



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA LAGUNA DE TÓBARI**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. JORGE HUMBERTO SOLIS TAMAYO

TUTOR PRINCIPAL

Dr. ARIOSTO AGUILAR CHÁVEZ  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO DE 2018



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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: (Dra. SOFÍA ESPERANZA GARRIDO HOYOS)

Secretario: (Dr. VÍCTOR MANUEL ARROYO CORREA)

Vocal: (Dr. ARIOSTO AGUILAR CHÁVEZ)

1er Suplente: (Dr. EFRAÍN MATEOS FARFÁN)

2do Suplente: (Dr. JORGE ARMANDO LAUREL CASTILLO)

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA  
JIUTEPEC, MORELOS

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. ARIOSTO AGUILAR CHÁVEZ

-----  
**FIRMA**

Un agradecimiento a mi tutor el Dr. Ariosto Aguilar Chávez por dirigir y sustentar este documento. Asimismo, un respetuoso reconocimiento y agradecimiento a mi comité de evaluación y revisores los cuales me orientaron durante todo el proceso de titulación:

Dra. Sofía Esperanza Garrido Hoyos  
Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa  
Dr. Efraín Mateos Farfán  
Dr. Jorge Armando Laurel Castillo

Que con sus valiosos comentarios ayudaron a enriquecer y fortalecer esta obra.

Toda mi gratitud y respeto a:

La Universidad Nacional Autónoma de México  
El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Por darme la oportunidad de cumplir mis metas profesionales, académicas y guiarme en el camino.

Agradecer principalmente a mi familia, amigos, maestros y a todas aquellas personas que de alguna forma están presentes en mi vida, que me impulsan a superar cualquier obstáculo, me apoyan y confían en mi ¡GRACIAS!

## RESUMEN

El manejo integral de los recursos hídricos requiere un conocimiento detallado de todo el entorno, en el caso de la Laguna Tóbari, es de importancia conocer la cuenca hidrológica de captación, las obras de ingeniería de aprovechamiento hidráulico, así como las zonas de alta producción comercial, que en este caso son la agricultura intensiva de riego, la pesquería y la industrial que existen dentro de la cuenca.

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema de soporte que permita evaluar el comportamiento hidrodinámico del sistema ambiental de la Laguna de Tóbari, considerado debido a los efectos de la baja explotación pesquera, las descargas de aguas usadas por la zona agrícola y también la depuración natural del sistema lagunar considerando la interacción mareal de la laguna de Tóbari, con el golfo de California.

En primera instancia se analiza las condiciones fisiográficas naturales del sistema lagunar Tóbari, definiéndolo como una cuenca no estuarina, considerando que la aportación de agua superficial de la cuenca hidrológica llega en forma indirecta y se comporta como un cuerpo receptor del distrito de riego DR 041 Río Yaqui debido a los ciclos agrícolas. Así como también, considera las acciones que se han implementado para mejorar su condición de funcionamiento hidrodinámico, como es el caso que desarrolló la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca (SAGARPA) en 2008-2012.

Para evaluar el funcionamiento hidrodinámico actual de la laguna Tóbari se realizó una campaña de medición de corrientes, batimetría y campo de masa, los resultados obtenidos indicaron que este cuerpo lagunar es muy somero con profundidad media de 1.4 m, elevada salinidad, temperatura y con poco aporte de agua dulce proveniente de afluentes del distrito de riego, además presenta una baja comunicación mareal entre la laguna y el golfo de California, cumpliendo con las características de una cuenca con clasificación no estuarina.

Posterior al trabajo de campo se aplicó un modelo de simulación de flujo de aguas someras, este modelo resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento en dos dimensiones. aplicando la técnica de elemento finito. La extensión de superficie de la malla de análisis es de 242,586.03 km<sup>2</sup>, con el fin de evaluar la interacción mareal entre la laguna Tóbari y el Golfo de California.

Para evaluar la hidrodinámica actual de la laguna Tóbari se realizó un escenario de 28 días para tener un periodo lunar. Lo cual determinó el funcionamiento general y los tiempos de residencia actuales. Además, se realizaron dos escenarios considerando opciones de dragado, con el fin de simular y visualizar mejoraras el funcionamiento hidrodinámico y disminuir los tiempos de residencia.

Los resultados obtenidos permiten analizar opciones para tomadores de decisiones en obtener una mejora el sistema ambiental de la laguna.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
1. ANTECEDENTES.....	1
2. ZONA DE ESTUDIO (LAGUNA DE TÓBARI) .....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
JUSTIFICACIÓN.....	15
OBJETIVOS.....	22
HIPÓTESIS .....	22
MARCO TEÓRICO .....	22
MODELO DE AGUAS SOMERAS (ADCIRC) .....	23
ECUACIÓN DE CONSERVACION DE MASA .....	24
ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO .....	24
MODELO DE GWCE .....	26
MÉTODOS DE SOLUCIÓN DISCRETA .....	26
3. METODOLOGIA .....	28
DEFINICIÓN DEL DOMINIO A SIMULAR .....	36
CREACIÓN DE LA MALLA NUMÉRICA DEL DOMINIO .....	41
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ADCIRC (ESCENARIO BASE).....	43
4. RESULTADOS.....	45
TIEMPO DE RESIDENCIA ESCENARIO ACTUAL.....	79
RESULTADO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO .....	87
5. CONCLUSIONES .....	90
RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Laguna de Tóbari y sus componentes .....	10
<b>Figura 2.-</b> Bocabarras Norte y Sur .....	11
<b>Figura 3.-</b> Plano de DDR041 .....	12
<b>Figura 4.-</b> Localización de drenes en la Bahía del Tóbari .....	13
<b>Figura 5.-</b> Municipios a los que pertenece la Laguna de Tóbari.....	14
<b>Figura 6.-</b> Fotos de la laguna en diferentes etapas, pleamar-bajamar-pleamar. ....	16
<b>Figura 7.-</b> Toma y transporte de muestras.....	16
<b>Figura 8.-</b> Sitios de muestreo de agua y sedimentos en la laguna.....	17
<b>Figura 9.-</b> Sitios determinados para el muestreo en la laguna de Tóbari .....	17
<b>Figura 10.-</b> Toma de muestras de Aguas y Sedimentos .....	17
<b>Figura 11.-</b> Puntos del recorrido en la zona de estudio.....	18
<b>Figura 12.-</b> Localización de los drenes de descarga del distrito de riego 041. ....	19
<b>Figura 13.-</b> Metodología de análisis, en el modelo ADCIRC .....	28
<b>Figura 14.-</b> Señalización de las Bocas, .....	29
<b>Figura 15.-</b> Tablas de mareas del mes de junio de Guaymas (norte) y Yavaros (sur) ...	30
<b>Figura 16.-</b> Transectos Batimétricos realizados en la Boca Norte.....	30
<b>Figura 17.-</b> Transectos Batimétricos realizados en la Boca Sur .....	31
<b>Figura 18.-</b> Perfiles de Temperatura y Salinidad .....	31
<b>Figura 19.-</b> Salinidad en el interior de la Laguna de Tóbari .....	32
<b>Figura 20.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad boca norte .....	33
<b>Figura 21.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad boca sur .....	33
<b>Figura 22.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad en el interior-sur .....	34
<b>Figura 23.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad en el interior-centro .....	34
<b>Figura 24.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad en el interior- dren principal.....	35
<b>Figura 25.-</b> Mediciones de Temperatura y Salinidad en el interior-norte.....	35
<b>Figura 26.-</b> Laguna de Tóbari, Delimitación de la línea de costa y la isla de Hiuvulai.	36
<b>Figura 27.-</b> Laguna de Tóbari con el dominio de análisis.....	37
<b>Figura 28.-</b> Batimetría 3D de la laguna.....	37
<b>Figura 29.-</b> Batimetría en planta de la Laguna de Tóbari .....	38

<b>Figura 30.-</b> Mapas cotidales de las componentes armónicas semidiurnas .....	39
<b>Figura 31.-</b> Mapas cotidales de las componentes armónicas diurnas .....	40
<b>Figura 32.-</b> Marea Mixta predominantemente diurna. ....	41
<b>Figura 33.-</b> Malla de análisis.....	42
<b>Figura 34.-</b> Detalle de malla en la laguna de Tóbari.....	43
<b>Figura 35.-</b> Detalle de malla en la boca norte y sur .....	43
<b>Figura 36.-</b> Ilustración de la posición de los 17 puntos/nodos de control.....	44
<b>Figura 37.-</b> Variación de la marea (mixta) en la laguna.....	45
<b>Figura 38.-</b> Batimetría de la zona actual de la laguna.....	46
<b>Figura 39.-</b> Elevaciones y velocidades 20 de junio 2017 .....	47
<b>Figura 40.-</b> Elevaciones y velocidades 21 de junio de 2017.....	48
<b>Figura 41.-</b> Elevaciones y velocidades 22 de junio de 2017.....	49
<b>Figura 42.-</b> Elevaciones y velocidades 23 de junio de 2017 .....	50
<b>Figura 43.-</b> Elevaciones y velocidades 24 de junio de 2017 .....	51
<b>Figura 44.-</b> Elevaciones y velocidades 25 de junio de 2017.....	52
<b>Figura 45.-</b> Elevaciones y velocidades 26 de junio de 2017.....	53
<b>Figura 46.-</b> Elevaciones y velocidades 27 de junio de 2017.....	54
<b>Figura 47.-</b> Elevaciones y velocidades 28 de junio de 2017.....	55
<b>Figura 48.-</b> Elevaciones y velocidades 29 de junio de 2017.....	56
<b>Figura 49.-</b> Batimetría del escenario de mejora uno .....	57
<b>Figura 50.-</b> Elevaciones y velocidades 20 de junio 2017.....	58
<b>Figura 51.-</b> Elevaciones y velocidades 21 de junio 2017.....	59
<b>Figura 52.-</b> Elevaciones y velocidades 22 de junio 2017.....	60
<b>Figura 53.-</b> Elevaciones y velocidades 23 de junio 2017.....	61
<b>Figura 54.-</b> Elevaciones y velocidades 24 de junio 2017.....	62
<b>Figura 55.-</b> Elevaciones y velocidades 25 de junio 2017.....	63
<b>Figura 56.-</b> Elevaciones y velocidades 26 de junio 2017.....	64
<b>Figura 57.-</b> Elevaciones y velocidades 27 de junio 2017.....	65
<b>Figura 58.-</b> Elevaciones y velocidades 28 de junio 2017.....	66
<b>Figura 59.-</b> Elevaciones y velocidades 29 de junio 2017.....	67



<b>Figura 60.-</b> Batimetría del escenario de mejora dos.....	68
<b>Figura 61.-</b> Elevaciones y velocidades 20 de junio 2017.....	69
<b>Figura 62.-</b> Elevaciones y velocidades 21 de junio 2017.....	70
<b>Figura 63.-</b> Elevaciones y velocidades 22 de junio 2017.....	71
<b>Figura 64.-</b> Elevaciones y velocidades 23 de junio 2017.....	72
<b>Figura 65.-</b> Elevaciones y velocidades 24 de junio 2017.....	73
<b>Figura 66.-</b> Elevaciones y velocidades 25 de junio 2017.....	74
<b>Figura 67.-</b> Elevaciones y velocidades 26 de junio 2017.....	75
<b>Figura 68.-</b> Elevaciones y velocidades 27 de junio 2017.....	76
<b>Figura 69.-</b> Elevaciones y velocidades 28 de junio 2017.....	77
<b>Figura 70.-</b> Elevaciones y velocidades 29 de junio 2017.....	78
<b>Figura 71.-</b> Perfil Batimétrico de la Boca Norte .....	80
<b>Figura 72.-</b> Perfil Batimétrico de la Boca Sur.....	80
<b>Figura 73.-</b> Área de la Boca Norte .....	83
<b>Figura 74.-</b> Área de la Boca Sur.....	83
<b>Figura 75.-</b> Puntos / nodos de control de elevaciones y velocidades.....	84
<b>Figura 76.-</b> Marea Mixta de la Laguna de Tóbari mediante ADCIRC .....	84
<b>Figura 77.-</b> Rosa de los vientos de las velocidades Boca Norte .....	85
<b>Figura 78.-</b> Rosa de los vientos de las velocidades Centro de la laguna.....	85
<b>Figura 79.-</b> Rosa de los vientos de las velocidades Boca Sur. ....	86
<b>Figura 80.-</b> Valores de la velocidad .....	86
<b>Figura 81.-</b> Energía que se presenta en cada una de las Bocas .....	88
<b>Figura 82.-</b> Histograma de frecuencias de las energías.....	88
<b>Figura 83.-</b> Comparación de los datos de las mareas.....	91
<b>Figura 84.-</b> Marea con ADCIRC comparada de Yavaros y Guaymas .....	92
<b>Figura 85.-</b> Batimetrías .....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> Constituyentes armónicas en relevancia de la marea .....	4
<b>Tabla 2.-</b> Amplitud y Fase de las principales Constituyentes Armónicas de marea en la zona de estudio .....	5
<b>Tabla 1.-</b> Áreas de la laguna de Tóbari .....	10
<b>Tabla 4.-</b> Cantidad de sitios de muestreo .....	18
<b>Tabla 5.-</b> Puntos de muestreo en la laguna del Tóbari .....	18
<b>Tabla 6.-</b> Puntos del muestreo en el distrito de riego (DR041).....	19
<b>Tabla 8.-</b> Amplitud de los principales Constituyentes .....	40
<b>Tabla 9.-</b> Constituyentes de marea en el golfo .....	40
<b>Tabla 9.-</b> Comportamiento de los flujos de entrada y salida.....	89
<b>Tabla 10.-.</b> Comparación de los escenarios.....	89

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

En este capítulo se introduce una explicación breve de los conceptos básicos relacionados a las lagunas costeras, así como su importancia socioeconómica, preservación y explotación de los recursos de su medio ambiente y brevemente su clasificación.

La hidrodinámica de las lagunas costeras está fuertemente relacionada a diversas actividades de índole social económico debido a su equilibrio ambiental, como son, por ejemplo, la factibilidad de realizar acuicultura, debido a la geomorfología de su composición que por lo general son cuerpos de agua semi-cerrados y controlables, actividades relacionadas a la navegación y comunicación, mediante la interacción con instalaciones portuarias, faenas de dragados, áreas de recreación y turismo. Son zonas de hábitat natural de muchas especies, de manera general, debido a la interacción de actividades antropogénicas, ocurren problemas de contaminación por residuos industriales y domésticos. En algunos casos es posible aprovechar la energía que se genera debido a la interacción mareal y oleaje del mar y/o su energía térmica.

Debido a su alta relación con las actividades antropogénicas, las lagunas costeras son zonas de alta importancia socioeconómica, desde el punto de vista de producción de alimentos, capacidad de aprovechamiento energético, potencial turístico, habitacional y comunicación, que debemos entender y enfocarnos a su estudio, preservando el medio ambiente natural que se desarrolla en estas zonas de alta importancia ambiental.

En la zona costera hay una gran biodiversidad de ecosistemas, la laguna de Tóbari (laguna no estuarina) está catalogada como de especial importancia, debido a que los estuarios son las zonas en las que el agua de mar se diluye significativamente con el agua dulce proveniente del drenaje terrestre (Pritchard, 1967). Se trata de ecosistemas dinámicos, complejos, con muchas fronteras, en los que hay grandes variaciones de salinidad, nutrientes, temperatura, oxígeno disuelto y sustratos; con patrones de circulación determinados por la geomorfología, los vientos, la descarga de los ríos y que además son fuertemente afectados por las mareas (Yáñez Arancibia, Soberón Chávez, & Sánchez Gil, 1995)” (Garrido Hoyos, y otros, 2017).

Estudiar, entender y simular la hidrodinámica, de un cuerpo de agua es una tarea compleja debido a muchas variables que intervienen, debido a que el conocimiento de la hidrodinámica es fundamental, saber cómo se mueve el agua, a qué agentes se debe su movimiento, cuáles de éstos se pueden controlar modificar y sus afectaciones debido a modificaciones naturales o artificiales. Debido a estos motivos es importante analizar el comportamiento de la hidrodinámica, así como conocer cómo se transporta la materia en suspensión o dilución en el agua, esto puede considerarse por ejemplo la dispersión de organismos para su reproducción o caso contrario partículas de contaminantes. Con este conocimiento será posible abordar, enfrentar y resolver de una manera más adecuada

problemas de acuacultura, contaminación, navegación, formación y/o erosión de playas, transporte de sedimentos, construcción de obras, entre otras cosas.

Estuario es un cuerpo o masa de agua costera semi-cerrada, con conexión libre al mar abierto, y en el cual es medible la dilución del agua de mar por agua dulce proveniente de la tierra. (Pritchard, 1967). Hay ciertas características que lo diferencian de una bahía o de un golfo, como, por ejemplo, al ser semi cerrado, la influencia de las fronteras laterales es considerable en sus patrones de circulación, es un cuerpo costero, sin embargo, no forma parte de la línea de costa como tal debido al tamaño de su cuenca pequeña. Al tener conexión con el mar se permite el intercambio de agua, sal y transmisión de energía de la marea permanentemente para todo estado de la marea y durante todas las estaciones del año. Existe una relación con la salinidad en el interior del estuario y el océano adyacente debido a los afluentes de agua dulce, precipitación y evaporación, Pritchard definió la terminología, que actualmente se utiliza para definir “cuenca estuarina” y “cuenca no estuarina”, en donde estuarina se refiere a la existencia de una salinidad interior menor que el océano y no estuarina se refiere a una salinidad interior mayor que el océano.

En México se define laguna costera como una depresión en la zona costera, bajo el nivel de pleamar media superior, que tiene una conexión permanente o efímera con el mar, pero se encuentra protegida de éste por algún tipo de barra, estacada o elemento geomorfológico, es importante en la definición debido a que la conexión con el mar puede ser permanente o efímera, no considera las características de salinidad en el interior. Usa indistintamente los términos de laguna costera, bahía, sonda, boca, estero, estuario, caleta, lago, laguna, o lagunilla para denominar este tipo de cuencas, que se presentan en los 1/3 de los 10,000 km de longitud de costas en México. En base a su geomorfología mixta (origen, forma de la depresión y características de la barra) comúnmente se identifican las 123 principales lagunas costeras de México, sin embargo, es de recalcar que no existe una clasificación exacta, es decir, una laguna puede tener características de dos o más tipos además de estar constantemente evolucionando de un tipo a otro, o cambiando estacionalmente debido al régimen de lluvias, entre otros factores. Se considera que la única laguna costera en México que se encuentra permanentemente en condición estuarina es el Estuario del Río Colorado, (Lankford, 1976).

Entonces las lagunas costeras son fenómenos geológicos de vida corta, estando en permanente alteración por erosión y depósito de sedimentos y por las variaciones del nivel del mar y de la tierra, que reciben influencia de las descargas de los ríos afluentes y los rangos de las mareas que varían permanentemente, por lo que nunca logran tener un equilibrio definitivo, se consideran sistemas complejos de vida efímera en permanente interacción y modificación, frágiles a afectaciones externas.

La laguna de Tóbari es un caso de una laguna no estuarina, esto debido a la ausencia de aporte significativo de agua dulce de los ríos, y por que las mareas son el factor más importante en su dinámica. Dentro de sus características que la definen están: ser somera con una profundidad media de 1.4m, debido a que la relación casi nula entre la descarga

del río y la descarga de la marea. Además, su ancho es mayor a 20 veces la profundidad por lo que también se considera verticalmente homogénea. El viento, la radiación solar y la temperatura atmosférica producen evaporación de extensas superficies produciendo un gradiente de salinidad hacia la costa y a la superficie, y el mismo comportamiento para la temperatura.

Los agentes que se encuentran involucrados en la dinámica, circulación y el transporte de materia de las lagunas costeras ya sean estuarinas o no estuarinas en orden de importancia son los siguientes:

- Mareas periódicas
- Afluentes y aportaciones de agua dulce (no aplica para las no estuarinas, salvo estacionalmente)
- El esfuerzo del viento
- Gradientes de densidad, consecuentes de la temperatura y/o de salinidad, relacionados con el intercambio de agua dulce, evaporación, precipitación y el intercambio de calor
- Presión barométrica
- La morfología de la cuenca (batimetría y contorno)
- La fricción en el fondo y las paredes laterales de la cuenca
- El efecto de Coriolis

La marea en una laguna costera es una variación temporal en la posición vertical de la superficie libre del agua, con respecto a un nivel de referencia arbitrario, esta puede ser causada por cualquier fenómeno o conjunto de fenómenos internos o externos. Los fenómenos predominantes que causan la generación de mareas son los siguientes:

- a) *Astronómicos*. Son producidos por la interacción de fuerzas gravitacionales de planetas y astros sobre la masa de agua;
- b) *Meteorológicos*. Vientos y gradientes de presión atmosférica en la región local o en zonas oceánicas adyacentes, evaporación y precipitación;
- c) *Gradientes de densidad*. Son productos de gradientes de salinidad y/o temperatura horizontales o verticales; y
- d) *Locales u otras*. Causadas por la morfología, fricción, dimensiones de la cuenca, efecto de Coriolis, y aportaciones de los afluentes.

La marea astronómica es periódica y predecible, es la más importante en magnitud; la meteorológica es en parte periódica y aperiódica y es la segunda en importancia, el resto son consideradas aperiódicas y tienen poca relevancia.

El Sol y la Luna por su mayor masa comparada con otros astros y su cercanía a la Tierra producen fuerzas atractivas significantes hacia el mar, las características y anomalías (inclinaciones de ejes, acercamientos, alejamientos, oscilaciones, interacciones, rotaciones, periodos, interacción con otros planetas, cambios de velocidad, etc.) de sus orbitas, originan variaciones en las mareas (constantes, periodo largo, diurnas y

semidiurnas). Estas mareas sufren variaciones debido a: a) fluctuaciones de la declinación y el paralaje y b) variaciones como consecuencia de la atracción recíproca Sol-Luna; originándose lo que se conoce como constituyentes armónicas de las mareas.

La marea astronómica que incluye a todas las constituyentes armónicas, que es diferente para cada punto de la superficie terrestre, según su latitud y longitud, puede expresarse como la superposición de dichas constituyentes:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\sigma_k T_k - \alpha_k)$$

Ecuación 1

Donde,  $A_k$  son las amplitudes,  $T_k$  los periodos,  $\alpha_k$  las fases,  $N$  el número total de componentes, y  $\sigma_k = 2\pi/T_k$  son las frecuencias angulares. Mediante un análisis armónico de registros (mediciones) de alturas de marea puede determinarse para cada localidad geográfica la amplitud y fase de cada una de las constituyentes si se conocen sus periodos.

**Tabla 1.-** Constituyentes armónicas en relevancia de la marea

<b>Semidiurnas</b>		<b>Periodo (horas)</b>	<b>Promedio mundial de importancia relativa</b>
$M_2$	Lunar principal	12:42	100
$N_2$	Lunar elíptico mayor	12:66	19.2
$K_2$	Lunar-solar declinacional	11:97	12.7
$S_2$	Solar principal	12:00	46.6
<b>Diurnas</b>		<b>Periodo (horas)</b>	<b>Promedio mundial de importancia relativa</b>
$O_1$	Lunar principal	25:82	41.5
$K_1$	Lunar-solar declinacional	23:93	58.4
$P_1$	Solar principal	24:01	19.4

**Tabla 2.-** Amplitud y Fase de las principales Constituyentes Armónicas de marea en la zona de estudio

Lugar	Referencia (fase)	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		K <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>		P <sub>1</sub>	
		A (m)	α (°)	A (m)	α (°)	A (m)	α (°)	A (m)	α (°)	A (m)	α (°)	A (m)	α (°)	A (m)	α (°)
Guaymas Sonora	105° W	0.136	311.9	0.106	286.6	0.036	330	0.035	281.4	0.279	73.7	0.186	72.2	0.093	71.5
Yavaros Sonora	105° W	0.221	304.5	0.157	292.7	0.055	311.8	0.055	293.4	0.257	84.4	0.178	76.7	0.085	84.4

Las curvas de variación temporal de altura de mareas permiten definir algunos casos como típicos:

*Marea semidiurna:* presentan dos máximos (pleamares) y 2 mínimos (bajamares), en un día.

*Marea diurna:* presenta un máximo y un mínimo en un día.

Las mareas durante un mes (periodo lunar) pueden ir cambiando de semidiurnas a diurnas o viceversa, de nominándose m ixtas, pe ro c on pr edominancia ha cia a lgún comportamiento. Las mareas siguen un comportamiento relacionado con el periodo lunar, además de las mareas antes mencionadas se pueden presentar quincenalmente variaciones en los rangos de amplitudes; creciendo o decreciendo originándose dos veces al mes:

*Mareas vivas (sicigia):* ocurren cuando se presenta luna llena y luna nueva, su característica es que los rangos de sus amplitudes son mayores

*Mareas muertas (cuadratura):* ocurren en los cuartos crecientes y menguantes; su característica es que los rangos de sus amplitudes son menores.

Se entiende como rango de marea a la diferencia de altura entre un máximo y un mínimo consecutivo o viceversa, los rangos de las mareas son diferentes para cada ciclo (cada lugar). En una laguna costera se define prisma de marea al volumen de agua que se almacena (o evacua) entre una bajamar y una pleamar (o viceversa) consecutivo y también es diferente para cada ciclo de marea.

La marea meteorológica y local son consideradas de menor orden de magnitud que la astronómica, de bido a eso no se profundiza en el tema. Sin embargo, la marea total (involucrando todos los componentes) se expresa como:

$$y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(\sigma_k t - \alpha_k) + n(t)$$

Ecuación 2

En donde, el primer término es el nivel de referencia, el segundo corresponde a la sumatoria de las componentes armónicas, astronómicas, meteorológicas y locales y el

tercer término son las componentes no armónicas meteorológicas y ruido. La teoría astronómica indica cuales frecuencias ( $\sigma_k$ ) y cuantas ( $N$ ) de ellas son significativas en cada localidad. Generalmente las más importantes son 6-7. Mediante un análisis de Fourier en los registros de marea de cada localidad se obtienen las amplitudes  $A_k$  y las fases  $\alpha_k$  de cada componente armónica de período conocido y se filtran de las no armónicas  $n(t)$ . En una laguna costera además del filtrado de Fourier se realiza un análisis espectral para identificar la presencia de otras componentes armónicas de frecuencias desconocidas.

Las descargas de agua dulce por afluentes son típicas para lagunas costeras por definición de lagunas estuarinas, y en algunos casos estacionalmente en las no-estuarinas. Los efectos más importantes que producen las aportaciones de agua dulce en una laguna son producir la estratificación de la circulación en dos capas, el intercambio de agua entre el afluente y la laguna, influyen en la rapidez de la renovación de las aguas, y modifican la materia por difusión turbulenta y por dispersión.

El viento produce efectos locales (evaporación, apilamiento de agua en su dirección y oleaje) debido a que actúa directamente sobre la laguna costera y efectos no locales (flujos residuales de frecuencias bajas) al actuar sobre el océano, estos flujos en frecuencias bajas en lagunas no estuarinas producen las condiciones de renovación de agua a largo plazo y hacen factible (control de calidad y transporte de sedimentos) las actividades de maricultura debido a que no cuentan con aportes permanentes de agua.

Los gradientes de densidad están determinados por su temperatura, salinidad y presión, para el caso de lagunas muy someras como la laguna de Tóbari, la influencia de las variaciones verticales de presión en la densidad es despreciables, y éstas se encuentran únicamente determinadas por temperatura y salinidad, estas son independientes en sí. En lagunas estuarinas, los aportes de agua dulce producen gradientes de salinidad significativos que predominan sobre los gradientes de temperatura. Lo contrario sucede en lagunas no estuarinas (por lo general ubicadas en zonas áridas semi-tropicales), donde los gradientes de temperatura son los predominantes debido al calentamiento solar significativo.

En un volumen de agua de mar, teniendo una cantidad constante de masa de sal, la única forma en que varíe su salinidad es mediante el aumento o disminución de cantidades de agua dulce presente en ella. Pero en una laguna costera, la masa de sal varía con el agua de mar que entra y sale debido a los efectos de mareas.

En las lagunas costeras hay 3 fuentes naturales de aportación y variación de agua dulce, evaporación, precipitación y descargas de afluentes; en las lagunas estuarinas los afluentes son el factor predominante, en las no estuarinas, no hay afluentes constantes y la precipitación es escasa, la evaporación es la única fuente de variaciones de agua dulce que inducen fluctuaciones de la salinidad en la cuenca.



En escalas de tiempo largas (meses, estaciones del año) las fluctuaciones de salinidad las cuales generan gradientes de densidad para lagunas estuarinas dependen principalmente de los intercambios de volúmenes producidos por las mareas, en las lagunas estuarinas, además de las mareas, comparte relación con las aportaciones estacionales de las descargas de agua dulce de los afluentes. En las escalas de tiempo cortas (días o semanas) las variaciones y gradientes dependen prioritariamente de las descargas de agua dulce proveniente de los afluentes en casos estuarinos y exclusivamente de la evaporación en los casos no estuarinos.

Los valores de la temperatura dependen de cómo se transfiera el calor desde o hacia la masa de agua mediante conducción, convección o radiación. Para escalas de tiempo largas, en las lagunas no estuarinas, las variaciones de temperatura dependen de las variaciones del océano adyacente transmitidas por la convección forzada del intercambio de volúmenes de aguas producido por la marea y fluctuaciones estacionales de la radiación solar, en las lagunas estuarinas además de la convección forzada por el volumen de aguas y la radiación estacional, influye la convección forzada por las descargas de agua dulce de los afluentes.

En escalas de tiempo corto, para los casos no estuarinos, las variaciones y gradientes dependen prioritariamente de las fluctuaciones en la radiación solar; y para los casos estuarinos, de las fluctuaciones en la convección forzada por las descargas de agua dulce de los afluentes. Adicionalmente estas variaciones pueden verse afectadas debido a eventos extraordinarios en estaciones del año, como corrientes de agua fría del océano adyacente durante veranos, precipitaciones excesivas y/o atípicas debidas a tormentas o huracanes, independientemente si son estuarinas o no estuarinas. Aunque cuando la temperatura y la salinidad son dos variables independientes entre sí, la dependencia conjunta de sus variaciones en los mismos fenómenos físicos pueden ocasionar su correlación en casos particulares, como por ejemplo debido al área, ya que en un volumen de agua, con su mayor extensión superficial se incrementa el volumen de agua dulce evaporada y la radiación recibida, caso particular para una laguna no estuarina, este fenómeno produce que la salinidad aumente y la temperatura aumente simultáneamente bien cuando no hay evaporación significativa, que la salinidad permanezca constante y la temperatura aumente, simultáneamente. Otro ejemplo de esta relación es el efecto en el tiempo de residencia, en las zonas alejadas a las bocas (lagunas no estuarinas) donde las velocidades de las corrientes son pequeñas, o bien en las zonas más extensas durante los periodos de cuadratura (muertas), la lenta renovación del agua y su presencia por tiempo prolongado y poco movimiento del lugar, acentúan la evaporación y su calentamiento. En consecuencia, la salinidad y la temperatura aumentan simultáneamente, fenómeno que no se observa en las zonas cercanas a la boca (donde si hay más movimiento).

La presión barométrica es identificada como un agente principal en la inducción de fluctuaciones en frecuencias bajas del nivel de la superficie libre del agua. La morfología de la cuenca genera dos efectos en el patrón de circulación de lagunas, a) formación de meandros en las estuarinas y b) efecto “bombeo de marea” en las no estuarinas; aunque

ambos pueden presentarse en las lagunas, no son exclusivos. Los efectos de fricción (lateral y de fondo) en la hidrodinámica de una laguna costera más importantes son: a) retardo y amortiguación de la ola de marea, más acentuados en no estuarinas por sus anchos superficiales característicos mayores que sus profundidades b) el paso no lineal de energía a componentes locales y c) pérdida de momentum de las corrientes. El efecto de Coriolis produce una asimetría derecha-izquierda en la descarga neta si la laguna costera es suficientemente ancha para que las paredes laterales no logren anular el efecto.

## CAPÍTULO 2

### ZONA DE ESTUDIO

#### (LAGUNA DE TÓBARI)

Este trabajo contribuye en la construcción de escenarios de evaluación y para la toma de decisiones en mejoramiento ambiental, utilizados en el proyecto estratégico de Huella Hídrica, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, “DP1712.1-Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales”. El proyecto considera de gran importancia el estudio de la hidrodinámica debido a la relación con la dispersión y transporte de los contaminantes inorgánicos-orgánicos presentes en la descarga de la cuenca del río Yaqui, así como los impactos ambientales sobre los organismos de agua dulce y marina.

Este documento presenta el desarrollo de un modelo de soporte, para toma de decisiones, que permita analizar los efectos de la contaminación en un sistema lagunar, que recibe las descargas directas o indirectas de los escurrimientos a la salida de una cuenca hidrológica. Se analiza la relación entre la Laguna de Tóbari - la región hidrológica Río Yaqui-Vicam RH-09ba (INEGI), en donde la Laguna de Tóbari recibe las descargas de los drenes agrícolas del DR 041 Río Yaqui y además existe una interacción de marea entre la laguna y el Golfo de California.

En la cuenca hidrológica del río Yaqui en su parte final se ubica la Presa Álvaro Obregón (Oviachic), que tiene una altura de 57 m y una capacidad de almacenamiento de 2,989 Mm<sup>3</sup>, con un uso agrícola, público urbano, de generación hidroeléctrica y piscícola. La presa Álvaro Obregón cuenta con dos obras de toma, la toma alta para uso agrícola y una toma baja que descarga a río en donde se ubica la central hidroeléctrica Chiculi de la Comisión Federal de Electricidad, pero posteriormente se canaliza a una red de canales para uso agrícola.

Por lo tanto, el principal uso del agua del río Yaqui aguas debajo de la Presa, es para producción agrícola, en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui que abarca una superficie de 230,000 ha. Para analizar los efectos de las descargas agrícolas en la Laguna de Tóbari se debe tener en cuenta que la red de drenaje del DR 041 Río Yaqui desemboca en dos zonas principalmente. La primera en el tramo del río Yaqui, aguas abajo de la presa Álvaro Obregón y la segunda, en la Laguna de Tóbari. En el trabajo “Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales” se analizaron las descargas principales hacia la Laguna (dren 16), que comprenden por una parte volúmenes o escurrimientos localizados en la parte norte y sur de la laguna que descargan a este sistema lagunar, en donde se ubican los desarrollos de producción camaronícola los cuales han disminuido su producción de especies comerciales atribuyendo como causa principal el sistema medioambiental de la laguna.

Entonces, la integración de la hidrodinámica actual representa una aportación significativa y una explicación al comportamiento de la posible bioacumulación y biomagnificación de los contaminantes en el ecosistema acuático. De esta manera obteniendo la información pertinente, se pretende plantear estrategias de control y en su caso la mitigación de la contaminación presente en la zona de estudio (Garrido Hoyos, y otros, 2017).

La laguna del El Tóbari se ubica al Suroeste de Ciudad Obregón, Sonora entre los 26° 54' y 27° 10' de latitud norte y los 109° 50' y 110° 24' de longitud oeste, con una superficie total aproximada de 8,274 ha, y se encuentra separada del Golfo de California por una barra arenosa, conocida como la isla de Hiuvulai. La morfología entre la laguna y golfo de California la compone una isla con dos bocas en cada uno de sus extremos. La profundidad promedio de la laguna es 1.4 m, pero existen zonas de mayor profundidad como son los canales de comunicación de acceso a las bocas, en el caso de las bocas se tienen profundidades de 5 y 8 m en la boca norte y sur, respectivamente como se ilustra en la **Figura 1** (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008).

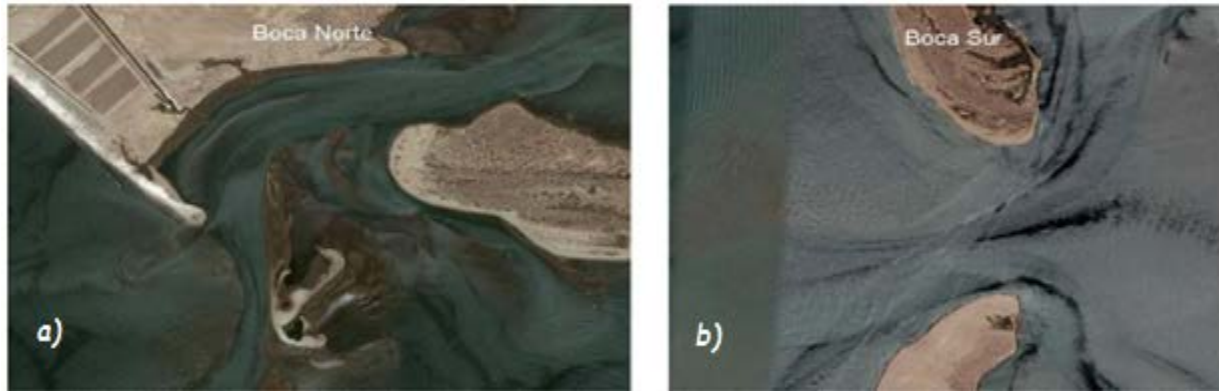
**Tabla 3.-** Áreas de la laguna de Tóbari

COMPONENTE	Ha	%
<b>Tóbari</b>	<b>6,421.10</b>	<b>77.61</b>
Ensenada La Batea	7.70	0.09
Estero El Chilico	1.10	0.01
Giamora	65.90	0.80
La Liebre	23.40	0.28
La Pitahaya	144.20	1.74
Ensenada El Gallo	29.90	0.36
Estero Punta Verde	14.60	0.18
El Conchalito	55.10	0.67
El Tóbarito	1038.10	12.55
La Península	111.80	1.35
Cubula	118.60	1.43
Cumora	13.60	0.16
El Diablo	38.20	0.46
El Siari	190.70	2.30
<b>TOTAL</b>	<b>8,274.00</b>	<b>100.00</b>



**Figura 1.-** Laguna de Tóbari y sus componentes (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008)

Las características de las bocas de comunicación con el golfo de California o mar de Cortés son la norte con 1,200 m y 940 m al sur en sus partes más amplias (variables dependiendo de la referencia de medición), presentan variaciones a lo largo del tiempo debido a las mareas y la corriente litoral. En la boca norte se observa un delta que disminuye la circulación del flujo de marea que divide el escurrimiento en dos canales principales.



