	0.22	2	0.14	3	0.22	5	0.3	4	0.27
O1	3	0.22	2	0.13	2	0.15	3	0.19	1	0.09
M2	12	0.42	8	0.26	16	0.57	24	0.81	21	0.72
MSF	360	354	359	353.65	353	347.49	348	342.09	342	336.8
Q1	1	0.07	2	0.13	1	0.08	0	0.01	0	0

Para ilustrar de mejor manera los resultados, se tomaron en cuenta los escenarios 1 y 5, que muestran el comportamiento del flujo con una barra con longitud de 1.6 km y sin barra respectivamente.

En la Figura 6-8 se muestran gráficamente las amplitudes y las fases de onda, para las primeras 3 componentes armónicas que son K1, O1 y M2. Del lado izquierdo las componentes del escenario 1 y del lado derecho las componentes del escenario 5.

La línea roja representa la componente calculada en la zona norte, la cual se ve modificada en amplitud y fase en la garganta (línea azul) y en el centro de la laguna (línea verde).

## Escenario 1



## Escenario 5

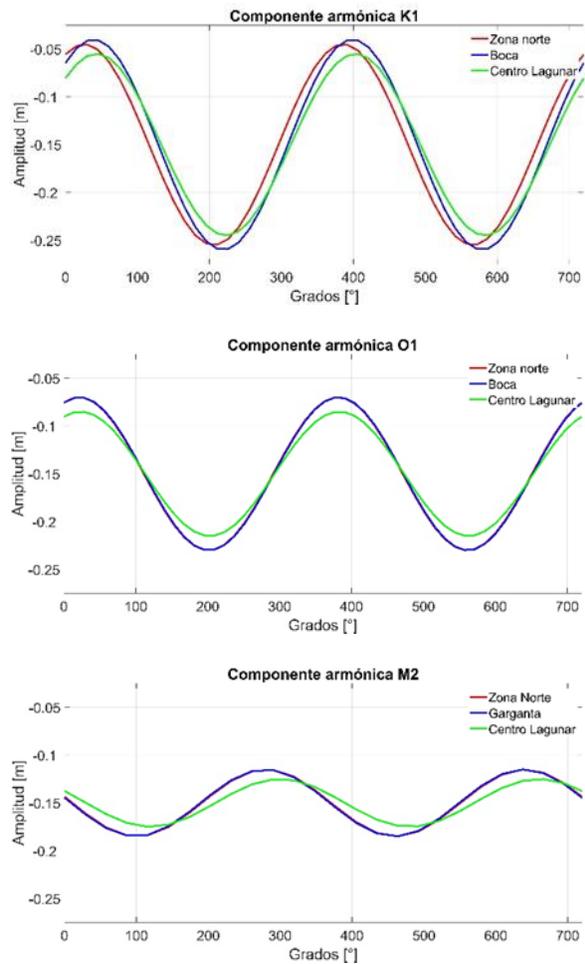


Figura 6-8. Componentes armónicas principales de serie de tiempo 2017-2018.

Como se puede ver, realizando una comparación entre escenarios, las amplitudes y fases de las componentes en la zona norte, nunca cambian. Esto es debido a que la onda como tal, es la que se está utilizando de condición de frontera O norte.

Por otro lado, se observa que las amplitudes y los desfases entre componentes a medida que se propagan en dirección a la laguna, son de mayor magnitud. Esto pasa dado que, al no existir barra, el intercambio de agua es más franco y no hay gran pérdida de energía en el escenario 5 como sucede en el escenario 1 por la existencia del canal (1.6 km).

### 6.1.5 Transporte de sedimentos

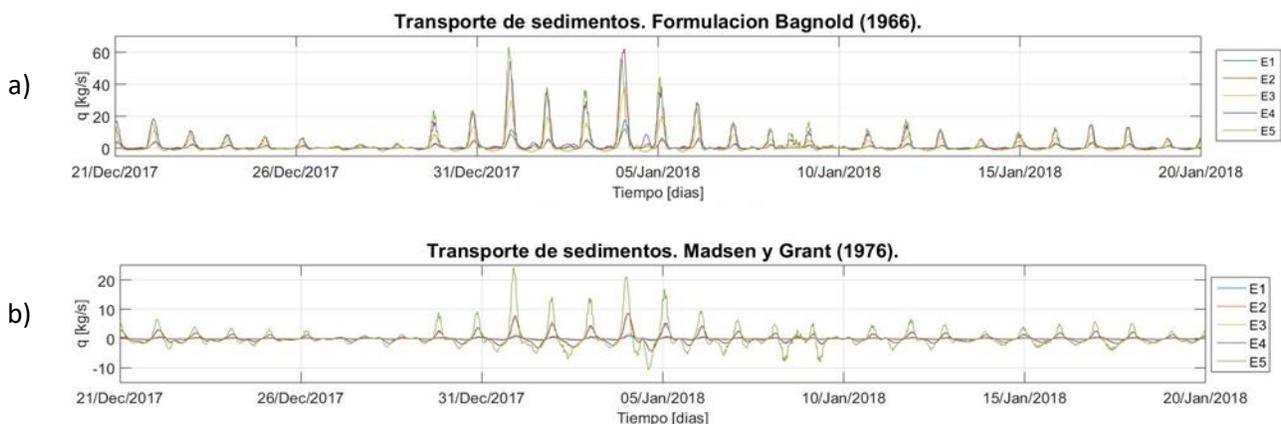
Las fuerzas que retienen el sedimento en un punto son la gravedad y la fricción entre los granos y las superficies sobre las que descansan (esfuerzo cortante crítico). Cuando la fuerza del agua es mayor que el esfuerzo cortante crítico, las partículas son levantadas y transportadas en la dirección del flujo de agua. Cuanto más alto se eleva las partículas, más se transportan.

Es importante evaluar el transporte de sedimentos en el sistema lagunar. La razón de ello es a causa de la relación que existe entre los cambios que genera la morfodinámica sobre la hidrodinámica y viceversa, tal como se ha mencionado en capítulos anteriores.

A continuación, se presentan los resultados de un análisis en el que se evaluó el potencial del transporte de sedimentos utilizando las formulaciones mencionadas en la sección 1.4.1. La Figura 6-9 y la Figura 6-10 presentan las gráficas de transporte obtenidas en la sección garganta y en la sección boca respectivamente.

Cada una de las formulaciones está adaptada a ciertas características físicas propias del lugar donde fueron probadas. Sin embargo, en el presente estudio, se utilizaron características propias del sistema, las cuales tienen variaciones con las descritas en los experimentos. Es por ello que la cantidad de transporte de sedimentos presenta grandes variaciones. Como resultado el análisis de transporte de sedimentos se realizó solo de forma cualitativa.

Como se puede ver en ambas figuras, la mayor tasa de transporte de sedimento se da en periodos de mareas vivas para todas las formulaciones. Las que muestran mayor semejanza en cantidad de transporte son Madsen y Grant (1976), Van Rijn en su última formulación (2007a) y la modificación de la misma (2007b). Por esta razón, para el análisis mostrado a continuación, solo se tomarán en cuenta dichas formulaciones.



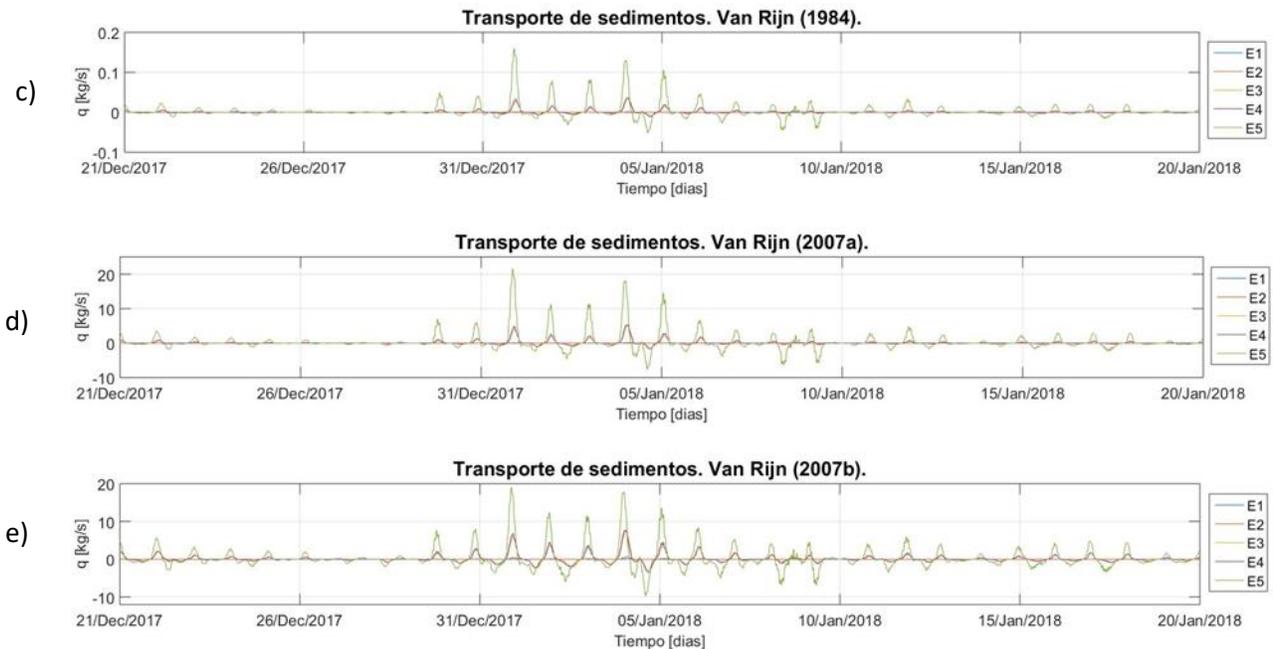
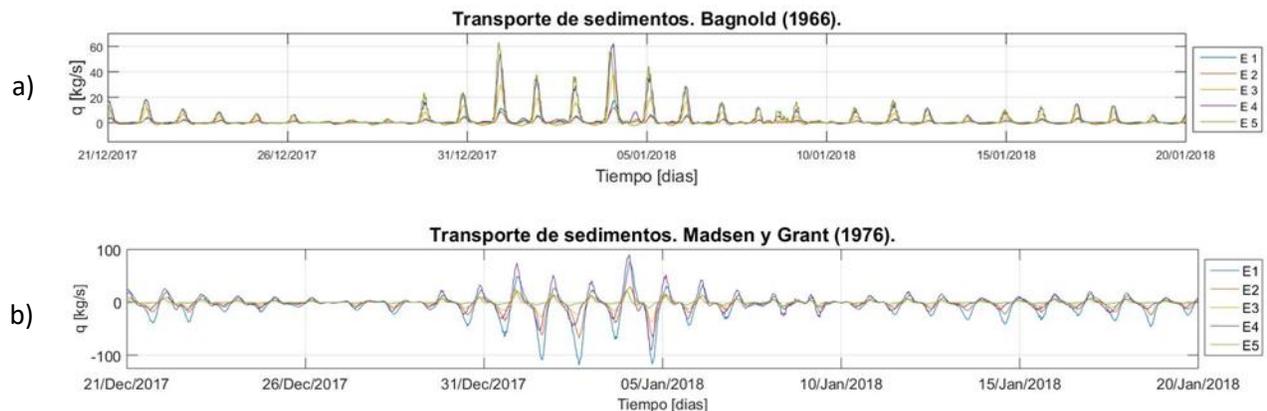


Figura 6-9. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Bagnold, 1966. b) Madsen y Grant, 1976. c) d) y e) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b.

Analizando el transporte en la sección garganta (Figura 6-9), se observa que en el escenario 5 (sin spit) es donde se da la mayor tasa de transporte de sedimento y de ahí comienza a disminuir hacia los primeros escenarios donde se da el incremento de la lengua. También se ve, como el transporte de flujo siempre supera al transporte de reflujos. La razón de que esto ocurra, se debe a que las formulaciones de transporte están basadas en la velocidad del flujo. Por lo tanto, el comportamiento de las velocidades es similar al comportamiento del transporte de sedimentos. La existencia de mayor transporte durante flujo en el E5 y su consecuente disminución hacia el escenario 1 sugiere que la lengua juega un papel importante, protegiendo la boca para que no importe sedimento adentro de la laguna, lo cual podría ocasionar el cierre de la boca.



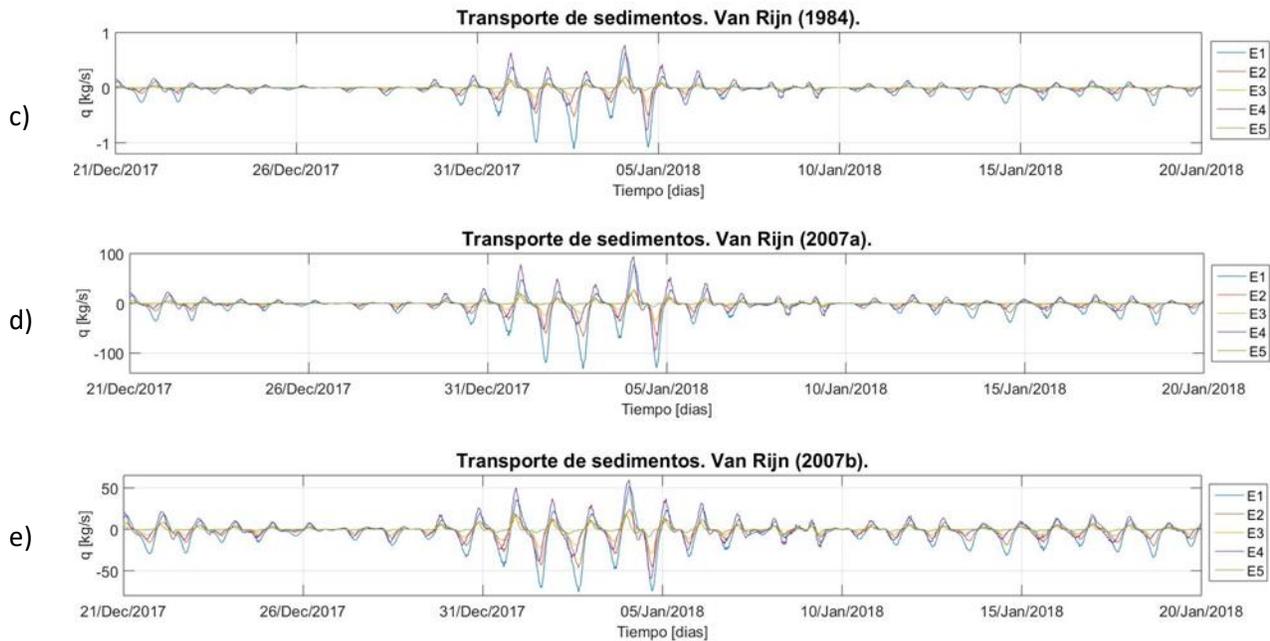


Figura 6-10. Transporte de sedimentos en la boca. a) Bagnold, 1966. b) Madsen y Grant, 1976. c) d) y e) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b.