**Figura 2.-** a) Bocabarras Norte Comunicación al Mar donde presenta un bajo de arena que influye en los flujos de entra y salida b) Boca Sur con comunicación al mar (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008)

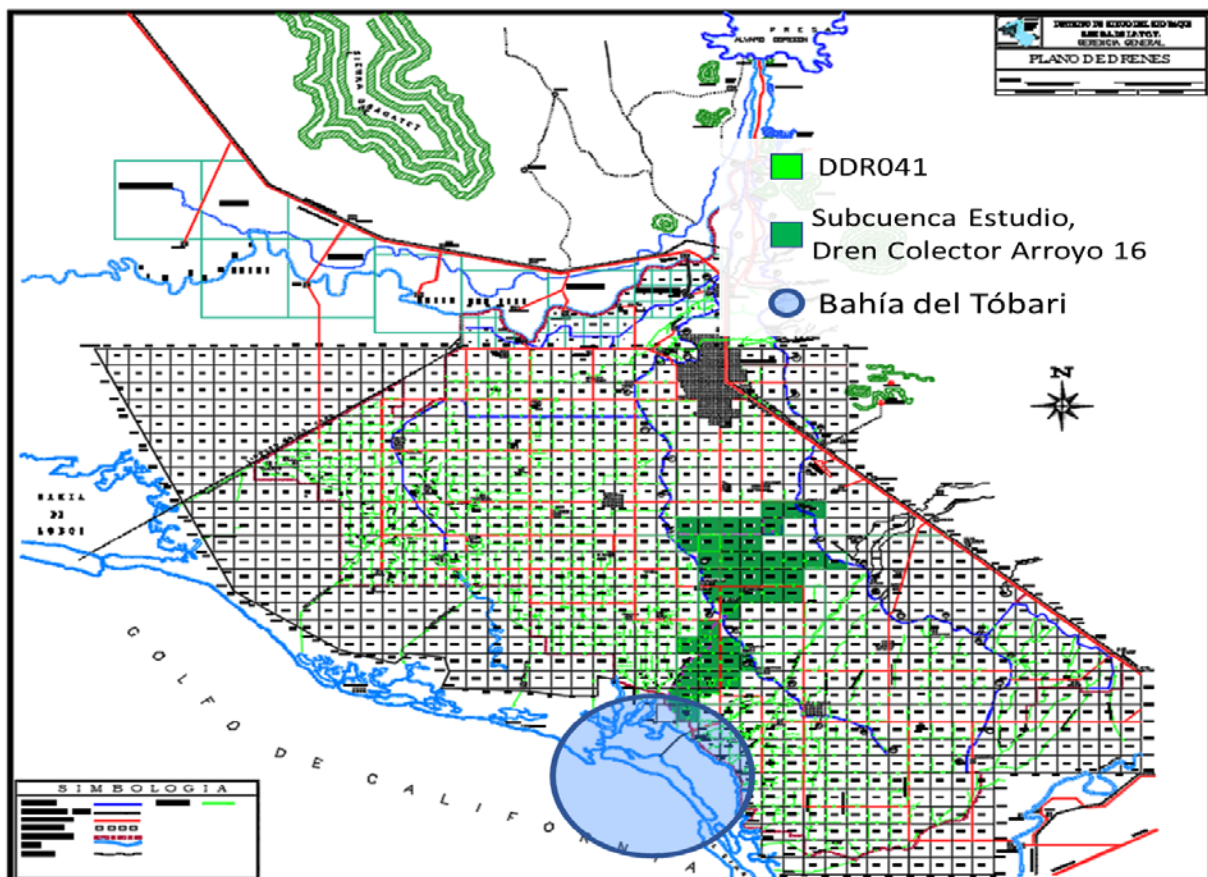
Durante la investigación bibliográfica se analizó una propuesta de restauración ambiental del sistema, la cual tenía como objeto evaluar el efecto en la hidrodinámica de la laguna considerando el pedraplén de 4.7 km construido en los años setenta que comunicaba el continente con la isla de Hiuvulai, la ubicación del pedraplén dentro del sistema lagunar era cargado hacia el norte y esto dividió la laguna en dos sectores. El pedraplén disminuyó la circulación del flujo de la marea y produjo bajas velocidades durante muchos años, más aún que el único punto de comunicación entre las dos partes de la laguna era un puente de 20 m de ancho. Esta problemática indujo disminución en la profundidad de la laguna y afectaciones a la calidad del agua del sistema. (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008).

Como antecedente a la generación de la herramienta de soporte, el estudio realizado por GS Ingeniería Integral en 2008, definió la laguna de Tóbari como un complejo lagunar cuyos componentes ambientales contiene un humedal con las características de un estuario mezclado, que en ocasiones funciona como sistema no estuarino, lo anterior es debido a que la salinidad es mayor al interior de la bahía que en la zona marina y con una baja comunicación con el golfo de California como se describió anteriormente. En 2008, la SAGARPA, impulsó una iniciativa para rehabilitar la circulación del agua, esta propuesta consideraba eliminar el puente vehicular y establecer un plan de dragados dentro del sistema, obteniendo contribuciones positivas a las actividades de la pesca, turismo de la zona e incluso podría promover mejoras en la hidrodinámica. En 2012 se removió el puente y se realizaron dragados en algunas zonas en el sistema, en la actualidad los problemas continúan.

En este estudio se realizó un trabajo de campo para determinar la hidrodinámica actual, incluyendo la propuesta de mejora en la laguna el Tóbari. Para lo cual se realizó la medición de la batimetría en la zona de las bocas y la zona cercana a los canales de comunicación del norte y sur, también se realizó una campaña de aforos de corrientes con equipo de perfilación acústica ADCP (*Acoustic Doppler current profiler*) en las bocas, en los periodos de vaciante de la marea, para establecer los flujos máximos en ese periodo. Así como una campaña de medición de salinidad y conductividad eléctrica, con equipo CTD (medidor de Conductividad Temperatura y Densidad en columna).

En el estudio elaborado en 2008 para la SAGARPA, se valida la importancia ambiental, social y económica de la laguna, así como la decadencia productiva de todos sus ámbitos de la zona, en

dicho estudio se consideró la división en tres sectores o celdas debido a la morfología de la laguna y a la división que creaba el puente de acceso a la isla de Hiuvulai (Norte, Central y Sur) y las acciones que se implementaron tuvieron como objetivo mejorar las condiciones para el subsistema pesquero mediante el mejoramiento del sistema en general y se puso en marcha un programa de dragado (finalizado 2012) en los canales principales con la finalidad de mejorar los flujos en la laguna (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008) . En el estudio “Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales” elaborado en 2017 se revalida la importancia de la zona de estudio en el ámbito social económico y problemática ambiental con relevancia y enfoque en metales pesados. Considerando que el aporte de sedimentos y contaminantes provienen de los drenes de la zona agrícola que tienen su descarga directa a las aguas de la laguna. (Garrido Hoyos, y otros, 2017), estos procesos aceleran el proceso natural de deterioro de una laguna costera, debido a su composición geológica y se refleja en su deterioro ambiental que repercute en bajas producciones de especies comerciales, con valor comercial aprovechable de la zona, y que finalmente repercuten en el desarrollo social de las comunidades que dependen de este cuerpo de agua, que tiene interacción con el mar. (GS Ingeniería Integral, S.A de C.V., 2008) .



**Figura 3.-** Diagrama de la zona de estudio donde se ilustra el plano de DDR041 proporcionado por la administración local y se resalta la zona de influencia de la investigación que tiene como inicio la presa Álvaro Obregón y descarga final la laguna de Tóbari, Fuente: Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales (Garrido Hoyos, y otros, 2017)

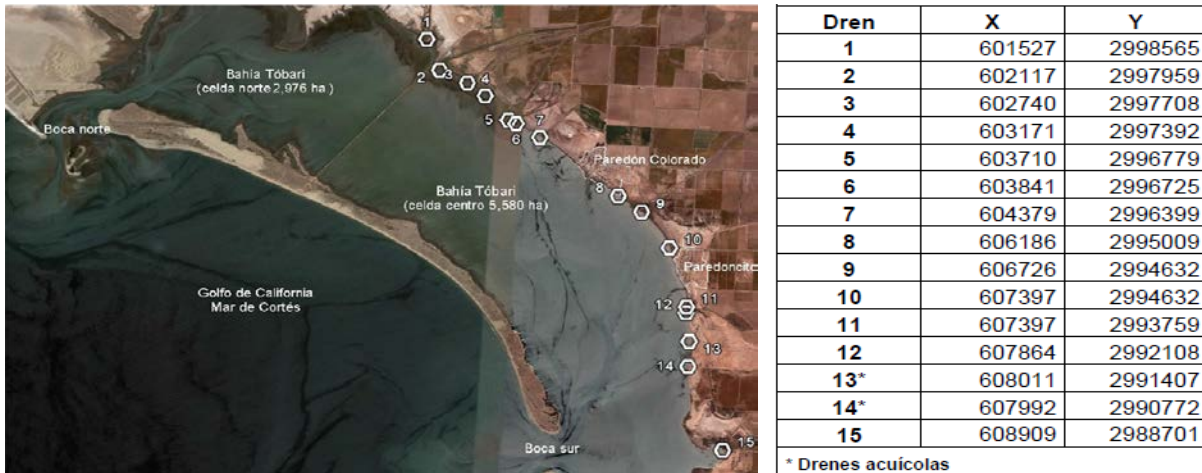


Figura 4.- Localización de drenes en la Bahía del Tóbari (Fuente: GS Ingeniería Integral S.A. de C.V., 2008)

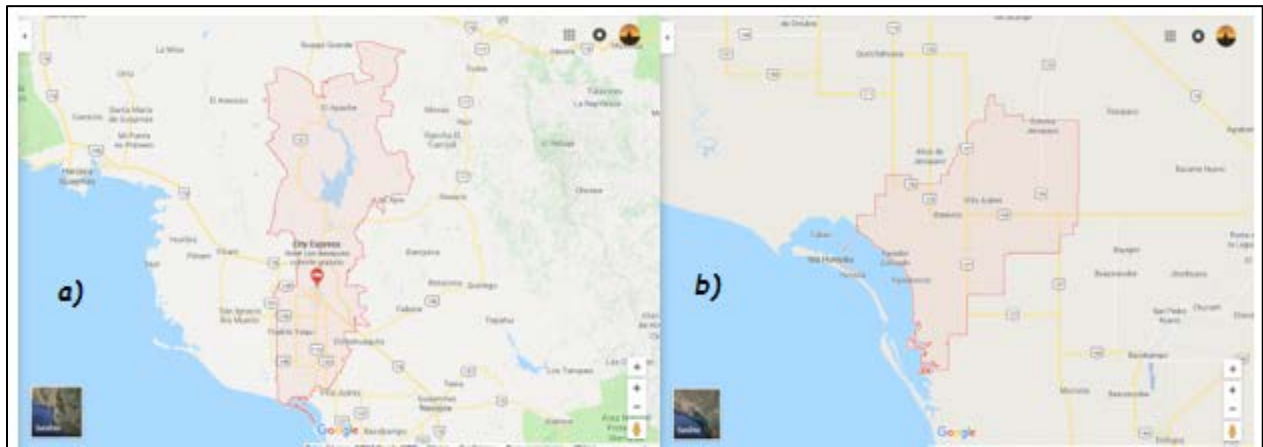
### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los sistemas ambientales de alta complejidad, la mayor parte de los contaminantes, provienen de fuentes no localizadas, conocidas anteriormente con el nombre de contaminación "difusa". Este tipo de contaminación es resultado y está estrechamente ligada a un amplio grupo de actividades humanas en las que los contaminantes no tienen un punto claro de ingreso en los cursos de agua. Convencionalmente, en la mayor parte de los países, se presentan ejemplos de todos tipos de prácticas agrícolas y formas de utilización del suelo, incluidas las operaciones de alimentación animal, las cuales son consideradas como fuentes no localizadas (Ongley, 1997). Durante mucho tiempo las consecuencias de la contaminación difusa pasaron desapercibidas; hoy en día, la intensidad de las actividades humanas y el efecto acumulativo de los contaminantes en los ríos y cuerpos de agua han tomado mayores proporciones que ponen en riesgo la salud de los ecosistemas, la salud humana y las actividades productivas en áreas terrestres y marinas.

La contaminación no localizada resulta entonces de un efecto acumulativo, producto de pequeños aportes individuales realizados desde sitios diversos, que terminan afectando los cuerpos de agua superficial, las aguas subterráneas y muchas veces también el área marina asociada, ya que sus impactos no se restringen a las cuencas hidrográficas, sino que impactan a las costas y los cuerpos de agua dulce, salobre y marina; como lo demuestran algunos estudios realizados sobre los procesos de eutrofización en los sistemas costeros de Yucatán (Herrera-Silveira, y otros, 2009) y de hipoxia en zonas del Golfo de México (Rabalais, Turner, & Scavia, 2002) (Garrido Hoyos, y otros, 2017).

La actividad pesquera de los Mayos de Sonora se desarrolla principalmente en la zona costera del municipio de Benito Juárez, en las localidades Paredón Colorado (Paredón Viejo), Paredoncito y Aceitunitas, localizados en la Laguna de Tóbari, la cual tiene problemas de contaminación y principalmente por el azolvamiento, debido a la descarga de drenes agrícolas que aportan además de sólidos, aguas contaminadas mediante las descargas acuícolas de las granjas de camarones instaladas en las proximidades y drenes agrícolas colectores del DR041, que las localidades utilizan

como medio de desalojo de aguas residuales domésticas. Además de tener una eficiente circulación hidrodinámica ocasionada por la disminución de entrada de agua dulce del río Mayo y la regulación de las presas aguas arriba y el rebombear de las aguas salobres del DR041, en los reportes de la calidad del agua de la laguna se tiene una mayor salinidad que en el Golfo de California. Alrededor del 70–75% de la contaminación marina global es producto de las actividades humanas que tienen lugar en la superficie terrestre. La importancia de la contribución de los ríos como vía de ingreso de contaminantes al mar fue reconocida por primera vez en la Conferencia Técnica de la FAO sobre Contaminación Marina y sus Efectos en los Recursos Vivos (Escobar, 2002), donde se establece que los ríos contribuyen en una serie de funciones tales como el transporte de agua, la acuicultura, la agricultura de riego, fuente de agua para uso doméstico y el turismo (Liao, y otros, 2016). (Garrido Hoyos, y otros, 2017).



**Figura 5.-** localización de los municipios a los que pertenece la Laguna de Tóbari Fuente: Medios Electrónicos

GS Ingeniería Integral en 2008 señaló que la Bahía del Tóbari se ha convertido en el cuerpo receptor de las aguas residuales de diversas actividades ajenas a la pesca que se desarrollan en o alrededor de la bahía, principalmente actividades turísticas, acuícolas, agrícolas y porcícolas, además que los efectos acumulados de dichas actividades significan una agresión importante al modelo de circulación hidrodinámica de este cuerpo de agua. El sistema de presas y los módulos de riego también tienen relación debido a la regulación de los volúmenes de agua descargados y las políticas de operación, ocasionando que el volumen de agua dulce estacional que descargaba en la bahía sea de temporal o agua de retorno después de haber regado los terrenos del DR (agua ligeramente más salada), incrementando así la cantidad de sólidos en el agua que se descarga en la laguna. Además, la red de drenes del DR ha sido aprovechado por las localidades ubicadas en las márgenes para verter las aguas residuales urbanas y que tienen como destino final la laguna de Tóbari. Así, el problema es complejo y además hay que añadir la eficiente circulación hidrodinámica de la laguna ocasionada por la restricción hidráulica continental de bida a l piedraplen (1970–2012) que existía como comunicación a la isla Hiuvulai y el avanzado proceso de azolve de la propia laguna.

El deterioro natural de una laguna costera se aceleró, primero con la obstrucción de los flujos con la construcción de un piedraplen con la finalidad de fomentar el turismo de la zona, repercutió en la calidad de las aguas y en la caída de la producción de especies de alto valor comercial producidas



en la zona mediante acuicultura, y también en la cantidad de producto obtenido de la pesquería, la decisión de analizar la hidrodinámica de la laguna es una respuesta a la situación actual, la remoción del puente y un proyecto de dragado donde se consideró canales principales de recirculación de la laguna, con el objetivo de fomentar la recuperación ecológica de la zona, fomentando la construcción de 11 tarquinas para la recuperación de mangle en la zona y contener los azolves, no han contribuido positivamente y las descargas de los drenes de la zona agrícola que vierten en la laguna según los ciclos de cultivos continúan acarreado gran cantidad de sedimentos, continuando con el proceso de deterioro de la laguna, por lo que es de vital importancia analizar el comportamiento hidrodinámico actual de la laguna, la interacción de las bocas y proponer algún medio de mitigación de los daños y/o mejoramiento de la zona.

### JUSTIFICACIÓN

Durante las últimas décadas, los estudios enfocados al medio ambiente y la contaminación han sido de relevancia internacional y se han incrementado debido a sus implicaciones directamente relacionadas sobre descripciones y explicaciones de diversos fenómenos físicos y antropológicos, esta relación aunada a los costos cada vez mayores, hacen que los programas de monitoreo y remediación requieran de una mejor planeación, ejecución, análisis, tratamiento de datos y comunicación a los usuarios y autoridades de cada país o región, para con ello definir estrategias de prevención, mitigación o remediación. (Abarca, 2007)

De acuerdo con la clasificación de Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la región Río Yacahua-Cascada Basaseachic (Sonora y Chihuahua) se encuentra dentro de la categoría RHP “Amenazada” con varios aspectos preocupantes, destacando entre ellos la contaminación por agroquímicos en la planicie costera, los desechos mineros en las partes altas de la cuenca, y las descargas domésticas residuales (CONABIO, 2008).

En el estudio: “Estimación y dispersión de contaminantes en el río Yacahua (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales” elaborado por la coordinación de desarrollo profesional e institucional de la subordinación de posgrado del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua mediante el monitoreo y evaluación de calidad del agua, sedimentos y organismos en la zona de estudio. Se describen las visitas a la zona de estudio para la obtención de muestras de calidad de las aguas en DR 041 en los meses de junio y noviembre de 2017. Sin embargo, no involucra el estudio de la hidrodinámica, las características de la laguna de Tóbari y una explicación de la condición actual. En el mes junio 2017 (época de estiaje) se llevó a cabo la primera visita prospectiva a la zona de estudio, los días del 24 al 29 de junio del 2017, dentro de la información recopilada se encuentra el Plano general del DR041 **Figura 3**, y los calendarios de cultivos, los cuales están relacionados con las aportaciones de aguas dulce a la laguna. En la visita prospectiva (junio 2017) se realizó un recorrido en el Distrito de Riego 041 recorriendo los principales drenes que conducen el agua de riego hacia la laguna de Tóbari. fueron identificados 14 puntos de muestreo en la laguna, y 18 puntos de muestreo a lo largo del DR041 que incluyeron canales de riego, pozos, drenes, plantas potabilizadoras y plantas de tratamiento. (Garrido Hoyos, y otros, 2017)



**Figura 6.-** Fotos de la laguna en diferentes etapas, pleamar-bajamar-pleamar.



**Figura 7.-** Toma y transporte de muestras a) al realizar los muestreos y transectos el nivel de las aguas de la laguna disminuyo y mediante una carreta con tracción animal se permitió salir de la laguna debido a que la lanchas no podían acercarse al desembarcadero b) carreta de tracción animal yendo por las muestras



**Figura 8.-** Sitios de muestreo de agua y sedimentos en la laguna a) ejemplo de toma de muestra con equipo CTD b) separación de sedimento obtenido del punto de muestreo



**Figura 9.-** Sitios determinados para el muestreo en la laguna de Tóbari a) Etiquetas y preservación de las muestras se clasifica y anota la información de las muestras tomadas de agua b) Filtración de muestras y obtención de las muestras de agua en diversos puntos de la laguna



**Figura 10.-** Toma de muestras de Aguas y Sedimentos a) Sonda multiparamétrica HANNA HI 9829 b) Extracción y recolección de sedimentos mediante draga Van-Veen

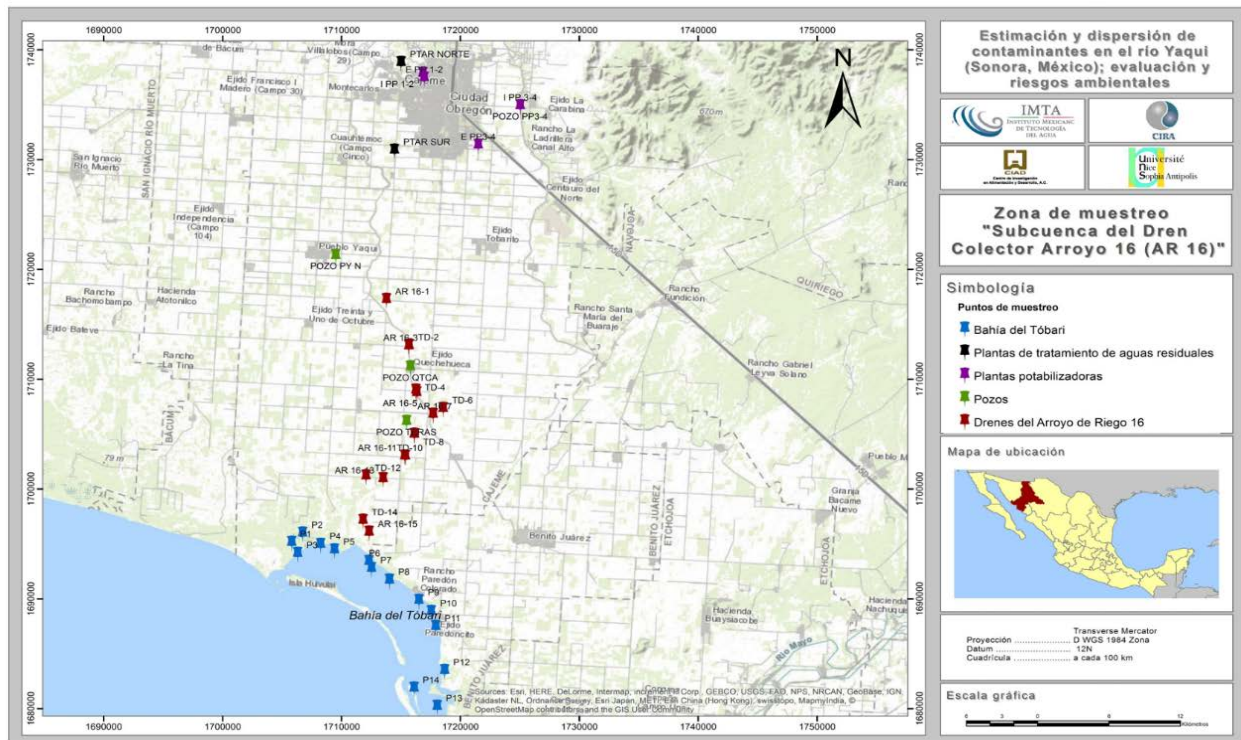
En la etapa de noviembre 2017 (época de siembra) se realizó una segunda visita a la zona de acuerdo con las fechas de siembra y la guía de riego, y las fechas para el muestreo correspondieron del 27 de octubre al 01 de noviembre de 2017, con el fin de asegurar la mayor cantidad de agua en el dren principal y tributarios

**Tabla 4.-** Cantidad de sitios de muestreo

Sitio propuesto	Número de muestras
Red de drenaje	15
Potabilizadoras	4
Pozos	4
PTAR efluente	2
Bahía del Tóbari	14
<b>TOTAL</b>	<b>39</b>

**Tabla 5.-** Puntos de muestreo en la laguna del Tóbari

No	Identificador	Coordenadas	
		Latitud Norte	Longitud Oeste
1	P1	27°06'50"	110°02'31"
2	P2	27°07'18"	110°01'21"
3	P3	27°06'18"	110°02'11"
4	P4	27°06'48"	110°01'02"
5	P5	27°04'15"	110°00'06"
6	P6	27°06'05"	109°58'31"
7	P7	27°05'45"	109°58'22"
8	P8	27°05'13"	109°57'25"
9	P9	27°04'17"	109°55'51"
10	P10	27°03'46"	109°55'11"
11	P11	27°03'02"	109°54'55"
12	P12	27°00'53"	109°54'20"
13	P13	26°59'06"	109°54'36"
14	P14	26°59'56"	109°55'50"

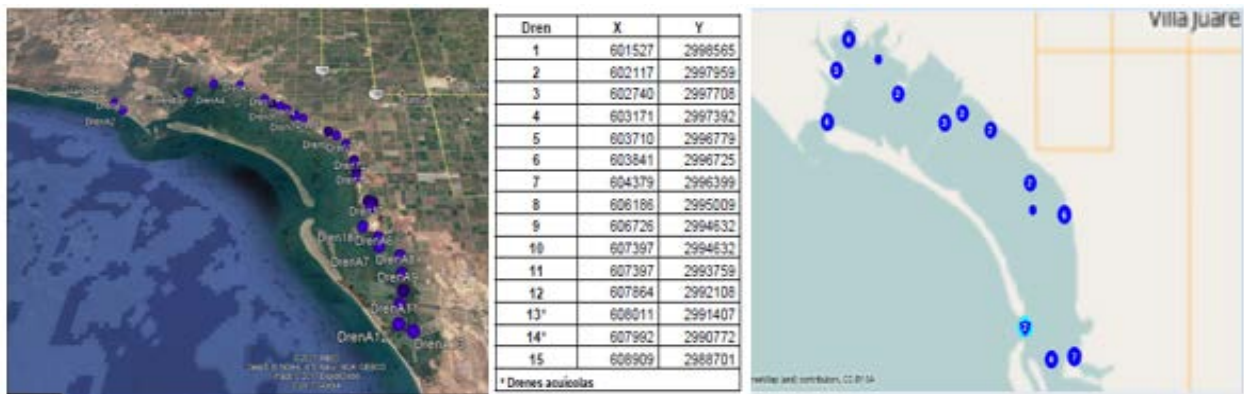


**Figura 11.-** Puntos del recorrido en la zona de estudio. La toma de muestras de ala laguna complementa el estudio (Garrido Hoyos, y otros, 2017)

**Tabla 6.-** Puntos del muestreo en el distrito de riego (DR041)

Punto		Coordenadas	
Consecutivo	Descripción (referencia)	Latitud Norte	Longitud Oeste
15	AR 16-1	27°19.061	109°58.431
16	TD-2	27°16.872	109°57.138
17	AR 16-3	27°16.839	109°57.143
18	TD-4	27°14.667	109°56.642
19	AR 16-5	27°14.549	109°56.597
20	TD-6	27°14.667	109°56.642
21	AR 16-7	27°13.514	109°55.695
22	TD-8	27°12.490	109°56.603
23	AR 16-9	27°12.479	109°56.580
24	TD-10	27° 11.387	109° 56.987
25	AR 16-11	27° 11.381	109° 57.014
26	TD-12	27° 08.060	109° 58.560
27	AR 16-13	27° 10.209	109° 58.490
28	TD-14	27° 08.097	109° 58.942
29	AR 16-15	27° 07.537	109° 58.602
30	PP 1 Y 2 INFLUENTE	27° 30.332	109° 57.257
31	PP 1 Y 2 EFLUENTE	27° 30.126	109° 57.164
32	PP 3 Y 4 INFLUENTE	27° 28.980	109° 52.185
33	PP 3 Y 4 EFLUENTE	27° 26.939	109° 54.218
34	Pozo PP 3 y 4	27° 28.590	109° 52.110
35	Pozo PY-N	27° 21.718	110° 01.972
36	Pozo Teras	27° 13.592	109° 57.212
37	Pozo QTCA	27° 15.480	109° 57.000
38	PTAR- NORTE	27° 30.823	109° 58.428
39	PTAR -SUR	27° 28.980	109° 52.185

La descarga a la bahía de los principales drenes se ubica en los siguientes puntos:



**Figura 12.-** Localización de los drenes de descarga del distrito de riego 041 a la laguna de Tóbari y localización de los puntos de muestreo de CTD en el interior de la laguna, donde se obtuvo valores de temperatura, salinidad, conductividad y profundidades.

Los sitios fueron identificados de acuerdo con la información analizada conforme a los planos dentro de la zona de estudio para obtener el comportamiento general aguas debajo de la presa hasta la salida de la cuenca que corresponde a la laguna de Tóbari, se definieron en el estudio de estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales, se consideraron la toma de 39 muestras de agua, que incluyen 14 puntos en la Bahía del Tóbari incluyendo sedimentos en cada punto, 15 puntos en los drenes, 4 pozos de agua, 4 puntos del influente y efluente de 2 plantas potabilizadoras y 2 efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas como se muestra en la Tabla 5. En la **Figura 11** (Garrido Hoyos, y otros, 2017)(Garrido Hoyos, y otros, 2017) se muestran los puntos del recorrido en la zona de estudio de la laguna del Tóbari, drenes, pozos, plantas potabilizadoras y plantas de tratamiento de aguas residuales. (Garrido Hoyos, y otros, 2017).

Además de justificarse la actualización de la hidrodinámica actual y presentarse como complemento al estudio de la laguna como complemento de l proyecto estimación y dispersión de contaminantes en el río Yaqui ( Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales, durante las últimas décadas, los estudios oceanográficos han sido tema de especial interés a nivel mundial y se han incrementado, ganando importancia los estudios relacionados al estudio de las corrientes, mareas y la circulación oceánica, esto debido a sus implicaciones directamente relacionadas sobre la descripción y explicaciones de diversos fenómenos físicos, ambientales y antropológicos, se tienen informes en la literatura que indican como las corrientes y las mareas son los responsables de diversos fenómenos de transporte de nutrientes y están directamente relacionados con la biodiversidad, estos efectos de las mareas y corrientes por consiguiente tienen un gran impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas marinos, se reflejan principalmente en la producción biológica y en su variedad, debido al transporte de larvas, plancton, peces, nutrientes y sedimentos, además, las corrientes y las mareas se encargan del transporte y dispersión de compuestos básicos como sales, oxígeno, dióxido de carbono e incluso ayudan a la dispersión de contaminantes; El entendimiento del comportamiento dinámico de la circulación oceánica es esencial, para predecir la propagación de químicos en accidentes ambientales y el comportamiento del océano cerca de puertos, playas y zonas costeras en donde, además, el uso del suelo con fines comerciales o de producción acuícola están asociados a un gran impacto antrópico. (Gaona & Portilla, 2014).

Los fenómenos de transporte de las corrientes y mareas tienen efecto importante sobre las propiedades oceánicas, se pueden obtener en la laguna, la densidad, temperatura y acidez, convirtiéndose así, en componentes importantes de los ciclos bioquímicos, geoquímicos e hidrológicos que describen el comportamiento de su hidrodinámica mareal, es así como un adecuado entendimiento del comportamiento de corrientes, mareas y circulación oceánica constituye la base para comprender estos fenómenos, predecir su comportamiento, aprovechar los recursos disponibles de forma sustentable y en caso de proponer un plan de manejo sustentable proponer adecuaciones al sistema.

Se debe tomar en cuenta que tanto las corrientes como las mareas obedecen a las leyes de la física, por lo que es posible, mediante modelos numéricos, reproducir sus condiciones con bastante aproximación (Gaona & Portilla, 2014). La descripción matemática de estos fenómenos físicos (continuidad, conservación de energía y momento), y la gran capacidad de computación actual, permiten el desarrollo y utilización de modelos numéricos de confiabilidad para describir estos procesos.

Según la revista: “Hydropower & Dams” el potencial teórico de la energía hidroeléctrica en México es de 49 GW. Sin embargo, el potencial económico se estima en aproximadamente la mitad, (27 GW) basado en el factor de capacidad actual calculado a partir de un potencial de generación total de 72 TWh / año. Este potencial económico es más del doble de la capacidad instalada en 2013. En México hoy se tiene una capacidad hidroeléctrica de al menos 3,8 GW (SENER, 2014), se estima podrían utilizarse otros 15 GW, enfocándose en el potencial estimado de energía de marea en el Golfo de California, la cifra asciende a 26 GW (SENER, 2014). Por lo que el tema de aprovechamiento de energía limpia hay mucho campo de oportunidad que se puede desarrollar, debido a la localización y geografía particular que presenta nuestro país.

Adicional a los aspectos de manejo ambiental para conocer la hidrodinámica de la laguna bajo las condiciones ambientales actuales, también justifica realizar un análisis preliminar de la evaluación del potencial mareomotriz de la laguna costera Tóbari. Este análisis puede contribuir a evaluar el potencial de generación mareomotriz a nivel de lagunas costeras, lo anterior se justifica en el contexto de que México cuenta con al menos 10,000 kilómetros de costas y aproximadamente un tercio lo conforman los contornos de lagunas costeras, los posibles usuarios y beneficiarios serían las comunidades cercanas a esta zona lagunar. Ampliar el estudio en este tema es importante, debido a que no es tan suficientemente estudiadas las lagunas costeras como zonas potenciales de generación hidrocinéticas (Farreras, 2004).

Finalmente, es de notar que es una tarea urgente para México la formación de recursos humanos capacitados para el estudio científico, como asimismo para la aplicación de técnicas de planificación, que permitan un desarrollo eficiente y en armonía con la preservación del medio ambiente, para estas lagunas costeras. Prioritariamente se requiere del conocimiento de la hidrodinámica de estos sistemas y de las características de su transporte de materia disuelta y en suspensión. (Farreras, 2004).

## OBJETIVOS

Evaluar la condición actual del sistema determinando el comportamiento de la hidrodinámica de la zona, esto debido a su importancia ambiental, económica y social. Determinar el tiempo de residencia de la laguna del Tóbari y los patrones de corrientes por efecto de marea dentro de la laguna mediante la herramienta de software ADCIRC. Como objetivo específico es obtener simulaciones preliminares para poder desarrollar futuras investigaciones de la laguna mediante la herramienta, métodos y algoritmos utilizados en la creación de las mallas computacionales.

Adicional a los aspectos de manejo ambiental, se realiza un análisis preliminar del potencial hidrocínético de funcionamiento hidrodinámico de la laguna Tóbari, considerando el forzante mareomotriz.

## HIPÓTESIS

El campo de masa de la laguna de Tóbari se renueva en un periodo de marea.

La interacción del flujo de marea que existe en las bocas de la Laguna de Tóbari puede ser explotada como una fuente de energía mareomotriz.

## MARCO TEÓRICO

ADCIRC (*ADvanced CIRCulation Model*), que es un modelo de circulación desarrollado por el Departamento de Ciencias Marinas de la Universidad de North Caroline (Chapel Hill). Es un modelo de circulación oceánica que resuelve la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento de aguas someras en dos dimensiones y puede reconstituir el perfil de la velocidad en la vertical, la estrategia para resolver el sistema de ecuaciones fundamentales es mediante una ecuación generalizada de onda para la ecuación de conservación de masa, esta formulación se conoce como GWCE (*Generalized Wave Continuity Equation*), además resolviendo las ecuaciones de movimiento de fluidos sobre un marco de referencia rotativo, y utilizando las ecuaciones de presión hidrostática tradicionales y aproximaciones de la ecuación de Boussinesq. Numéricamente utiliza métodos de elemento finitos (en el espacio) y método de diferencias finitas (en el tiempo) para permitir un alto grado de flexibilidad por medio del uso de mallas no estructuradas.

En general, ADCIRC puede ser usado para predecir mareas e inundaciones, modelar mareas y circulaciones causadas por vientos. Las aplicaciones varían desde la cuantificación del transporte de larvas, hasta operaciones marítimas cerca de las costas debido a la importancia del papel que juegan las mareas y sus corrientes asociadas en la dinámica del océano, en el estudio de ecosistemas, y con la finalidad de explicar los fenómenos ambientales, y así optimizar el uso de recursos sustentando la conservación ambiental. Dado a que la laguna de Tóbari representa un ecosistema de alta importancia ambiental y económico de la zona, resulta un caso especialmente relevante.



La literatura nos indica que método del elemento finito se fundamenta en establecer funciones sobre una subdivisión del dominio (Aguilar Chávez, 2017) dentro de las ventajas de forma están:

- Es mucho más fácil satisfacer las condiciones de frontera con funciones locales sobre partes locales de la frontera, que tratar de construir funciones globales sobre todo el dominio.
- Al realizar una subdivisión del dominio en pequeños intervalos con funciones de baja aproximación para cada elemento, permite establecer un error menor para una solución global, principio de límite sobre las aproximaciones discretas.

En forma general el procedimiento para aplicar el método de elemento finito se puede dividir en los siguientes pasos:

- Dividir el subdominio en N intervalos o elementos Finitos
- Desarrollar funciones de interpolación que sean válidas sobre cada elemento, en esta condición se puede generar un sistema coordenado local con el fin de asegurar su funcionamiento general. Para lo cual se debe ajustar estas funciones a las condiciones de continuidad requeridas para cada elemento
- Forzar la continuidad de las funciones con las siguientes acciones:
  - Establecer la definición de las funciones Cardinales
  - Generar el ensamble de matrices

### **MODELO DE AGUAS SOMERAS (ADCIRC)**

Las ecuaciones de flujo en aguas someras son comúnmente empleadas para determinar fluctuaciones de marea y patrones de corrientes marítimas. Estas ecuaciones son obtenidas al integrar las ecuaciones generales de flujo de Navier-Stokes en la dirección vertical. Para obtener la solución de las ecuaciones de aguas someras en su forma primitiva, en la tesis nombrada Propiedades de propagación de esquemas numéricos para la simulación de flujos a superficie libre se describen las prácticas comunes del uso de esquemas numéricos de discretización que emplean la técnica de elemento finito en el espacio y de diferencias finitas en el tiempo (Westering et al., 1987; Zienkiewicz y Taylor, 1989; Reddy, 1993). Sin embargo, también se menciona y hace referencia a que los esquemas que se han construido basados en las técnicas antes mencionadas producen soluciones que exhiben oscilaciones espurias de un nodo a otro (Kinnmark y Gray, 1985; Kinnmark, 1986). (Aguilar Chávez, 2002). Con el fin de eliminar dichas oscilaciones, hace referencia a diversos investigadores que han propuesto hacer uso de términos de filtrado, teniendo en cuenta que al incluirlos debe cuidarse que la solución funcione adecuadamente, tanto para longitudes de onda grandes como pequeñas. Lynch y Gray en 1979, introdujeron una propuesta que consiste en el uso de la ecuación de continuidad generalizada de onda (Generalized Wave Continuity Equation, o GWCE), como una formulación de las ecuaciones de aguas someras, que ofrece un excelente control de las oscilaciones espurias y permite obtener soluciones aceptables en amplios rangos de longitud de onda (Ramírez, et al., 1997; Aguilar y Escalante, 1998; Aldama y Aguilar, 1999) (Aguilar Chávez, 2002).

La formulación de la GWCE tiene su origen en las ecuaciones de aguas someras o ecuaciones primitivas determinadas de la integración en la verticalidad de la ecuación de Navier-Stokes, bajo las siguientes consideraciones:

- El fluido se considera bien mezclado en la vertical y la aceleración vertical del fluido puede ser despreciada; esto implica que puede utilizar una aproximación hidrostática.
- El fluido es incompresible
- El fluido es turbulento
- Las ondas que se propagan en la superficie son largas

### ECUACIÓN DE CONSERVACION DE MASA

Tanto en el modelo bidimensional como en el tridimensional. ADCIRC resuelve la ecuación de continuidad utilizando la Generalized Wave Continuity Equation (GWCE) partiendo de la ecuación de continuidad y conservación de cantidad de momento, la ecuación de continuidad se muestra a continuación:

$$\mathcal{L}(H, U, V; x, y, t) = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH)$$

Ecuación 3

Donde,  $\mathcal{L}(H, U, V; x, y, t)$ , operador de la ecuación de conservación de masa;  $H$ , altura Total de la columna de agua  $H = \zeta + h$ ;  $\zeta$ , variación del nivel del mar sobre el geoid;  $h$ , profundidad del fondo oceánico bajo el geoid (batimetría);  $U$ , velocidad promedio (espacial) en la dirección  $x$ , y  $V$ , velocidad promedio (espacial) en la dirección  $y$ .

El primer término se refiere a la variación del nivel de mar en el tiempo. Cuando la batimetría ( $h$ ) es invariable, dicho término depende únicamente de  $\zeta$ . El segundo término, por su parte aporta con el gradiente de velocidad en la dirección  $x$ ; mientras que el tercer término representa el gradiente de velocidad en el eje  $y$ .

### ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Además de la ecuación de continuidad, ADCIRC resuelve la ecuación de balance de momento, que se muestra a continuación en su forma conservativa:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_x(H, U, V; x, y, t) &= \frac{\partial UH}{\partial t} + U \frac{\partial UH}{\partial x} + V \frac{\partial UH}{\partial y} - fVH \\ &= -gH \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_o} - \alpha\eta \right]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} + M_x + D_x + B_x \end{aligned}$$

Ecuación 4

$$\begin{aligned}\mathcal{M}_y(H, U, V; x, y, t) &= \frac{\partial VH}{\partial t} + U \frac{\partial VH}{\partial x} + V \frac{\partial VH}{\partial y} - fUH \\ &= -gH \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_o} - \alpha\eta \right]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} + M_y + D_y + B_y\end{aligned}$$

Ecuación 5

en su forma no conservativa:

$$\begin{aligned}\mathcal{M}_x(H, U, V; x, y, t) &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV \\ &= -g \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_o} - \alpha\eta \right]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_o} + \frac{M_x}{H} + \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H}\end{aligned}$$

Ecuación 6

$$\begin{aligned}\mathcal{M}_y(H, U, V; x, y, t) &= \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU \\ &= -g \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_o} - \alpha\eta \right]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_o} + \frac{M_y}{H} + \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H}\end{aligned}$$

Ecuación 7

Donde,  $\mathcal{M}_x(H, U, V; x, y, t)$ , operador de cantidad de movimiento en el sentido  $x$ ;  $\mathcal{M}_y(H, U, V; x, y, t)$ , operador de cantidad de movimiento en el sentido  $y$ ;  $f$ , parámetro de Coriolis  $f = 2\omega\sin(\phi)$ ;  $\omega$ , coeficiente de Coriolis  $= 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ;  $\phi$ , latitud en grados;  $P_s$ , presión atmosférica a nivel del mar;  $g$ , aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $\alpha\eta$ , potencial de marea de equilibrio;  $P_s$ , densidad de referencia del agua;  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ , esfuerzos superficiales impuestos;  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ , esfuerzos por fricción en el fondo, y  $M_x, M_y$ , gradiente de esfuerzos laterales y se representan por las expresiones siguientes:

$$M_x = \frac{H\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{H\tau_{yx}}{\partial y}$$

Ecuación 8

$$M_y = \frac{H\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{H\tau_{xy}}{\partial x}$$

Ecuación 9

El primer término de ambas ecuaciones se refiere a la variación de la velocidad en función del tiempo en los ejes  $x$  y  $y$  respectivamente. Los términos advectivos consideran el gradiente de momento lineal. El cuarto término se refiere al cambio de momento generado por el efecto de Coriolis, que depende de la latitud. En el lado derecho de la igualdad, se tienen los cambios de momento debido a la variación de la altura, al gradiente de presiones y al potencial de las mareas. Además, se consideran los efectos del viento al incluir esfuerzos superficiales  $\tau$  en la ecuación. La fricción con el fondo marino se toma en cuenta como un esfuerzo cortante

$\tau_b$ . Finalmente, los últimos tres términos  $M$ ,  $D$  y  $B$  consideran los gradientes de los esfuerzos, la dispersión de momento y el gradiente de presiones baro clínicas debidas a los cambios de densidad.

Las ecuaciones descritas anteriormente pueden llegar a ser tan complejas como se requiera. Por lo tanto, su complejidad (o simplificación) dependerá de la cantidad de variables y fenómenos físicos que se desee incluir. Mientras más fenómenos se incluyan, mayor será la precisión de los resultados, pero también mayores las demandas computacionales y en cuanto al conocimiento de las condiciones iniciales y de frontera (Gaona & Portilla, 2014).

### MODELO DE GWCE

La GWCE se basa en la ecuación de continuidad y la conservación de cantidad de movimiento en forma conservativa, derivando las ecuaciones anteriores con respecto al tiempo y sustituyendo, obtenemos la GWCE

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{\partial UUH}{\partial x} - \frac{\partial UVH}{\partial y} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + M_x \right. \\ \left. + D_x + B_x + \tau_0 UH \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{\partial VUH}{\partial x} - \frac{\partial VVH}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \right. \\ \left. + M_y + D_y + B_y + \tau_0 VH \right\} = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 10

los términos advectivos están en forma conservativa, la experiencia indica que si estos términos se ponen en forma no conservativa se obtiene una estabilidad numérica mejorada, cuando las advecciones son dominantes en el equilibrio global o fuerza local. Los términos advectivos en el GWCE se reformulan expandiendo las derivadas y sustituyendo en la ecuación de conservación de masa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ U \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \right. \\ \left. + M_x + D_x + B_x + \tau_0 UH \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial V}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} \right. \\ \left. - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + M_y + D_y + B_y + \tau_0 VH \right\} = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 11

### MÉTODOS DE SOLUCIÓN DISCRETA

La solución de la GWCE para flujo en aguas someras consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales, bien planteadas, de valor inicial y de valores en la frontera, y no se tiene una solución integral exacta, para cualquier tipo de dominio y condición de

frontera. Por lo anterior, para tener una solución de la formulación GWCE se recurre al uso de método discretos. El modelo ADCIRC utiliza la técnica de elemento finito, con malla numérica no estructurada, con elemento triangulares (ADCIRC, 2018).

Los modelos discretos permiten solucionar en forma aproximada las formulaciones matemáticas continuas, para condiciones de fronteras sofisticadas o complejas, y también para problemas que contengan términos no lineales (Aguilar Chavez, 2016)

Las metodologías más usuales que se reportan en la literatura para construir un modelo discreto (aproximado) de un problema diferencial son (Aguilar Chavez, 2016):

- **Método de las características**, se sigue en un plano característico las trayectorias o líneas en como viaja la información y después se genera un modelo discreto (puede ser en diferencias finitas o de residuos pesados) para calcular las propiedades de las variables dependientes.
- **Método de diferencias finitas**, tomando una expansión en Taylor sobre las variables dependientes se genera un modelo discreto, a este modelo se adicionan los valores de condición inicial y de frontera (también en forma discreta)
- **Método de elemento finito**, este método utiliza primero una formulación balanceada en el grado de las derivadas espaciales (conocida como formulación débil del sistema continuo), posteriormente se aplica un método semi-integral para tener un modelo de aproximación que es pesado sobre un subconjunto (o elemento finito) y finalmente a la formulación pesada se genera un modelo en diferencias sobre los términos temporales. Este método es muy utilizado para problemas en dos dimensiones espaciales como son los casos de flujo para aguas someras (lagos, estuarios o circulación marítima de meso escala), también es utilizado para flujos en medios porosos saturados y no saturados.
- **Método de volumen finito**, a la formulación continua se aplica una integral sobre un volumen finito, con el fin de evaluar los flujos en la frontera y las propiedades dentro del volumen integral (teorema de Stokes), a este modelo integral se construye un modelo de aproximación para cada propiedad intensiva (masa, energía o cantidad de movimiento), los modelos de volumen finito son aplicados principalmente a la solución de las ecuaciones generales de la mecánica de fluidos (CFD, computational fluid dynamics).

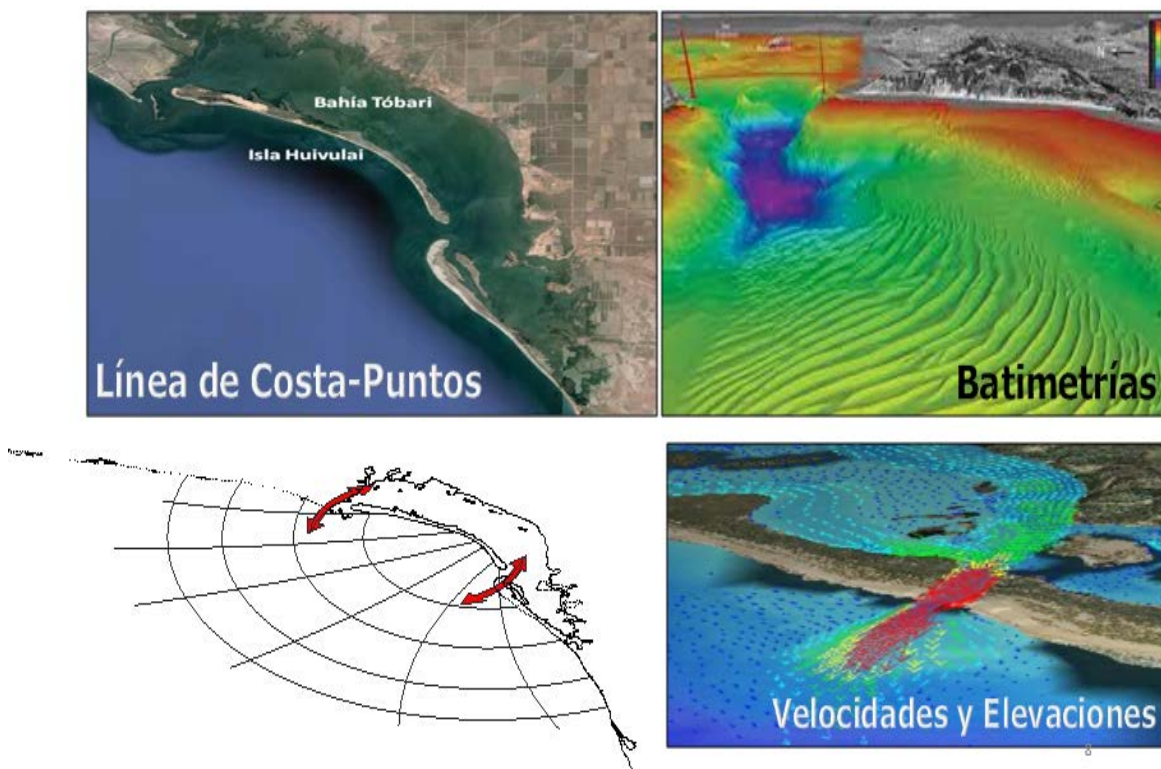
Para la aplicación del modelo ADCIRC, en la laguna de Tóbari, se utilizaron como condición principal la marea astronómica como forzante principal.

## CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

El proceso para realizar una modelación de la hidrodinámica consiste en definir el dominio de cálculo mediante una malla, el ingreso de la batimetría, realizar el forzamiento de las mareas con la cantidad de variables a analizar y finalmente obtener los datos de salida de velocidades y elevaciones como se esquematiza en la **Figura 13**.

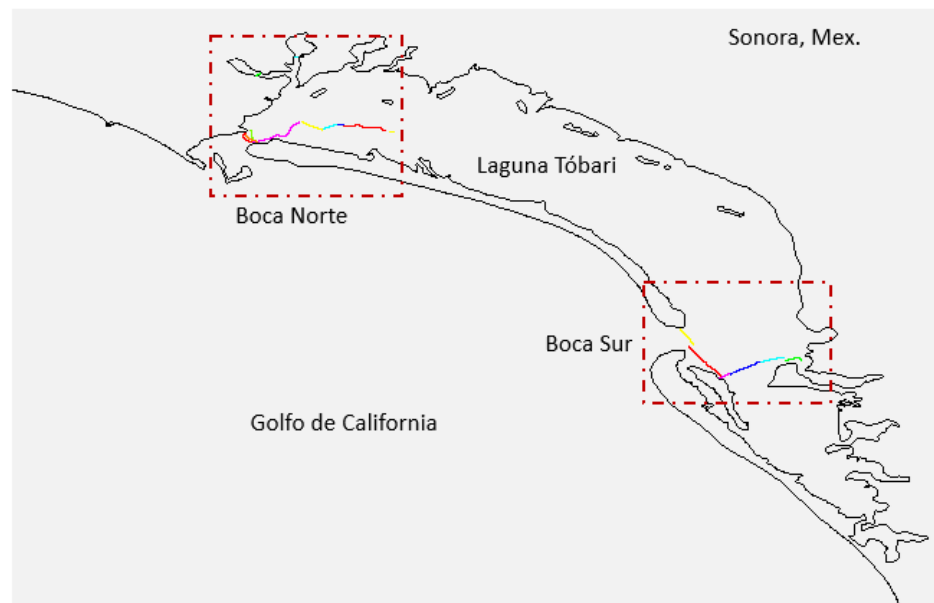
Para el sitio de estudio de Sonora (Laguna Tóbari), los datos de la batimetría utilizados para la creación de la malla corresponden a una combinación de batimetría satelital en las zonas de mar abierto (Golfo de California) provenientes de los datos GEBCO's ([www.gebco.net](http://www.gebco.net)) y muestreos de que se tomaron en campo *in situ*. Estas dos fuentes de batimetría fueron combinadas para obtener una cobertura en toda la zona de estudio con suficiente detalle.



**Figura 13.-** Metodología de análisis, en el modelo ADCIRC

Algunos detalles del proceso de combinación de las batimetrías se indican a continuación: en primer lugar, los datos *in situ* no fueron suficientes debido a que su distribución de toma de datos fue irregular y dispersa, existiendo heterogeneidad de valores en las diversas zonas de muestreo de datos, debido a que la laguna es muy extensa y somera y al poco tiempo disponible para la toma de muestras, se realizaron diversos transectos batimétricos en las

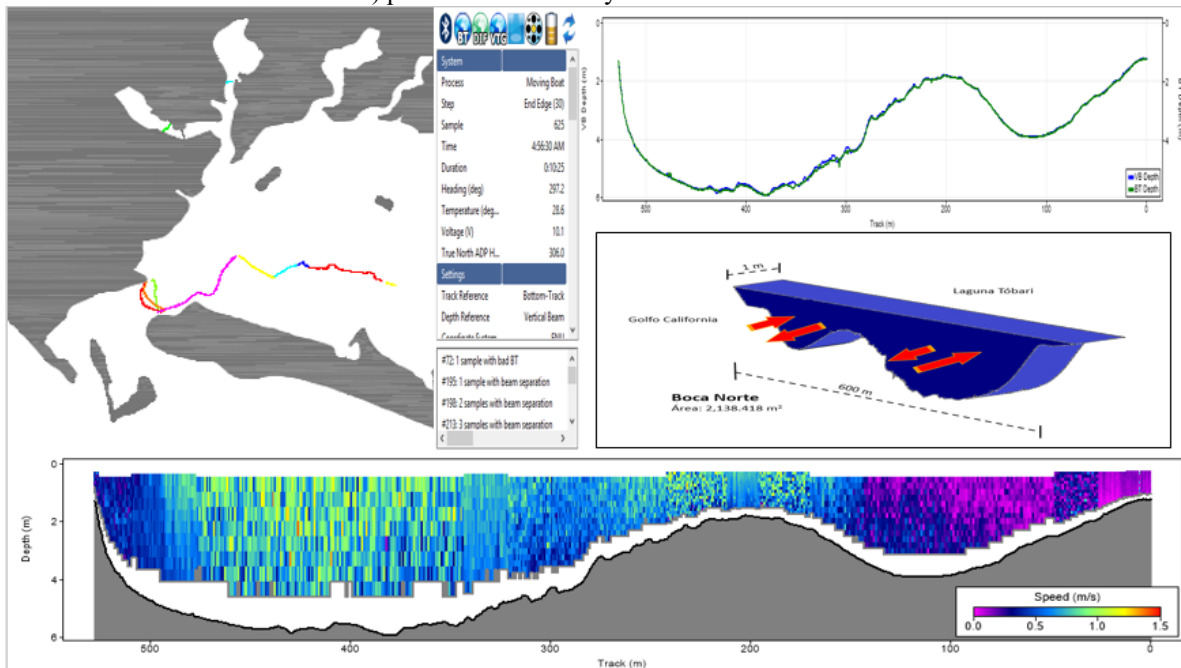
áreas de mayor relevancia como es el caso de las bocas de ingreso a la laguna. La ventaja de los datos *in situ* es su alta densidad que permite obtener un perfil batimétrico denso de esa zona, sobre todo en la zona de las bocas donde se realizaron más transectos y dio una idea de la forma y batimetrías de ambas, la desventaja es que, en muchas otras zonas, debido al periodo de visita disponible y a la extensión de la laguna 8,274 ha, no se pudo cubrir toda el área. Por esta razón, la combinación de éstas dos fuentes fue obligada. En la **Figura 14** se señalizan recuadros rojos, donde se realizaron los transectos principales y la recopilación de los principales datos *in situ*. En la **Figura 15** se ilustran las tablas de mareas próximas a la zona de estudio proyectadas para el mes de análisis, el pleamar y bajamar de la zona y los equipos utilizados, en la **Figura 16** y **Figura 17** se detallan unos transectos de la boca Norte y Sur respectivamente.



**Figura 14.-** Señalización de las Bocas, donde en los rectángulos señalados se realizaron en total 17 transectos batimétricos, con los cuales se pudo reconstruir la batimetría de la laguna apoyados en diversos puntos de control a lo largo de la laguna medidos con equipo CTD

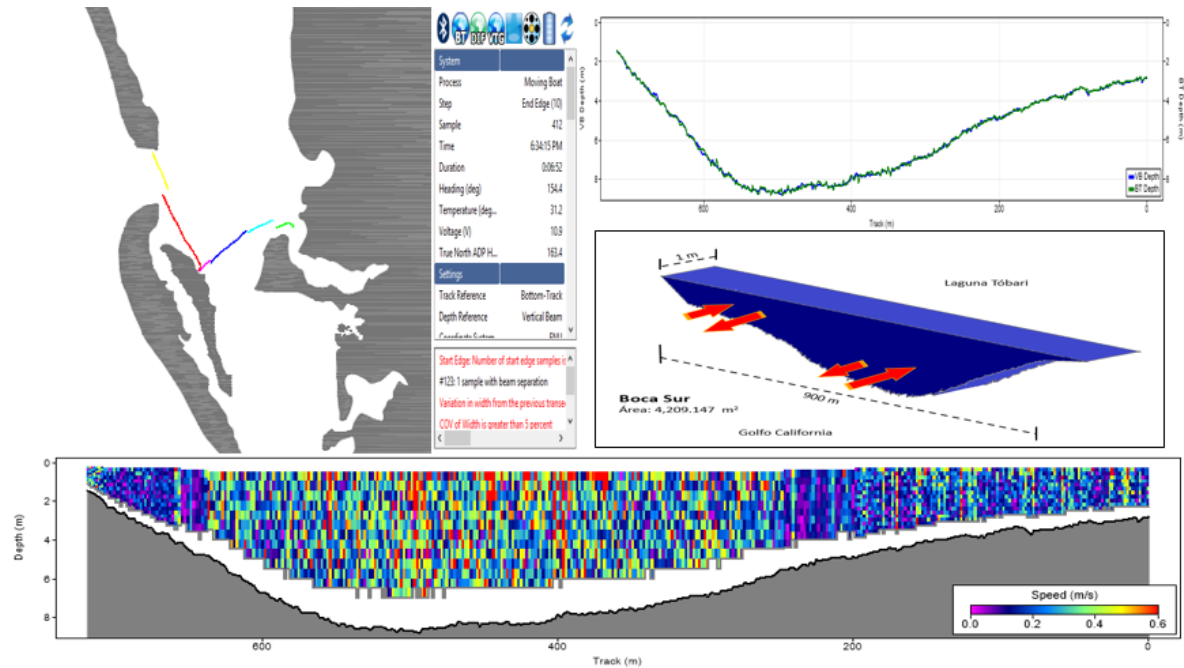


**Figura 15.-** Tablas de mareas del mes de junio de Guaymas (norte) y Yavaros (sur) debido a que Tóbari no cuenta con ninguna estación, fotos de la visita a la zona donde se observa el pleamar y bajamar en los días de máximo intercambio de mareas según las tablas de marea entre 24-27 junio 2017, equipo utilizado (ADCP y CTD) para las mediciones y fotos de las actividades



**Figura 16.-** Transectos Batimétricos realizados en la Boca Norte y unos de los perfiles obtenidos de la boca, los cuales nos proporcionaron los datos para completar las batimetrías de la laguna.

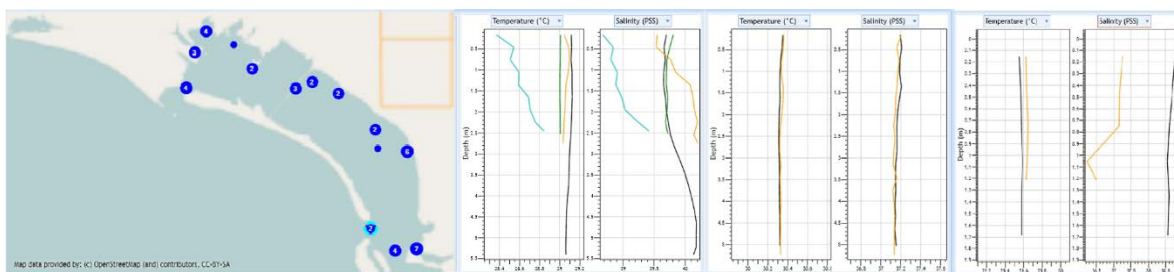




**Figura 17.-** Transectos Batimétricos realizados en la Boca Sur y unos de los perfiles obtenidos de la boca, los cuales nos proporcionaron los datos para completar las batimetrías de la laguna.

Durante los transectos realizados mediante el perfilador acústico se alternaron mediciones con equipo CTD para tomar muestras puntuales de salinidad, temperatura, conductividad y profundidad, estos muestreos se localizaron alineándose a las salidas de las descargas de los drenes previamente ubicadas a lo largo de la costa lagunar, la interacción del aporte de las descargas (agua continental) a la laguna tiene influencia en la cantidad de sedimentos y contaminantes que ingresan a la laguna.

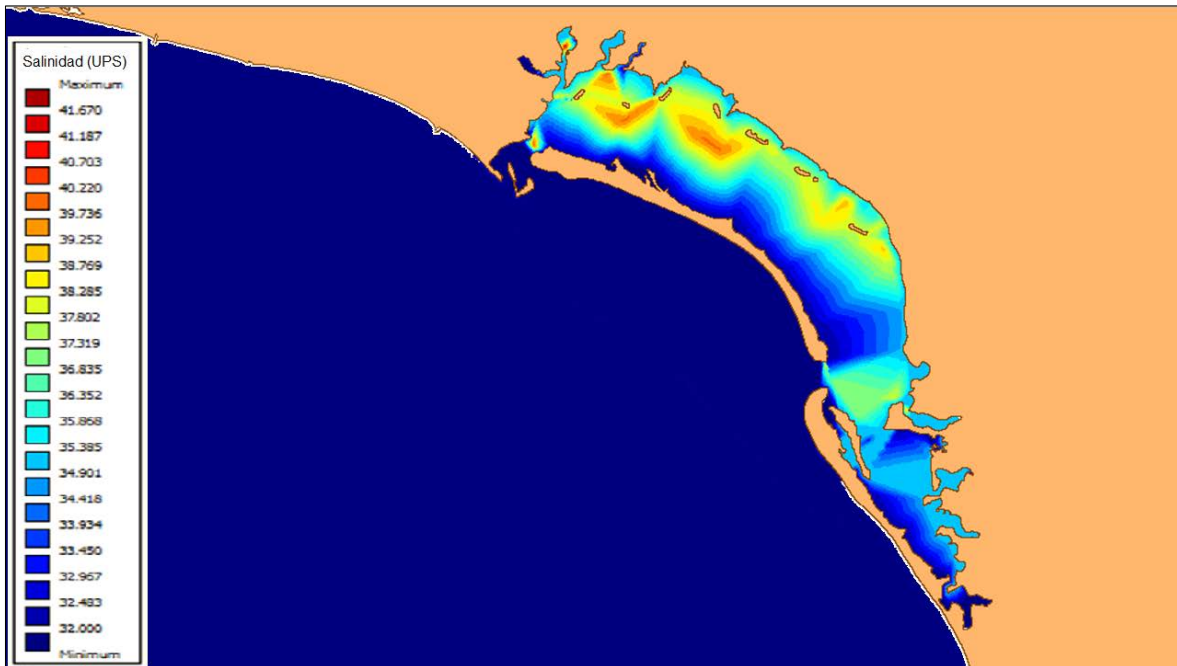
Durante los muestreos, se propuso conocer el campo de masa de la laguna, para lo cual se utilizó un equipo CTD marca CastAway, este equipo mide los perfiles de conductividad, temperatura y densidad, además cuenta con un sistema de geoposición GPS, un medidor de presión para determinar la profundidad y una memoria para el guardado de la información. Este equipo se puede acoplar con el perfilador acústico para realizar una corrección de la velocidad en la vertical y mejorar la calidad de la medición, además que presenta la interfaz de exportar los datos a Matlab® para el post-procesamiento de datos. Un ejemplo de los perfiles del equipo CTD se muestra en la **Figura 18**.



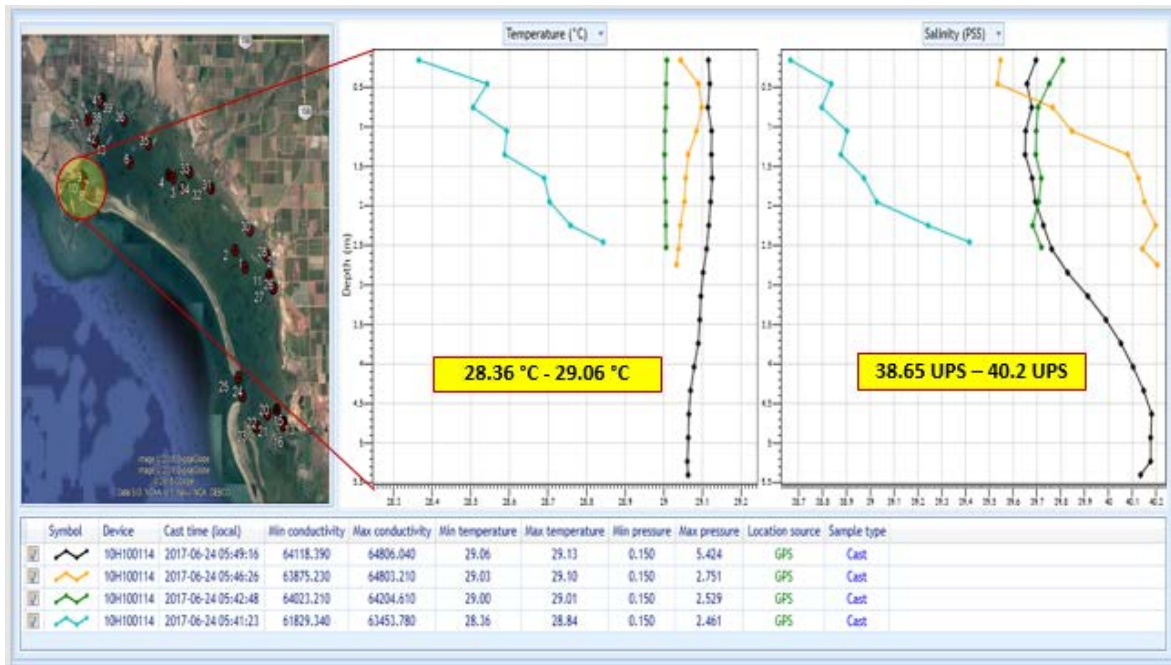
**Figura 18.-** Perfiles de Temperatura y Salinidad con respecto a su Profundidad (Norte, Centro y Sur)

Mediante las mediciones o bien registros que en las bocas se presenta una menor temperatura ( $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), en comparación con la parte central ( $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), esto puede ser debido a varias situaciones, entre ellas la profundidad de las bocas y la recirculación, que ayuda a que la temperatura sea menor a diferencia de la parte más somera y central de la laguna, así como la época del año donde la temperatura es mucho mayor en el centro de la laguna, así mismo se observó que las mediciones obtenidas de salinidad se elevan en la proximidades a los drenes o la zona costera, como se muestra en la **Figura 19**.

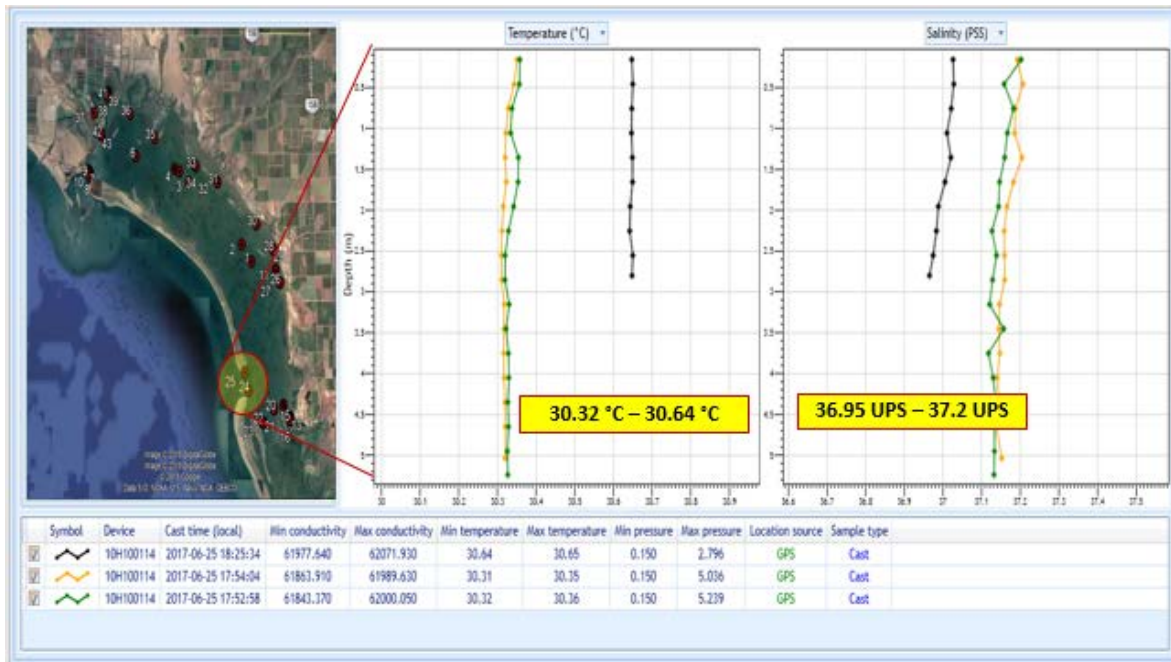
En la **Figura 19** se analizaron los datos obtenidos del equipo CTD y se realizó una interpolación con los valores en el interior de la laguna y cercanos a las bocas, el resultado indica una mayor salinidad en la costa lagunar próxima a los principales drenes de descargas provenientes del distrito de riego 041 y con tendencia a la parte central de la laguna donde alguna vez estuvo ubicado el piedraplen, este resultado indica una baja interacción con el agua del Golfo de California, en las **Figuras 20 a 25** se presenta los datos resumen de las diferentes zonas de las mediciones del equipo CTD donde existen valores de UPS mayores a los valores de agua de mar y temperaturas elevadas.



**Figura 19.-** Salinidad en el interior de la Laguna de Tóbari en base a las mediciones de control tomados con el equipo CTD, en donde se observa una mayor salinidad en las cercanías a la costa en especial el Dren 16, donde este resultado puede ser consecuencia de la época del año y los niveles someros de las aguas y las descargas de los drenes y a la lejanía de la circulación de las Corrientes que ingresan por las bocas.