Por otro lado, el transporte en la boca muestra mayores tasas de transporte flujo/reflujo en comparación con la garganta. El motivo de esto, de igual manera que en la sección garganta está relacionado con la magnitud de las velocidades. Es importante resaltar que las tasas de transporte de reflujo en esta sección son más grandes que las de flujo. Este suceso, está relacionado con un equilibrio dinámico del sistema. De no ocurrir esto, la laguna perdería su estabilidad y se cerraría.

Contrario a la sección de la garganta, las mayores magnitudes para flujo se dan en el escenario 4 y para reflujo en el escenario 1. De igual manera, los resultados sugieren que, además de que el transporte en reflujo es mayor, la presencia de la lengua (spit) hace que el transporte sea mayor cuanto mayor es la lengua, lo cual es favorable para la estabilidad del sistema.

Por último, retomando las formulaciones vistas, se realizó una comparación cualitativa del transporte de sedimentos en las secciones garganta y boca, tomando como referencia el escenario que presentaba mayor transporte (para cada modelo), en este caso el escenario 5 en flujo. La Figura 6-11 y la Figura 6-12 muestran los resultados obtenidos del análisis mencionado.

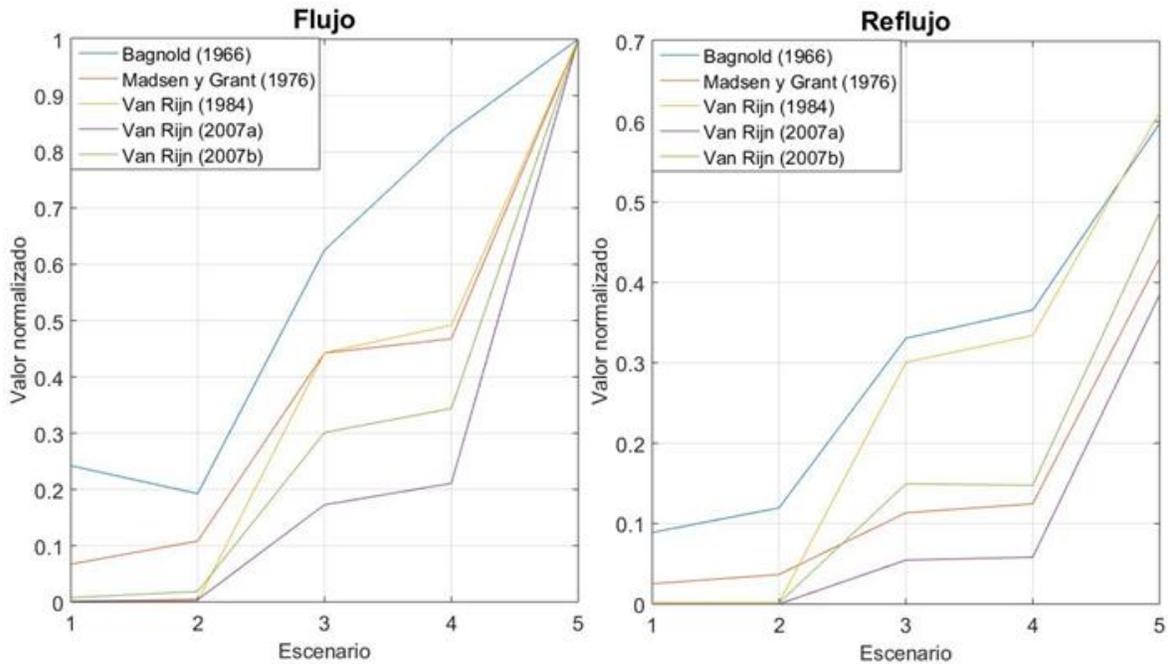


Figura 6-11. Valor normalizado en la sección garganta del transporte de sedimentos para todas las formulaciones.

El transporte de sedimentos en flujo siempre es mayor que en reflujo en todos los escenarios. A medida que la lengua de la laguna crece (hacia el escenario 1), el transporte de sedimentos disminuye gradualmente hasta que la cantidad que pasa por la sección es mínima. Esto sugiere que existe un límite natural para el crecimiento de la barra de arena, más allá del cual el crecimiento se ralentiza, lo que puede tener implicaciones importantes para la gestión y conservación de los sistemas lagunares y costeros.

Además, se observa que el transporte de reflujo en la sección garganta siempre es aproximadamente el 50% que el de flujo, y conforme la lengua va creciendo, dicho transporte es cada vez menor. Los resultados indican que el flujo de agua en la laguna es más dominante que el reflujo, lo que lleva a una acumulación de sedimentos en la garganta y, por lo tanto, a un crecimiento de la barra de arena.

En los escenarios E5 al E4, se produce un aumento significativo en el transporte de sedimentos, lo que a su vez contribuye al crecimiento acelerado de la barra. Sin embargo, una vez que la longitud de la lengua alcanza alrededor de 400 metros, el crecimiento de la barra comienza a disminuir, incluso si el transporte de sedimentos sigue siendo alto. Esto puede deberse a varios factores, como la disminución en la disponibilidad de sedimentos en la zona, el aumento de la competencia entre las corrientes o la disminución de la energía de la corriente en la zona de la barra.

Finalmente, se observa que del escenario 4 al 5 es cuando se da el mayor salto de transporte tanto para flujo como para reflujos. Esto sucede porque cuando la barra de arena comienza a formarse, la morfodinámica de la zona cambia y esto reduce la capacidad del agua para transportar sedimentos en intervalos regulares.

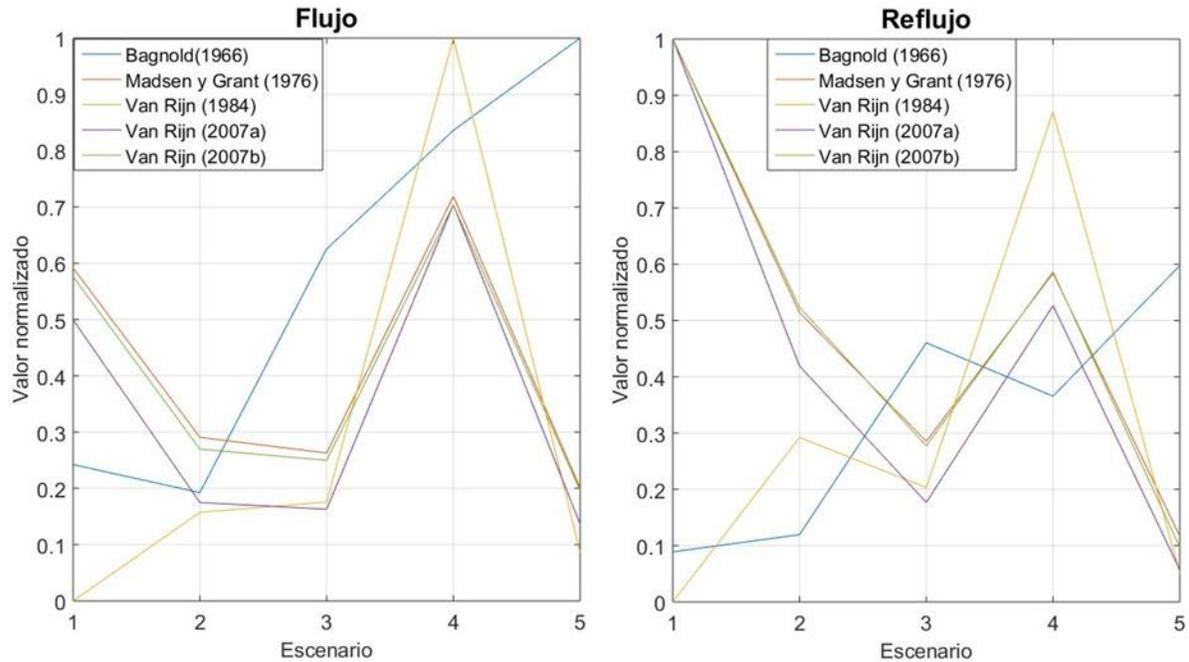


Figura 6-12. Valor normalizado en la sección boca del transporte de sedimentos para todas las formulaciones.

En la Figura 6-12 se observa que, en la sección de la boca, es el reflujos el que transporta la mayor cantidad de sedimentos y esto ocurre cuando la lengua tiene su mayor tamaño. Este comportamiento se debe a las velocidades de reflujos más elevadas, lo que favorece al sistema. Es importante mencionar que en el escenario 1, donde el reflujos es mayor, la boca tiene una dominancia al reflujos a través del cual se facilita la exportación de sedimentos y el sistema se encuentra más estable. De no ser así, el canal se azolvaría y se cerraría la laguna.

En cuanto al transporte de sedimentos para el flujo y reflujos, se observa una disminución conforme la lengua disminuye, excepto en el escenario 4, donde en ambos casos se ve un crecimiento. Este crecimiento está relacionado con un incremento en las velocidades, ya que en esa sección hay una disminución en la sección transversal y un consecuente aumento de la velocidad, acompañado por una profundización del canal que hace que la fricción sea relativamente menor.

La existencia del spit sugiere un sistema más estable, ya que ayuda a que el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico interactúen de tal manera que entre ambos encuentren un equilibrio dinámico del sistema. En conclusión, estos

resultados resaltan la importancia de considerar la interacción entre la hidrodinámica y la morfodinámica para entender la dinámica de las lagunas costeras y su gestión adecuada.

## 6.2 Marea hipotética

Un escenario hipotético es aquel en el cual se pueden modelar y evaluar distintos conjuntos de suposiciones con el fin de encontrar el comportamiento de un sistema determinado. En esos casos, dada la complejidad de los procesos hidrodinámicos y todos los factores que participan, se procede a simplificar el problema (despreciando términos en las ecuaciones de gobierno, fijando variables o estimándolas con base en estudios previos, simplificando la geometría del dominio, simplificando los forzamientos), con el fin de aislar alguno(s) proceso(s) y evaluar su importancia relativa y la respuesta del sistema. En este caso se analiza la hidrodinámica usando una marea simplificada, hipotética, compuesta por sólo una señal armónica, es decir una señal monocromática. Para analizar las variaciones de la propagación de la marea, la capacidad de renovar volúmenes de agua, así como la capacidad de expulsar o no material y la estabilidad del sistema, se realizó una metodología que consistió en la generación de 2 mareas hipotéticas.

A pesar de que el régimen en el que se encuentra la zona de estudio es diurno, estas 2 nuevas señales de marea son de régimen semidiurno, M2, más su primer armónico, M4, para evaluar su dominancia al flujo o al reflujos de acuerdo a varios estudios previos (e.g., Friedrichs y Aubrey 1988, Speer y Aubrey, 1985, Salles et. al, 2005). Esto debido a que, con la propagación de la onda, la transmisión de bajas frecuencias a altas frecuencias, causadas por el asomeramiento, puede generar asimetría de marea en las velocidades. A continuación, en la Tabla 6-9 se describen las amplitudes y las fases de estas mareas.

Tabla 6-9. Características de señal de mareas hipotéticas.

	Amplitud [m]		Fase [°]	
	M2	M4	M2	M4
Marea hipotética 1	0.2	0.1	0	-90
Marea hipotética 2	0.2	0.1	0	0

Mediante el análisis de estas mareas hipotéticas, se pudo determinar la velocidad de la corriente generada por la marea en cuestión. Como se vio en capítulos anteriores, con el cálculo de la fase relativa se puede determinar si la laguna tiene tendencia presentar mayores velocidades durante el flujo o el reflujos. Entonces, de acuerdo a (Speer y Aubrey, 1985):

$$\text{Fase relativa Marea hipotética 1} = 2(0) - (-90) = 90$$

$$\text{Fase relativa Marea hipotética 2} = 2(0) - (0) = 0$$

Para evaluar los efectos de distintas condiciones de mareas en el comportamiento del modelo, se llevaron a cabo dos simulaciones con mareas hipotéticas: la primera sin dominancia de flujo o reflujo (marea hipotética 1) y la segunda con una dominancia al flujo (marea hipotética 2). De esta manera, se obtuvieron nuevos escenarios de simulación para analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes condiciones de marea, tal como se hizo previamente con la marea real.

### 6.2.1 Prisma de marea

El prisma de marea en el caso de las mareas hipotéticas muestra un comportamiento similar al analizado para la marea real. En la Figura 37 se observa que los volúmenes de reflujo siempre son mayores que los de flujo, debido a aporte de agua dulce. De hecho, despreciando evapotranspiración, en este caso de la marea hipotética la diferencia entre dichos volúmenes corresponde al volumen de entrada de agua dulce al sistema. Además, los paneles superiores muestran que conforme la longitud de la lengua disminuye (del escenario 1 al 5), el prisma de marea en ambos sentidos aumenta de manera importante (233% entre el escenario 1 y el 5, lo que equivale a un aumento de  $0.00015645 \text{ m}^3/\text{s}$  durante la duración de 12.42 h de estos ciclos hipotéticos de la marea, y también a un aumento promedio de  $0.00009778 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada metro de reducción de la lengua), lo cual está asociado a una menor disipación de energía cuando el hidráulicamente ineficiente canal se hace más corto.

Por otro lado, los paneles inferiores de la Figura 6-13 muestran que el volumen neto (diferencia entre volumen de entrada y volumen de salida), permanece casi constante, aunque también se observa una ligera tendencia a aumentar conforme la longitud de la lengua disminuye (variación de solo 0.045% entre el escenario 1 y el 5, lo que equivale a un aumento de  $1.9442\text{e-}08 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir  $1.2151\text{e-}11 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada metro de reducción de la lengua). Sin embargo, analizando con más detenimiento esos paneles inferiores, se puede notar que el modelo sugiere un decremento de volumen del escenario 3 al 4 para ambas mareas hipotéticas. Si bien, esta disminución de volumen no se ve reflejada en la marea real para el cálculo del prisma de mareas, en el cálculo de las velocidades se hace evidente que la sección transversal colocada en el escenario 4, tiene características particulares.