**Figura 20.-** Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en la boca norte



**Figura 21.-** Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en la boca sur

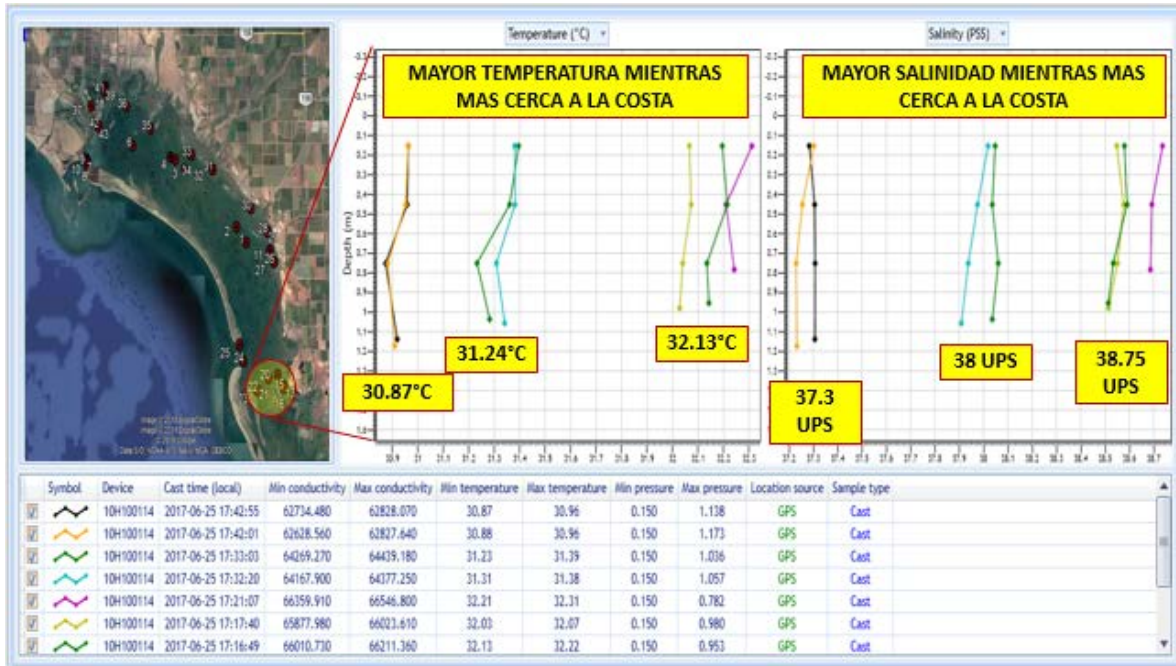


Figura 22.- Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en el interior-sur

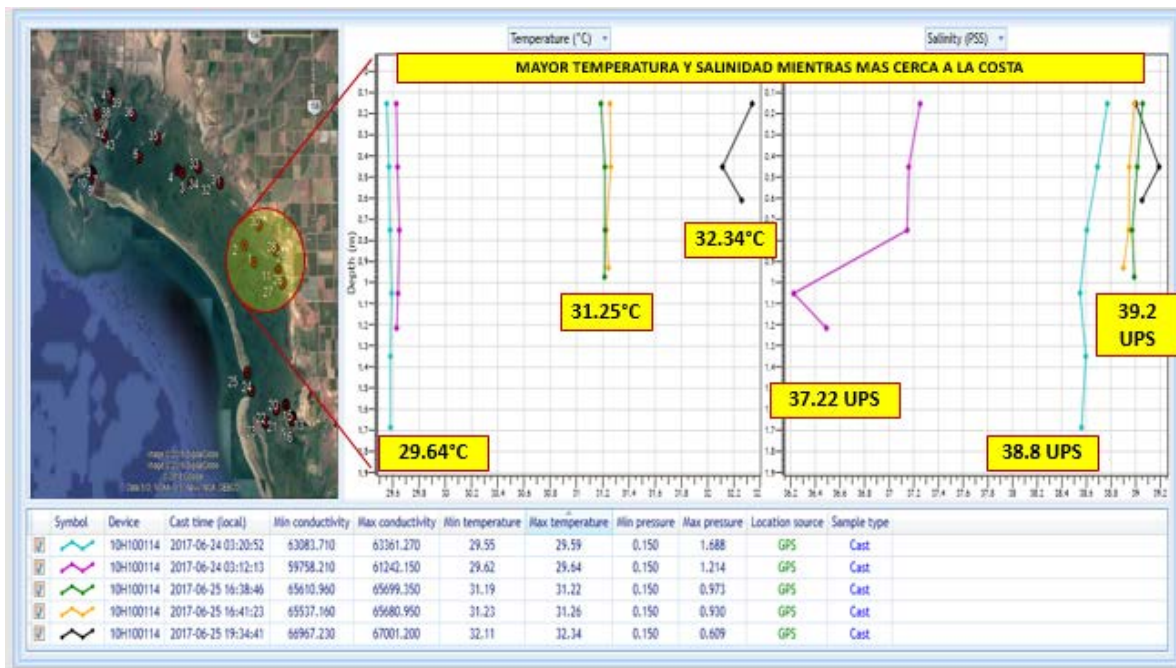
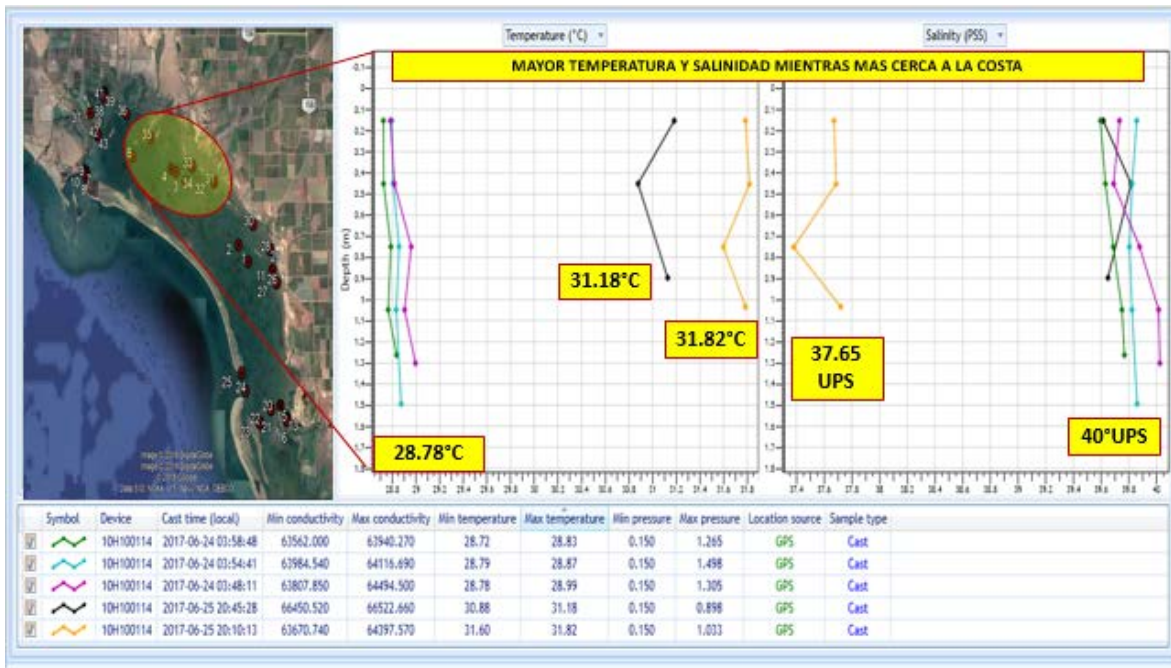
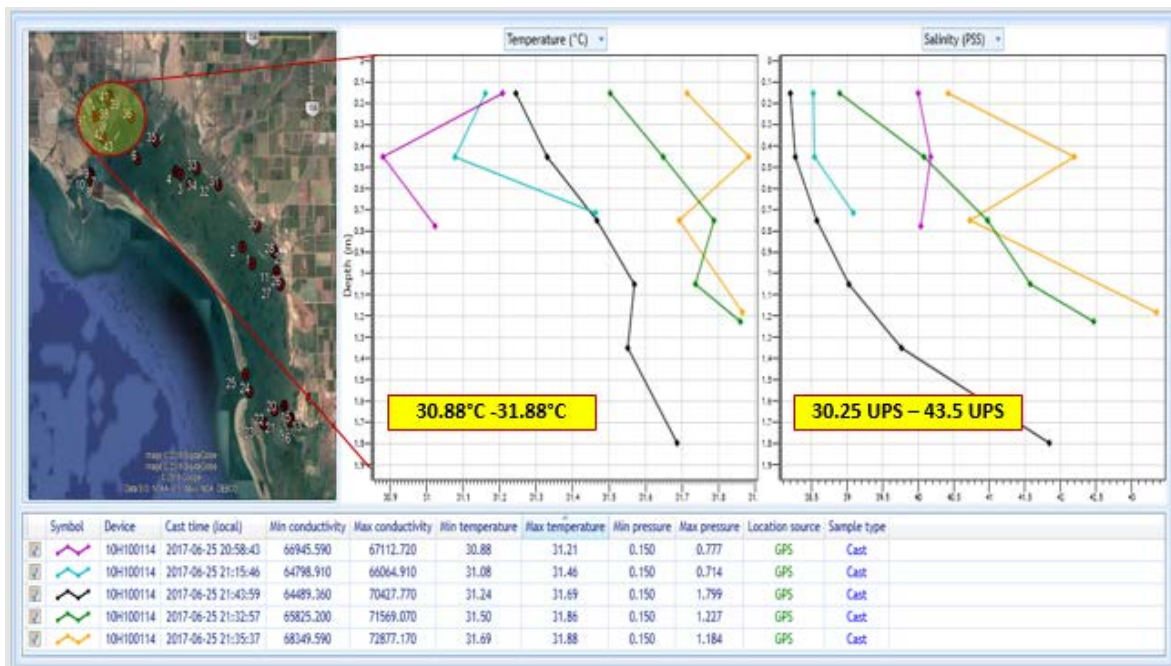


Figura 23.- Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en el interior-centro



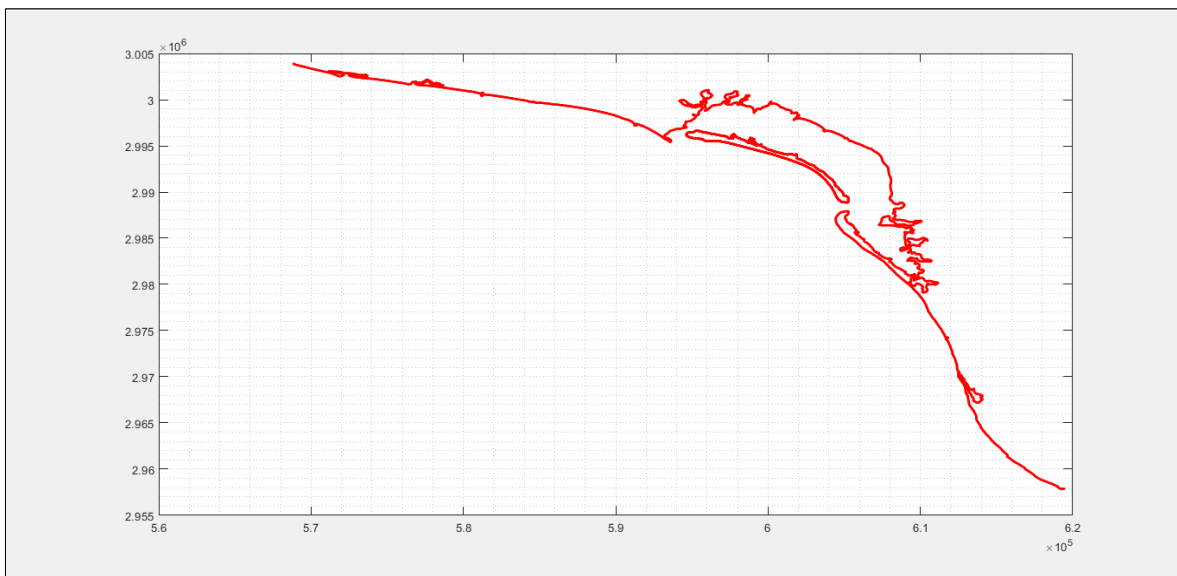
**Figura 24.-** Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en el interior- dren principal



**Figura 25.-** Mediciones de Temperatura y Salinidad con respecto de la profundidad en la laguna con el equipo CTD en el interior-norte

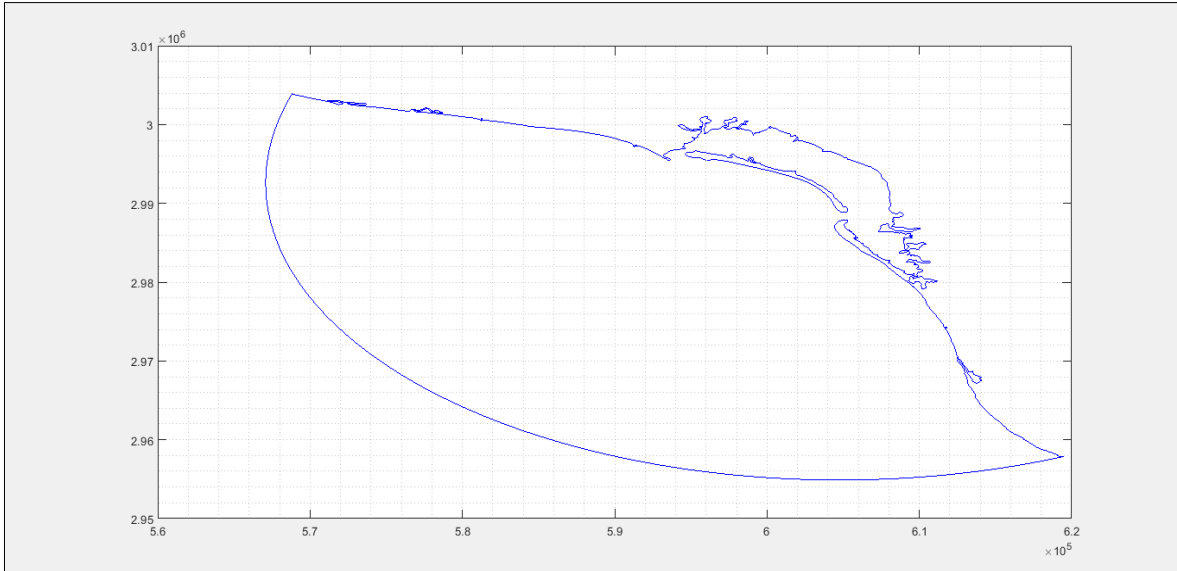
## DEFINICIÓN DEL DOMINIO

A partir de las batimetrías de satelitales e *in situ*, se construyó la malla computacional, el primer paso fue adecuar el nivel 0 de la batimetría que corresponde a los bordes de las islas (Tierra), los datos de batimetría satelital son menos densos, mientras que los datos *in situ*, a menudo pueden encimarse o duplicarse o encontrar más de un borde costero para las islas y tierra continental, es todo debido a que en las fechas que realizamos los transectos y mediciones se encontraba en vaciante de las aguas, por efecto de la marea. La necesidad de tener los puntos del borde de tierra e islas definidos radica en que el modelo de ADCIRC requiere de esa información para establecer las condiciones de borde o de frontera para la simulación. La delimitación de la zona costera se muestra en la **Figura 26**, donde se define la tierra firme continental y la isla Hiuvulai.

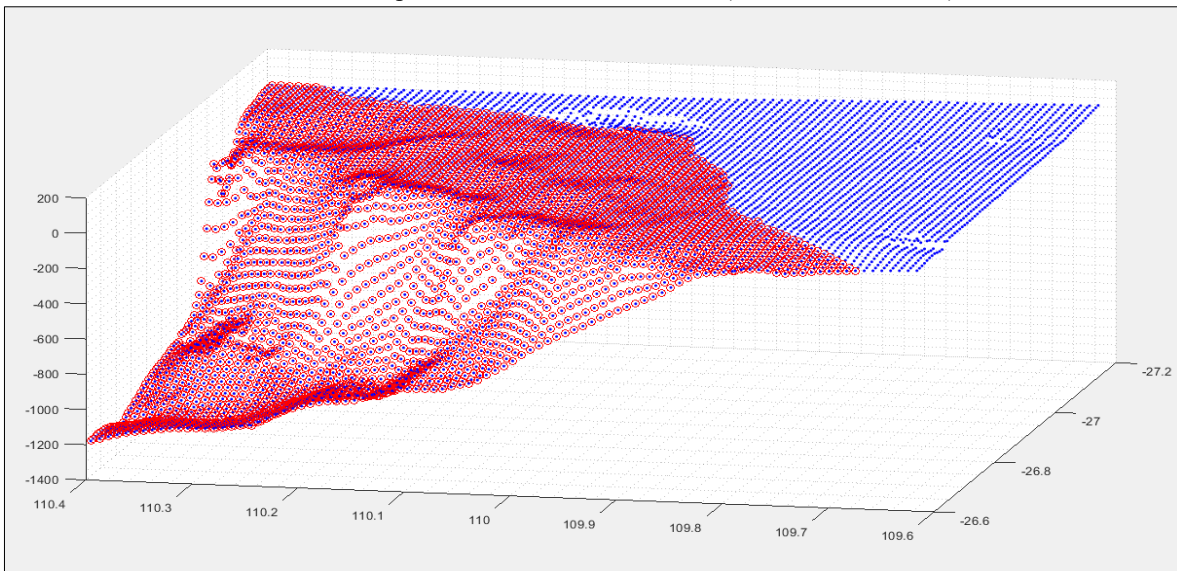


**Figura 26.-** Laguna de Tóbari, Delimitación de la línea de costa y la isla de Hiuvulai, la delimitación de las costas fue obtenida mediante puntos UTM y fue recreada en su proximidad tomando en cuenta las áreas húmedas y secas, dichas son variables según el nivel de la marea. La delimitación de la tierra firme y las islas son importantes para delimitar el modelo ADCIRC.

Dado que los procesos numéricos se realizan de forma automática, resulta evidente que la falta de definición de un único borde para la tierra o islas generará problemas numéricos, por lo que es necesario procesar los datos antes de utilizarlos en la definición de un polígono del dominio, antes de aplicar el programa de generación de malla *Surface-water Modeling System* (SMS 12.2), entonces el dominio de simulación numérica que incluye la zona de la laguna costera de Tóbari y la zona costera que permitirá evaluar los efectos de la marea se muestra en la **Figura 27** donde se define una frontera de mar en la cual se aplicarán las forzantes de marea, definido el dominio de análisis la unificación de la batimetría se presentan en la **Figura 28** tomando valores de 0 a 1,200 m de profundidad, en la **Figura 29** se presenta la batimetría actual en planta, donde los colores rojos corresponden a las áreas de secado y más someras, y las áreas azules a las zonas más profundas conforme nos adentramos al mar.



**Figura 27.-** Laguna de Tóbari con el dominio de análisis, la coordenada central fue ubicada en  $-110.1198^\circ$  y  $26.8874^\circ$ , el radio tiene longitud de 45 km aproximadamente mar adentro que define la frontera del mar y en esta frontera se aplican las forzantes de mareas (K1, M2, N2, O1, S2).

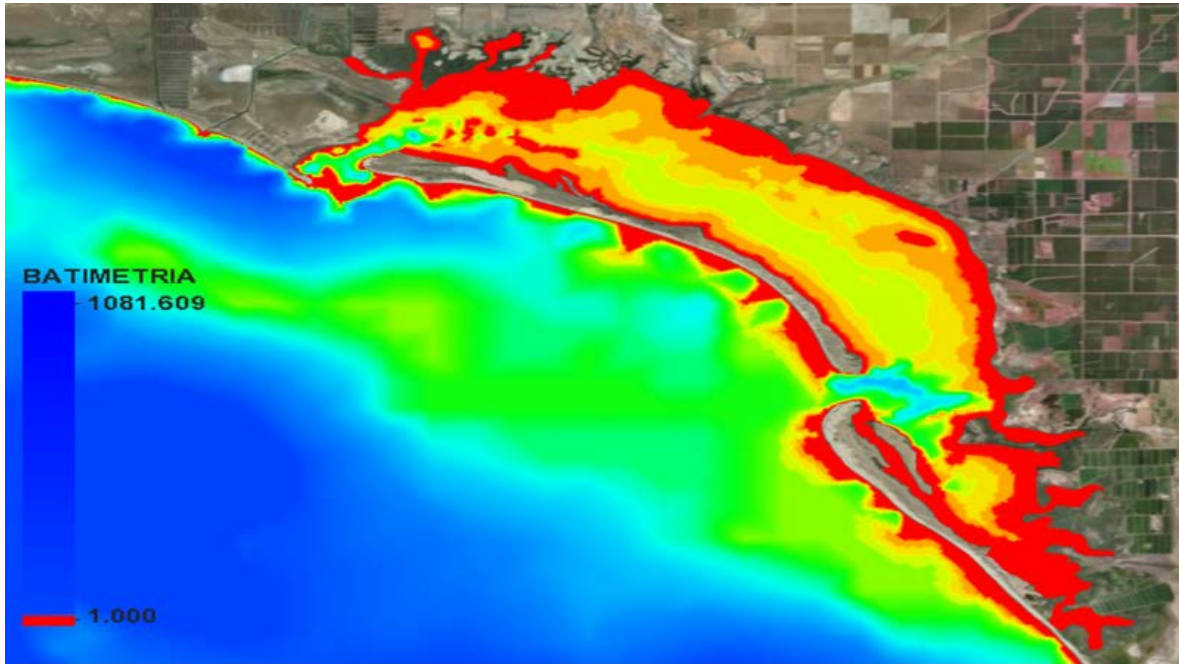


**Figura 28.-** Batimetría 3D de la laguna habiendo realizado la unión de datos satelitales obtenidos de la base de datos GEBCO's y los datos tomados in situ en la campaña de medición.

En la condición inicial se debe especificar los valores iniciales con los que comenzará el cálculo y en el caso del modelo ADCIRC, son el nivel del agua y las velocidades en el dominio, con un valor constante, para nivel  $\eta = 0.0$  y  $U, V = 0$ , para todo el dominio de solución.

Para la condición transitoria se deben incluir las forzantes de marea y los atractores dentro del dominio, por lo tanto, en la modelación de la laguna de Tóbari se tomaron en cuenta dos tipos de fronteras, las definidas por los límites cerrados a lo largo de las líneas "tierra-agua" (costas, riberas) y las abiertas (mar) que establecen el campo de flujo hacia el golfo de

California. El modelo ADCIRC cuenta con condiciones de frontera las cuales representan los límites del modelo y su interacción con el resto del océano y corresponden con los procesos que se incluyen: hidrodinámica, oleaje y de transporte. Los tres tipos de fronteras se explican a continuación, sin embargo, para la simulación solo se consideró la hidrodinámica correspondiente a los forzantes de marea astronómica.



**Figura 29.-** Batimetría en planta de la Laguna de Tóbari uniendo la batimetría satelital y los datos in situ obtenidos, se puede observar en la foto que el área “Roja” coincide con las áreas de secado cuando se presenta vaciante, esa franja de secado concuerda con las áreas de menor profundidad de la laguna

*Las fronteras hidrodinámicas* corresponden a los niveles de marea astronómicos, ingresados a partir de sus componentes armónicas de amplitud y fase.

*Las fronteras de oleaje* corresponden a los valores de altura significativa de ola, periodo pico y dirección, sin embargo el modelo también puede ser ejecutado sin introducir condiciones de frontera de oleaje, esto permite disminuir el número de datos de entrada necesarios y facilita su ejecución al disminuir la dependencia de fuentes de información externas, por lo tanto en la sección de calibración se analiza si es necesario incluir estas fronteras, de acuerdo a comparaciones con mediciones en la zona (tabla de mareas próximas a la laguna en este caso).

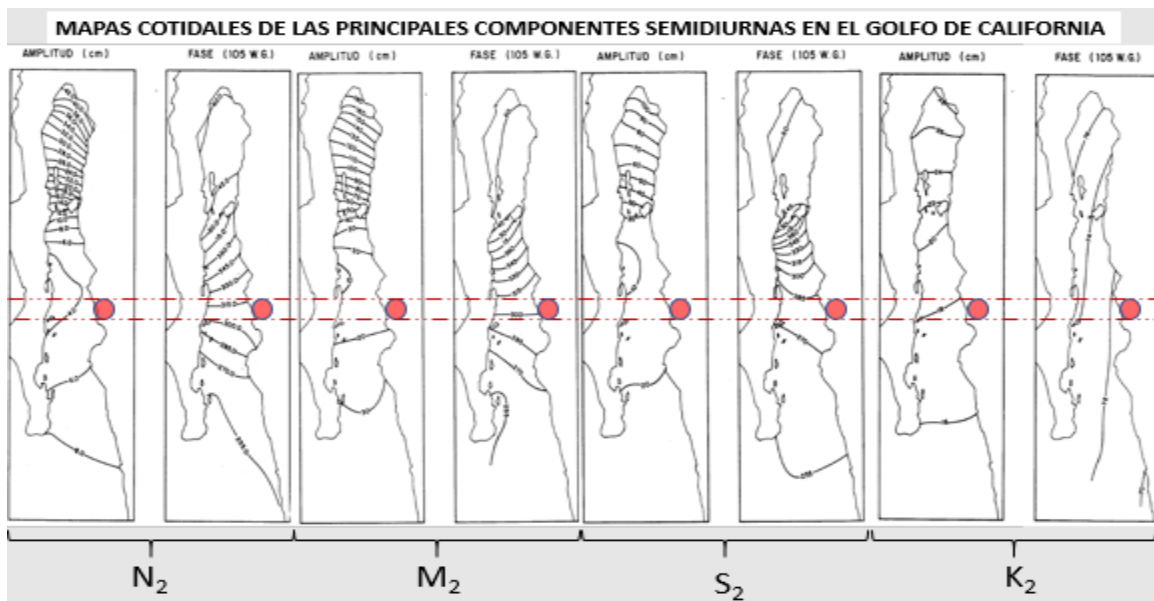
*Las fronteras de transporte* consisten en los perfiles de temperatura y salinidad, debido a que la información disponible es limitada, se optó por delimitar el modelo mediante perfiles promedio y analizados de manera independiente al modelo de soporte y calculados a partir de los datos disponibles obtenidos del CTD. Las fronteras del modelo se introducen mediante puntos de control que las delimitan y en los cuales se asignan valores a las respectivas variables, los valores en los puntos intermedios se calculan mediante interpolación.



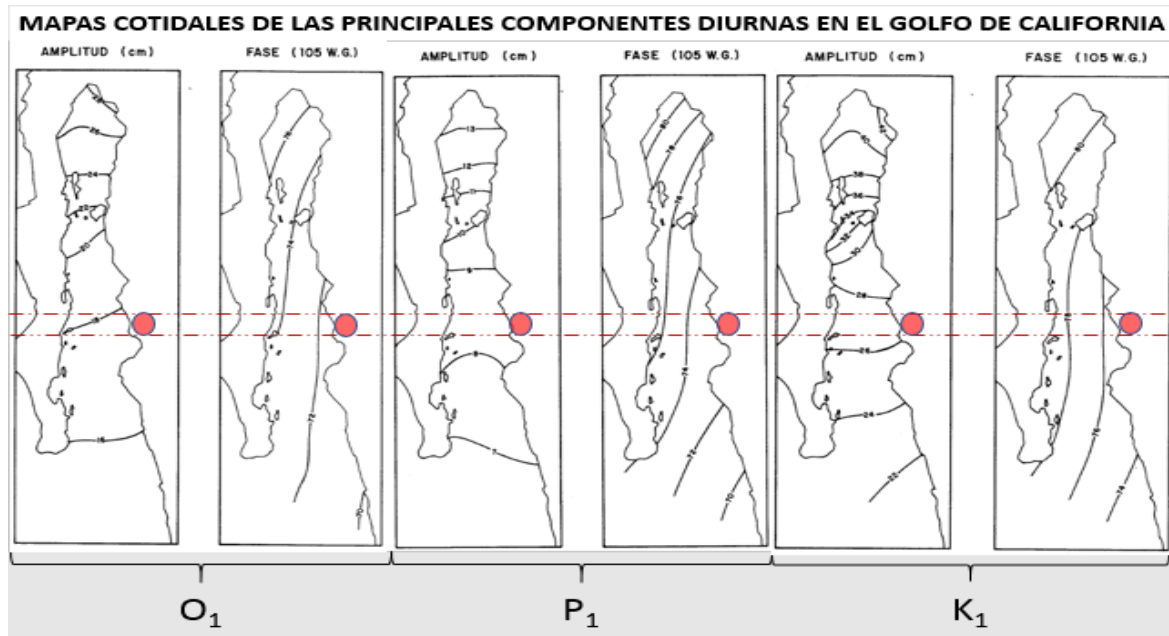
Adicionalmente a los forzamientos generados mediante las condiciones de frontera, el modelo incluye los siguientes procesos: fuerzas resultantes de las interacciones gravitacionales actuando sobre las mareas, influencia de arrastre del viento, influencia de la presión atmosférica, modelo para intercambio de calor por la superficie libre, descarga media de los principales afluentes.

Las constantes armónicas son obtenidas para cada localidad a partir de observaciones utilizando la técnica de análisis armónico, en la Tabla 8 (Marinone & Lavín, 1997) se presentan los 7 armónicos más importantes en la entrada y norte del Golfo de California, que describen el comportamiento de la marea, se puede observar la amplificación en dirección al norte, esto como consecuencia de la resonancia que existe en el Golfo de California.

Debido a que la laguna de Tóbari no cuenta con estaciones de registros, a través de mapas cotidales del golfo de California, se puede obtener las amplitudes y fases en la zona de estudio (Morales Pérez & Gutierrez de Velasco, 1988), graficando la marea utilizando los números de Doodson mediante un script de Matlab®, se genera la marea para la zona, como resultado se tiene una marea mixta predominantemente diurna debido al factor de forma, en la **Figura 32** se muestra la marea partir de los datos registrados de la Tabla 9 Constituyentes de marea en el golfo (Morales Pérez & Gutierrez de Velasco, 1988).



**Figura 30.-** Mapas cotidales de las principales componentes armónicas semidiurnas del Golfo de California, donde las marcas rojas indican la ubicación de la laguna.



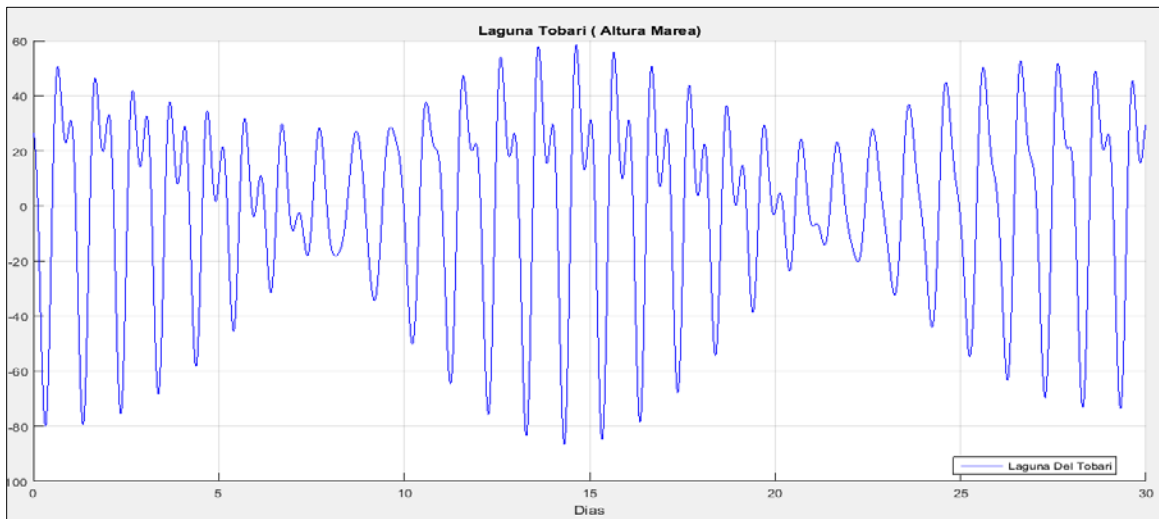
**Figura 31.-** Mapas cotidales de las principales componentes armónicas diurnas del Golfo de California, donde las marcas rojas, indican la ubicación de la laguna.

**Tabla 7.-** Amplitud de los principales Constituyentes o armónicos de la marea en Cabo San Lucas y San Felipe (Marinone & Lavín, 1997)

Constituyente	Periodo h	Cabo San Lucas		FA
		Amplitud (cm)	Amplitud (cm)	
M <sub>2</sub>	12.42	36.8	164.5	4.97
S <sub>2</sub>	12.00	23.7	99.3	4.19
N <sub>2</sub>	12.66	8.8	42.0	4.77
K <sub>2</sub>	11.97	6.6	26.4	4.00
K <sub>1</sub>	23.93	22.2	41.6	1.87
O <sub>1</sub>	25.82	15.2	26.3	1.73
P <sub>1</sub>	24.07	6.9	13.0	1.88

**Tabla 8.-** Constituyentes de marea en el golfo (Fuente: mapas Cotidales tomados de (Morales Pérez & Gutierrez de Velasco, 1988)

Constituyente	Periodo h	Tóbari	
		Amplitud (cm)	Fase GTM (105 W.G.)
M <sub>2</sub>	12.42	15.262	310.99
S <sub>2</sub>	12.00	12.751	285.80
N <sub>2</sub>	12.66	4.595	116.53
K <sub>2</sub>	11.97	4.02	280.79
K <sub>1</sub>	23.93	27.260	75.92
O <sub>1</sub>	25.82	18.726	72.80
P <sub>1</sub>	24.07	8.174	73.98



**Figura 32.-** Marea Mixta predominantemente diurna. Obtenida con ayuda de script MATLAB (Calculado con los números de Doodson)

Factor de forma de la marea lo definimos como la razón entre las amplitudes de los principales constituyentes diurnos y las principales constituyentes semidiurnas, obtenidos a partir del análisis armónico:

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

Ecuación 12

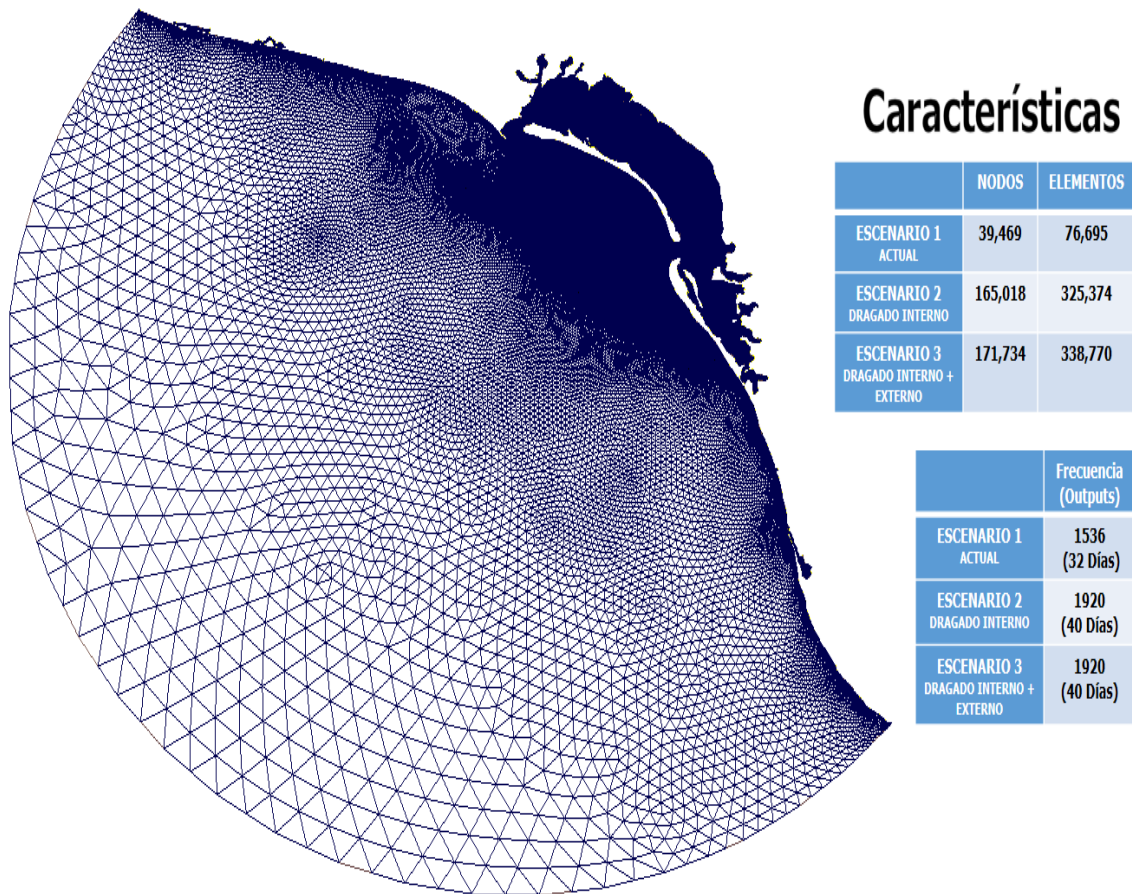
Si  $F=0$  a  $0.25$  semidiurna,  $0.25$  a  $1.5$  mixta, predominante semidiurna,  $1.5$  a  $3.00$  mixta, predominante diurna y mayor a  $3.00$  diurna.

El factor de forma es  $1.64$  lo que corresponde a una marea mixta, predominantemente diurna, en contraste con cabo San Lucas y San Felipe que es mixta predominantemente semidiurna.

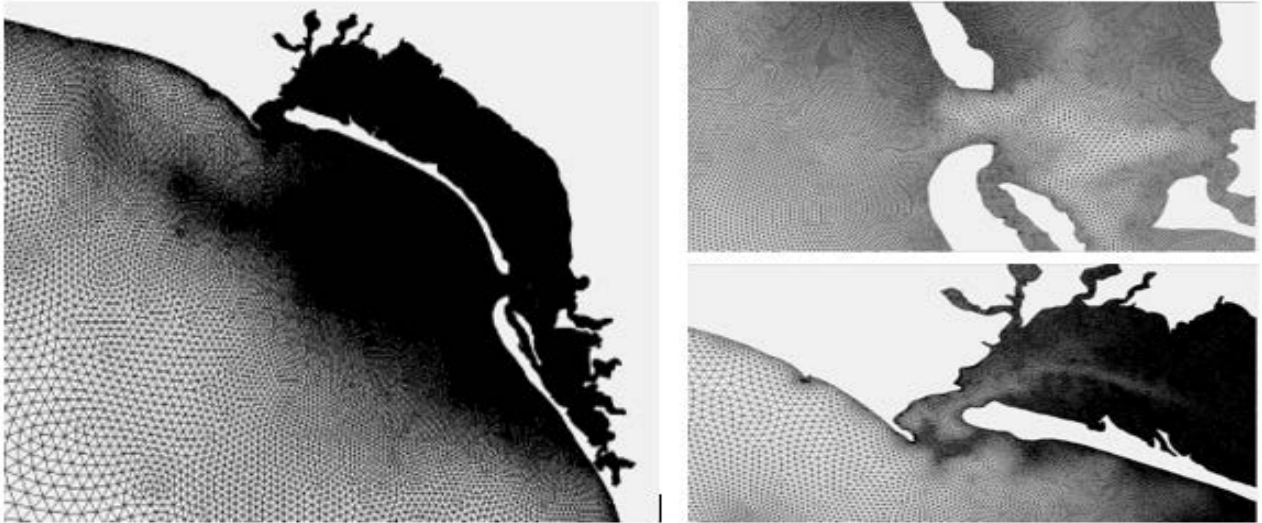
### CREACIÓN DE LA MALLA NUMÉRICA

Para hacer las simulaciones computacionalmente eficientes y aprovechar por otro lado la flexibilidad de los elementos finitos, se requiere una malla que tenga alta densidad en las cercanías de las islas y baja resolución en el resto del dominio. Entonces, como segundo paso en la elaboración del pre-proceso, se creó una malla que permitiera es decir, la resolución, gruesa y fina, la densidad de la malla indica la aproximación de nuestro modelo, una densidad elevada aproxima mejor el análisis minimizando el error, sin embargo, necesita más capacidad de cálculo y tiempo de simulación. La malla gruesa (menos densa) la hacemos coincidir con los datos de la batimetría Satelital GEBCO's (mar abierto), mientras que la malla fina con los datos *in situ* (laguna). Se consideró una distancia aproximada radial mar adentro de  $45$  km para generar el dominio de análisis.

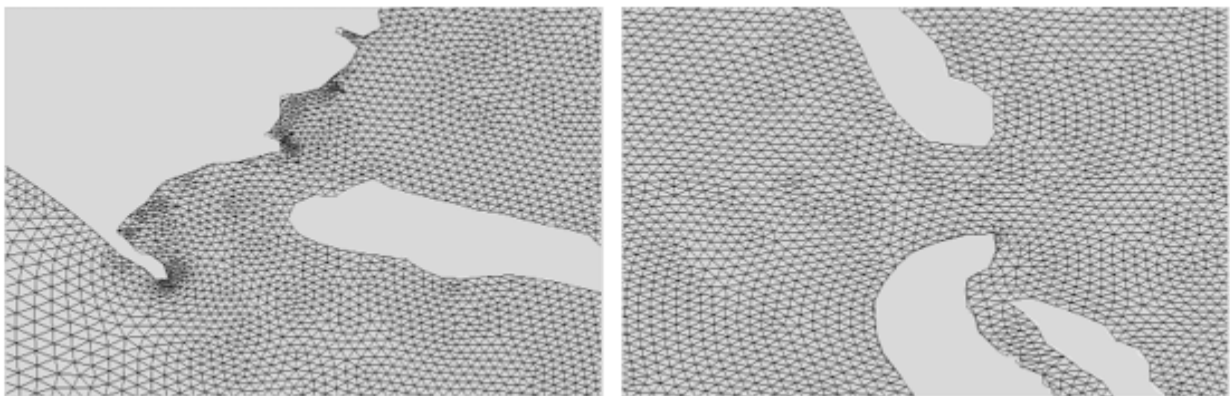
Para la creación de la malla se importaron los datos de la batimetría final, los bordes de las islas y tierra firme, la malla final es de tipo bidimensional. El archivo de exportación incorpora una variable adicional que permite distinguir los nodos de acuerdo con su ubicación, esto son los límites de las islas o bordes externos de la malla. Esta variable facilita el proceso de interpretación de esta malla junto con la de batimetría. El resultado de la malla de batimetría final se muestra en la **Figura 33**, se presenta la densidad de malla y en cada una de las bocas en las **Figura 34** y **Figura 35**.



**Figura 33.-** Malla de análisis realizada para el escenario de modelación 1, conformada de 39,469 nodos y 76,965 elementos, las características de la malla del escenario dos son 165,018 nodos y 325,374 elementos de análisis y finalmente para la malla del escenario tres sus características son 171,734 nodos y 338,770 elementos.



**Figura 34.-** Detalle de malla en la laguna de Tóbari, y detalle de malla en la boca norte y sur respectivamente.



**Figura 35.-** detalle de malla en la boca norte (figura izquierda) y sur respectivamente (figura derecha)

### IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ADCIRC (ESCENARIO BASE)

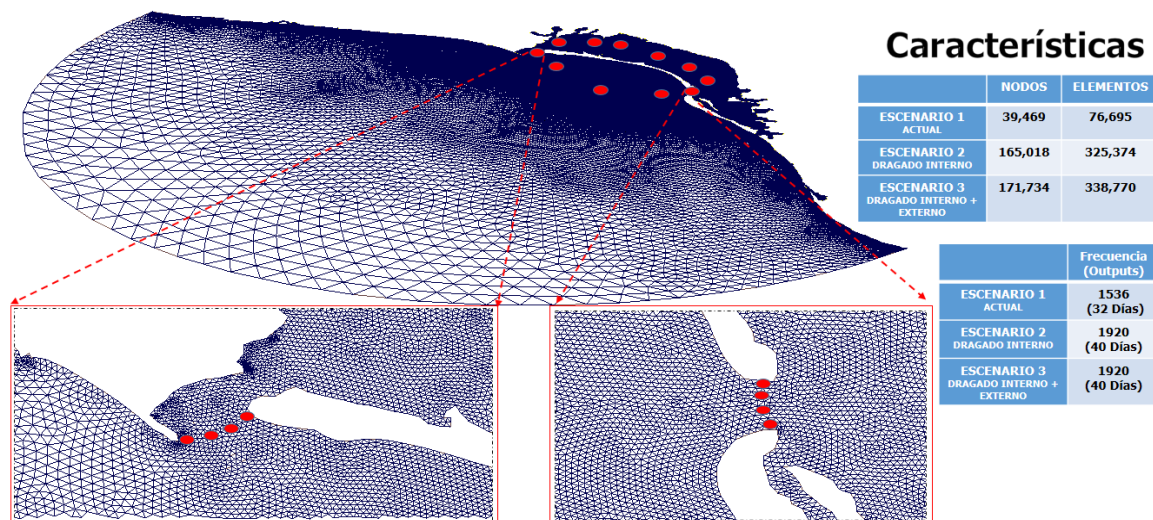
La implementación en ADCIRC se realizó de la manera más simplificada posible, solo se consideraron las forzantes de marea como se explicó anteriormente debido a ser la condicionante más importante y por simplificación del modelo, no se consideran condiciones de fuerzas externas como la acción del viento, ni transporte de sedimentos, y sólo resolviendo únicamente la ecuación de la continuidad y momentum sobre el espacio predeterminado bajo las condiciones iniciales de finidas. Para esta simulación de ADCIRC, se utiliza el forzamiento de marea definiéndolos de la siguiente manera según la base de datos LeProvost: **K1, M2, N2, O1** y **S2** como constituyentes de marea y considerando que son las más importantes para la zona y dentro de la mayor influencia Tabla 8. (Le Provost, Genco, Lyard, & Vincent, 1998). Se toman cada componente de marea y se extraen los valores que se necesitan de la base de datos de componente LeProvost, los valores de amplitud y fase se ajustan para cada nodo, inicialmente con altura de marea de 1 m, para el arranque del campo

de velocidad se dejó tres días para la estabilización del modelo, los resultados sólo se consideraron posterior a este periodo de arranque, para analizar 28 días de análisis aunque el modelo se ejecutó con 31 días, se considera un valor de rampa de inicio de tres días de liberación de los términos advectivos, este es un periodo de tiempo en el cual el modelo aumenta sin circulación hasta la amplitud de marea completa, esto mejora la estabilidad, los resultados de este periodo no concuerdan con la realidad física y no se guardan ni quedan registrados.

El archivo de control ADCIRC especifica diversos valores para su ejecución, dentro de ellos se incluyen especificaciones para forzar las mareas, los términos a incluir, la opción de arranque en caliente, sincronización del modelo, configuraciones numéricas y control de salida, sin embargo para que ADCIRC se ejecute correctamente, la malla debe convertirse a coordenadas geográficas (Latitud/Longitud), todo el proceso de creación de la malla debe ser realizado en coordenadas UTM para mayor precisión, pero es requisito final por funcionalidad convertirlas en formato geográfico (Lat./Lon.) para continuar con el análisis del ADCIRC.

Definido esto, ADCIRC está listo para ejecutarse, los archivos de entrada básicos (Malla) deben estar presentes en el directorio de trabajo, donde automáticamente SMS hace una copia del archivo malla y lo nombra fort.14 luego hace una copia del archivo de información de control del modelo (forzantes) y lo nombra fort.15 y ejecuta.

Una vez ejecutado y completado el ADCIRC, se crean varios archivos nuevos, entre ellos el fort.63 (Elevaciones) y fort.64 (velocidades) que son los archivos de salida del modelo. Realizando el post proceso con la información que el modelo numérico arroja podemos presentar los siguientes resultados, analizarlos y validarlos si son aproximados al comportamiento real que se observa en la laguna.



**Figura 36.-** Ilustración de la posición de los 17 puntos/nodos de control de elevaciones y velocidades para análisis comparativo de las propuestas de mejora en la laguna para analizar las variaciones de velocidad y elevaciones dentro y fuera de la laguna, 4 Boca Norte, 6 Interior de la laguna, 4 Boca Sur y 3 Exterior de la laguna.

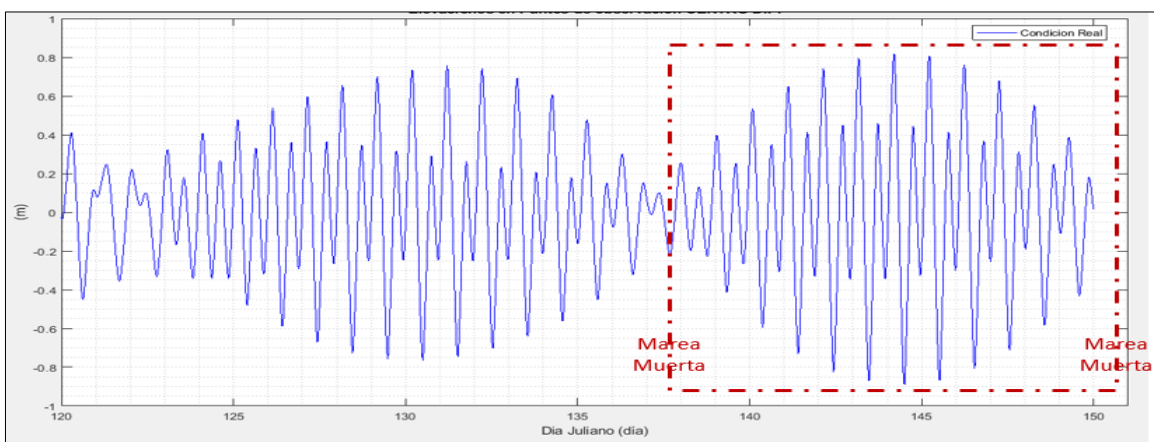
## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

Los resultados preliminares obtenidos en esta campaña de medición permiten conocer la batimetría del sistema lagunar, la cual es muy somera en la zona cercana a la costa e incluso para los periodos de marea baja, el sistema pierde más de 10% de la superficie, de igual forma se observa que la comunicación de los flujos entre la laguna y el Golfo de California se realizan preferentemente por la boca sur en comparación con el gasto en la boca norte. También en esta campaña de medición se obtuvieron los valores de salinidad medidos en la laguna, los cuales oscilan en la zona cercana a la costa entre 38 a 41 UPS (Unidades Prácticas de Salinidad), lo cual indica que el sistema lagunar tiene una comunicación débil con el Golfo de California y por consiguiente un tiempo de residencia alto) todas estas son características de una laguna costera no estuarina.

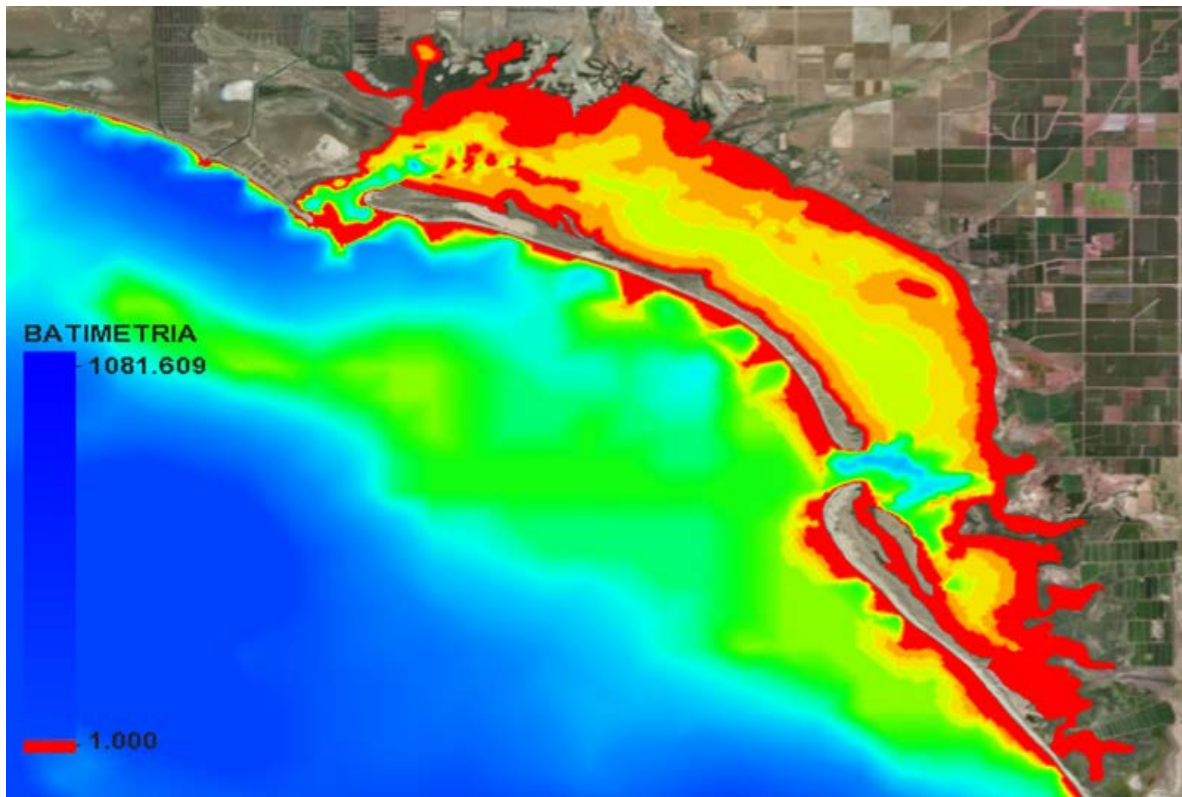
Los archivos de salida de la herramienta de soporte ADCIRC son los valores puntuales recopilados de la malla de análisis, se obtienen elevaciones y velocidades en los nodos, mediante la extracción de datos recreamos la marea en el interior de la laguna de Tóbari en su parte central obteniendo una marea mixta predominantemente diurna. En esta sección se presentarán las simulaciones realizadas, inicialmente se presenta la situación actual de la laguna y los datos obtenidos de la herramienta de soporte, posteriormente se presentarán los mismos resultados considerando dos situaciones de mejora, realizando dos propuestas de dragados en la laguna y comparando el comportamiento de la hidrodinámica obtenida.

La marea obtenida en los datos de salida al interior de la laguna es la que se muestra en la **Figura 37** a partir de las elevaciones obtenidas, se señala en un recuadro rojo punteado el periodo donde se realizaron las visitas y obtención de datos correspondientes de 20 al 29 de junio de 2017.



**Figura 37.-** Variación de la marea (mixta) en la laguna el recuadro rojo indica el periodo de análisis comprendido entre el 20 a 29 de junio de 2017 para las elevaciones.

A continuación, en la **Figura 38** se representa la batimetría de la condición actual de la laguna y posteriormente se presentan los resultados con los datos de salidas de la simulación con ADCIRC de las elevaciones (fort.63) y velocidades (fort.64). De la **Figura 39** a la **Figura 48** se presentan los valores de los niveles o elevaciones de la marea en escala de colores, y los comportamientos de los vectores en cada boca. Estos resultados indican que la laguna tiene un de marea mixta. la velocidad máxima obtenida para el escenario actual es de 2.22 m/s, las figuras que se presentan en los resultados del elevaciones y velocidades para el escenario actual corresponden a las fechas del 20 al 29 de junio y en estos resultados se presentan los datos de salida a las 00:00 horas de cada respectivo día como punto de comparación arbitrario.



**Figura 38.-** Batimetría de la zona actual de la laguna de Tóbari con la combinación de datos medidos in situ en los transectos y datos satelitales obtenidos de GEBCO's donde se confirma que las mayores profundidades se encuentran en las bocas de la laguna y la laguna es somera



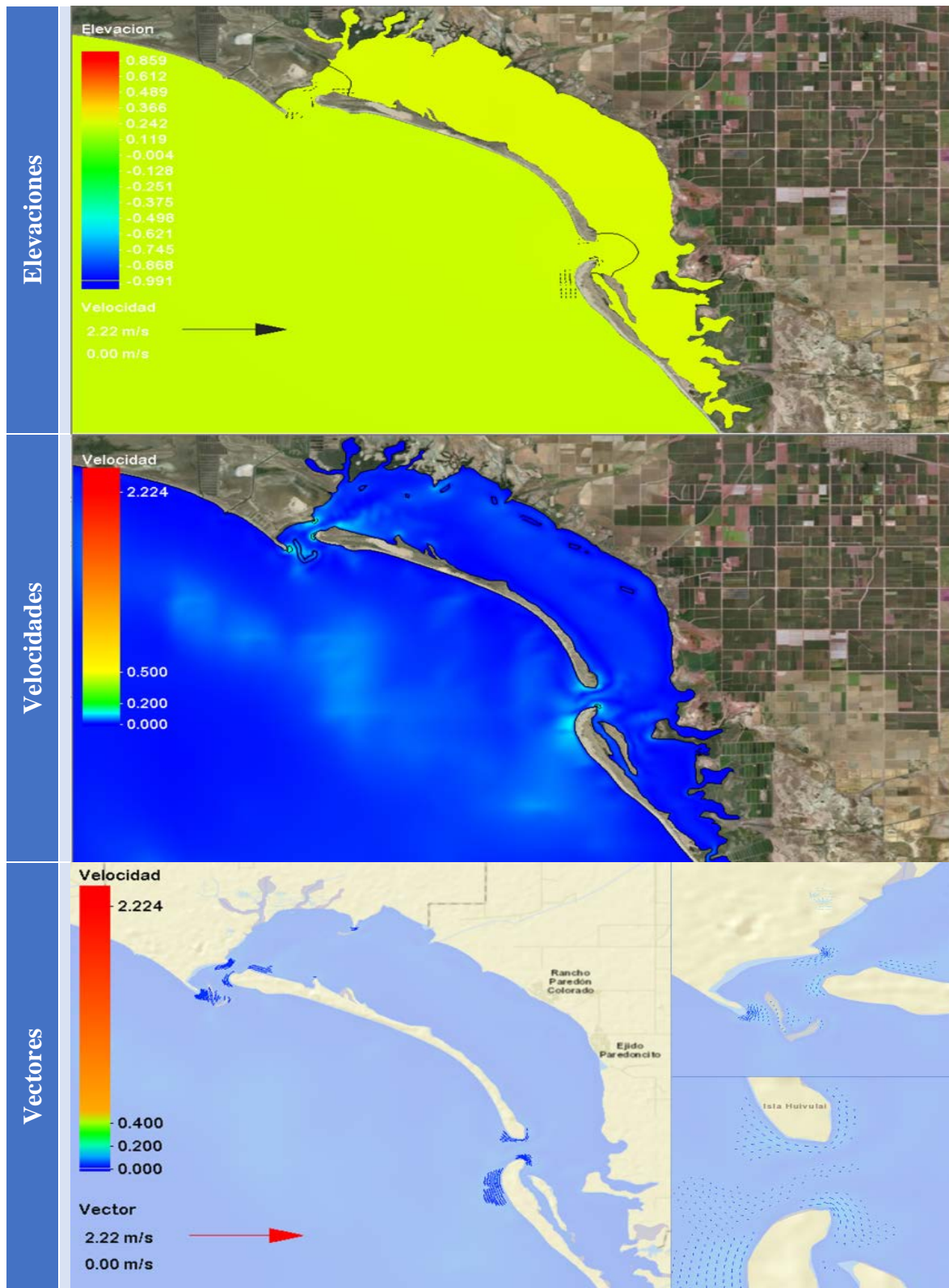
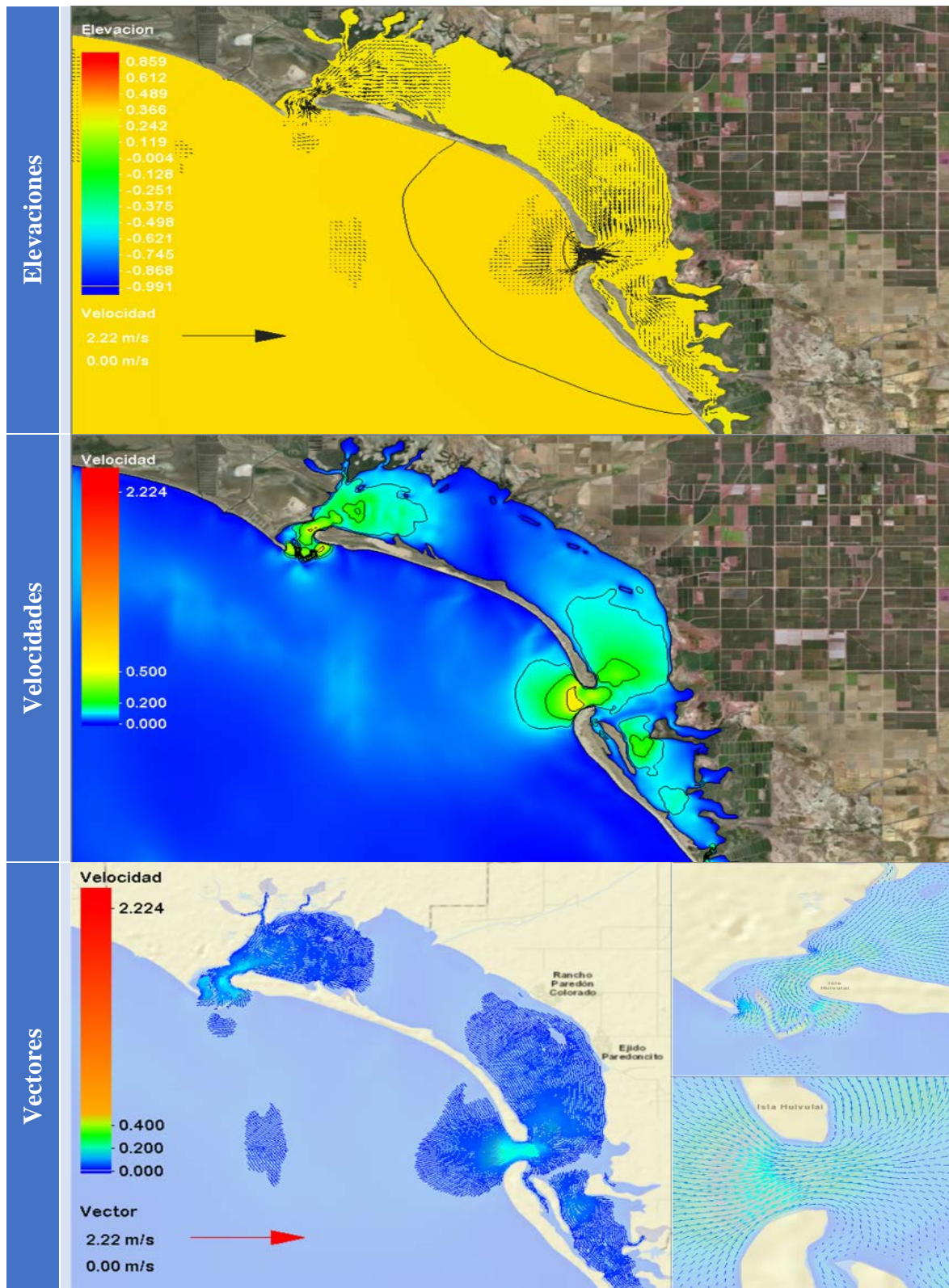


Figura 39.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 20 de junio 2017 para el escenario actual



**Figura 40.-** Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 21 de junio de 2017 para el escenario actual.

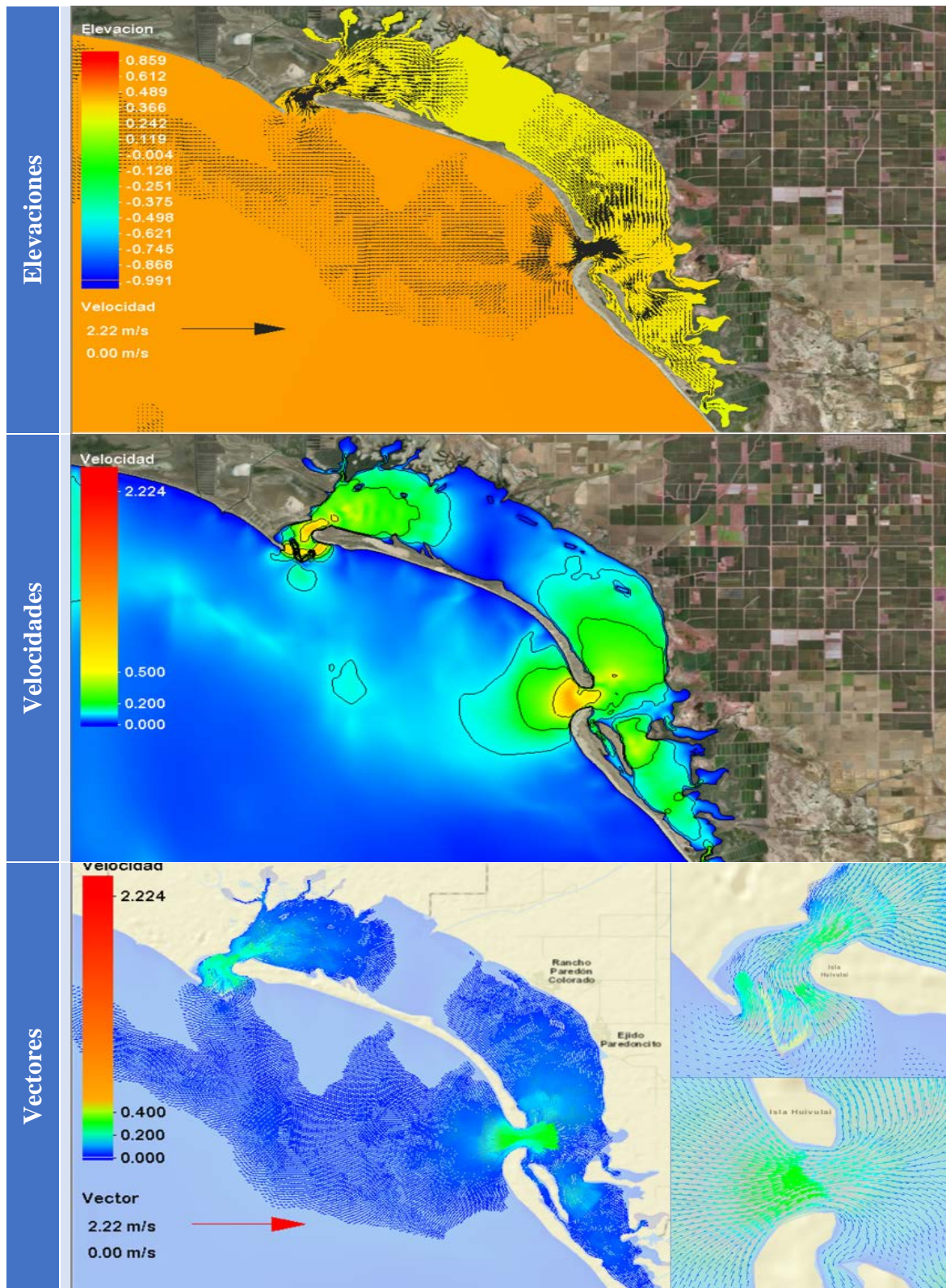
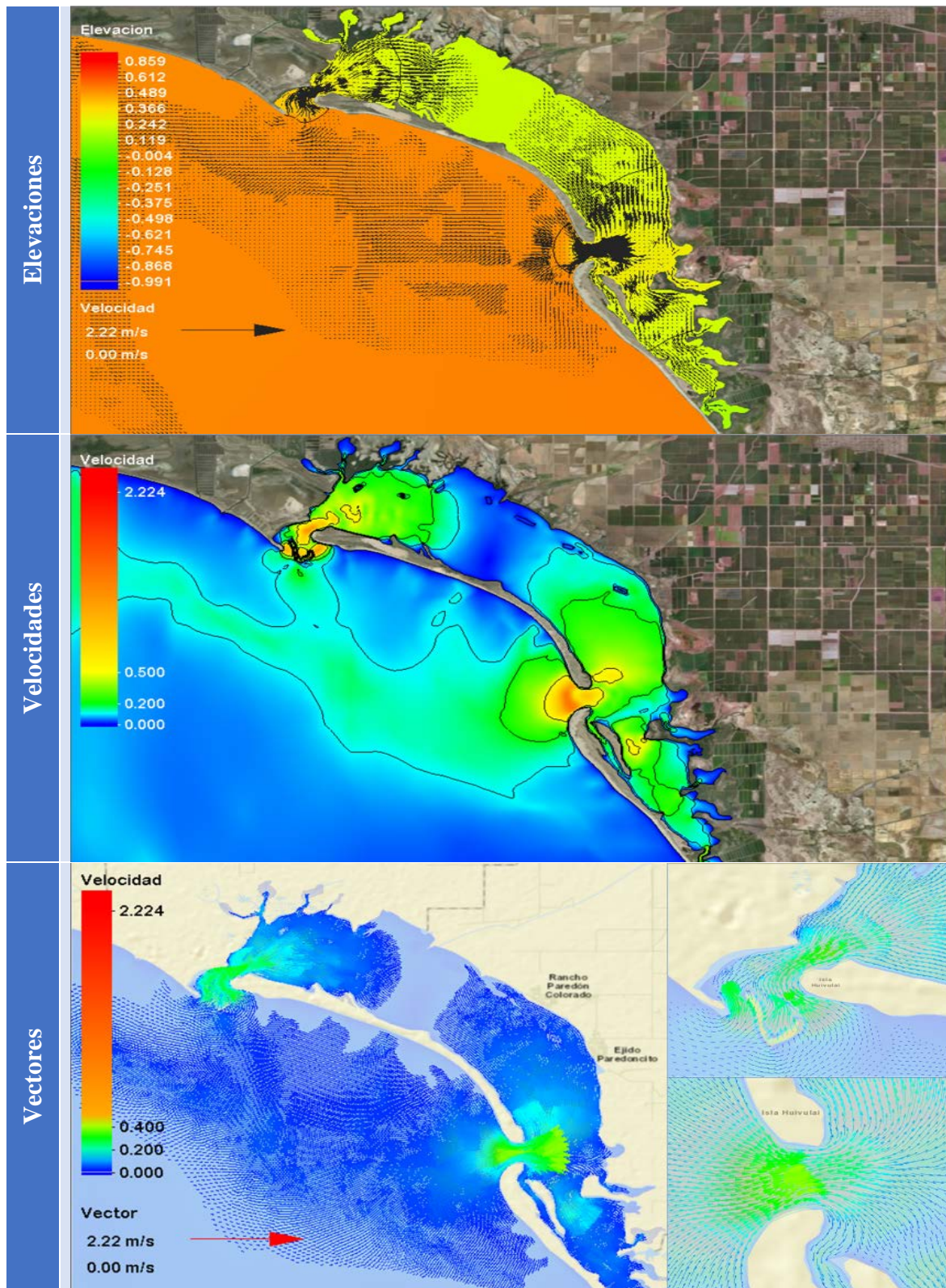
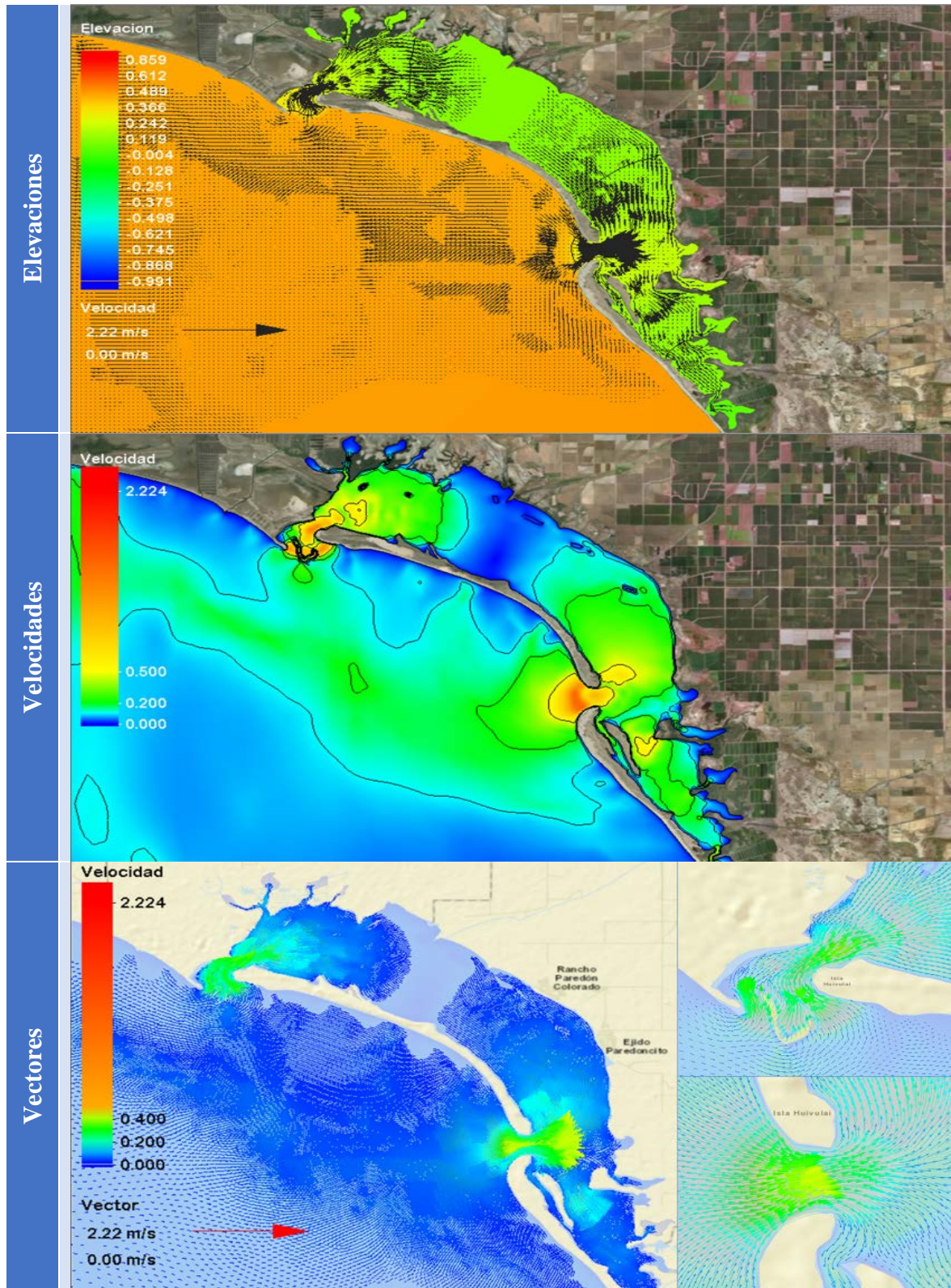


Figura 41.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 22 de junio de 2017, para el escenario actual