Es importante destacar que, en general, el volumen de la marea hipotética 2, donde el flujo predomina sobre el reflujo, es mayor que el volumen de la marea hipotética 1, donde ocurre lo contrario. Sin embargo, es relevante señalar que a medida que avanzamos en los diferentes escenarios, a partir del escenario 3, se observa un incremento significativo en el volumen de la marea hipotética 2. Esto implica que a

medida que la longitud de la lengua se reduce, la marea hipotética con flujo dominante experimenta mayores incrementos en su volumen. A través de la ecuación de continuidad, podemos establecer una relación directa entre la velocidad de flujo y el área de una sección transversal. Es decir, a medida que la velocidad del flujo aumenta, el área transversal disminuye y viceversa.

En el caso de los escenarios de mareas hipotéticas, se observa que los volúmenes de flujo aumentan a medida que avanzamos hacia el escenario 5. Esto se debe a que el ancho de la sección transversal va aumentando, lo que resulta en un incremento en el área de la sección. Sin embargo, es importante señalar que este aumento no sigue una relación lineal. La razón detrás de esto es que el sistema es complejo y están involucrados factores adicionales como la rugosidad, la viscosidad y los cambios en el fondo del canal. Estos factores adicionales contribuyen a aumentar la cantidad de volumen para los últimos 3 escenarios, lo que explica el incremento no lineal observado en los volúmenes de flujo.

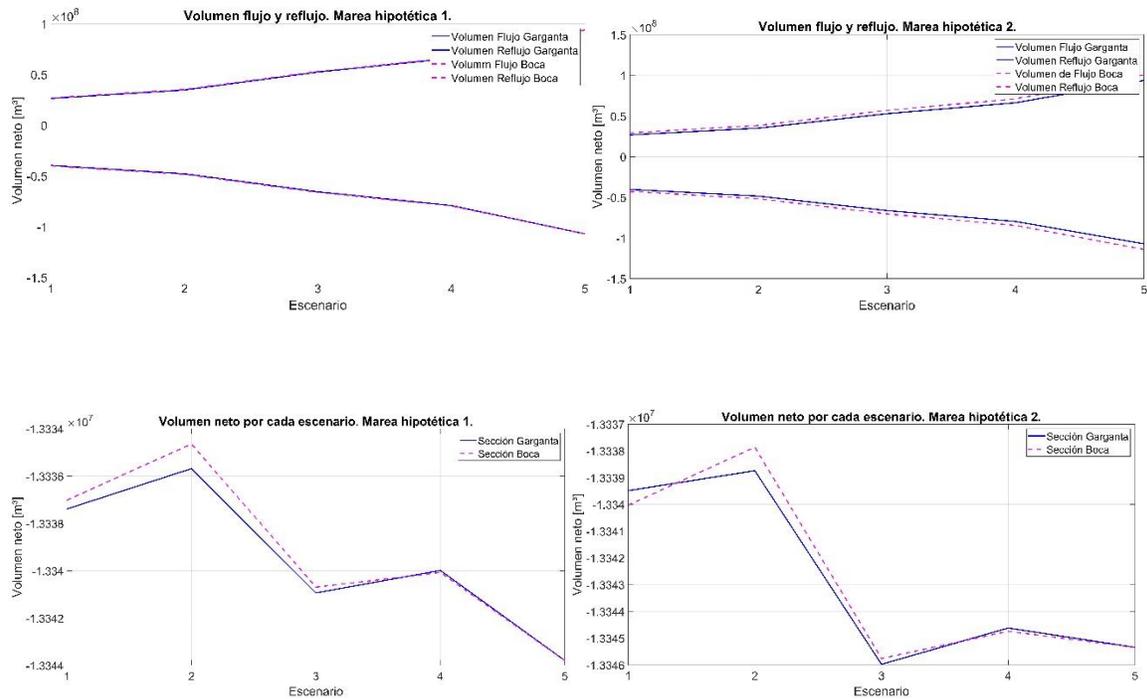


Figura 6-13. Relación Flujo-Reflujo por cada escenario. Línea continua representa la sección de la garganta y la línea punteada la sección de la boca.

En este estudio, se realizó el cálculo de la relación entre el volumen de reflujo ( $V_{\text{Reflujo}}$ ) y el volumen de flujo ( $V_{\text{Flujo}}$ ) con el fin de determinar la magnitud en la que el volumen de reflujo supera al volumen de flujo en función de la longitud de la lengua. Los resultados se muestran en la Figura 6-14 donde se observa un comportamiento similar al de la marea real para ambas mareas hipotéticas

simuladas. En otras palabras, a medida que la longitud de la lengua disminuye, la proporción  $V_{\text{Reflujo}}/V_{\text{Flujo}}$  también disminuye, lo que indica que una laguna con una lengua más corta tiende a exportar menos masas de agua. Sin embargo, es importante destacar que la capacidad de importar o exportar sedimento no depende únicamente de las masas de agua, sino también de las velocidades del flujo y el reflujo, lo cual se abordará en la siguiente sección de este estudio. Por otro lado, al considerar que la marea hipotética 2 se generó con una dominancia al flujo (fase relativa =  $0^\circ$ ), lo que indica una tendencia a ser un sistema importador de sedimento, se observa que efectivamente tiene una proporción  $V_{\text{Reflujo}}/V_{\text{Flujo}}$  menor (panel b de la Figura 6-14) en comparación con la marea hipotética 1 (panel a). Este hallazgo sugiere que el sistema lagunar es sensible al régimen de marea con el que interactúa.

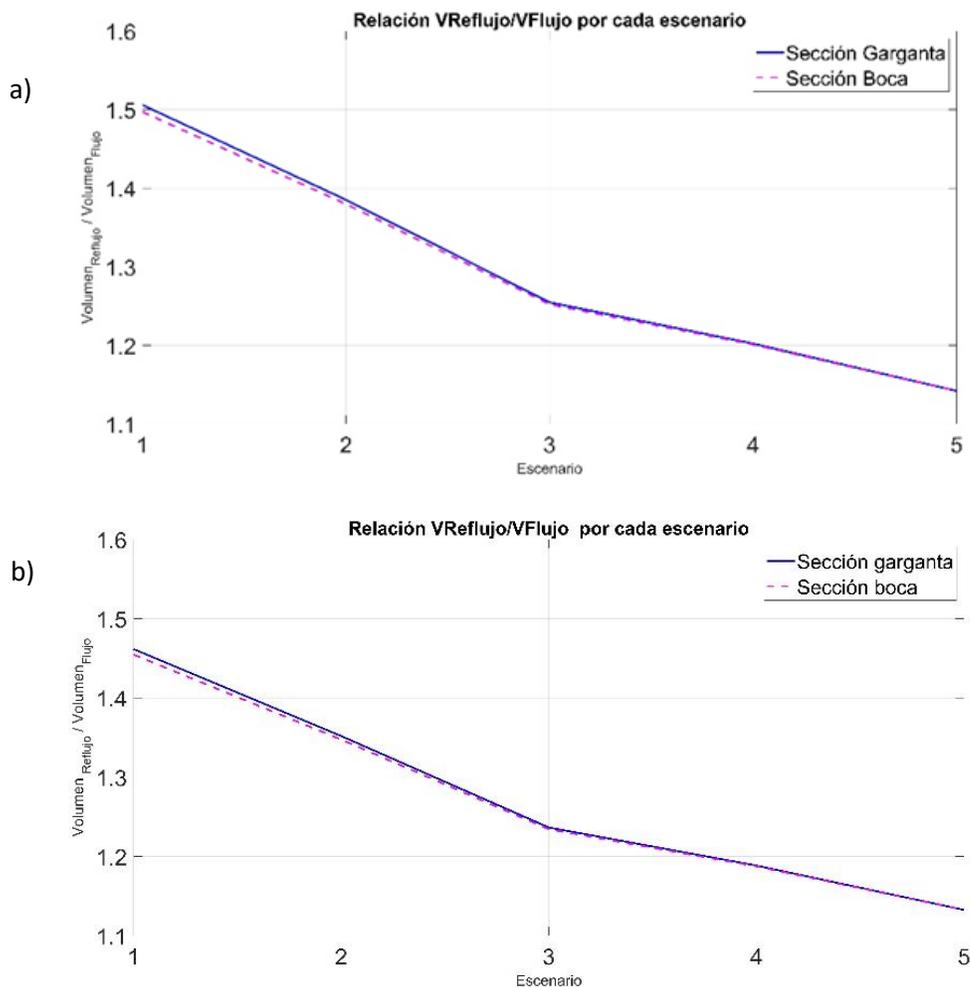


Figura 6-14. Relación  $V_{\text{Reflujo}}/V_{\text{Flujo}}$  para cada escenario, en la boca y en la garganta. El panel a) corresponde al forzamiento de marea hipotética 1 y el b) al forzamiento de la marea hipotética 2.

## 6.2.2 Velocidades

La velocidad de una señal de marea, que contiene únicamente la componente principal  $M_2$  y su primer armónico  $M_4$ , muestra un comportamiento simétrico. Esto significa que la velocidad de la marea sigue un patrón equilibrado y uniforme. Para ilustrar este fenómeno, se presentan en la Figura 6-15 y en la Figura 6-16 los perfiles de velocidad correspondientes a las dos mareas hipotéticas analizadas, tanto en la sección de la garganta como en la boca del área de estudio. Estas figuras permiten visualizar cómo varía la velocidad en cada uno de los escenarios analizados, brindando una representación detallada de los cambios en el flujo a lo largo del ciclo de marea.

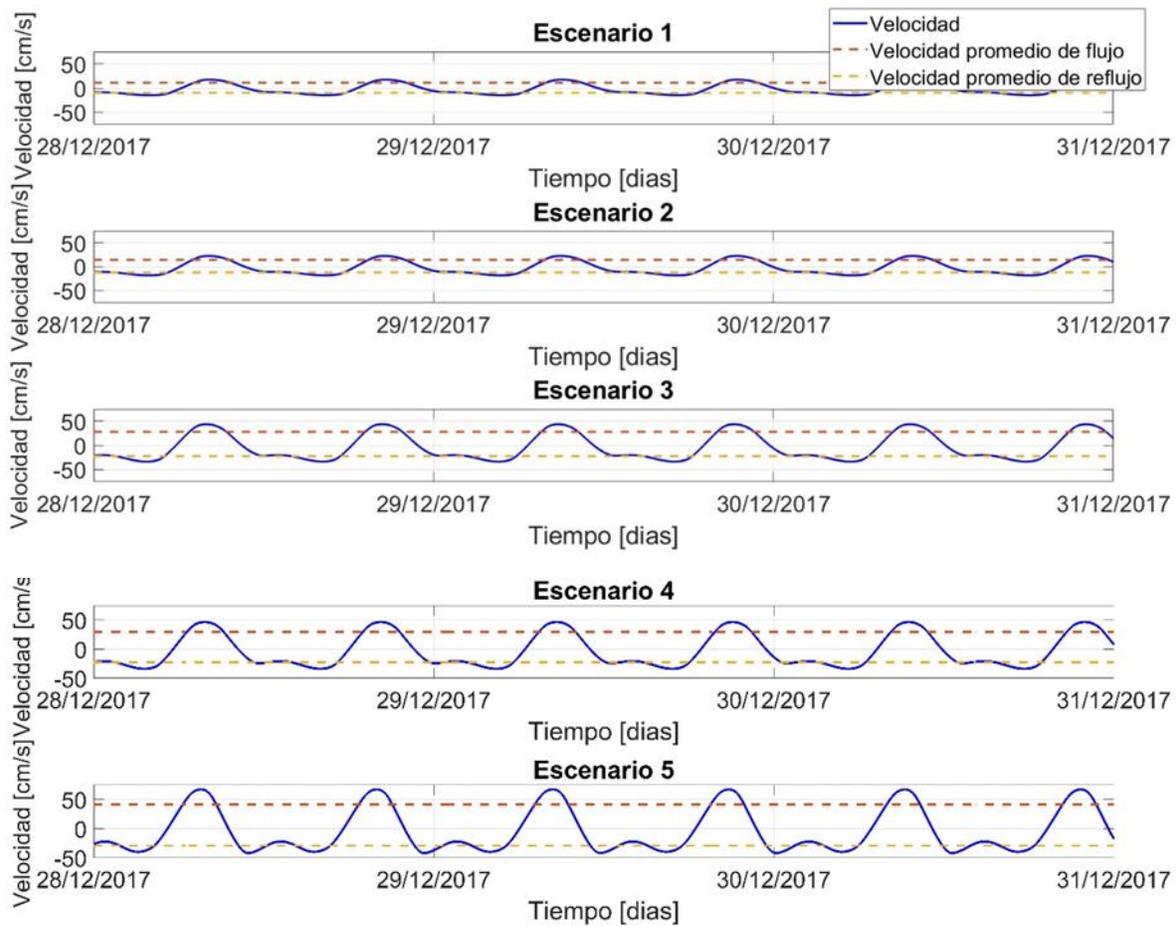


Figura 6-15. Velocidad en las secciones Garganta y Boca para Marea hipotética 2. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.

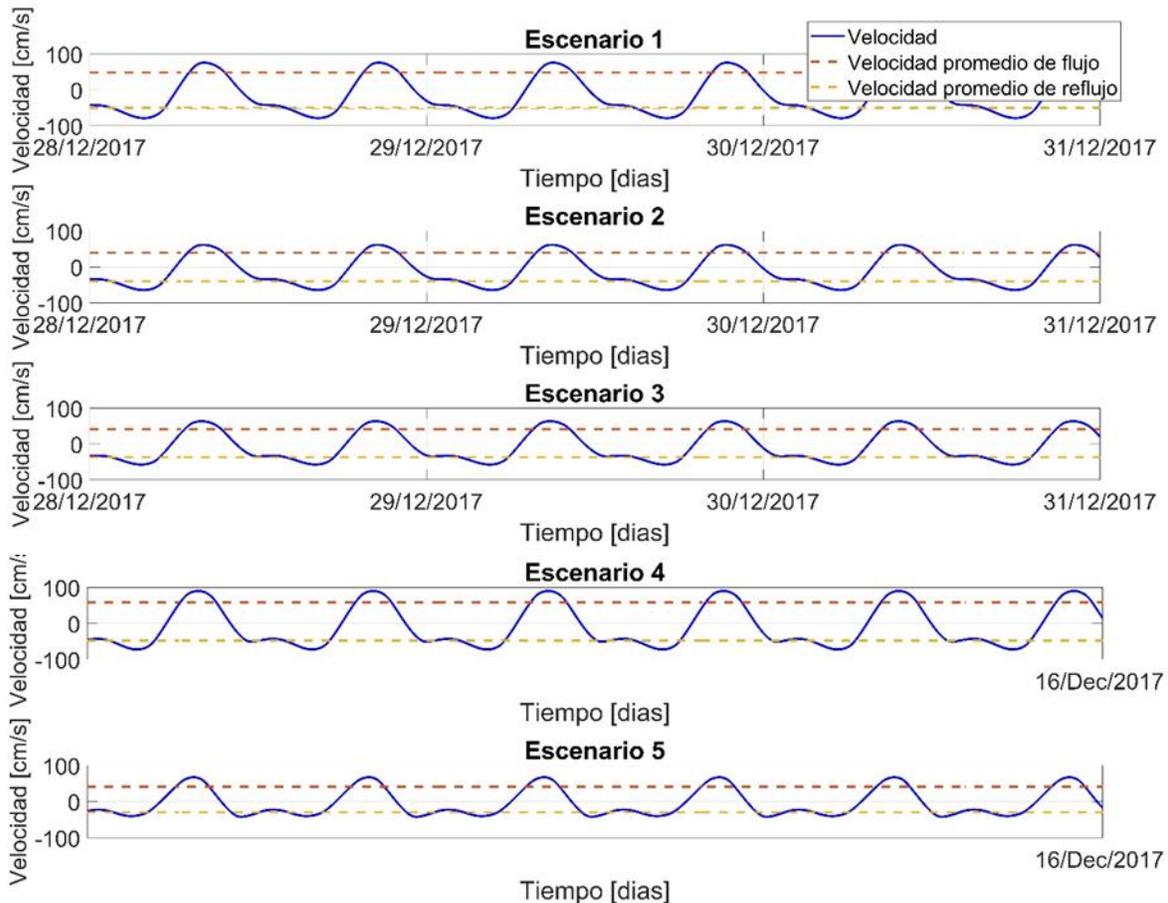


Figura 6-16. Velocidad en las secciones Garganta y Boca para Marea hipotética 2. Línea continua azul representa la velocidad, línea punteada roja es la velocidad promedio de flujo y línea punteada amarilla la velocidad promedio de reflujos.