**Figura 42.-** Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 23 de junio de 2017 para el escenario actual



**Figura 43.-** Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 24 de junio de 2017 para el escenario actual

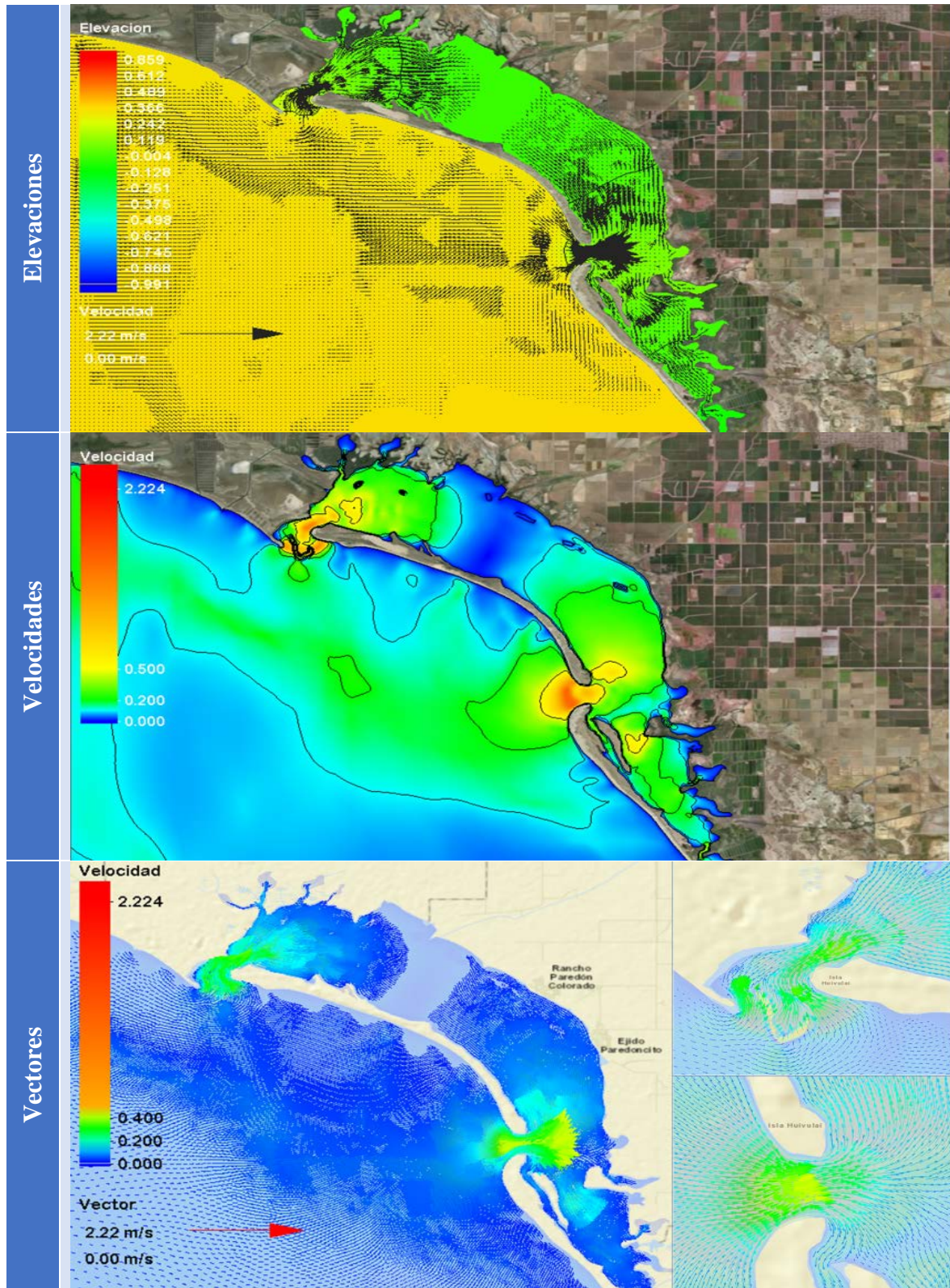


Figura 44.- Velocidades y magnitudes de los vectores de velocidad para el 25 de junio 2017 para el escenario actual

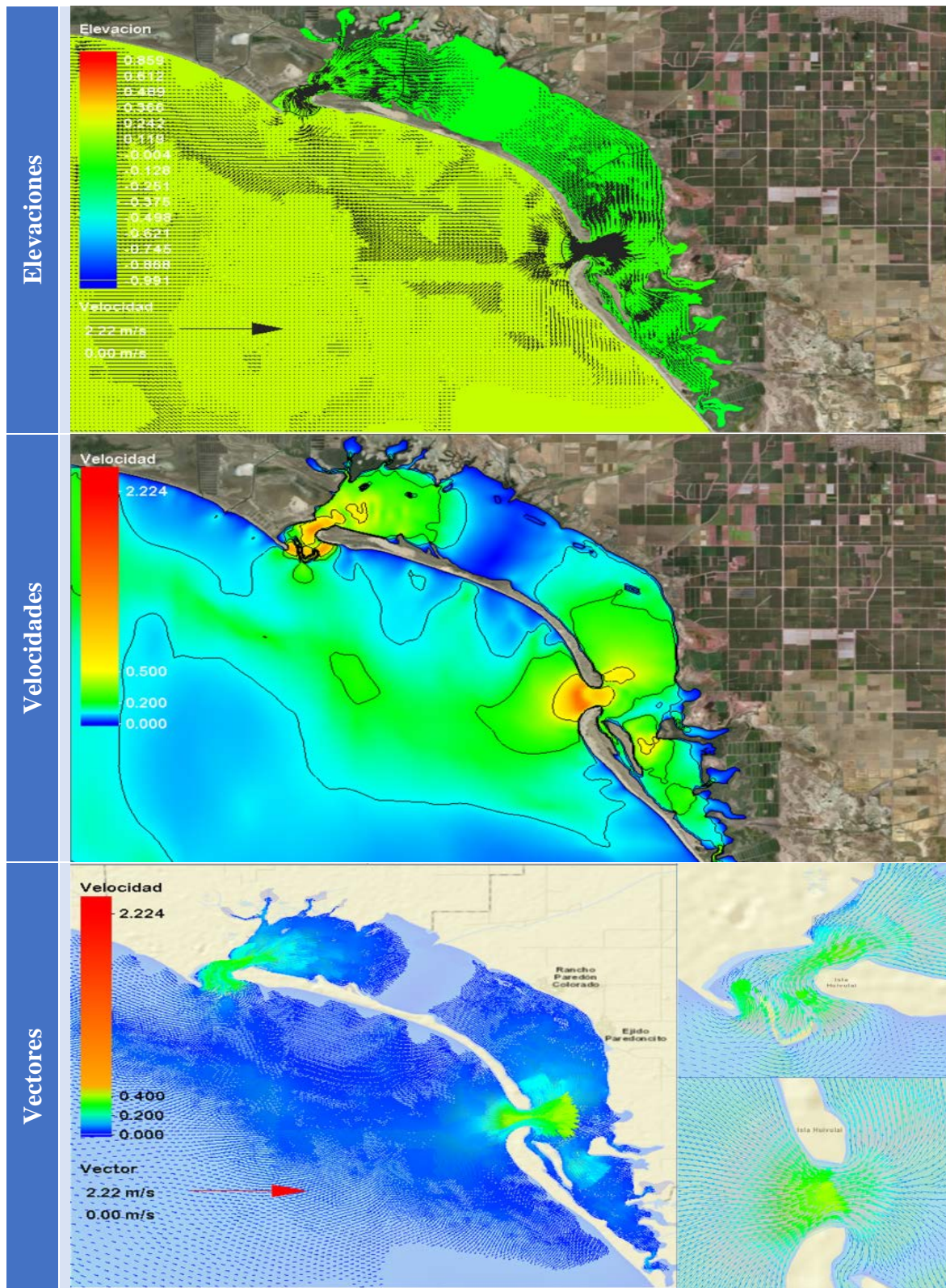


Figura 45.- Velocidades y magnitudes de los vectores de velocidad para el 26 de junio de 2017 para el escenario actual

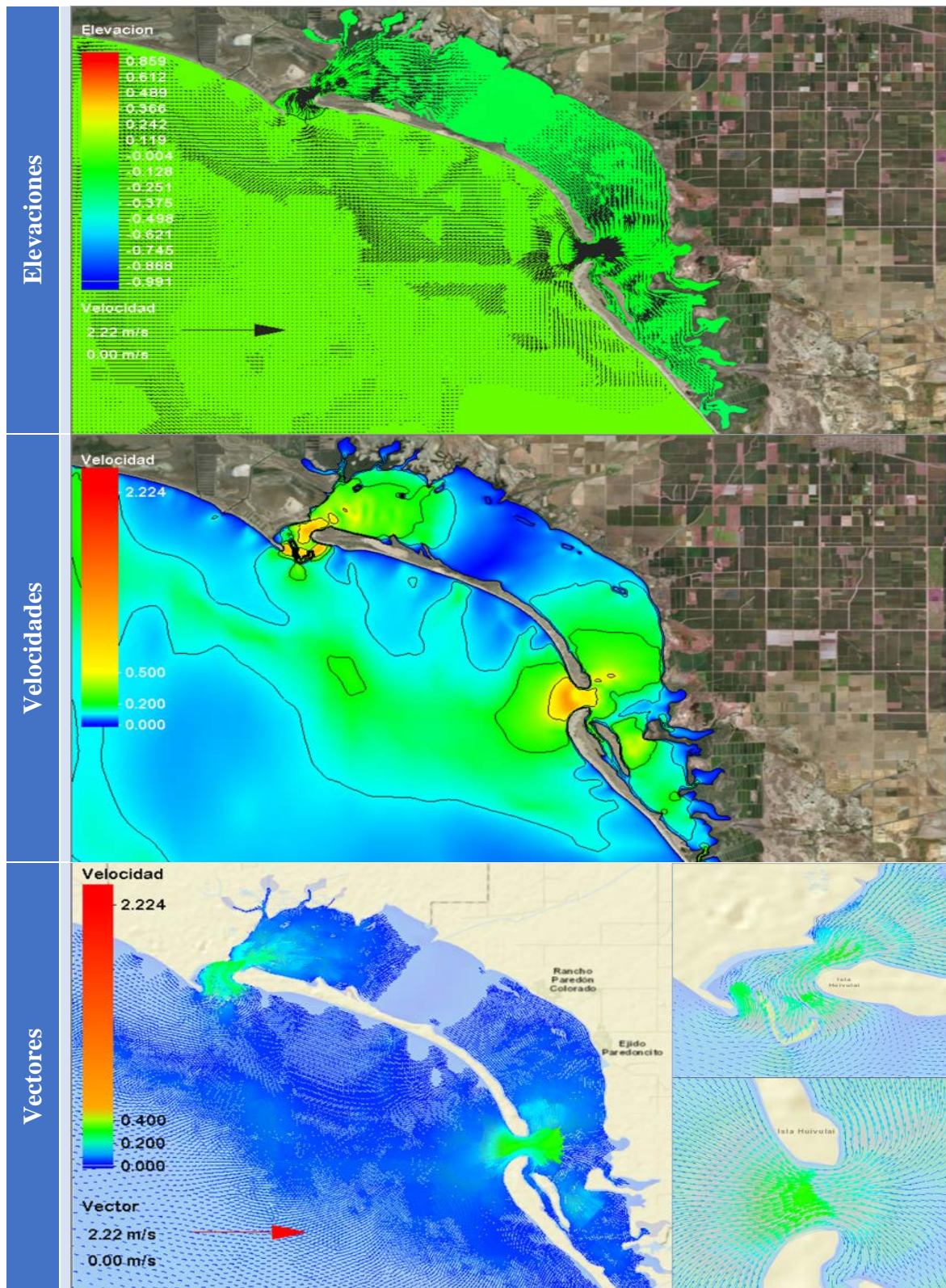
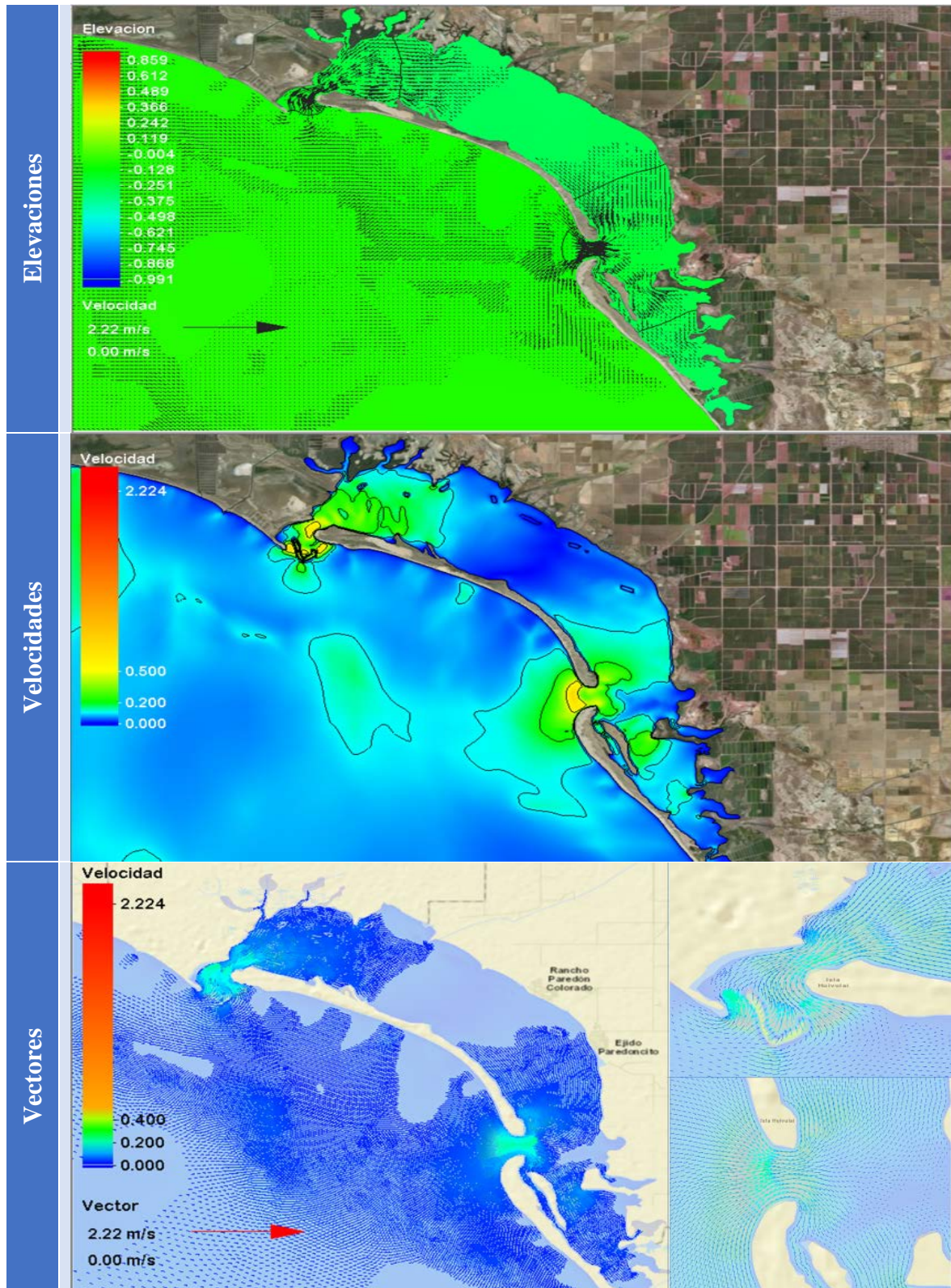
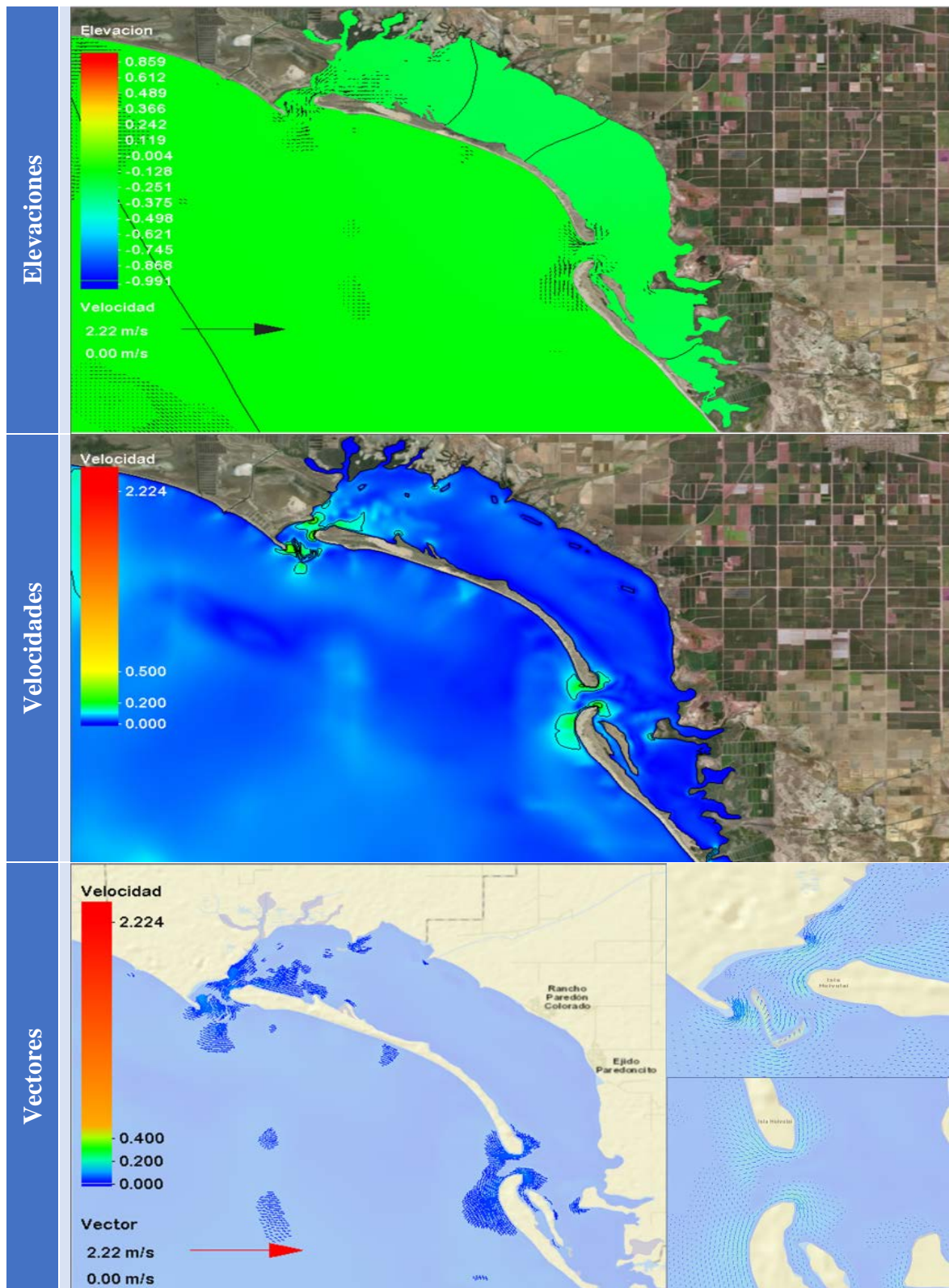


Figura 46.- Velocidades y magnitudes de los vectores de velocidad para el 27 de junio de 2017 para el escenario actual



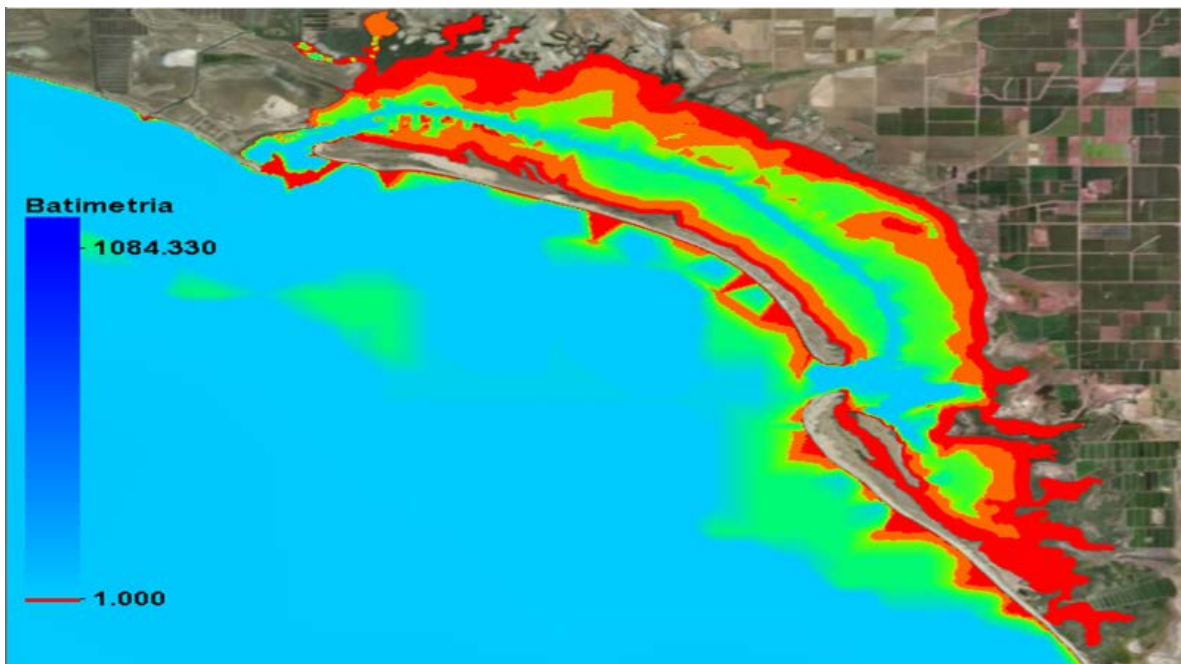


**Figura 47.-** Velocidades y magnitudes de los vectores de velocidad para el 28 de junio de 2017, para el escenario actual



**Figura 48.-** Velocidades y magnitudes de los vectores de velocidad para el 29 de junio de 2017, para el escenario actual

A continuación, en la **Figura 49** se representa la batimetría para el escenario de mejora para la condición actual de la laguna donde se realiza un dragado central que atraviesa toda la laguna uniendo ambas bocas y posteriormente se presentan los resultados con los datos de salidas de la simulación con ADCIRC de las elevaciones (fort.63) y velocidades (fort.64). De la **Figura 50** a la **Figura 59** se presentan los valores de los niveles o elevaciones de la marea en escala de colores, y los comportamientos de los vectores en cada boca. La velocidad máxima obtenida para el escenario actual es de 2.36 m/s, las figuras que se presentan en los resultados del elevaciones y velocidades para el escenario de mejora uno, corresponden de la misma manera a las fechas del 20 al 29 de junio y en estos resultados se presentan los datos de salida a las 00:00 horas de cada respectivo día como en los resultados anteriores, donde se puede observar como mejora la situación hidrodinámica en la escala de colores de las velocidades y la influencia de los vectores



**Figura 49.-** Batimetría del escenario de mejora uno de la laguna de Tóbari con la combinación de datos medidos in situ en los transectos y datos satelitales obtenidos de GEBCO's se realiza un dragado central que une ambas bocas para analizar la mejora en la hidrodinámica.

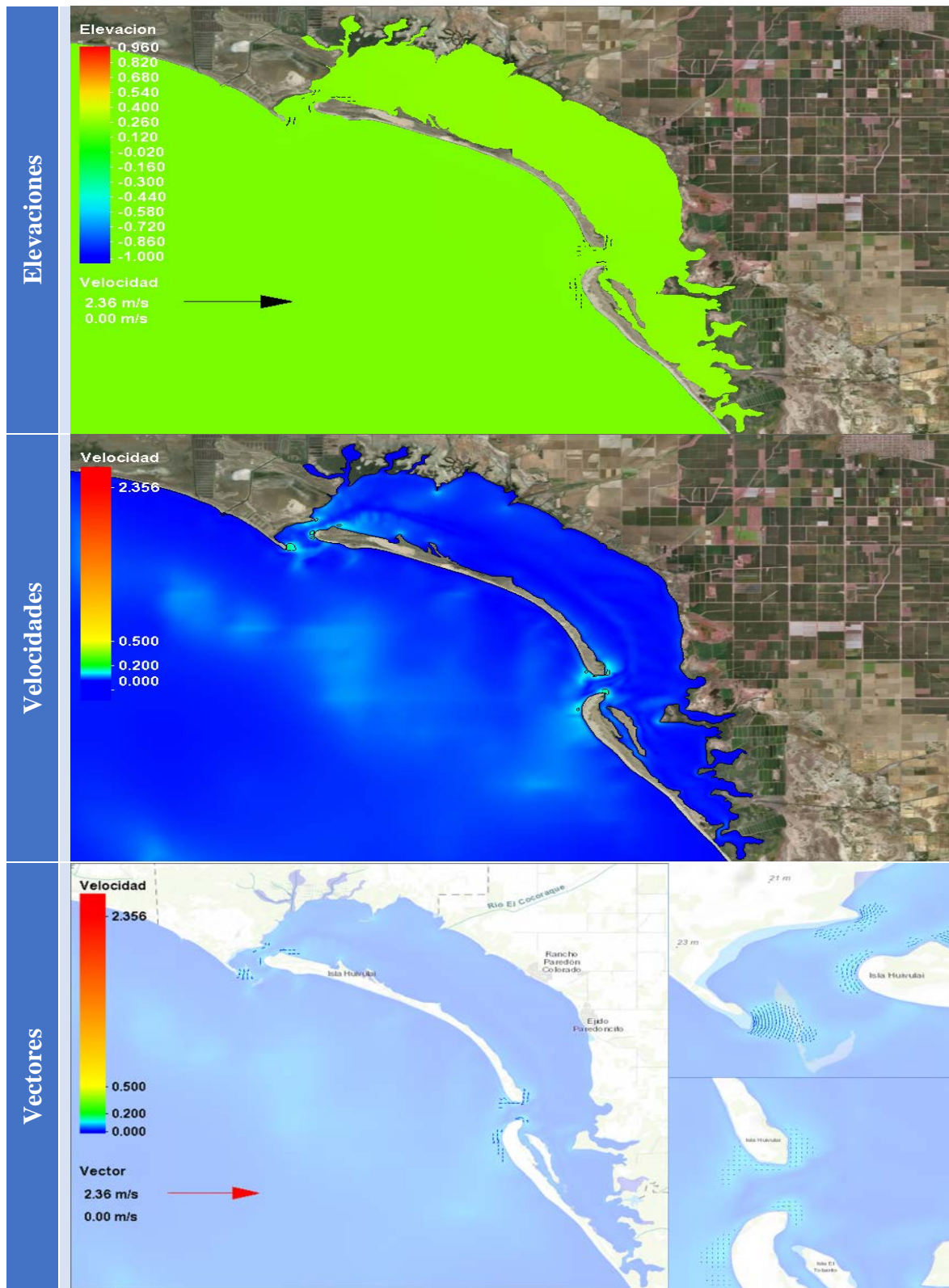


Figura 50.-Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 20 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

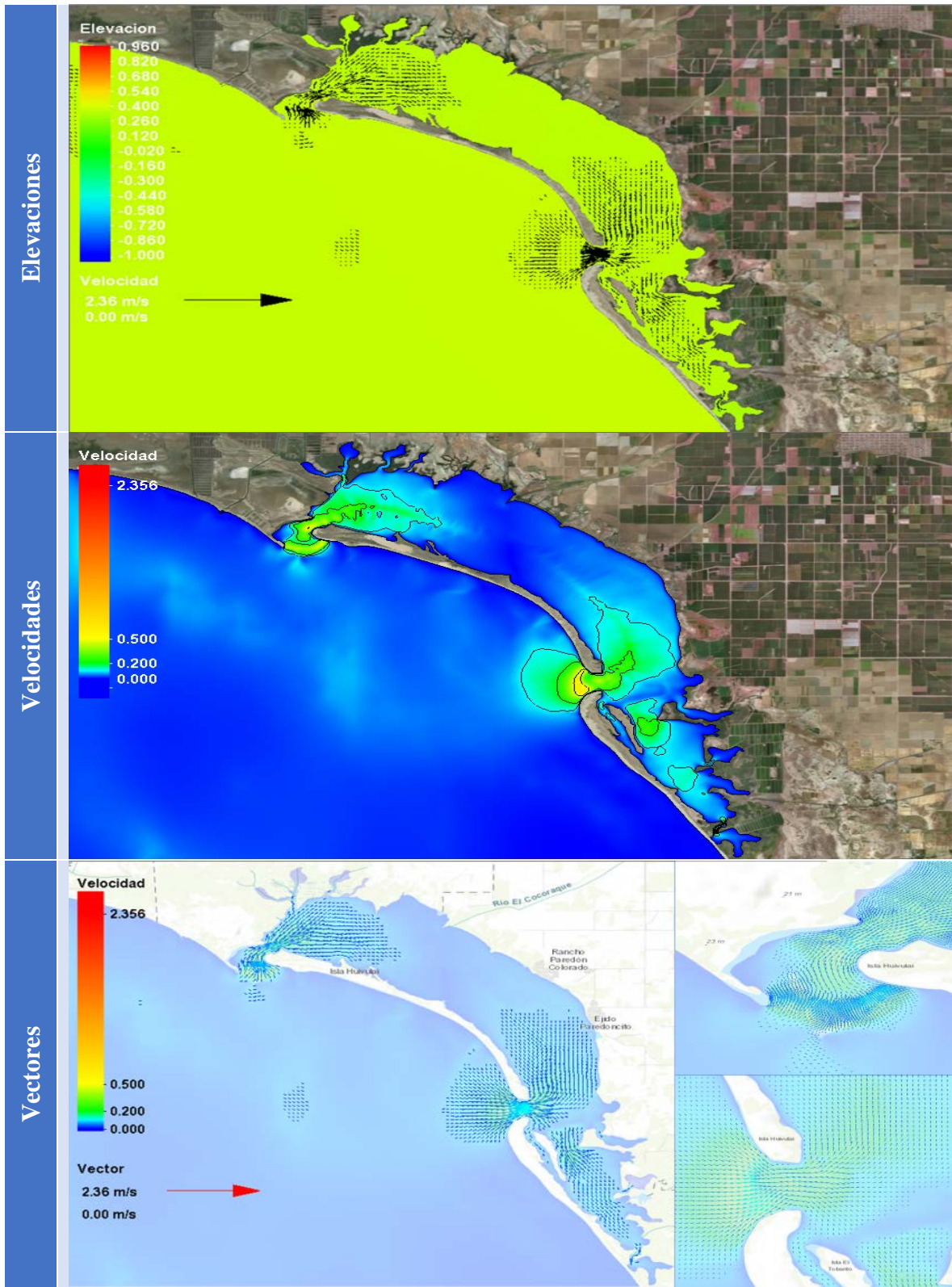


Figura 51.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 21 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

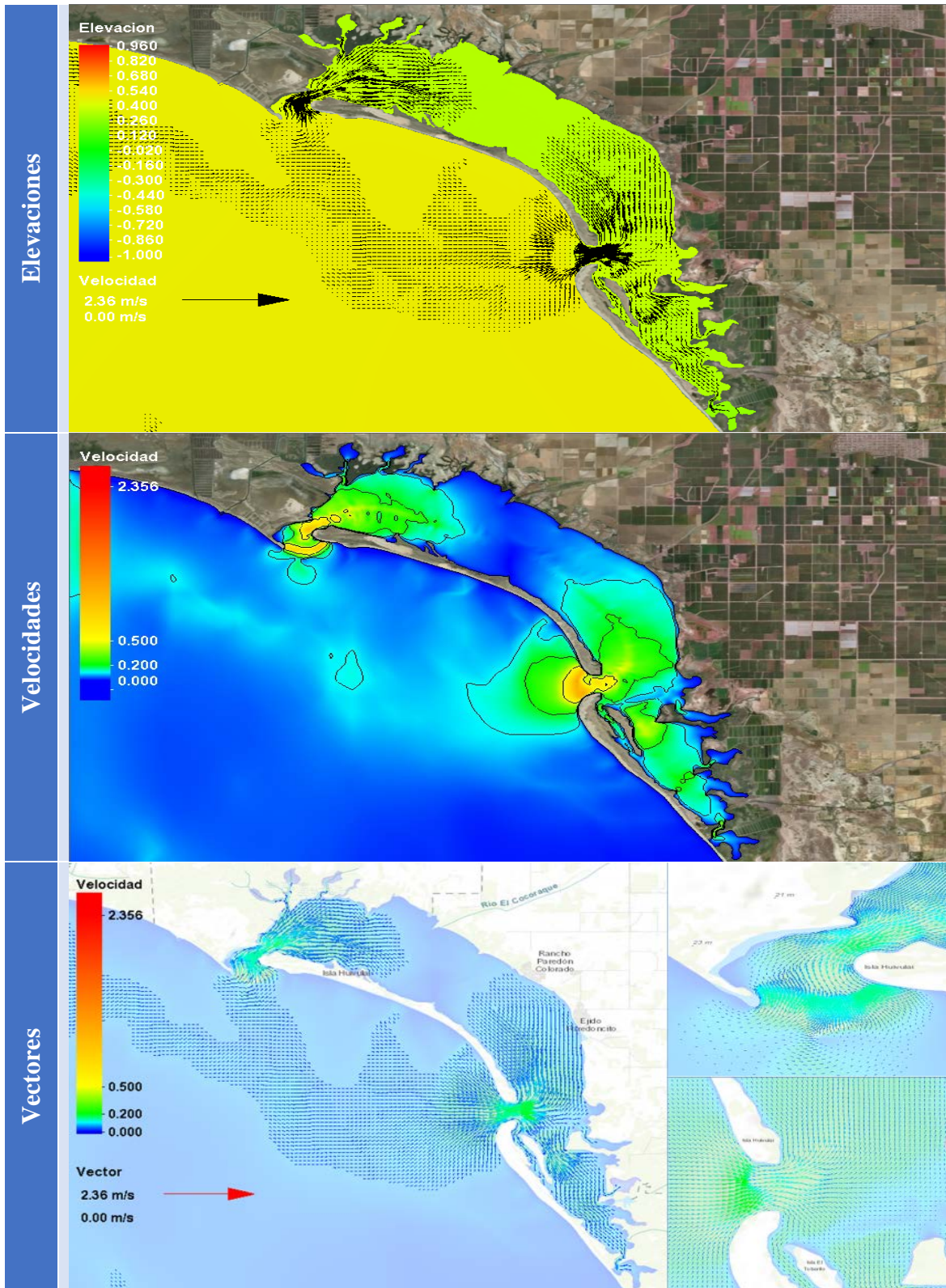
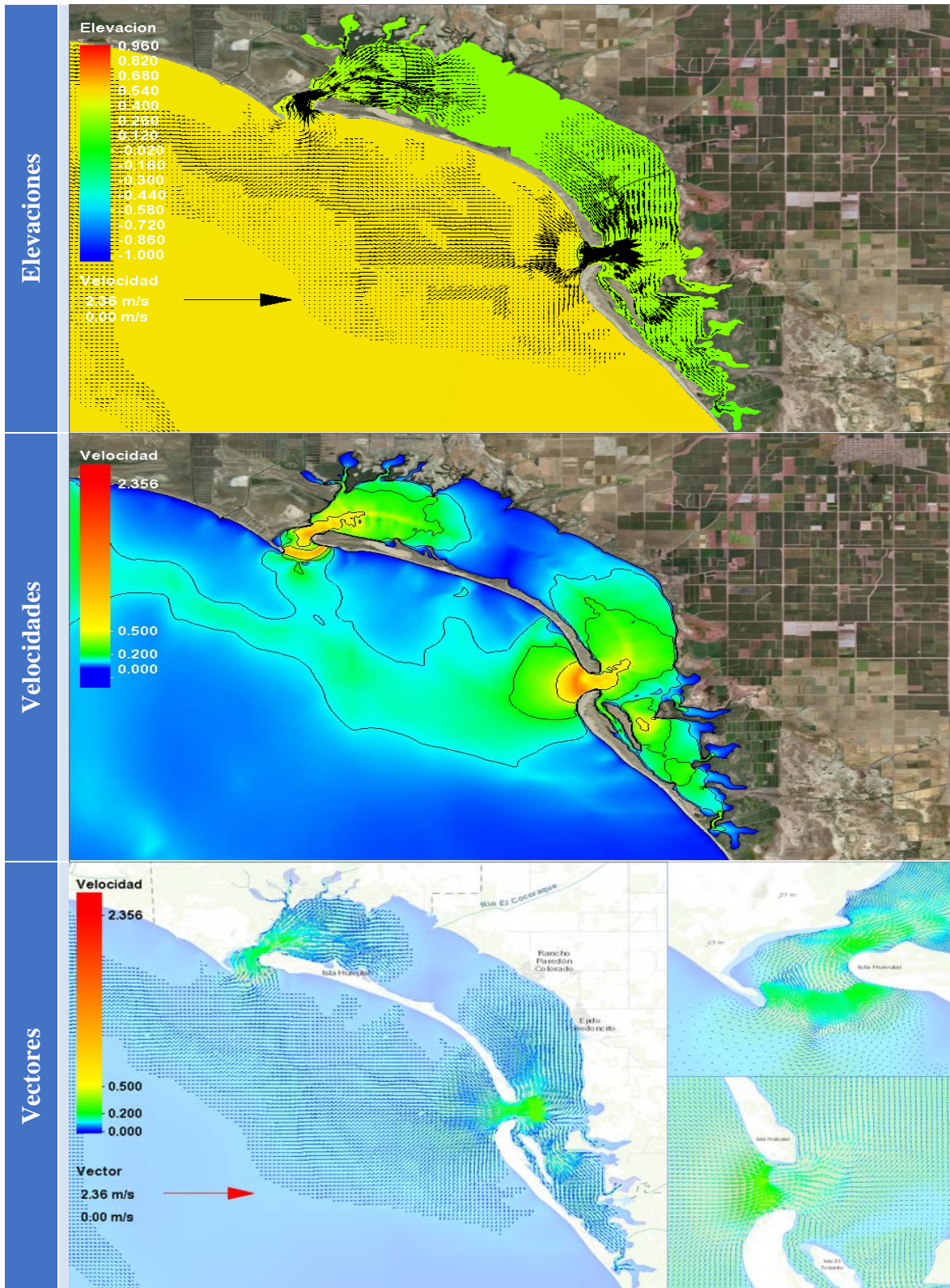


Figura 52.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 22 de junio 2017 para el escenario de mejora uno



**Figura 53** Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 23 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

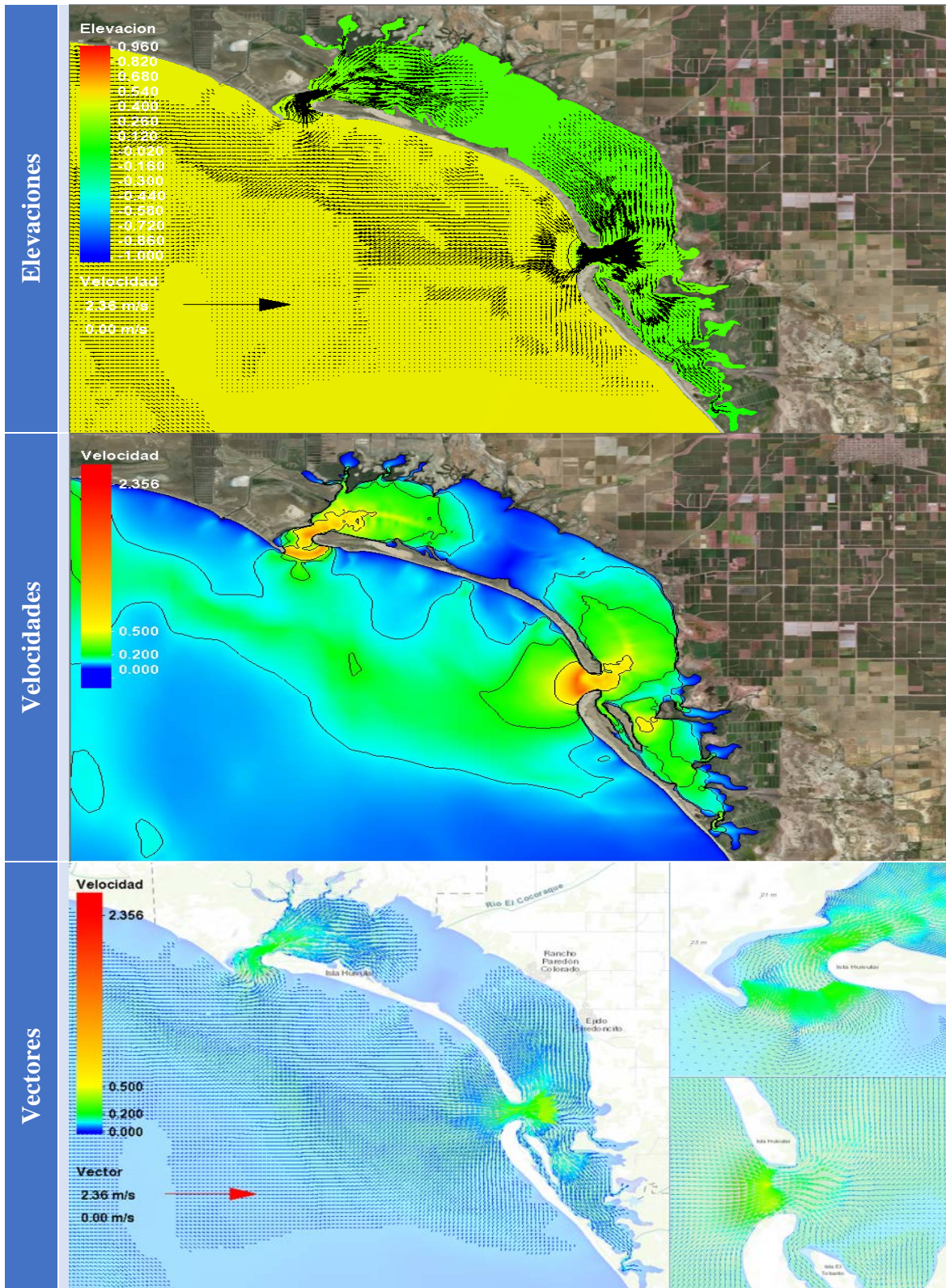


Figura 54.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 24 de junio 2017 para el escenario de mejora uno



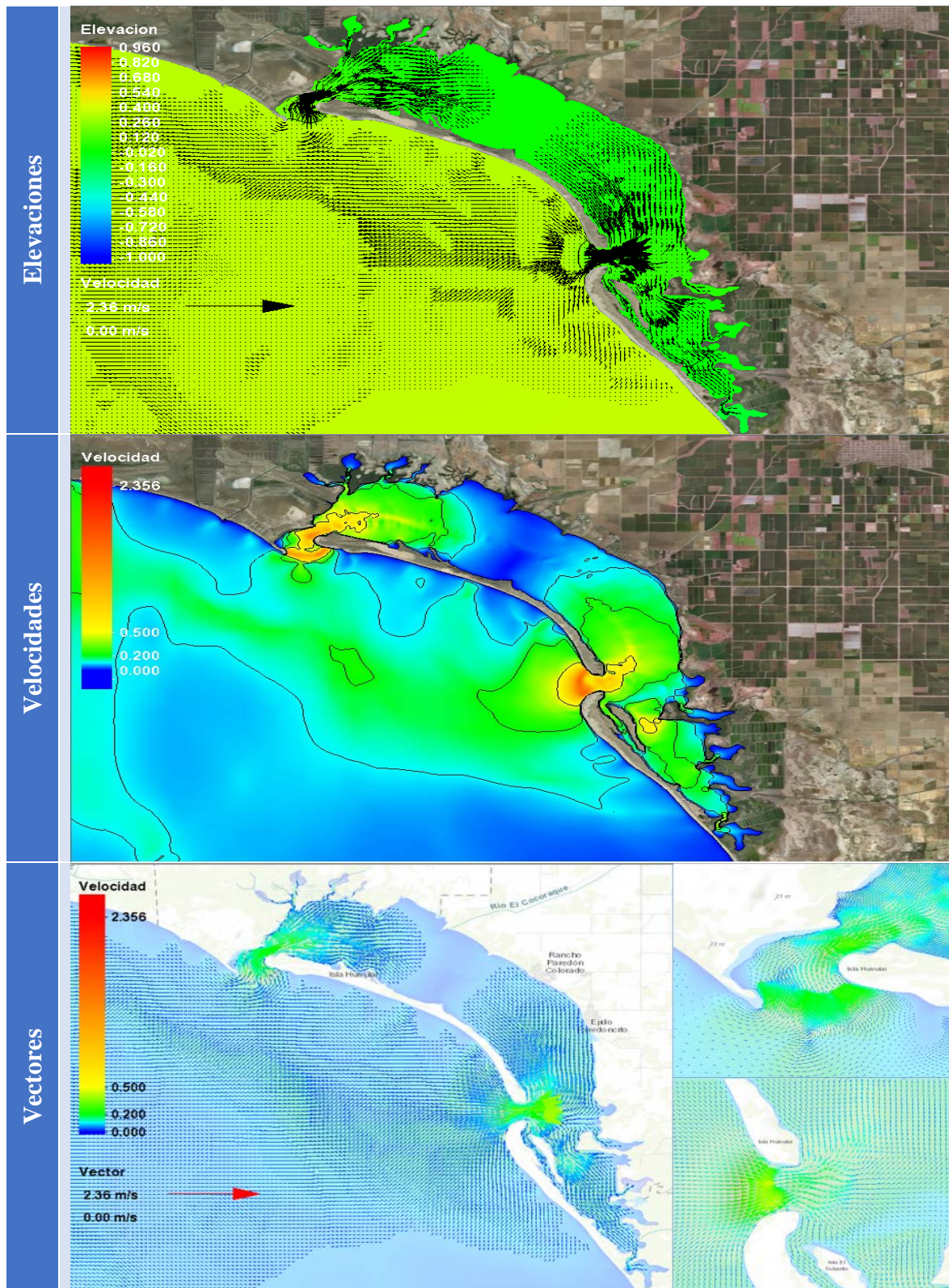


Figura 55.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 25 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

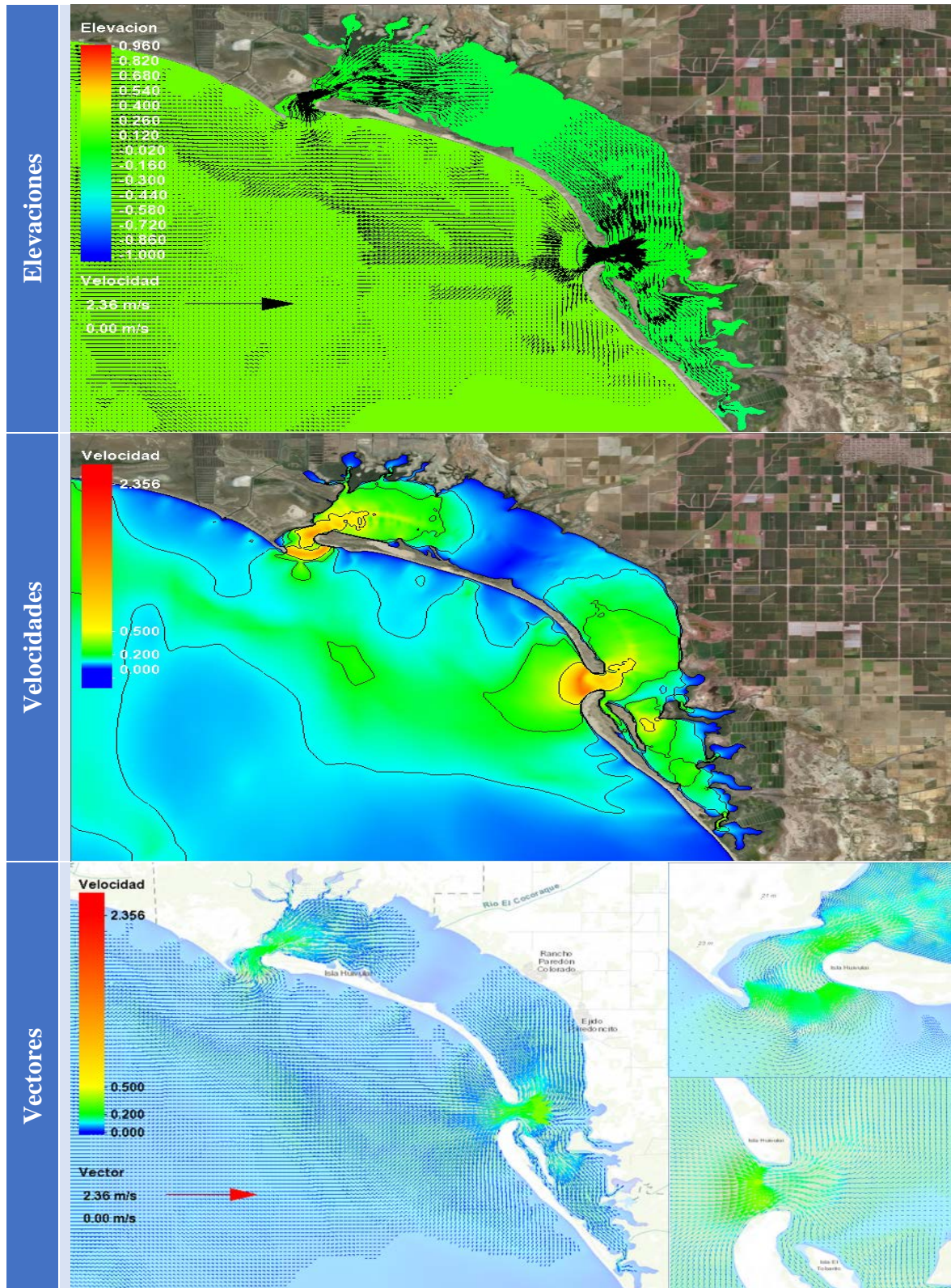


Figura 56.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 26 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

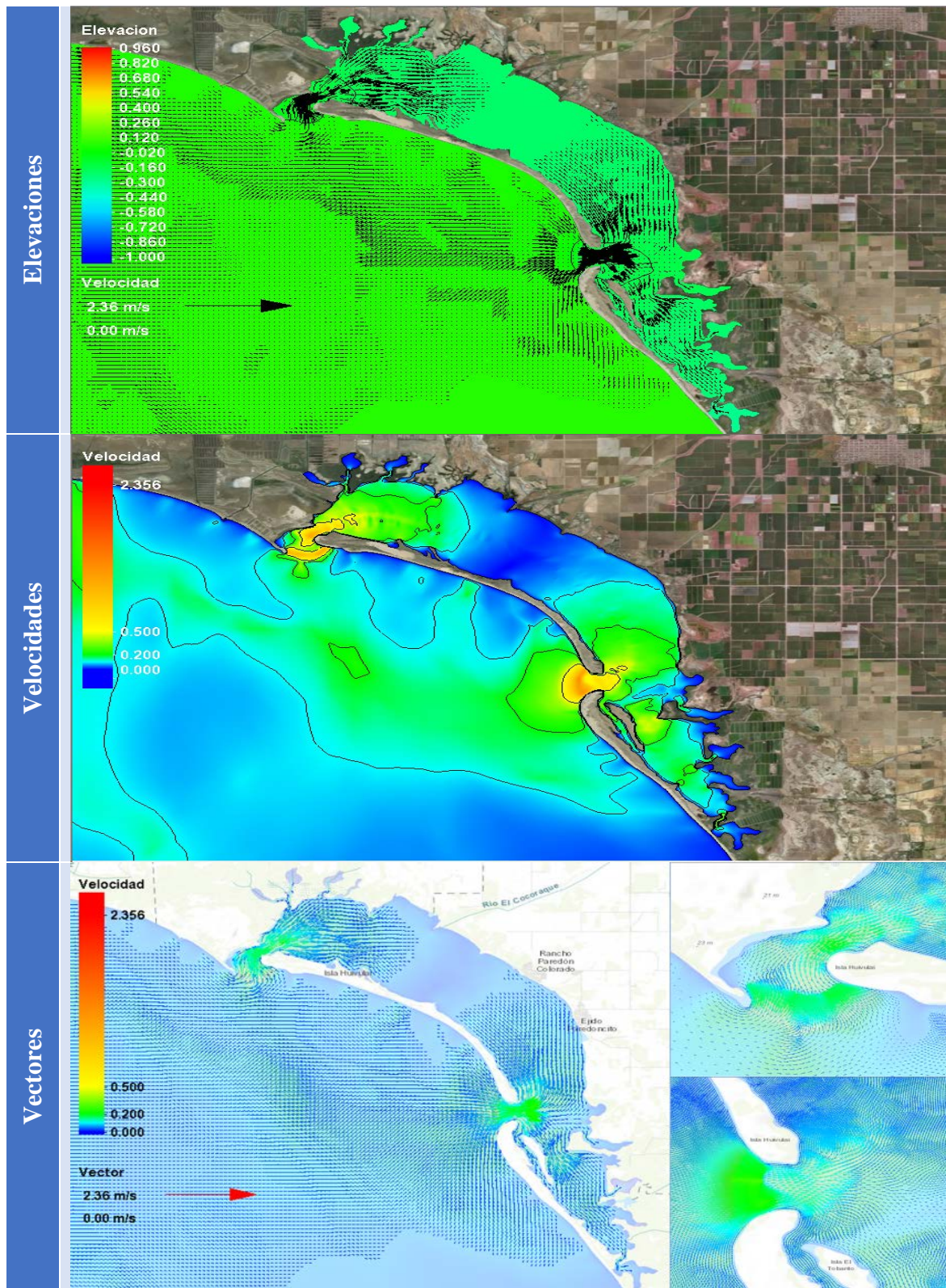


Figura 57.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 27 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

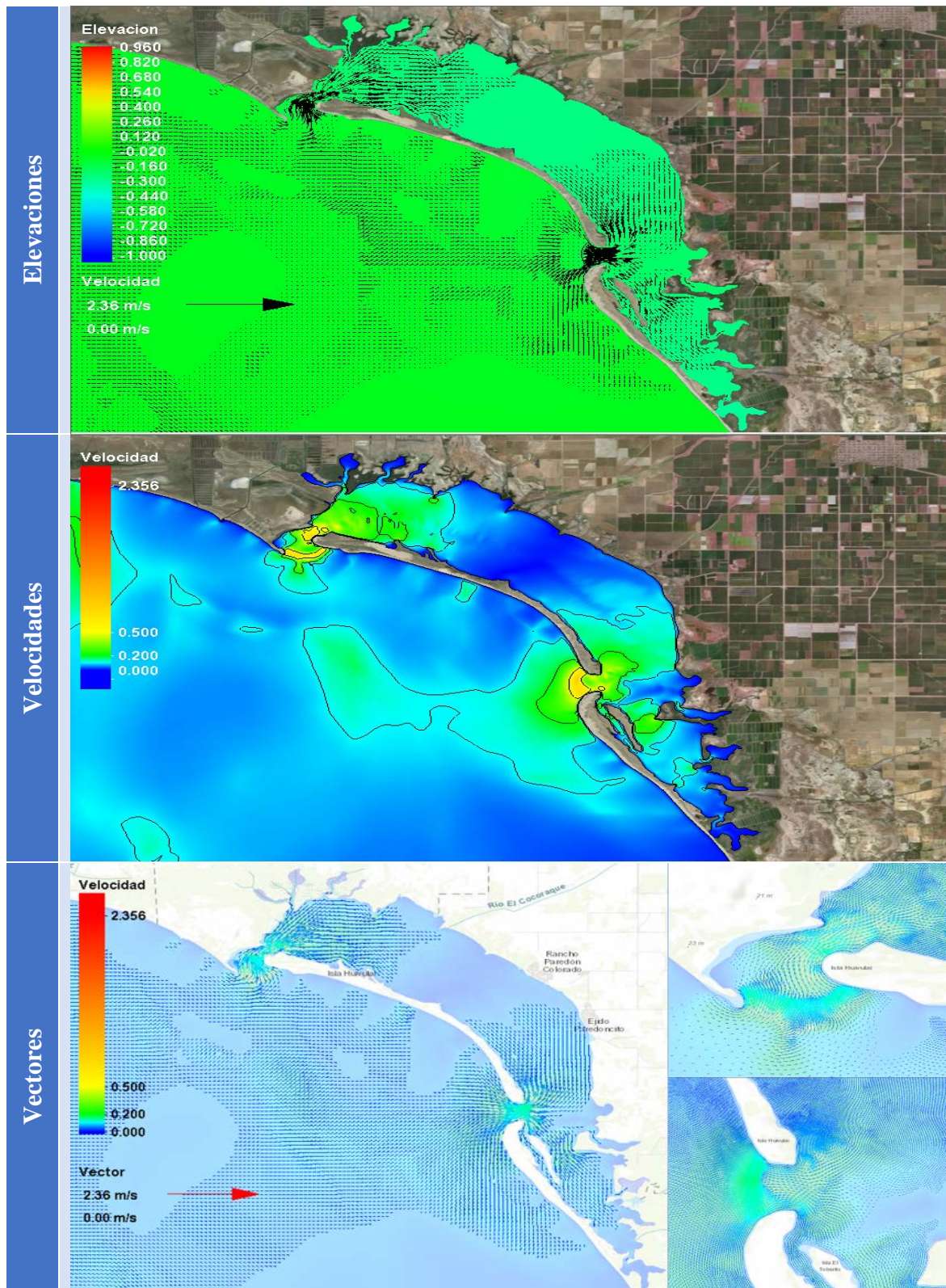


Figura 58.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 28 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

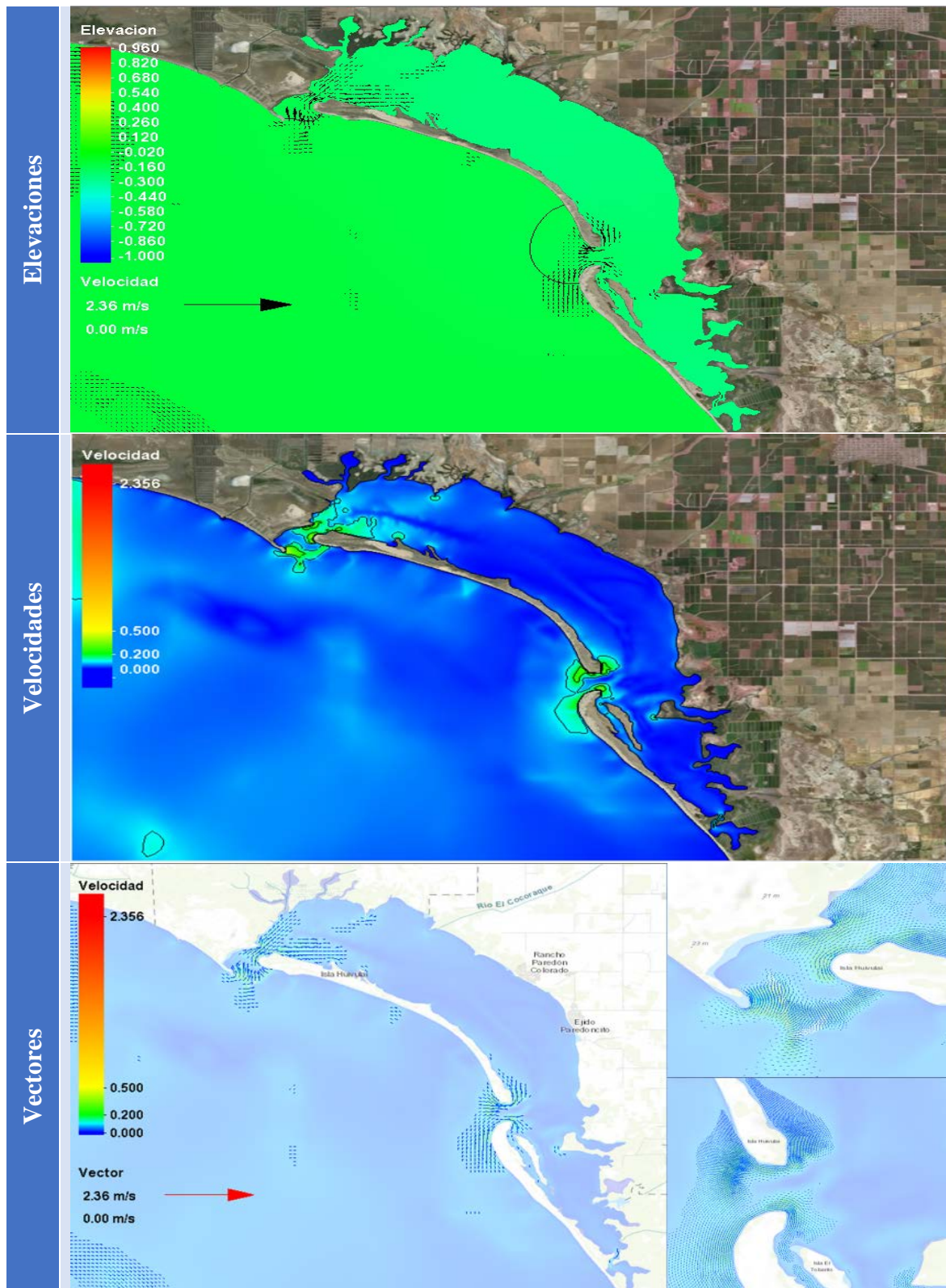
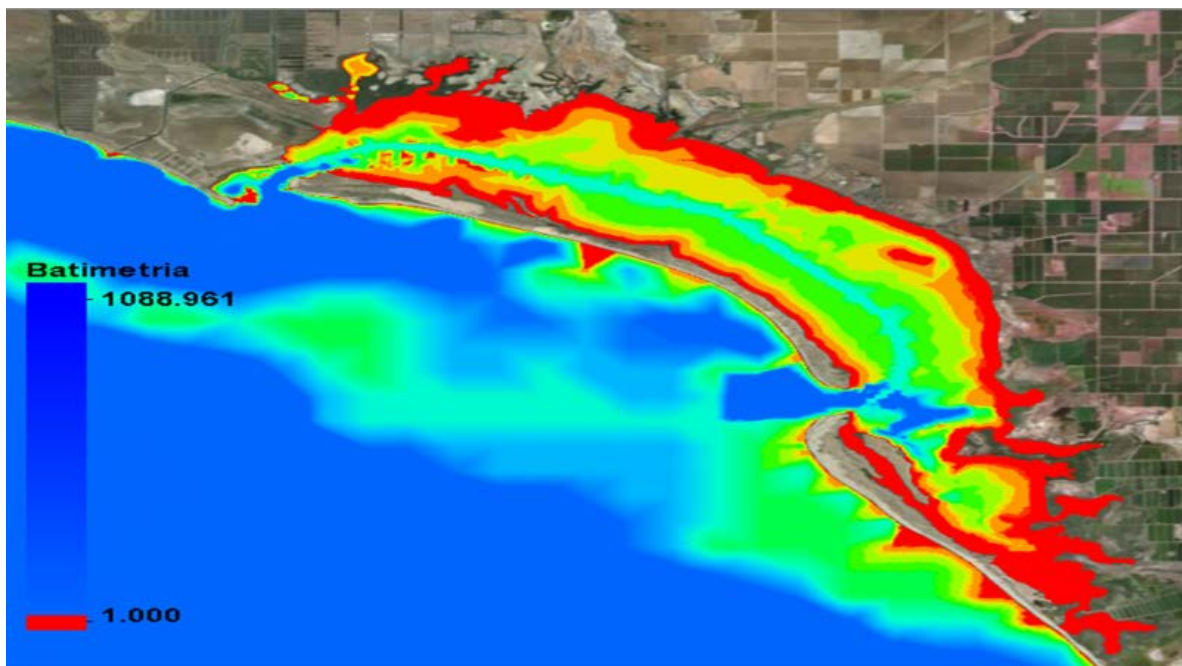


Figura 59.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 29 de junio 2017 para el escenario de mejora uno

A continuación, en la **Figura 60** se representa la batimetría del segundo escenario de mejora para la condición actual de la laguna donde se realiza un dragado central que atraviesa toda la laguna uniendo ambas bocas agregándole modificación de batimetrías en los bancos de arena de las bocas y posteriormente se presentan los resultados con los datos de salidas de la simulación con ADCIRC de las elevaciones (fort.63) y velocidades (fort.64). De la **Figura 61** a la **Figura 70** se presentan los valores de los niveles o elevaciones de la marea en escala de colores, y los comportamientos de los vectores en cada boca. La velocidad máxima obtenida para el escenario actual es de 1.82 m/s, las figuras que se presentan en los resultados de elevaciones y velocidades para el escenario de mejora uno, corresponden de la misma manera a las fechas del 20 al 29 de junio y en estos resultados se presentan los datos de salida a las 00:00 horas de cada respectivo día como en los resultados anteriores, donde se puede observar como mejora la situación hidrodinámica en la escala de colores de las velocidades y la influencia de los vectores



**Figura 60.-** Batimetría del escenario de mejora dos de la laguna de Tóbari con la combinación de datos medidos in situ en los transectos y datos satelitales obtenidos de GEBCO's se realiza además del dragado central que une ambas bocas se agrega un dragado en cada boca para analizar la mejora en la hidrodinámica.

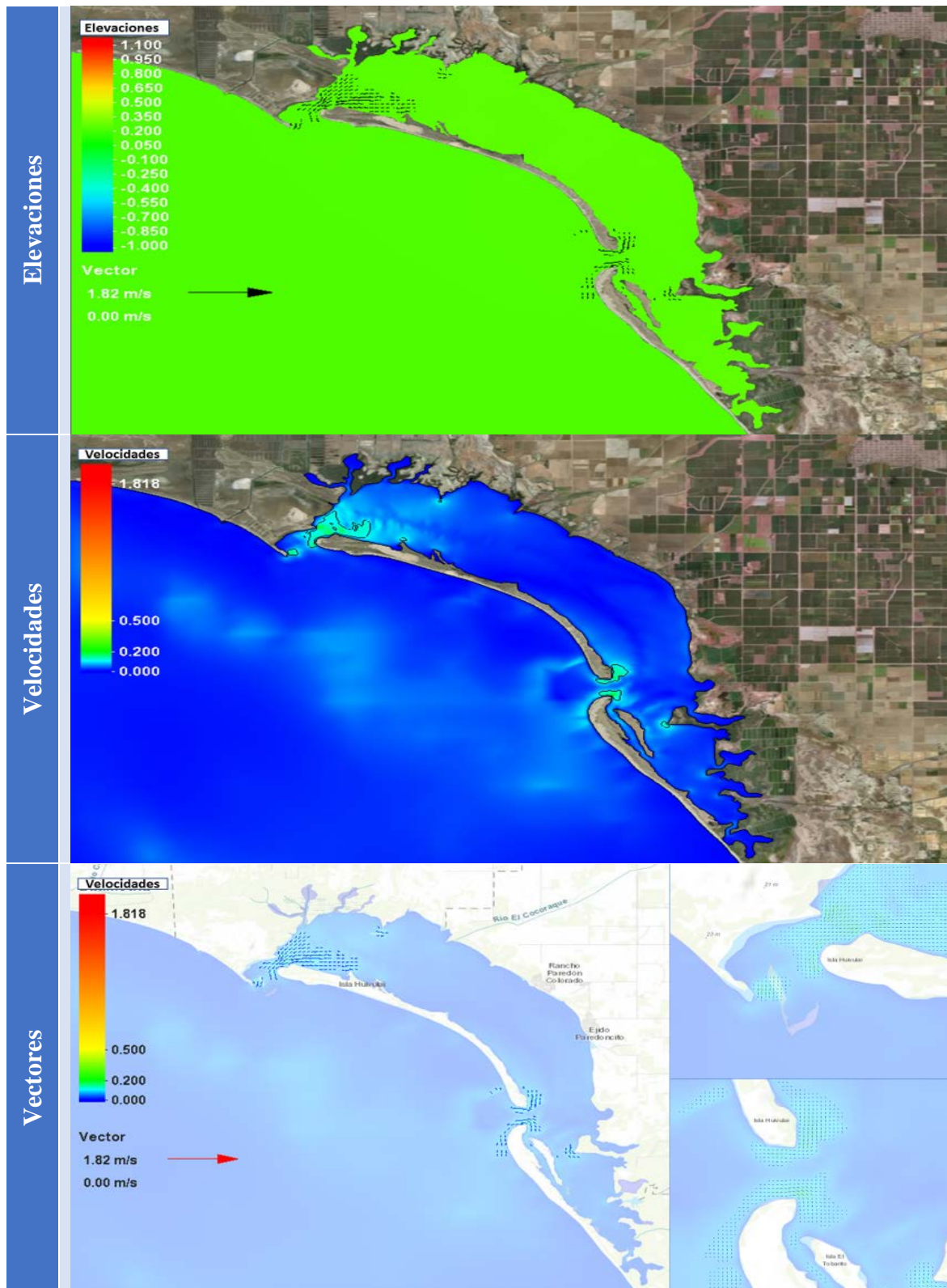
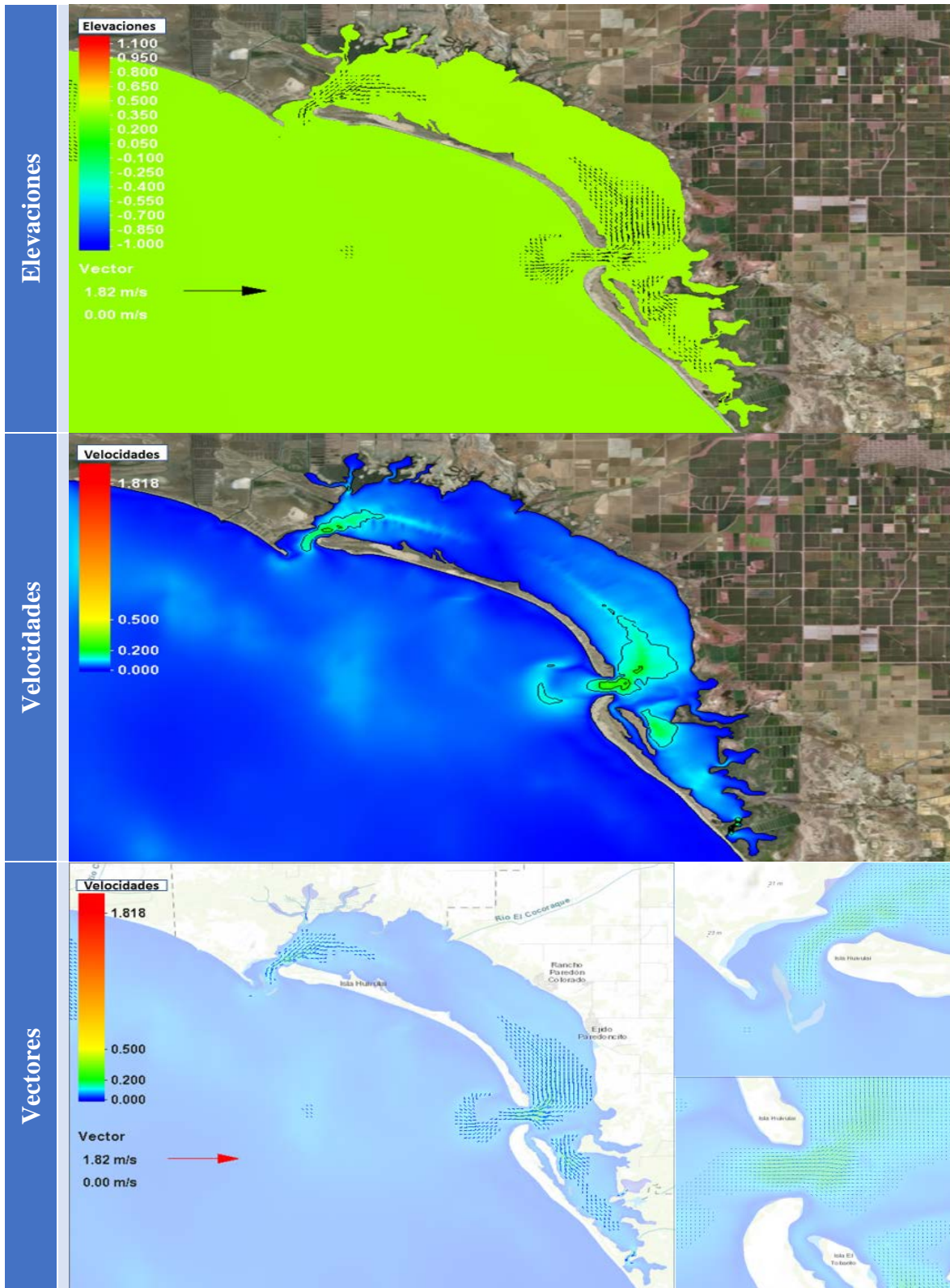


Figura 61.-Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 20 de junio 2017 para el escenario de mejora dos