Las tablas 16 y 17 proporcionan información detallada sobre las velocidades en las secciones garganta y boca para diferentes escenarios de las mareas hipotéticas. En la sección garganta, se observa un patrón consistente en ambas mareas hipotéticas: a medida que la longitud del spit disminuye, las velocidades del flujo y reflujos aumentan de manera progresiva. En la marea hipotética 1, las velocidades máximas registradas en flujo van desde 18.7 cm/s hasta 67.62 cm/s, y en reflujos van desde 14.77 hasta 42.32, mientras que en la marea hipotética 2, las velocidades máximas en flujo van desde 13.67 cm/s hasta 64.15 cm/s. Estos datos indican que la longitud del spit tiene una influencia significativa en la magnitud de las velocidades en la sección garganta.

Por otro lado, en la sección boca, los escenarios 1 y 4 muestran las velocidades más altas en ambas mareas hipotéticas. Esto se debe a las menores secciones transversales en esta área, lo que provoca un mayor flujo y reflujos de agua. En el escenario 1, para flujo las velocidades máximas oscilan entre 79.93 cm/s, mientras

que en el escenario 4, son alrededor de 90.95 cm/s. Estos resultados resaltan la importancia de la geometría del área en el comportamiento de las velocidades en la sección boca.

En general, los datos de la Tabla 6-10 Tabla 6-11 demuestran que las velocidades en las secciones garganta y boca siguen patrones consistentes y comparables a los de la marea real. Estos hallazgos resaltan la relevancia de la longitud del spit y la geometría del área en la dinámica de las velocidades del flujo y reflujo en el sistema estudiado.

Tabla 6-10. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.

Marea Hipotética 1								
Escenario	Sección garganta				Sección Boca			
	Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)		Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)	
	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo
1	11.03	-9.7	18.7	-14.77	48.77	-49.51	79.93	-78.74
2	14.28	-11.8	23.61	-17.97	39.86	-39.94	63.82	-63.4
3	27.93	-22.1	44.53	-33.67	41.32	-36.48	64.71	-57.07
4	29.93	-22.81	47.28	-33.91	58.07	-47.75	90.95	-72.22
5	41.69	-29.34	67.62	-42.32	41.69	-29.34	67.62	-42.32

Tabla 6-11. Velocidades de corriente para flujo y reflujo en cada escenario.

Marea Hipotética 2								
Escenario	Sección garganta				Sección Boca			
	Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)		Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)	
	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo
1	12.13	-10.28	20.36	-13.67	53.23	-51.85	85.75	-71.51
2	15.55	-12.68	25.56	-17.35	42.99	-42.11	68.12	-60.16
3	29.32	-23.48	46.94	-34.92	43.42	-38.81	68	-60.34
4	30.75	-24.32	48.91	-38.64	59.82	-51.51	94.16	-85.16
5	41.91	-32.12	68.73	-64.15	41.91	-32.12	68.73	-64.15

El estudio realizado con la marea semidiurna y la marea hipotética 2, que presenta una tendencia al flujo, permitió evaluar el impacto del régimen de marea en la hidrodinámica y morfodinámica de la zona. Se utilizó la marea semidiurna como punto de referencia para comparar los resultados obtenidos.

Se observa que tanto en la marea hipotética 1 como en la marea hipotética 2, el régimen de marea influye principalmente en la magnitud de las velocidades, mientras que la tendencia general sigue siendo similar. Esto significa que la dirección y patrón de flujo y reflujos siguen siendo consistentes en ambas mareas hipotéticas.

Sin embargo, al comparar estas mareas hipotéticas con la marea real, se puede observar que en el régimen semidiurno las variaciones entre los diferentes escenarios son más significativas. Esto implica que el régimen de marea semidiurno tiene un impacto más pronunciado en la hidrodinámica y morfodinámica de la zona en comparación con las mareas hipotéticas. Esto implica que el régimen de marea semidiurno tiene un impacto más significativo en la hidrodinámica y morfodinámica de la zona en comparación con las mareas hipotéticas. La interacción compleja entre las componentes de la marea, la geometría del canal y el lecho marino. En el caso de la marea real, la presencia de componentes no lineales conduce a la pérdida de energía a medida que fluyen a través del canal. Sin embargo, en las mareas hipotéticas, al considerar solo dos componentes armónicas, esta pérdida de energía no se produce.

Esta diferencia en la dinámica de las mareas puede tener un impacto significativo en la hidrodinámica y morfodinámica de la zona. La presencia de componentes no lineales en la marea real puede generar cambios más pronunciados en las variables hidrodinámicas y morfodinámicas, lo que explica las diferencias observadas entre las mareas hipotéticas y la marea real.

### **6.2.3 Duraciones**

Las duraciones para las mareas hipotéticas analizadas son más largas en reflujos que en flujos para todos los escenarios simulados. La principal diferencia que existe entre estas, y las ya calculadas con la marea real, es que muestra un comportamiento más uniforme ya que se está introduciendo como forzamiento una marea constante que no presenta mareas vivas y mareas muertas.

La asimetría de mareas en la sección para ambas secciones (garganta y boca) con las 2 mareas hipotéticas se presenta en el escenario 5. Como se puede ver en la Tabla 6-12 y la Tabla 6-13, dicho escenario es el que tiene un promedio menor de duraciones de flujo y un promedio mayor de duraciones de reflujos.

Tabla 6-12. Duraciones de flujo y reflujo (máxima y promedio) por cada escenario.

Marea Hipotética 1								
Escenario	Sección garganta				Sección Boca			
	Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)		Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)	
	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo
1	5	4.46	8	7.67	5	4.48	8	7.63
2	5	4.51	7.83	7.62	4	4.54	7.83	7.6
3	4.83	4.58	7.83	7.55	4.83	4.6	7.83	7.54
4	4.66	4.52	7.83	7.61	4.66	4.53	7.83	7.6
5	4.5	4.28	8.16	7.85	4.5	4.28	8.16	7.85

Tabla 6-13. Duraciones de flujo y reflujo (máxima y promedio) por cada escenario.

Marea Hipotética 2								
Escenario	Sección garganta				Sección Boca			
	Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)		Velocidades Medias (cm/s)		Velocidades Máximas (cm/s)	
	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo	Flujo	Reflujo
1	5.1	4.5	8.33	7.78	6.66	5.24	8.33	8.02
2	5	4.58	8.33	7.7	6.33	6.07	6.33	6.06
3	5	4.7	8	7.58	6.83	6.31	8.5	7.55
4	5	4.73	7.83	7.55	7.16	5.32	7.16	6.95
5	4.66	4.55	8.16	7.82	4.66	4.55	8.16	7.82

Analizando el comportamiento de las duraciones en el sistema lagunar como la proporción entre las duraciones de flujo y reflujo está aumentando a medida que la barra de arena crece, esto significa que la duración del reflujo se está volviendo relativamente más larga en comparación con la duración del flujo. En otras palabras, el sistema lagunar está experimentando un período de reflujo más prolongado en relación con el período de flujo. Este aumento en la proporción de duraciones puede tener varias implicaciones. En primer lugar, sugiere que el crecimiento de la barra de arena está influyendo en la dinámica del flujo y el reflujo, alargando la fase de reflujo. Esto podría estar relacionado con cambios en la geometría del canal y el comportamiento del flujo a medida que se encuentra con la barra de arena.

Además, el aumento en la proporción de duraciones podría afectar la morfodinámica del sistema lagunar. Un período de reflujo más prolongado puede influir en el transporte de sedimentos, la erosión y la deposición en la zona.

Por otro lado, al comparar las duraciones y tendencias entre las diferentes mareas hipotéticas, se observa una similitud en sus patrones. Esto implica que el desfase

entre las componentes M2 y M4 no parece afectar la asimetría de las mareas de manera significativa. A pesar de esta diferencia en la fase entre las componentes, las duraciones de flujo y reflujos siguen comportándose de manera similar, lo que sugiere que otros factores, como la geometría del sistema y las interacciones entre las corrientes y el fondo, son los principales determinantes de la asimetría de las mareas.

#### 6.2.4 Amplitudes y fases de marea

La amplitud y la fase de marea en un régimen semiduro han sido estudiadas en diversas publicaciones debido a la fuerte interacción de asimetría que se ha encontrado.

Para poder aplicar las metodologías obtenidas por (Speer y Aubrey, 1985; van de Kreeke y Robaczemska, 1993), se realizó un estudio en donde se obtuvieron las amplitudes y los desfases de la marea (en grados y en horas) para la zona norte, la boca y el centro de la laguna en cada una de las mareas hipotéticas.

Para la extracción de las componentes armónicas de importancia que se encuentran en el área de estudio se realizó, de igual manera que para la marea real, un análisis armónico de la señal de marea con el programa *t\_tide*.

A continuación, se muestran la Tabla 6-14 Tabla 6-15 y la Tabla 6-16 en las cuales podemos observar el cambio en las amplitudes y fases obtenidas para todos los escenarios. De esta manera se podrá observar cómo la barra de arena afecta estos parámetros para las mareas hipotéticas 1 y 2.

Tabla 6-14. Amplitudes y fase en punto de propagación de la onda.

Océano	Comp. Armónica	Periodo (horas)	Amplitud (m)	Fase (°)
Marea Hip 1	M2	12.42	0.203	3
	M4	6.21	0.106	275
Marea Hip 2	M2	12.42	0.203	2
	M4	6.21	0.106	5

Tabla 6-15. Amplitudes y fase por escenario en la garganta de la laguna La Carbonera.

Garganta	Comp. Armónica	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
		Amplitud (m)	Fase (°)								
Marea Hip 1	M2	0.048	61	0.063	53	0.1	40	0.131	29	0.195	6
	M4	0.011	353	0.016	342	0.03	318	0.045	303	0.096	279
Marea Hip 2	M2	0.047	70	0.066	64	0.089	57	0.11	48	0.147	28
	M4	0.012	18	0.018	55	0.025	5	0.034	357	0.061	337

Tabla 6-16. Amplitudes y fase por escenario en el centro de la laguna La Carbonera.

Laguna	Comp. Armónica	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
		Amplitud (m)	Fase (°)								
Marea Hip 1	M2	0.047	70	0.06	65	0.09	57	0.11	48	0.15	28
	M4	0.12	18	0.016	14	0.03	5	0.03	357	0.06	337
Marea Hip 2	M2	0.05	82	0.064	77	0.09	67	0.12	58	0.19	6
	M4	0.013	86	0.017	82	0.03	75	0.03	68	0.1	11

Al comparar la marea hipotética 1 (MH1) con la marea hipotética 2 (MH2), se pueden observar diferencias en las amplitudes y fases de las componentes M2 y M4 en ambos escenarios.

En términos de amplitud, MH2 presenta reducciones en comparación con MH1. Por ejemplo, la amplitud de la componente M2 en MH2 es aproximadamente un 79% de la amplitud correspondiente en MH1. Del mismo modo, la amplitud de la componente M4 en MH2 es aproximadamente un 64% de la amplitud correspondiente en MH1.

Para las fases, también existen diferencias entre MH1 y MH2. En promedio, las fases de la componente M2 en MH2 están aproximadamente un 23% más adelantadas en comparación con MH1. Por otro lado, las fases de la componente M4 en MH2 están aproximadamente un 28% más adelantadas en comparación con MH1.

En cuanto a las diferencias entre los distintos escenarios en cada marea hipotética, se pueden observar variaciones en las amplitudes y fases de las componentes M2 y M4. Por ejemplo, a medida que se pasa del escenario 1 al escenario 5 en MH1, las amplitudes de ambas componentes disminuyen en promedio en un 35%. Además, las fases presentan cambios significativos, con un adelanto promedio de alrededor de un 76% para la componente M2 y un adelanto promedio de aproximadamente un 18% para la componente M4.

Estos hallazgos indican que la presencia de una barra de arena afecta significativamente la amplitud de las componentes de marea, con una mayor reducción en la componente M4 en comparación con la M2. Asimismo, la longitud de la barra influye en los cambios de amplitud y fase de las ondas a medida que se propagan hacia el interior de la laguna.

Analizando la ecuación 3 vista en el capítulo 1.4.5

Para la marea hipotética 1 (MH1):

$$2M_2 - M_4 = 2(0.195) - 0.096 = 0.294$$

Para la marea hipotética 2 (MH2):

$$2M_2 - M_4 = 2(0.147) - 0.061 = 0.233$$

Observamos que, en ambos casos, los valores obtenidos están en el rango de " $0 < 2M_2 - M_4 < 180^\circ$ ", lo cual indica dominancia al flujo según la clasificación propuesta por Friedrichs (1988). Esto implica que estas mareas hipotéticas están caracterizadas por flujos más cortos y corrientes de mayor velocidad.

Para analizar de manera más clara los desfases que presentan las componentes armónicas, así como la pérdida de energía que se ve reflejada en la amplitud de esta, se realizaron cálculos de desfase en grados y horas.

A continuación, la Tabla 6-17 y la Tabla 6-18 muestran los desfases obtenidos de Garganta-Océano y Laguna-Garganta, respectivamente. En general, los desfases para ambas mareas armónicas tienden a disminuir cuando la longitud de la barra se va acortando. La única excepción a esto se da entre los escenarios 2 y 3 (marea hipotética 1, componente armónica  $M_4$ ) en el trayecto de la señal garganta-laguna.

Tabla 6-17. Desfase en principales componentes armónicas de la Laguna La Carbonera.

DEFASE Garganta- Océano	Comp. Armónica	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
		Desfase		Desfase		Desfase		Desfase		Desfase	
		°	Horas								
Marea Hip 1	M2	58	2	50	1.74	37	1.28	26	0.89	4	0.13
	M4	78	1.34	67	1.16	42	0.73	28	0.47	4	0.06
Marea Hip 2	M2	48	2.35	62	2.14	55	1.89	46	1.59	26	0.9
	M4	12	0.22	50	0.86	359	6.2	351	6.06	332	5.73

Tabla 6-18. Desfase en principales componentes armónicas de la Laguna La Carbonera.

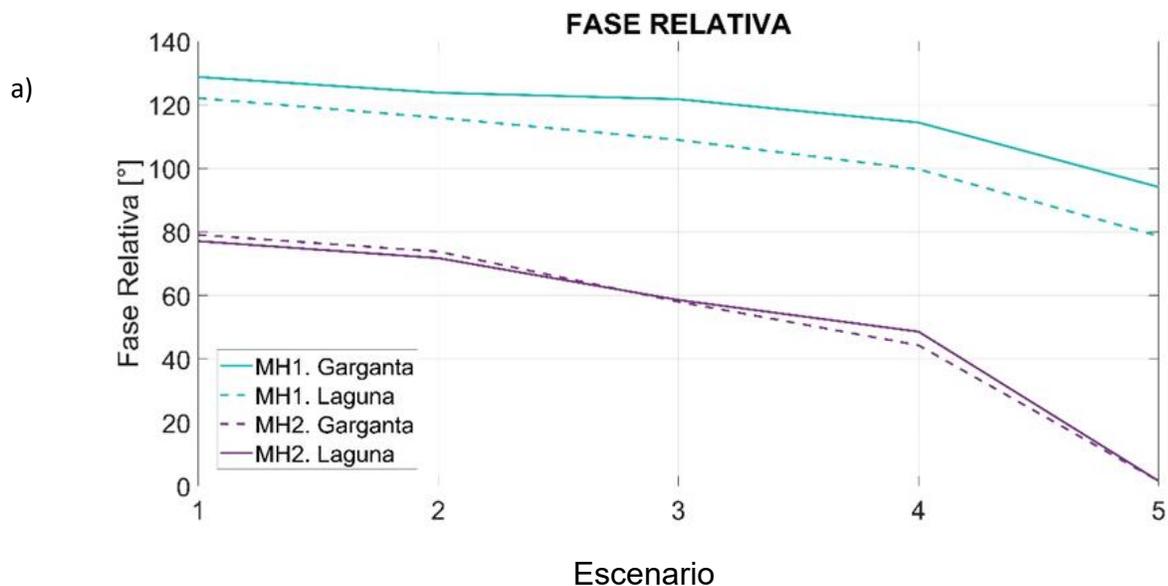
DEFASE Laguna- Garganta	Comp. Armónica	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
		Desfase		Desfase		Desfase		Desfase		Desfase	
		°	Horas								
Marea Hip 1	M2	69	2.38	62	2.15	46	1.6	35	1.19	4	0.13
	M4	149	2.57	99	1.71	125	2.15	115	1.98	96	1.66
Marea Hip 2	M2	80	2.74	75	2.58	65	2.24	56	1.94	4	0.15
	M4	81	1.39	76	1.31	70	1.21	63	1.08	6	0.1

Como se puede observar, la presencia del spit provoca mayores desfases, que a su vez no se ven reflejados en mayor asimetría de mareas, ya que como se estudió en la sección anterior, estas son mayores en el escenario 5. A continuación se observa

la Figura 6-17, las cual muestra en la primera imagen la fase relativa y en la segunda el grado de distorsión para las mareas hipotéticas 1 y 2.

Como se mencionó en capítulos anteriores, a través de la fase relativa, para un régimen con marea semidura es posible predecir el comportamiento del sistema, es decir, dominancia al flujo o al reflujó. Para los casos hipotéticos estudiados, la fase relativa va aumentando conforme la longitud de la barra también aumenta. Esto indica que con la longitud del spit más grande la laguna tiende a ser menos importadora, es decir, con dominancia al reflujó. Como se puede observar, la marea hipotética 2 que comienza con una señal la cual tiene dominancia al flujo, al momento de realizar los cambios en la longitud de spit, presenta un mayor incremento en la fase relativa con respecto al caso de marea hipotética 1. Esto sugiere que el sistema por sí mismo, con el crecimiento del spit va teniendo tendencia a comportarse con dominancia al reflujó, es decir más estable a largo plazo.

Además, se observa que conforme la barra va creciendo, la distorsión de las componentes armónicas de la marea  $M_2$  y  $M_4$  van disminuyendo, lo cual sugiere que el efecto de distorsión de la laguna va contrarrestando la presencia de la barra. De acuerdo a los estudios realizados por Friedrichs, cuando la laguna es exportadora es más estable el sistema y por esta razón se puede observar como el grado de distorsión va disminuyendo. La modificación la marea por el efecto de la geometría de la laguna, con lo somera y compleja que es, modifica la señal de marea, pero a su vez la lengua se encarga de disminuir este efecto, haciendo que se vuelva menos distorsionada pero más importadora.



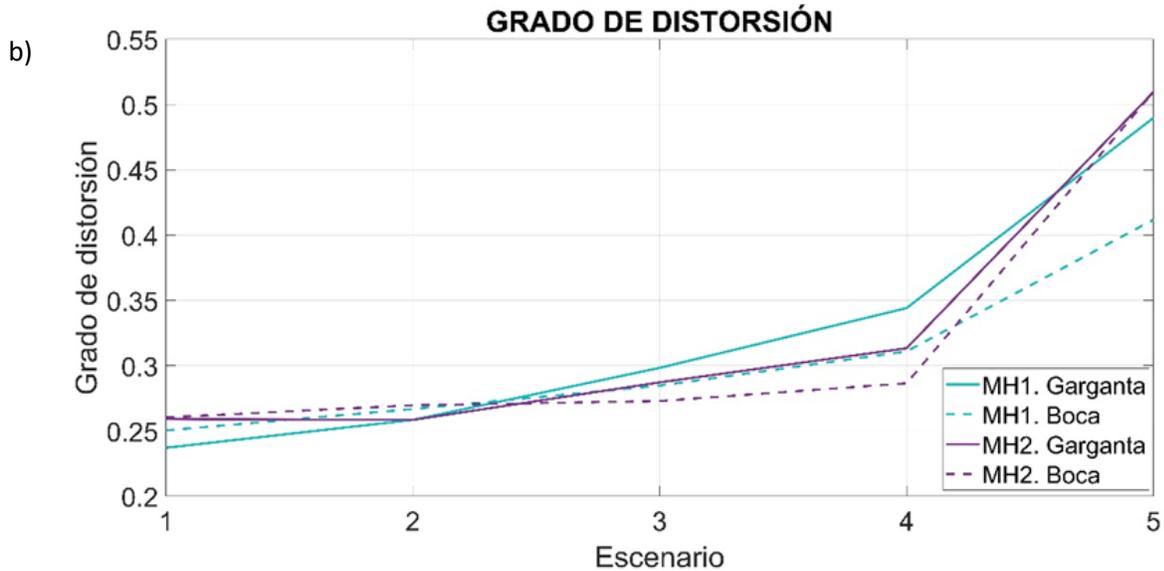


Figura 6-17. a) Fase relativa. b) Grado de distorsión. Mareas hipotéticas 1 y 2 en las secciones de garganta (rojo) y laguna (azul). Las líneas continuas representan la marea hipotética 1, y las líneas punteadas la marea hipotética 2.

### 6.2.5 Transporte de sedimentos

Se realizó el estudio de transporte de sedimentos para un régimen semidiurno con el fin de evaluar la diferencia con el régimen diurno (marea real), en una zona con las mismas características físicas. A continuación, se presentan los resultados del potencial de transporte para las 2 mareas hipotéticas ya estudiadas en la sección garganta y boca. Esto para las 5 formulaciones analizadas en la marea real.

La Figura 6-18 y la Figura 6-19, muestran la estimación del potencial de transporte de sedimento en la garganta y boca respectivamente para la marea hipotética 1 y la Figura 6-20 y la Figura 6-21 muestran transporte de sedimento en la garganta y boca respectivamente para la marea hipotética 2.

b)

Al igual que con la marea real, las formulaciones con mayor semejanza en la magnitud del potencial de transporte son Madsen y Grant (1976), Van Rijn en su última formulación (2007a) y la modificación de la misma (2007b). Por lo cual, de igual manera se realizará el análisis con base en dichas formulas.

Comenzando con el transporte de sedimentos en la sección garganta (Figura 6-18) y boca (Figura 6-19) para la marea hipotética 1, se observa que el comportamiento para cada escenario en ambas secciones es igual al observado en la marea real. Sin embargo, se encuentran 3 principales diferencias entre ambas mareas. La primera es la magnitud de este, siendo alrededor de 25 veces más grande en la marea real que la marea hipotética para la sección de la garganta y 5 veces más

grande en la sección boca. La segunda diferencia se relaciona con los regímenes mareales a los cuales pertenecen ambas mareas. Mientras que, para la marea real con régimen principal diurno, el transporte tiene un ciclo de flujo y uno de reflujos por día, para las mareas hipotéticas se presentan 2 ciclos por día. En la sección boca, este comportamiento muestra ciclos de reflujos más largos que los ciclos de flujo. Sin embargo, esto la cantidad de sedimento transportado en reflujos es menor que la de flujo.

Por lo tanto, al igual que en la sección anterior, se concluye que la lengua juega un papel importante, ya que contribuye a que se den condiciones que en cierta medida protegen la boca de la tal manera que se evita el cierre de la misma.

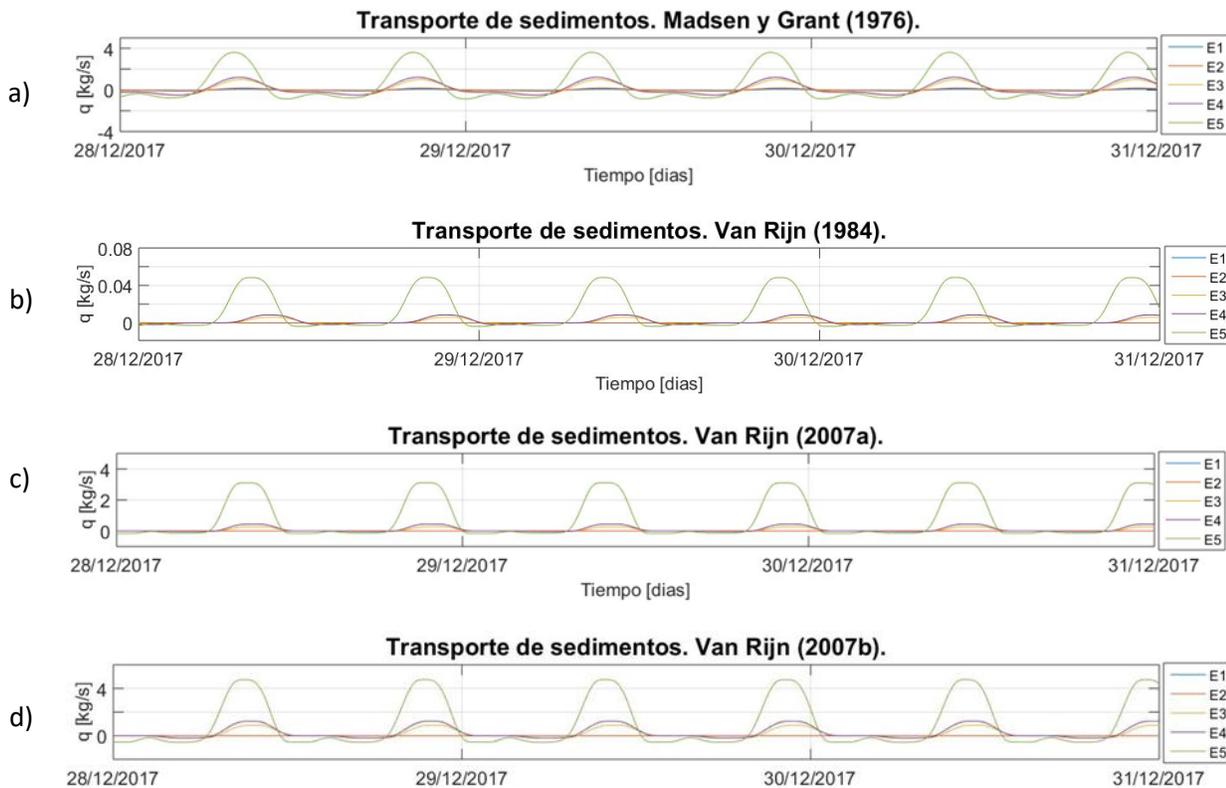
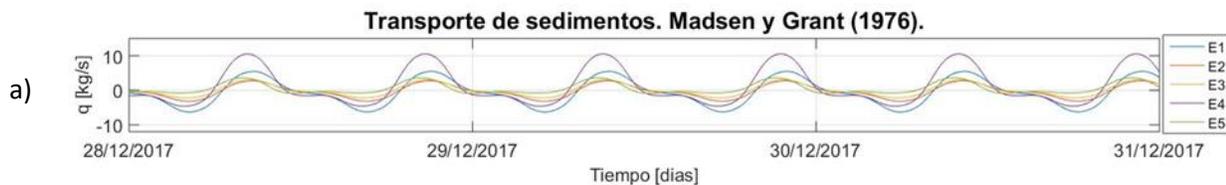


Figura 6-18. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 1.



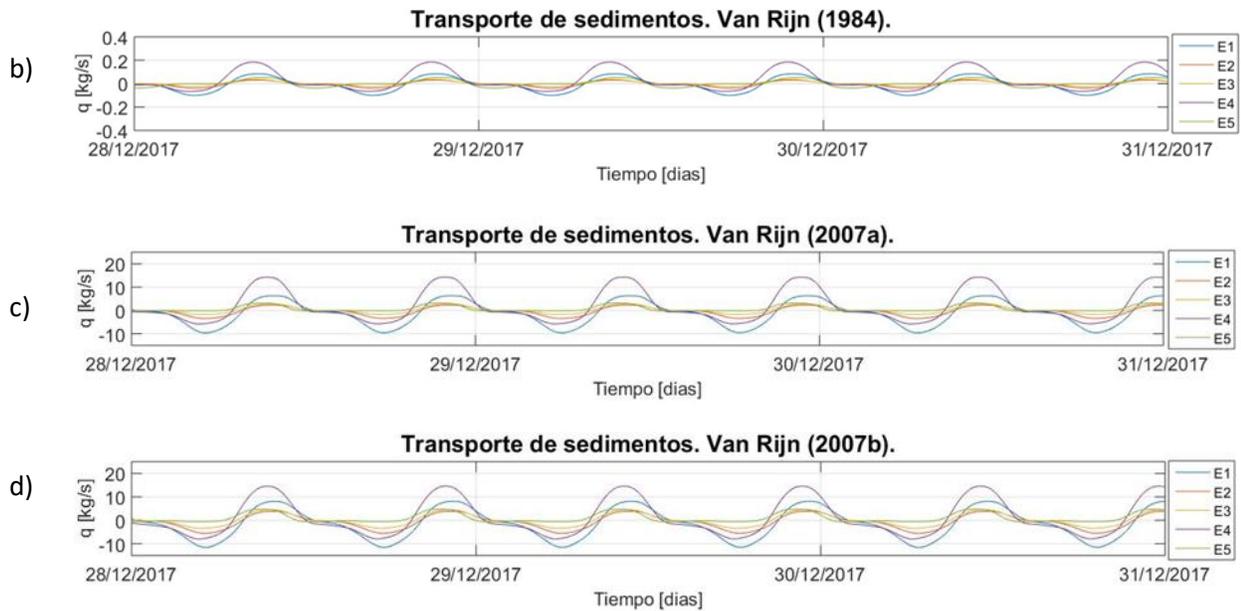
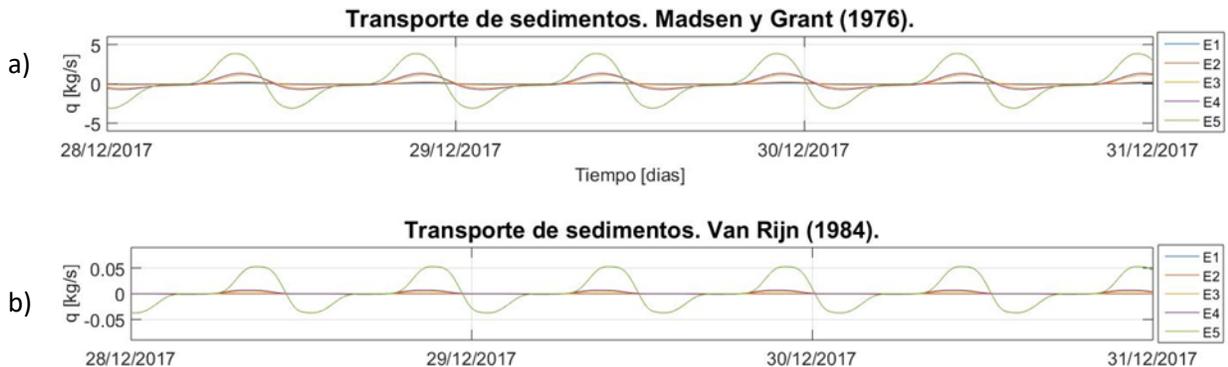


Figura 6-19. Transporte de sedimentos en la sección boca. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 1.

Continuando con los resultados obtenidos, se observa que en la marea hipotética 2 en la sección garganta, al igual que en los forzamientos previamente estudiados, el escenario 5 presenta el mayor potencial de transporte de sedimentos. A diferencia de la marea real y la marea hipotética 1, en la zona de refluo también se vuelve importante el potencial de transporte, especialmente en el escenario 5 en todas las formulaciones.

Se puede notar que el transporte de sedimentos en la zona de refluo está ligeramente por debajo del transporte de flujo, lo que sugiere que una laguna sin spit, bajo este forzamiento, podría alcanzar la estabilidad necesaria, ya que las cantidades de sedimento que entran y salen de la laguna son casi iguales. Además, se observa que a medida que la longitud del spit aumenta en los diferentes escenarios, el transporte de refluo se reduce aproximadamente en un 50%.



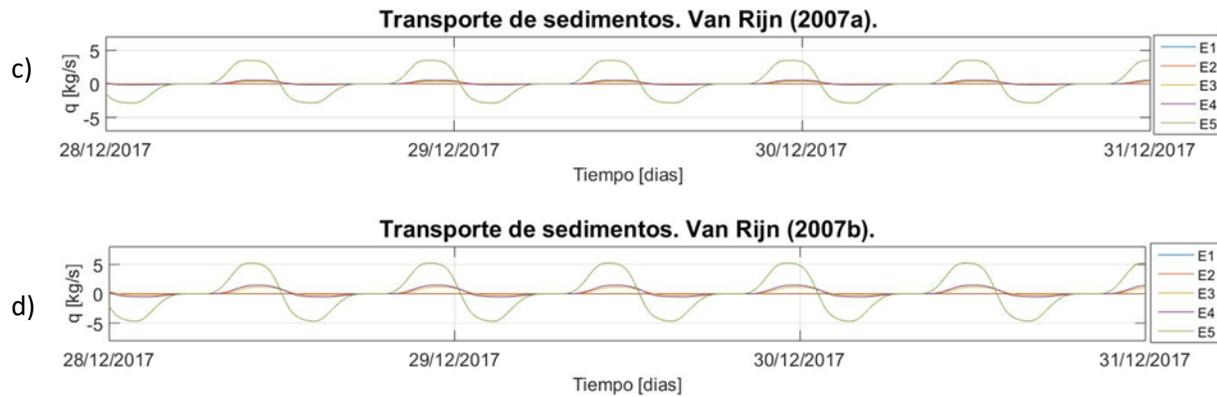
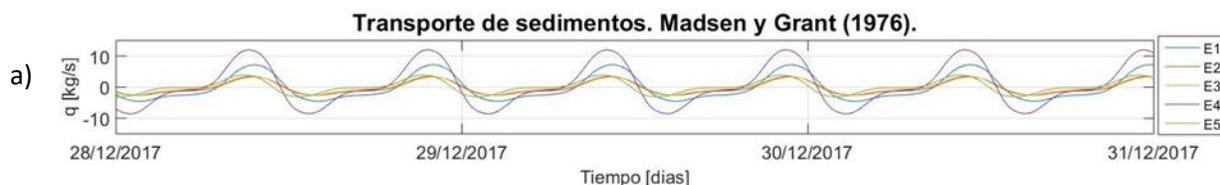


Figura 6-20. Transporte de sedimentos en la sección garganta. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 2.

Por último, En la sección de la boca (Figura 6-21), se observa que el escenario 4 presenta el mayor transporte de sedimentos tanto en flujo como en reflujos para todas las formulaciones. Es importante destacar que el transporte de flujo siempre es mayor que el de reflujos, lo cual indica que hay una mayor cantidad de sedimentos transportados durante el flujo en comparación con el reflujos. Además, en la marea hipotética 1, se observa que los reflujos son más largos en comparación con la marea hipotética 2.

Es cierto que los reflujos más largos se traducen en menores velocidades y, por lo tanto, en un menor transporte de sedimentos. Por lo tanto, la combinación de reflujos más largos en la marea hipotética 1 implica una disminución en las velocidades y, en consecuencia, en el transporte de sedimentos en comparación con la marea hipotética 2.

Esta diferencia en el transporte de sedimentos entre las dos mareas hipotéticas sugiere que la presencia de alguna dominancia en el flujo hace que el sistema sea más inestable, ya que aumenta la cantidad de sedimentos que ingresan al canal. Esto puede ser atribuido a las interacciones complejas entre las componentes armónicas de las mareas y la geometría del estuario.



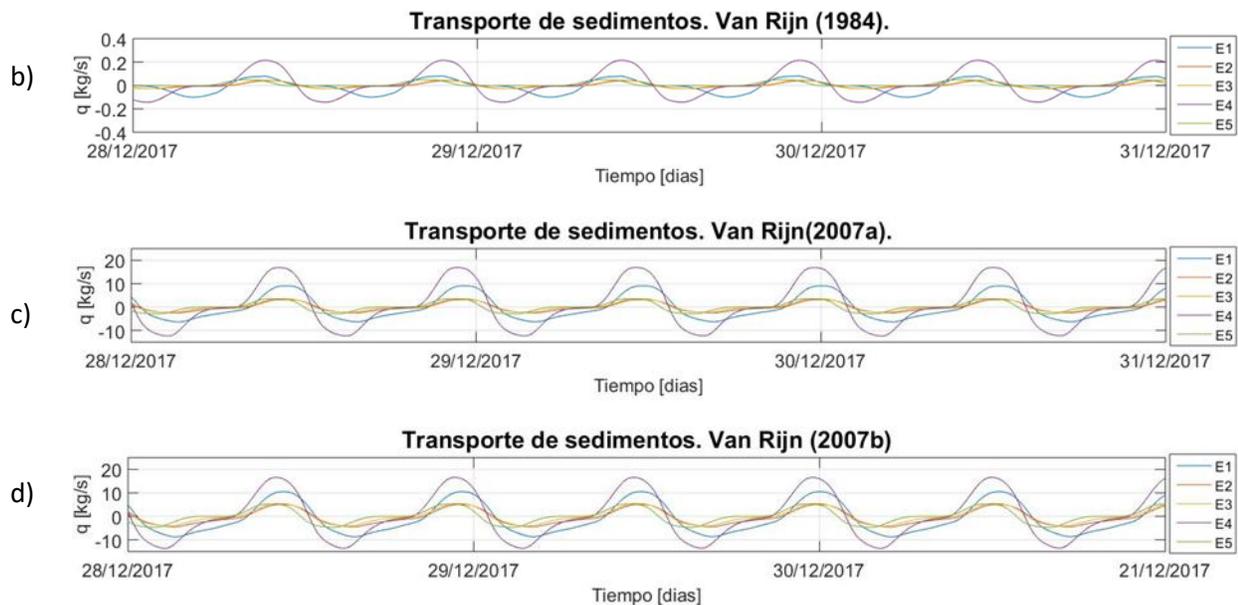


Figura 6-21. Transporte de sedimentos en la sección boca. a) Madsen y Grant, 1976. b) c) y d) Van Rijn, 1984, 2007a, 2007b. Marea hipotética 2.

Para finalizar el estudio de transporte de sedimentos para las mareas hipotéticas analizadas, se realizó la comparación cualitativa de igual manera que en la marea real. A continuación, se presentan en la Figura 6-22 los resultados obtenidos para la marea hipotética 1, y en la Figura 6-23 los resultados de la marea hipotética 2.

Como se puede observar, en la sección garganta para ambas mareas, el mayor transporte de sedimentos se obtiene en flujo en el escenario 5. A partir de ahí, se observa una disminución en el transporte conforme va aumentando la longitud de la lengua, comportamiento ya observado con la marea real.

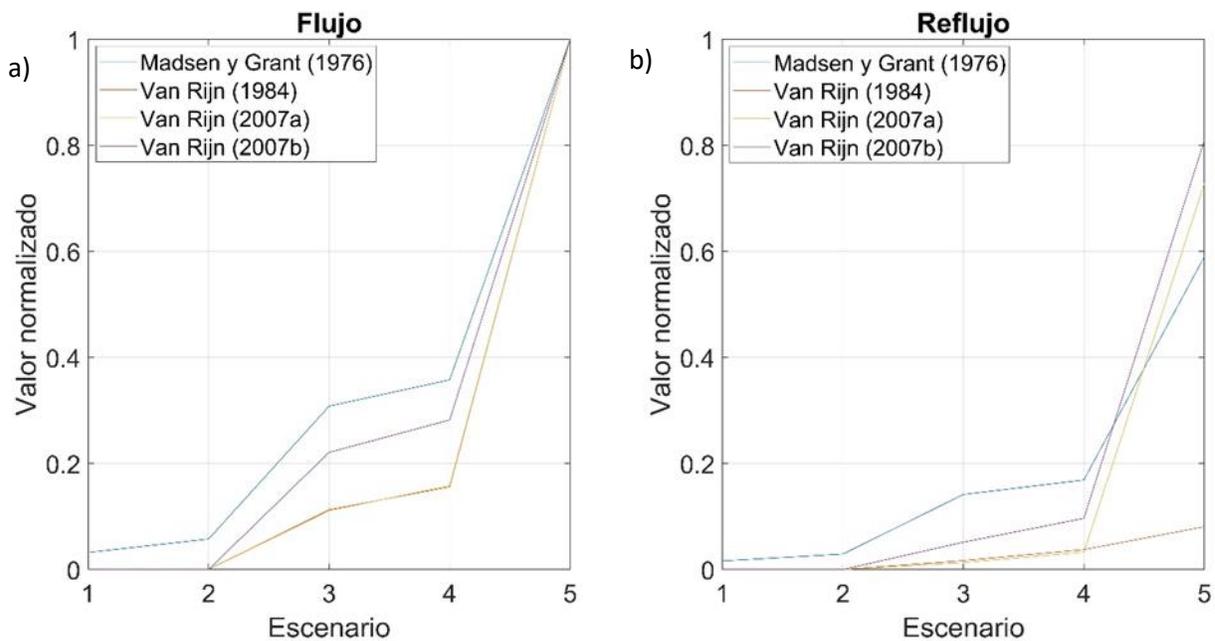
Analizando el comportamiento del transporte en el escenario 5 (sección garganta), para la marea hipotética 1 en flujo (Figura 6-22-a), se observan mayores valores de potencial de transporte de sedimento que para la marea hipotética 2. Sin embargo, con el sedimento de reflujos ocurre lo contrario, siendo más grande en la marea hipotética 2. Este hecho sugiere que hay mayor estabilidad del sistema para una señal con dominancia al flujo, lo cual no es intuitivo. No obstante, una vez que el spit comienza a crecer (Escenarios 4,3,2,1) la dinámica de los flujos se modifica de tal manera que deja de importar la dominancia al flujo agregada con las fases de M2 y M4 en la marea hipotética 2. Por lo cual ambas mareas adoptan un comportamiento de transporte de sedimentos semejante tanto en flujo como en reflujos.

Por otro lado, en la sección de la boca el escenario 4 es el que presenta mayor tasa de transporte tanto en flujo como en reflujos para ambas mareas. El hecho de que esto ocurra con el forzamiento de marea real y con estos 2 nuevos forzamientos,

indica que, como visto en capítulos anteriores, la sección transversal de la boca en el escenario 4 es menor y provoca mayores velocidades de flujo y reflujo y por ende de transporte potencial de sedimentos.

Que el transporte de las tasas de sedimento presente estas diferencias sugieren que una marea sin dominancia presenta mayor estabilidad tanto en la boca como en la garganta para lagunas con un spit largo. Sin embargo, para lagunas sin spit, el forzamiento con una marea con dominancia a al flujo es la que presenta mayor estabilidad del sistema.

Por último, comparando los resultados obtenidos con la marea real y con las mareas hipotéticas, se observa que un régimen diurno es más favorable para el sistema, ya que hace que el sistema sea menos importador en la sección de la boca. Mientras tanto, los casos hipotéticos con régimen semidiurno tienden a tener un comportamiento más exportador en términos de transporte de sedimentos hacia el exterior de la laguna. Sin embargo, es importante destacar que no alcanzan a ser completamente exportadores, es decir, no se produce una salida total de sedimentos de la laguna. Por lo tanto, de acuerdo a las teorías explicadas en el capítulo 2, la presencia de una marea semidiurna podría facilitar el cierre de la barra de arena en comparación con un régimen diurno.



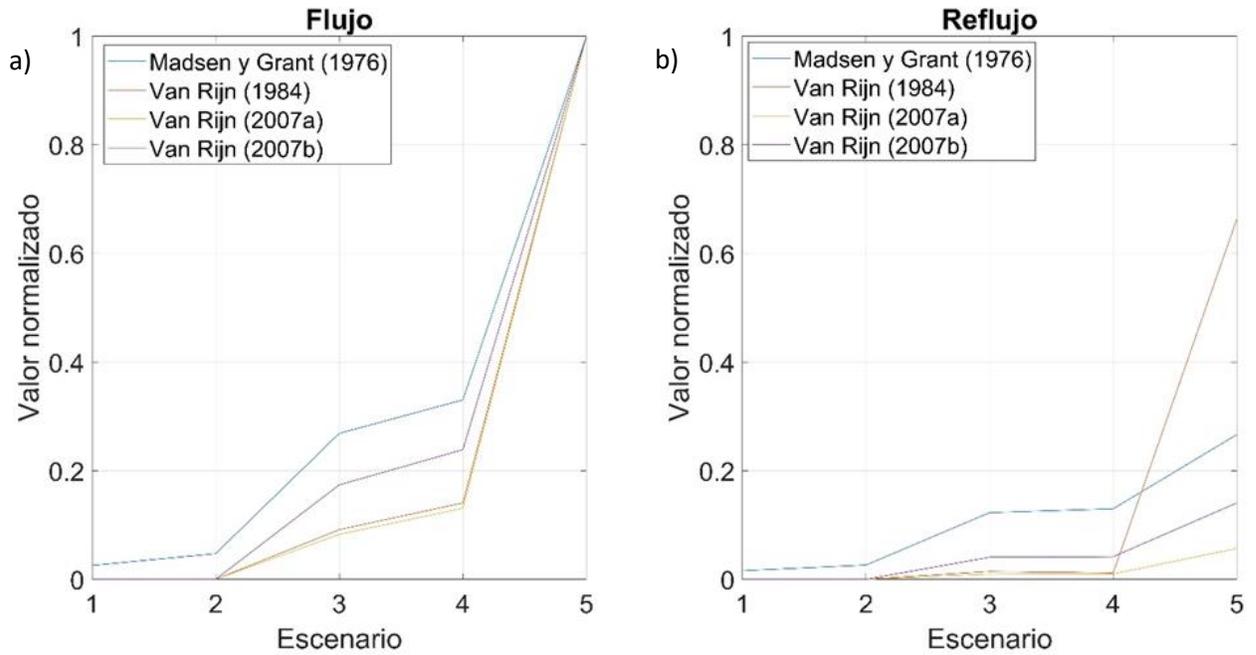
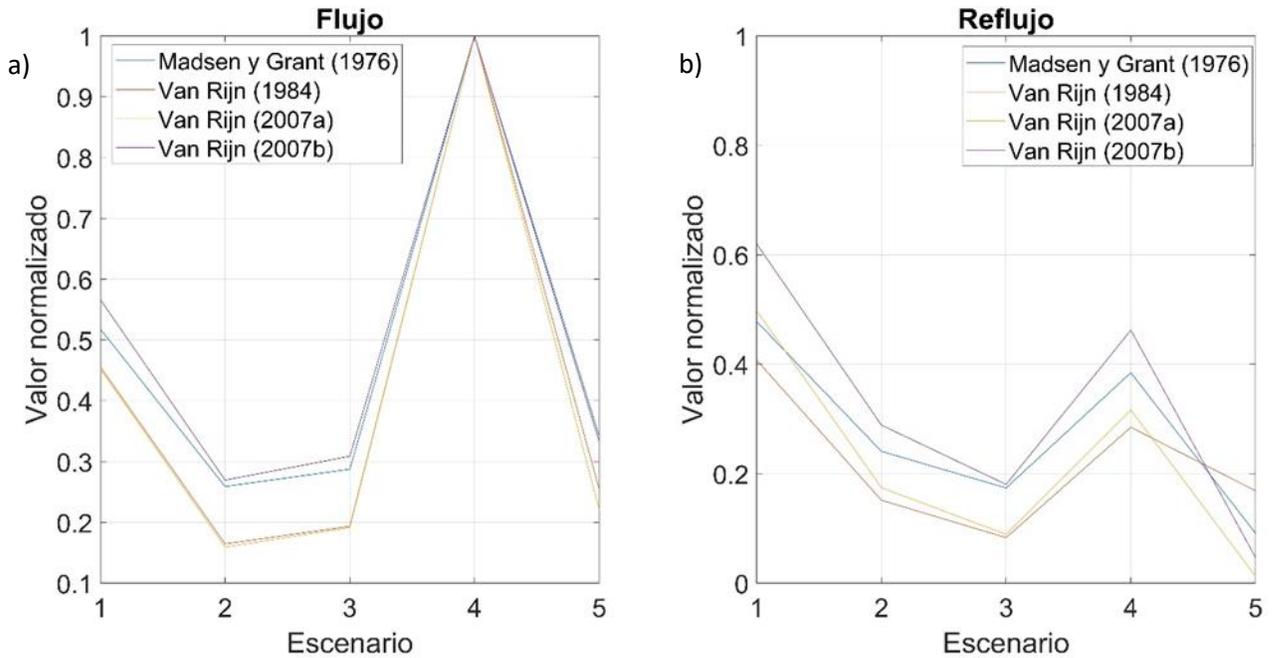


Figura 6-22. Valor normalizado en la sección garganta del transporte de sedimentos para todas las formulaciones. a) Marea hipotética 1. b) Marea hipotética 2.



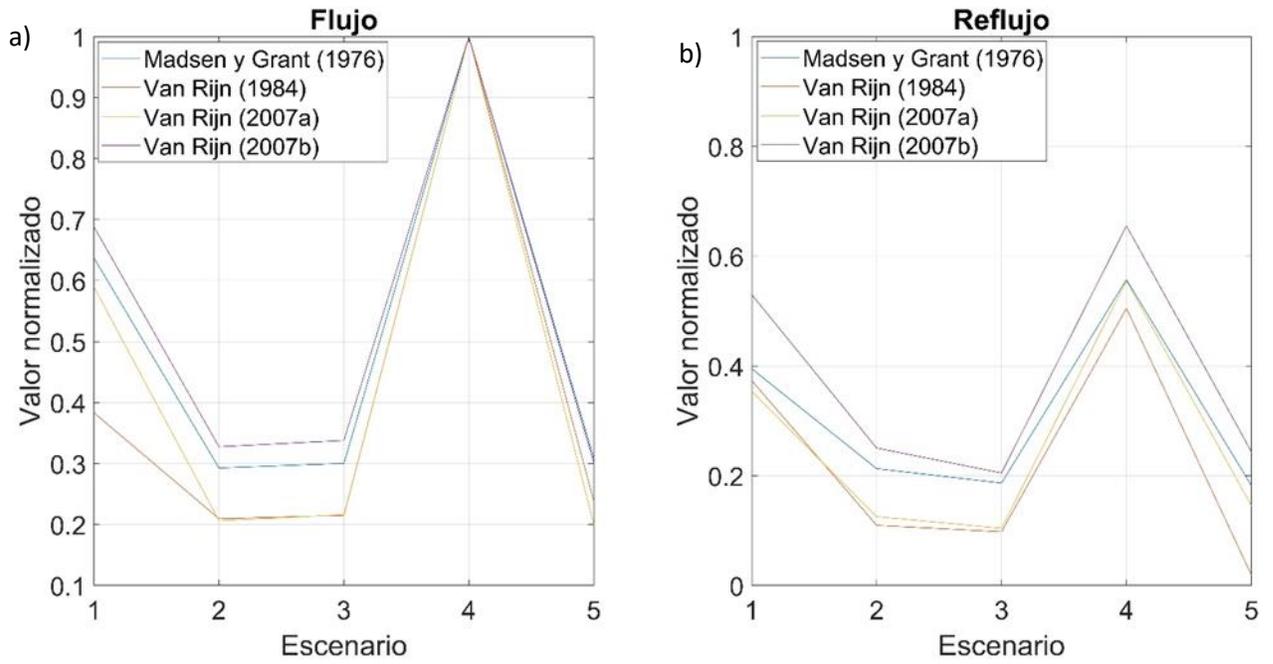


Figura 6-23. Valor normalizado en la sección boca del transporte de sedimentos para todas las formulaciones. a) Marea hipotética 1. b) Marea hipotética 2.

## 7 CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la laguna La Carbonera es un sistema altamente influenciado por las mareas, con patrones diurnos que tienen un impacto fundamental en su hidrodinámica. Las mediciones de amplitudes y fases de mareas han permitido entender mejor la variabilidad en los niveles de agua y las corrientes en la laguna, y cómo estas fluctuaciones afectan su dinámica.

Los estudios topo-batimétricos revelaron una morfología compleja en La Carbonera, con una boca que actúa como una entrada para las aguas del Golfo de México. Esta morfología varía con el tiempo debido a la dinámica de las mareas y las corrientes, lo que influye en los flujos de entrada y salida de agua, así como en la erosión y sedimentación en la zona costera.

La implementación y calibración del modelo numérico Delft-3DFM han sido fundamentales para simular diferentes escenarios y entender la hidrodinámica de la laguna. Esto ha proporcionado información sobre cómo la longitud de la lengua de arena y las condiciones meteorológicas influyen en la circulación del agua.

Tras realizar el análisis hidrodinámico en el modelo Delft3D-FM para cada forzamiento de marea en las secciones de la garganta y la boca de la laguna La Carbonera, se han obtenido conclusiones importantes.

En cuanto a los resultados de los niveles de agua obtenidos en el modelo, se observaron variaciones en comparación con los datos medidos debido a diversas circunstancias variables. Entre las más relevantes se encuentran la falta de información batimétrica precisa dentro de la laguna y la ausencia de datos sobre los aportes de agua dulce. Estos factores limitan la exactitud de los resultados y la capacidad del modelo para representar con precisión los niveles de agua observados en la realidad. Además, es importante destacar que, aunque el oleaje desempeña un papel significativo en la dinámica de la zona costera, no fue considerado en los alcances de este proyecto de investigación. Por lo tanto, el modelo no tuvo en cuenta los efectos del oleaje en los niveles de agua de la laguna La Carbonera. Es necesario tener en cuenta esta limitación al interpretar los resultados y entender que el análisis hidrodinámico se centró principalmente en la influencia de las mareas.

En cuanto a la validación del modelo, también se vio afectada por las mismas variables mencionadas anteriormente, es decir, la falta de información batimétrica, datos de aportes de agua dulce y la falta de consideración de los efectos del oleaje.

A continuación, se resumen las conclusiones claves, agrupadas en función de las mareas reales y las mareas hipotéticas:

#### Marea Real:

**Longitud del Spit y Estabilidad:** Se ha observado que a medida que aumenta la longitud del spit, la laguna se vuelve menos importadora y más estable en términos de intercambio de agua con el mar. Esta estabilidad está relacionada con un equilibrio en la tasa de transporte de sedimentos. Los análisis de transporte de sedimentos respaldan esta tendencia, mostrando una disminución en el volumen de transporte de sedimentos a medida que aumenta la longitud del spit.

**Aportes de Agua Dulce:** La introducción de aportes de agua dulce en la modelación numérica mejora los intercambios de agua en la zona lagunar. Se ha observado un aumento en las velocidades de reflujo como resultado de estos aportes. Esto contribuye a un mejor equilibrio hidrodinámico en la laguna.

**Efecto del Spit:** La presencia del spit actúa como un filtro que disminuye la asimetría de las mareas. Sin embargo, también provoca desfases en las componentes armónicas de las mareas y una pérdida de energía, lo que resulta en una disminución de las amplitudes de mareas.

**Geometría y Rugosidad de la Laguna:** La constricción y la rugosidad en la laguna tienen un impacto significativo en las velocidades de flujo y reflujo, favoreciendo un funcionamiento equilibrado del sistema. El transporte de sedimentos y el crecimiento del spit promueven que la laguna exporte en lugar de importar agua.

**Escenario sin Spit:** El escenario sin spit muestra mayor inestabilidad, con un mayor volumen de flujo y reflujo, así como un mayor transporte de sedimentos.

**Estabilidad de las Bocas de Lagunas Costeras:** Las bocas de las lagunas costeras son susceptibles a la deposición o erosión de sedimentos, lo cual está directamente relacionado con la geometría lagunar, el rango de mareas y el tipo de sedimento presente. Cuando la boca de la laguna costera se vuelve estable, el transporte longitudinal de arena debido al oleaje beneficia a las playas adyacentes.

#### Marea Hipotética:

**Dominancia de Flujo y Reflujo:** El análisis de la relación Flujo-Reflujo en un sistema con dominancia al flujo muestra que el sistema es más importador y, por lo tanto, más inestable. Esta tendencia se observa independientemente de los aportes de agua dulce presentes en la laguna. La presencia de un spit puede influir en la

distorsión de la señal de marea, haciendo que sea menos distorsionada pero más importadora en comparación con una laguna sin spit.

**Geometría de la Laguna:** La geometría compleja de la laguna influye en la modificación de la señal de marea, lo que resulta en una menor distorsión de la misma pero también en un mayor grado de importación de agua.

**Estabilidad del Sistema:** La presencia de un spit largo en una laguna con una marea semidiurna sin dominancia muestra una mayor estabilidad tanto en la boca como en la garganta. Esto indica que un spit largo favorece la estabilidad del sistema en presencia de una marea con características equilibradas. En lagunas sin spit, una marea con dominancia al flujo es la que presenta mayor estabilidad del sistema.

Este estudio proporciona una visión de la hidrodinámica en la laguna La Carbonera en el contexto de diferentes regímenes de mareas. Los resultados revelan que un régimen de mareas diurnas favorece un sistema completamente exportador en la sección de la boca, lo cual es altamente beneficioso para el ecosistema y la salud general de la laguna. Sin embargo, se observa que, en los casos hipotéticos con régimen semidiurno, aunque el sistema tiende a ser exportador, no alcanza a serlo por completo, lo que sugiere la posibilidad de cierre de la barra. Aunque los regímenes de mareas semidiurnas no son comunes en la región de estudio, esta investigación se ha basado en escenarios hipotéticos para comprender cómo podrían afectar la hidrodinámica de la laguna. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar y monitorear los cambios en los regímenes de mareas, incluso si son poco probables, ya que podrían tener implicaciones significativas en la estabilidad de la laguna y su ecosistema.

## 8 Referencias

- Arcecent, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.
- Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, 51, 3747-3763.
- Bagnold, R. A. (1963). Mechanics of marine sedimentation. *The sea*, 3, 507-528.
- Barnes, R. S. K. (1980). Coastal lagoons (Vol. 1). Cambridge University Press.
- Brown, J. M., & Davies, A. G. (2010). Flood/ebb tidal asymmetry in a shallow sandy estuary and the impact on net sand transport. *Geomorphology*, 114(3), 431-439.
- Bogucki, D. J., Jones, B. H., & Carr, M. E. (2005). Remote measurements of horizontal eddy diffusivity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(9), 1373-1380.
- Cárdenas Gámez, S. (2007). *Modelación hidrodinámica de la laguna costera El Colorado, Ahome, Sinaloa* (Doctoral dissertation).
- Carranza, E., A. M. Gutiérrez, and R. Rodríguez (1979), Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas, México, An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, 2.
- Davies, J. L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für geomorphologie*, 127-142.
- DE, E. O. A. G. (2012). *IE Wilmer Rey Sánchez* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Yucatán).
- Delgado O., Marvan, F., Mejia, A. and Gil, E. (2012). San Quintin Lagoon Hydrodynamics Case Study. *Water Resources Management and Modelling*. pp 127–144.
- Deltares, D-Flow Flexible Mesh, User Manual (Deltares Systems, 2022).
- Dronkers, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3), 117-131.
- Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5), 521-545.
- Godin, G., & Martínez, A. (1994). Numerical experiments to investigate the effects of quadratic friction on the propagation of tides in a channel. *Continental Shelf Research*, 14(7-8), 723-748.
- Gondwe, B. R., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., & Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), 1-17.
- Hayes, M. O. (1975). Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In *Geology and engineering* (pp. 3-22). Academic Press.

- Hayes, M.O. (1979) Barrier Island Morphology as a Function of Tidal 583 and Wave Regime. In: Latherman, S.P., Ed., *Barrier Island—From the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático ([INECC] 2007). Academic Press, New York, 1-71.
- Jewell, S. A., Walker, D. J., & Fortunato, A. B. (2012). Tidal asymmetry in a coastal lagoon subject to a mixed tidal regime. *Geomorphology*, 138(1), 171-180.
- Lankford, R. R. (1977). Coastal lagoons of Mexico their origin and classification. In *Estuarine processes* (pp. 182-215). Academic Press.
- Madsen, O. S., & Grant, W. D. (1976). Quantitative description of sediment transport by waves. In *Coastal Engineering 1976* (pp. 1092-1112).
- Mattocks, C., & Forbes, C. (2008). A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina. *Ocean Modelling*, 25(3-4), 95-119.
- Maulik, R., & San, O. (2016). Dynamic modeling of the horizontal eddy viscosity coefficient for quasigeostrophic ocean circulation problems. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(4), 300-324.
- Medellín, G., Mariño-Tapia, I., Pedrozo-Acuña, A., Enríquez, C., & González-Villarreal, F. (2013). Influencia de la marea en la hidrodinámica del sistema Mecoacán-río González, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(2), 71-90.
- Medellín, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G. R., Francone, A., Tereszkievicz, P. A., Lusito, L., ... & López, J. (2018). Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico). *Water*, 10(12), 1806.
- Morales, M., Aquije, J., Carvalho, L., & Mejía, A. (2020). Modelización hidrodinámica de una laguna costera en México. *Revista de Investigación de Física*, 23(3), 6-12.
- P. Salles, G Voulgaris D.G. Aubrey, 2004. Hydrodynamic Contribution of nonlinear mechanisms in the persistence of multiple tidal inlet systems. Massachusetts Institute of Technology. Estados Unidos de America.
- Pacheco-Castro, R., Salles, P., Canul-Macario, C., & Paladio-Hernandez, A. (2021). On the understanding of the hydrodynamics and the causes of saltwater intrusion on lagoon tidal springs. *Water*, 13(23), 3431.
- Paladio-Hernandez, A., Salles, P., Arriaga, J., & López-González, J. (2022). Characterization of the Morphological Behavior of a Sand Spit Using UAVs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 600.
- Parker, G. (1991). Selective sorting and abrasion of river gravel. II: Applications. *Journal of Hydraulic engineering*, 117(2), 150-171.
- Pérez-Ruzafa, A., Pérez-Ruzafa I., Newton E., Marcos, E. Coastal Lagoons, 2019. Environmental Variability, Ecosystem Complexity, and Goods and Services Uniformity, Coasts and Estuaries, Chapter 15. Pages 253-276.

- Ranasinghe, R., & Pattiaratchi, C. (2000). Tidal inlet velocity asymmetry in diurnal regimes. *Continental Shelf Research*, 20(17), 2347-2366.
- Santamaria-Aguilar S, Schuerch M, Vafeidis AT, Carretero SC (2017) Long-term trends and variability of water levels and tides in Buenos Aires and Mar del Plata, Argentina.
- Schmitter, P. C. (2002). Participation in governance arrangements: is there any reason to expect it will achieve “sustainable and innovative policies in a multi-level context”? *Participatory governance: Political and societal implications*, 51-69.
- Sumich, J. L. (1996). An Introduction to the Biology of Marine Life, Dubuque. *Am Biol Teach*, 255-269.
- Speer, P. E., & Aubrey, D. G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(2), 207-224.
- Torres-Mota, R., Salles-Afonso-de-Almeida, P., & López-González, J. (2014). Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(5), 5-20.
- Van Rijn, 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*.
- Van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves, I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), p 649-667.
- Wim Ridderinkhof. 2014. Influence of the back-barrier basin length on the geometry of ebb-tidal deltas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

**APÉNDICE A: REGIONES COSTERAS EN MÉXICO.**

<b>REGIÓN A</b>		<b>REGIÓN C</b>	
<b>Número</b>	<b>Nombre de laguna</b>	<b>Número</b>	<b>Nombre de laguna</b>
1	Estero San Miguel	1	Bahía de Aduar
2	Estero de Punta Banda	2	Bahía Cholla
3	Laguna Vicente Guerrero	3	Estero Peñasco
4	Bahía de San Quintín	4	Laguna Salada
5	Laguna Manuela	5	Estero de San Jorge
6	Laguna Guerrero Negro	6	Estero del Sargento
7	Laguna Ojo de Liebre	7	Laguna de la Cruz
8	Bahía Tortuga	8	Estero Tastiota
9	Laguna Abreojos	9	Bahía San Carlos
10	Estero Ballenas	10	Laguna de Guaymas
11	Laguna San Ignacio	11	Laguna Vicicori
12	Estero San Benito	12	Estero Tortuga
13	Laguna San Gregorio	13	Estero de Tecolote
14	Laguna Santo Domingo	14	Estero de Algodones
15	Bahía Magdalena	15	Estero de la Luna
16	Bahía Almejas	16	Estero de Lobos
		17	Estero Corga
		18	Estero de Hujvulay
		19	Estero Ciaris
		20	Estero de Santa Lugarda
		21	Bahía de Yavaros
		22	Estero de Agiabampo
		23	Bahía San Esteban
		24	Bahía de Topolobampo
		25	Bahía Ohuira
		26	Bahía de San Ignacio
		27	Bahía de Navachoste
		28	Bahía de Playa Colorada
		29	Bahía de Santa María
		30	Ensenada del Pabellón
		31	Ensenada de Quevedo

**REGIÓN B**

<b>Número</b>	<b>Nombre de laguna</b>
1	Estuario del Rio Colorado
2	Estero el Moreno
3	Estero de San Lucas
4	Bahía de Concepción
5	Ensenada de la Paz

<b>REGIÓN D</b>		<b>REGIÓN E</b>	
Número	Nombre de laguna	Número	Nombre de laguna
1	Estero de Urías	1	Laguna Madre de Tamaulipas
2	Laguna de Hizache	2	Laguna de San Andrés
3	Laguna de Caimanero	3	Laguna Chijol
4	Laguna de Escuinapa	4	Laguna de Pueblo Viejo
5	Laguna de Agua Brava	5	Laguna de Tamiahua
6	Laguna Mexcaltitlan	6	Laguna Tampamuchoco
7	Boca Cegada	7	Laguna Grande
8	Estero del Pozo	8	Laguna Verde
9	Estero del Rey	9	Laguna Mandiga
10	Estero de San Cristóbal	10	Laguna Camaronero
11	Laguna Agua Dulce	11	Laguna Tlalixcoyan
12	Estero de Navidad	12	Laguna de Alvarado
13	Laguna Cuyutlán	13	Laguna de Santecompan
14	Laguna de Potosí	14	Laguna de Ostión
15	Las Salinas de Cuajo	15	Laguna de Carmen
16	Laguna de Nuxco	16	Laguna Machona
17	Laguna Mitla	17	Laguna Tupilco
18	Laguna Coyuca	18	Laguna Mecoapan
19	Laguna Tres Palos	19	Estero de Chiltepec
20	Laguna Tecomate	20	Laguna Pom
21	Laguna Chautengo	21	Laguna Atasta
22	Laguna Apozahualco	22	Laguna de Términos
23	Laguna de Alotengo	23	Laguna Sabancuy
24	Laguna de Chacahua		
25	Laguna de Pastoría		
26	Estero de Punta Conejo		
27	Estero del Rio Tehuantepec		
28	Laguna Superior		
29	Laguna Inferior		
30	Mar Muerto		
31	Laguna La Joya		
32	Laguna del Viejo		

**REGIÓN F**

---

Número	Nombre de laguna
1	Laguna de Celestún
2	Estero de Progreso
3	Estero de Telchac
4	Estero de Punta Arenas
5	Laguna Lagartos
6	Laguna Yalahua
7	Cayo Arcas
8	Arrecifes Triángulos
9	Arrecife Alacrán

**REGIÓN G**

---

Número	Nombre de laguna
1	Bahía Contoy
2	Laguna Nichupté
3	Laguna Chumyaxchac
4	Bahía de la Ascensión
5	Bahía del Espíritu Santo
6	Bahía Chetumal
7	Banco Chinchorro
8	Unamed reef lagoons

**APÉNDICE B: CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA VARIANDO LOS VALORES DE RUGOSIDAD EN LAS 4 ZONAS EXISTENTES.**

Corrida	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1	0.01	0.01	0.015	0.05
2	0.01	0.01	0.02	0.05
3	0.01	0.01	0.025	0.05
4	0.01	0.01	0.03	0.05
5	0.01	0.01	0.035	0.05
6	0.01	0.01	0.04	0.05
7	0.01	0.015	0.02	0.05
8	0.01	0.015	0.025	0.05
9	0.01	0.015	0.031	0.05
10	0.01	0.015	0.035	0.05
11	0.01	0.015	0.031	0.1
12	0.015	0.015	0.025	0.05
13	0.015	0.015	0.03	0.05
14	0.015	0.015	0.035	0.05
15	0.015	0.015	0.04	0.05
16	0.015	0.02	0.025	0.05
17	0.015	0.02	0.03	0.05
18	0.015	0.02	0.035	0.05
19	0.015	0.02	0.04	0.05
20	0.02	0.02	0.025	0.05
21	0.02	0.02	0.025	0.06
22	0.02	0.02	0.025	0.07
23	0.02	0.02	0.03	0.05
24	0.02	0.02	0.03	0.06
25	0.02	0.02	0.03	0.07
26	0.02	0.02	0.035	0.05
27	0.02	0.02	0.035	0.06
28	0.02	0.02	0.035	0.07
29	0.02	0.02	0.04	0.05
30	0.02	0.025	0.025	0.05
31a	0.02	0.025	0.03	0.04
31	0.02	0.025	0.03	0.05
32	0.02	0.025	0.035	0.05
33	0.02	0.025	0.04	0.05
34	0.024	0.024	0.027	0.035
34a	0.024	0.024	0.027	0.03
34b	0.024	0.024	0.027	0.04
35	0.024	0.027	0.035	0.05
35a	0.022	0.027	0.035	0.045
36	0.025	0.025	0.03	0.05
37	0.025	0.025	0.035	0.05
38	0.025	0.025	0.04	0.05
39	0.025	0.03	0.035	0.05
40	0.03	0.03	0.035	0.05
41	0.03	0.03	0.04	0.05
42	0.035	0.035	0.04	0.05

**APÉNDICE C: CORRELACIÓN Y RMS VARIANDO LOS VALORES DE RUGOSIDAD POR ZONAS.**

PUNTO	C2		C20		C30	
	Correlación	RMS [m]	Correlación	RMS [m]	Correlación	RMS [m]
Mar	0.97	0.06	0.98	0.05	0.98	0.05
Barra	0.89	0.06	0.96	0.03	0.95	0.03
Laguna	0.85	0.06	0.93	0.04	0.91	0.04
Entrada canal	0.84	0.07	0.93	0.04	0.91	0.05
Canal medio	0.94	0.05	0.95	0.04	0.96	0.04
Ojo	0.89	0.05	0.78	0.07	0.82	0.06

PUNTO	C36		C34b		C31a	
	Correlación	RMS [m]	Correlación	RMS [m]	Correlación	RMS [m]
Mar	0.98	0.05	0.98	0.05	0.98	0.05
Barra	0.96	0.03	0.96	0.03	0.96	0.03
Laguna	0.93	0.04	0.93	0.04	0.93	0.04
Entrada canal	0.93	0.04	0.92	0.04	0.92	0.04
Canal medio	0.95	0.04	0.95	0.04	0.95	0.03
Ojo	0.79	0.07	0.79	0.07	0.79	0.06

APÉNDICE D: CORRELACIÓN Y RMS VARIANDO LOS VALORES DE RUGOSIDAD POR ZONAS.