**Figura 62** Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 21 de junio 2017 para el escenario de mejora dos



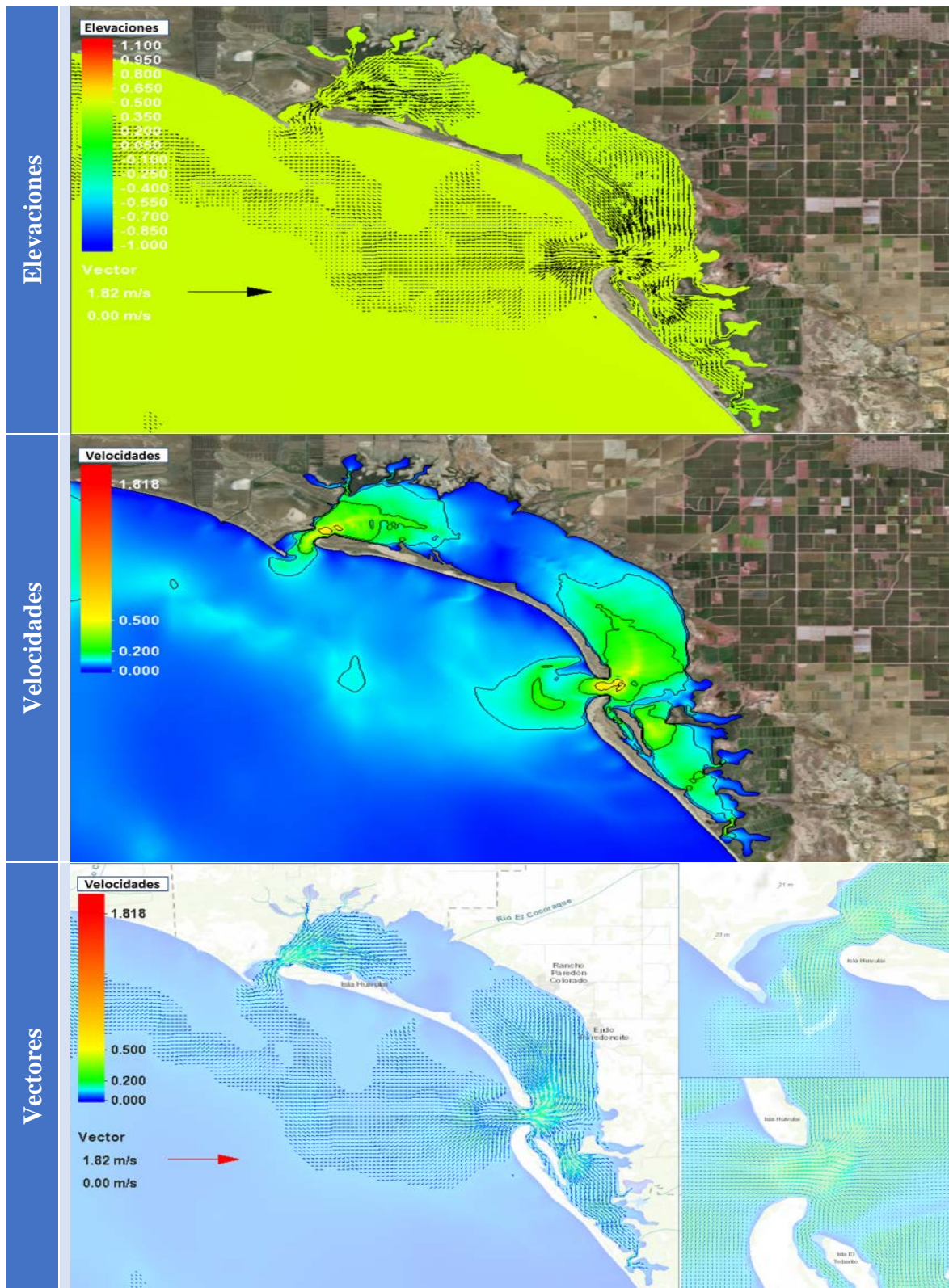


Figura 63.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 22 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

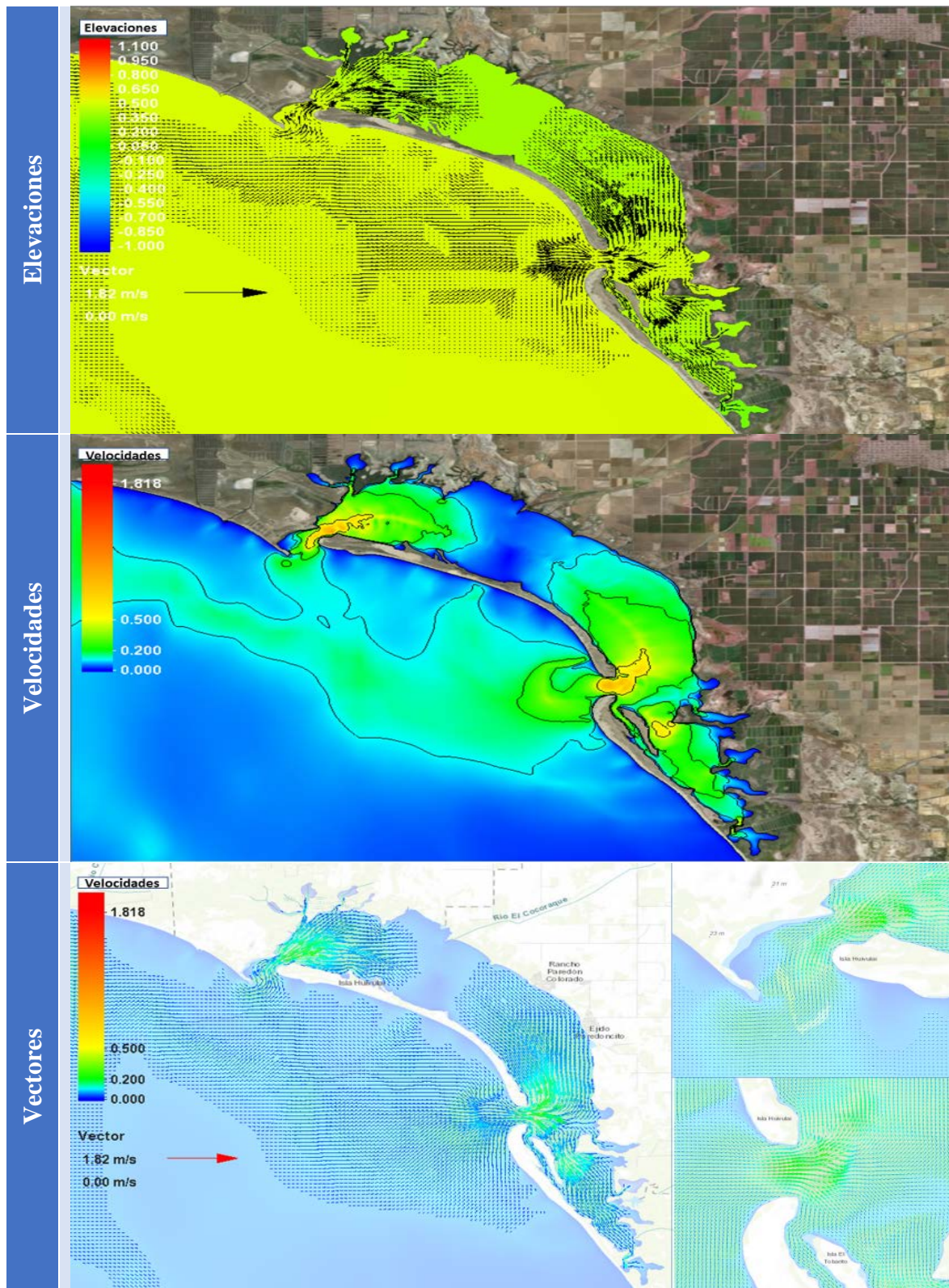


Figura 64.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 23 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

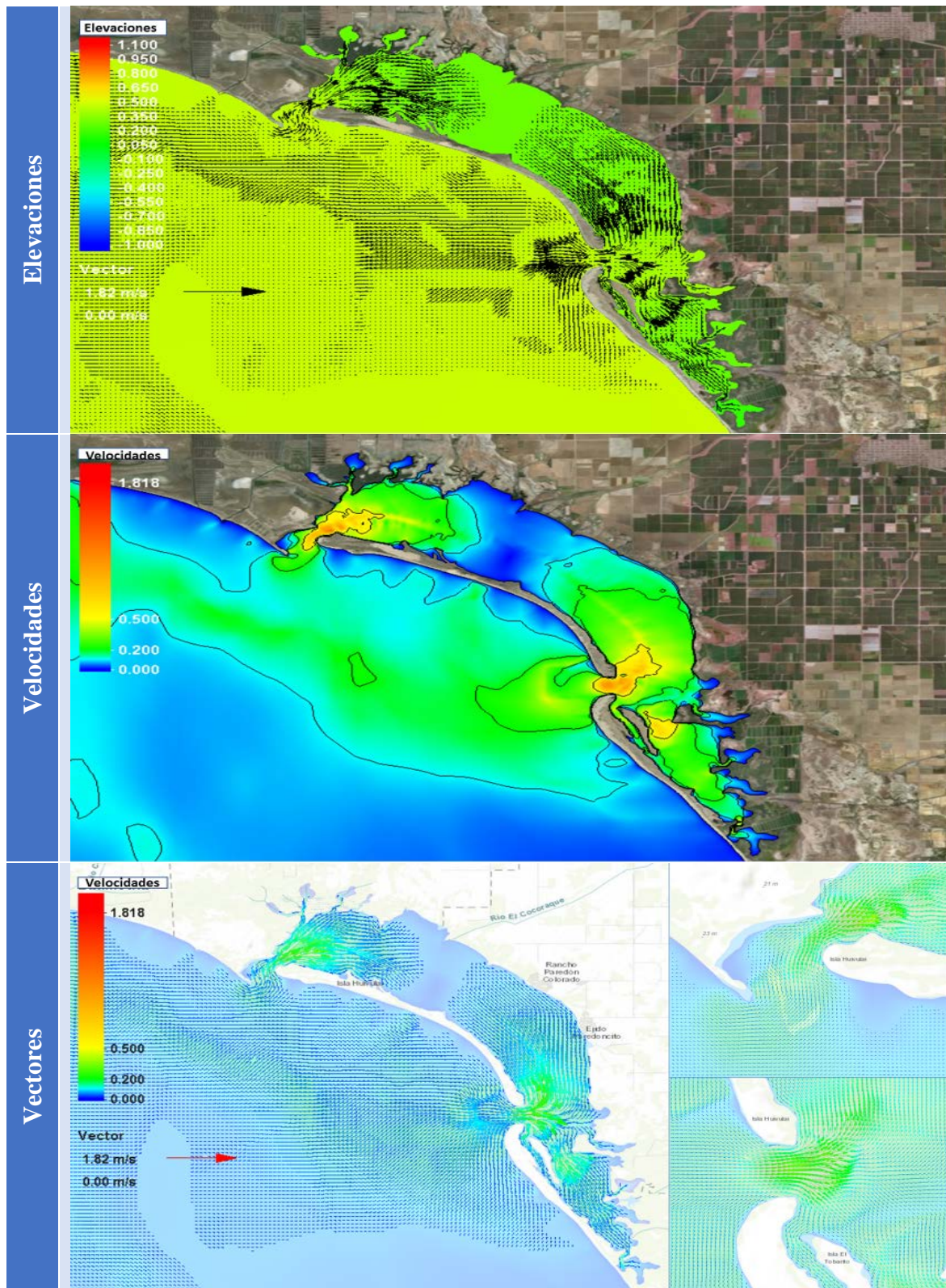


Figura 65.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 24 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

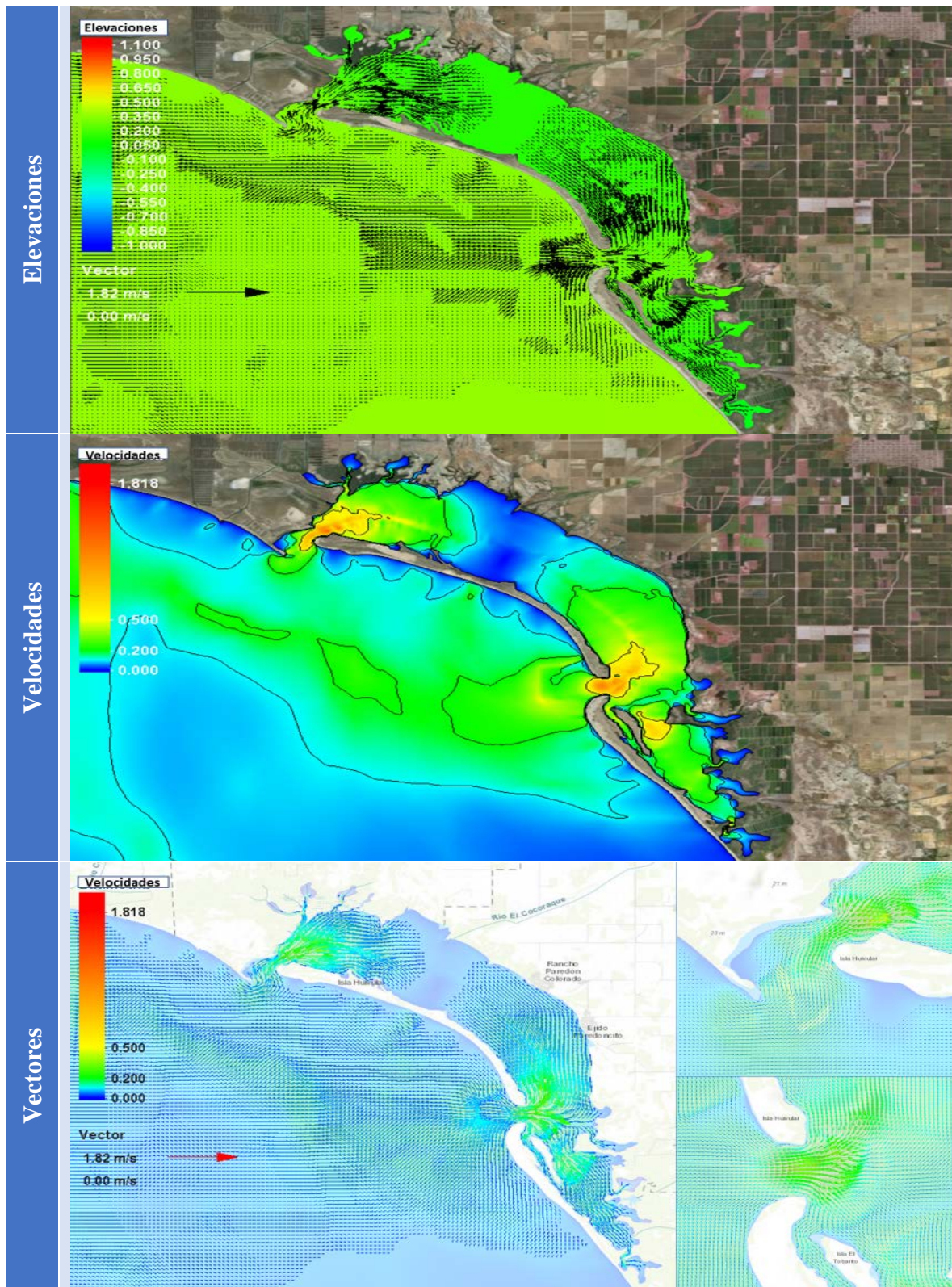


Figura 66.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 25 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

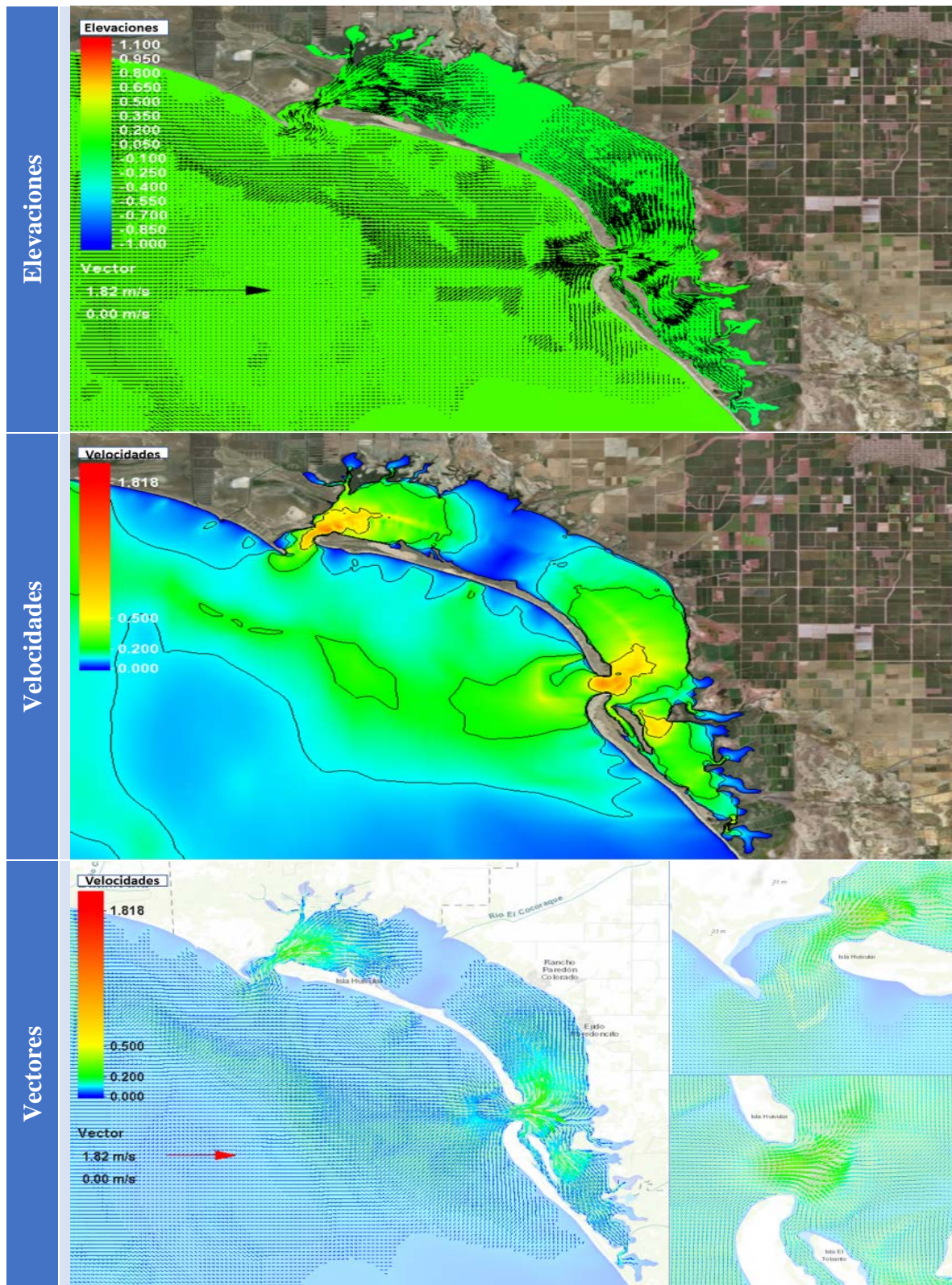


Figura 67.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 26 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

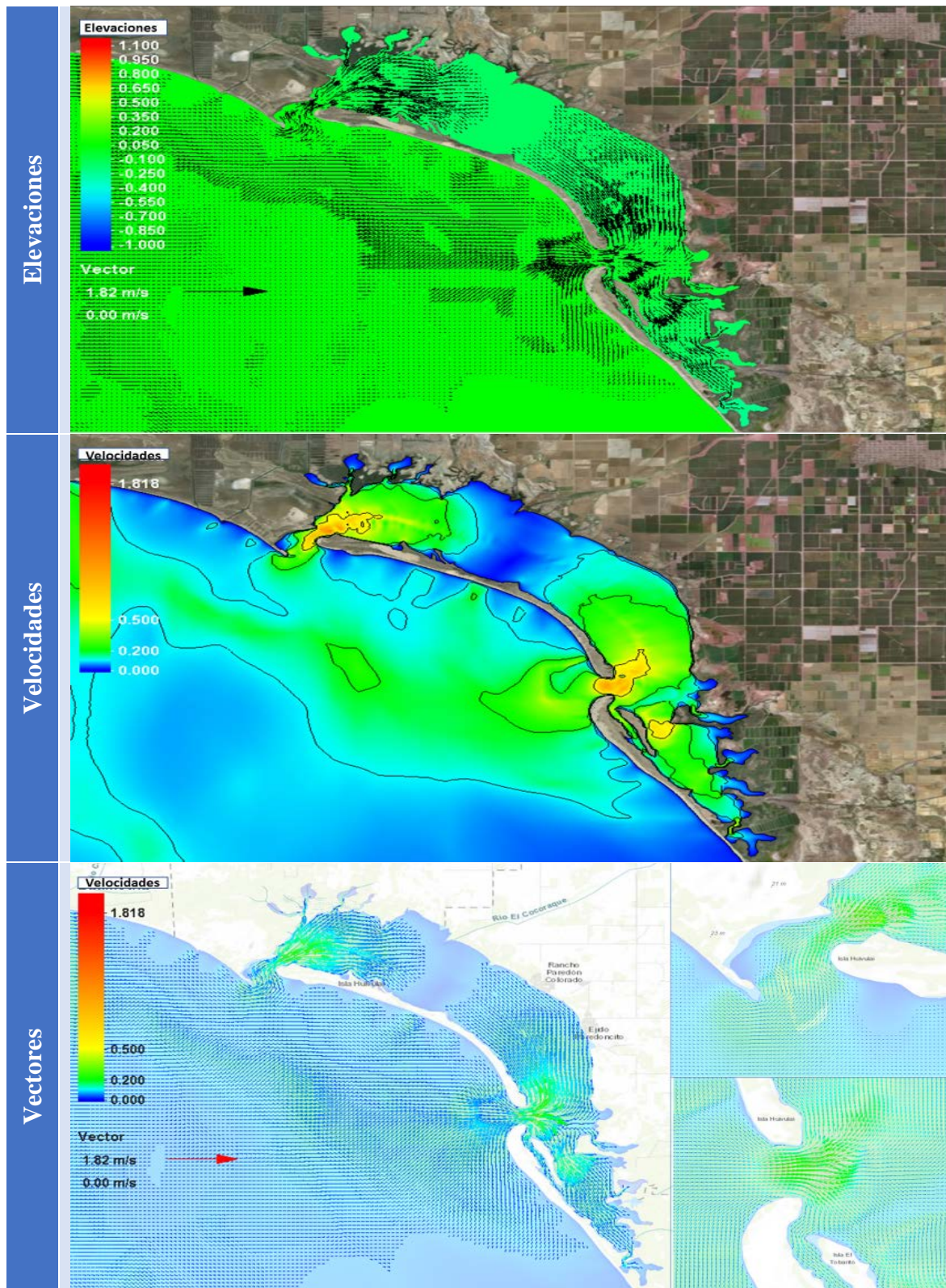


Figura 68.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 27 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

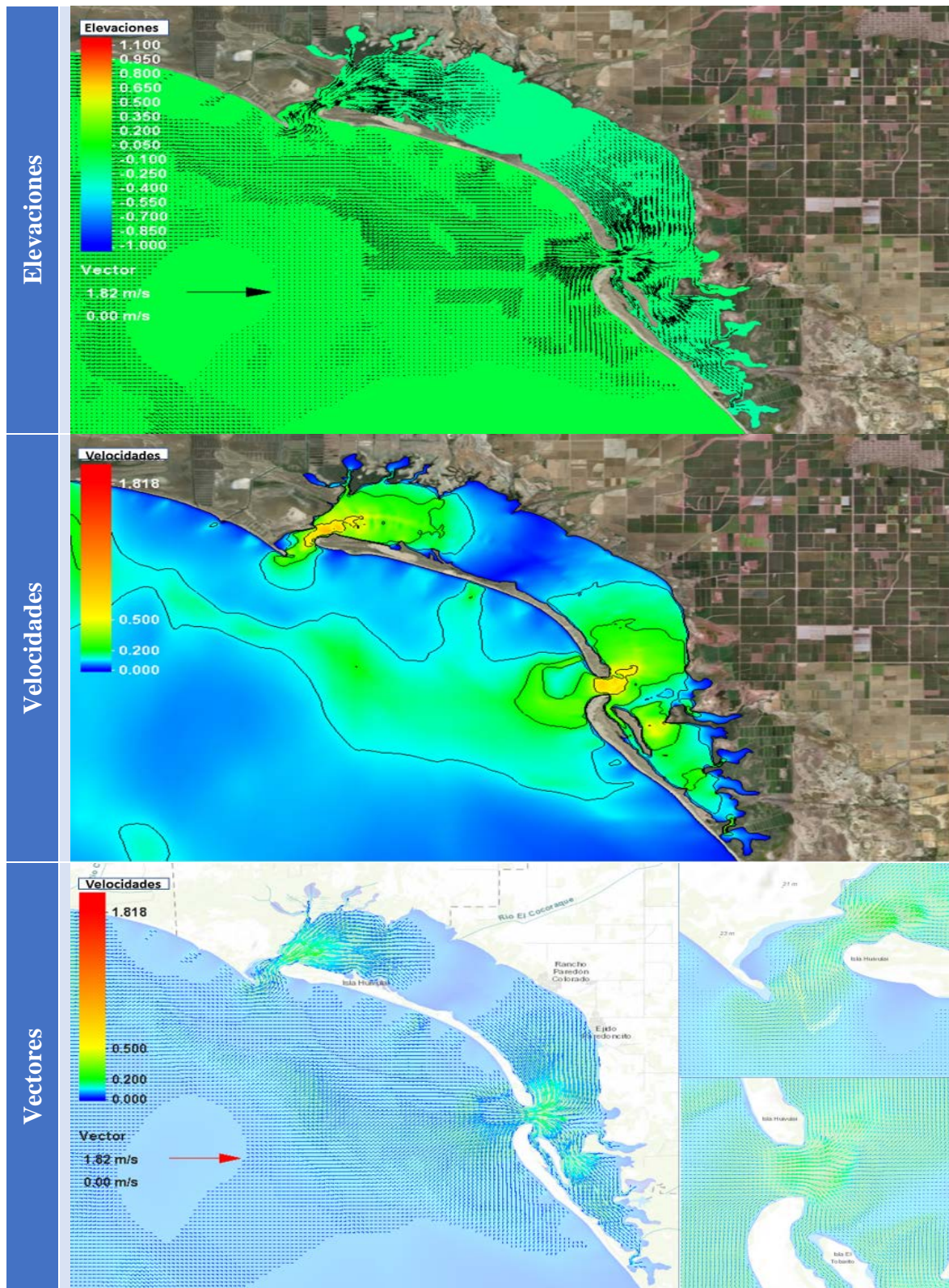


Figura 69.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 28 de junio 2017 para el escenario de mejora dos

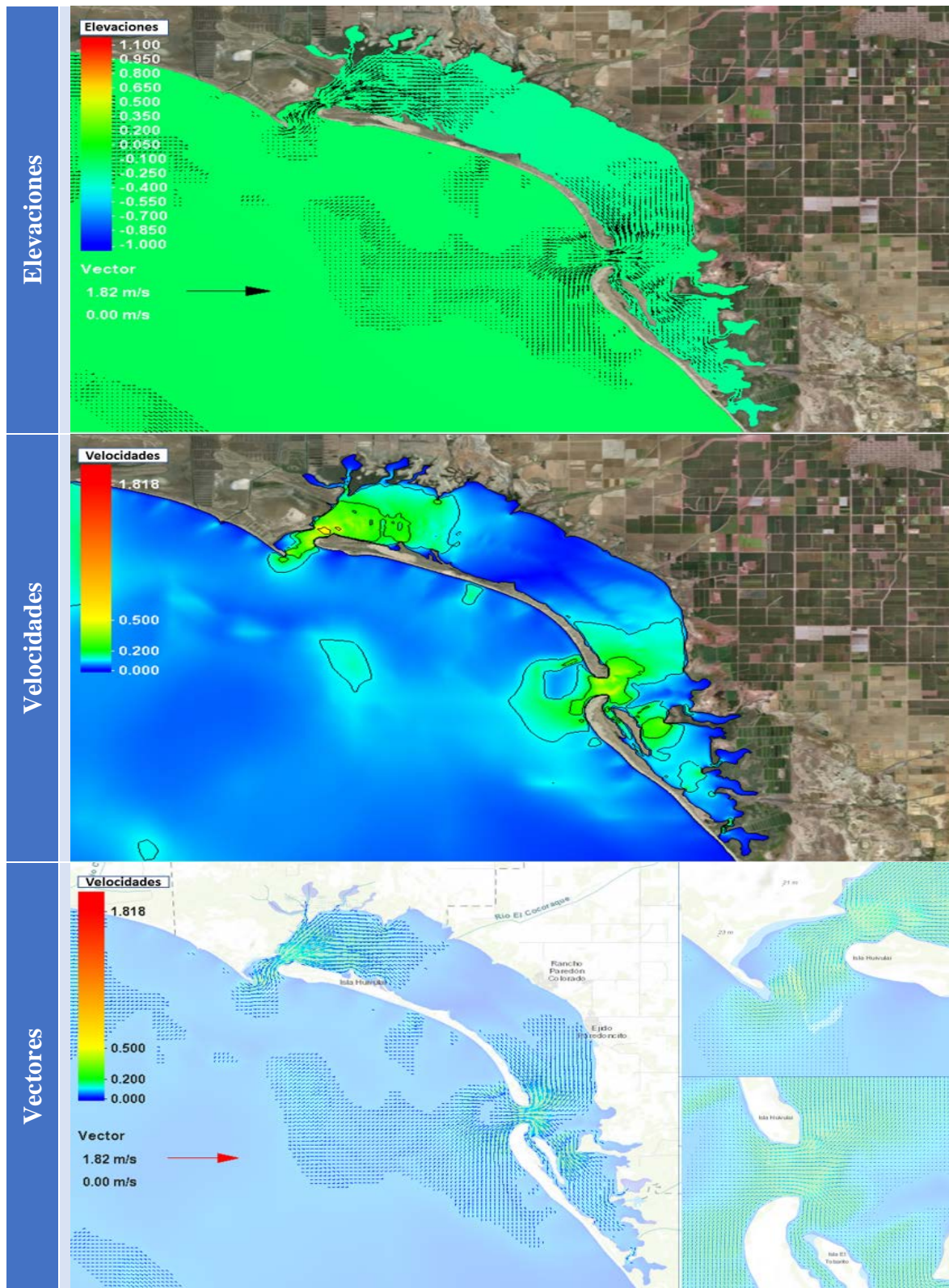


Figura 70.- Elevaciones y magnitudes de los vectores de velocidad para el 29 de junio 2017 para el escenario de mejora dos



### TIEMPO DE RESIDENCIA ESCENARIO ACTUAL

El tiempo de residencia es el tiempo que debe transcurrir para que la laguna tenga un cambio total del agua, con la finalidad de conocer un estimado del tiempo de residencia del agua en la laguna de Tóbari se realiza el cálculo mediante el método de prisma de marea (Dyer, 1979) & (Wright, 1974). El método consiste en suponer que el agua que entra en el flujo de la marea se mezcla completamente con la que se encuentra en el interior de la laguna, y que los volúmenes introducidos de agua de mar, y de agua de la laguna, igualan al volumen del prisma de marea.

$$TR = \frac{(P + V_{Bajamar})T}{P}$$

Ecuación 13

P, es el prisma de marea, T el ciclo de marea, V, el volumen, de acuerdo a la expresión mostrada, el prisma de marea se define como el volumen de agua que se intercambia entre la laguna y el mar en un ciclo de marea (ciclo de marea de pleamar a pleamar, corresponde en promedio a 12.4 hr); el valor aproximado corresponde al producto del área de la laguna por el rango de la marea, que se calcula entre la pleamar media superior y la bajamar media inferior (Dyer, 1979).

$$P = (V_{Bajamar\ media\ inferior} - V_{Pleamar\ media\ superior})$$

Ecuación 14

$$E_{Pleamar} = \frac{1}{805} \sum_{j=1}^n (z_{i=1}^k) = 1.138 \text{ m}$$

$$E_{Bajamar} = \frac{1}{731} \sum_{j=1}^n (z_{i=1}^k) = 1.644 \text{ m}$$

$$V_{Bajamar\ media\ inferior} = E_{bajamar} (\text{Area laguna})$$

Ecuación 15

$$V_{Bajamar\ media\ inferior} = 1.138 (8,274 \times 10,000) = 94,171,971.78 \text{ m}^3$$

$$V_{Pleamar\ media\ superior} = E_{pleamar} (\text{Area laguna})$$

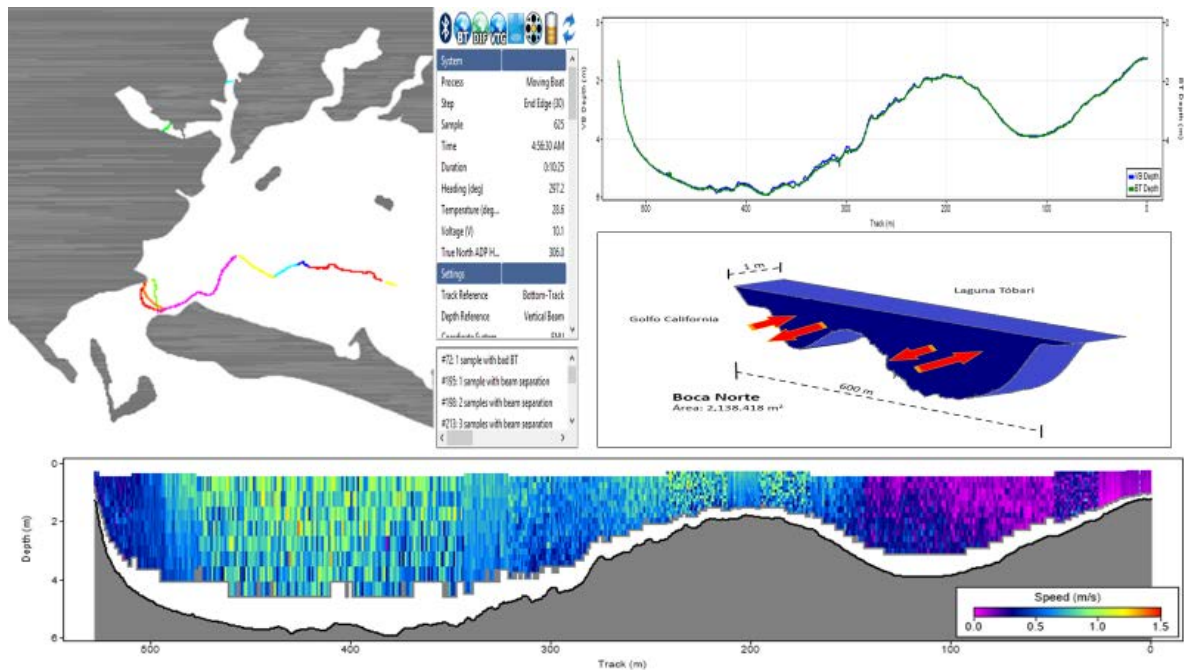
Ecuación 16

$$V_{Pleamar\ media\ superior} = 1.644 (8,274 \times 10,000) = 136,102,575.17 \text{ m}^3$$

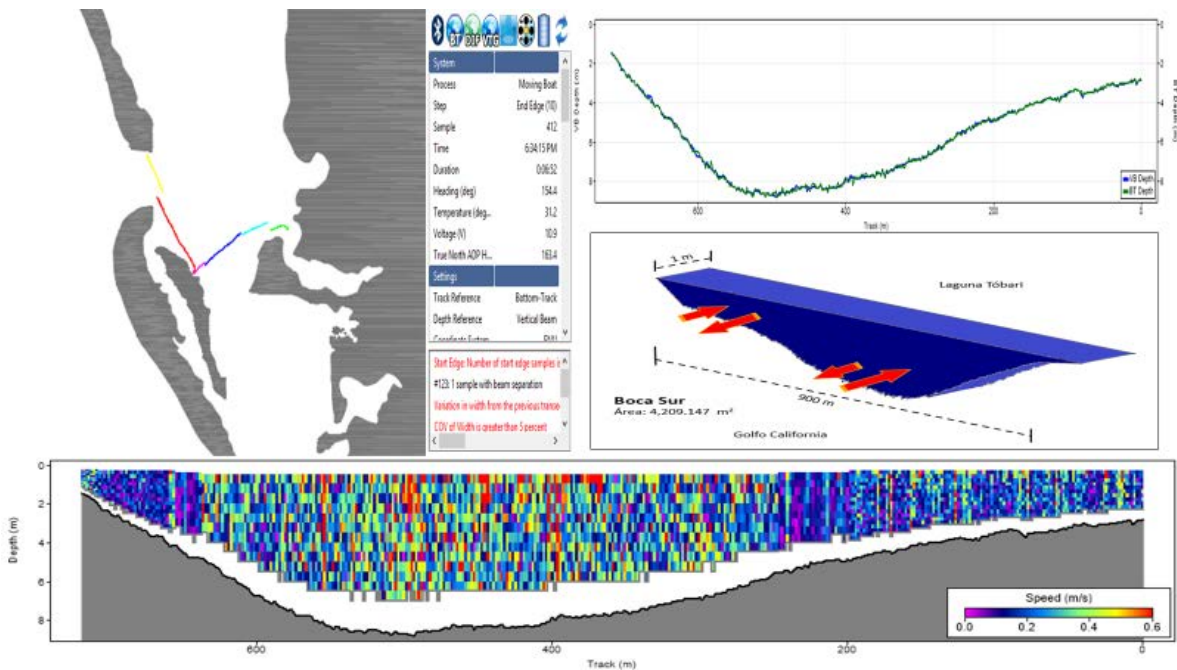
$$P = (136,102,575.17 - 94,171,971.78) = 41,930,603.38 \text{ m}^3$$

$$TR = \frac{(41,930,603.38 + 94,171,971.78) (12.4)}{41,930,603.38}$$

$$TR = 40.25 \text{ hr}$$



**Figura 71.-** Perfil Batimétrico de la Boca Norte con un área promedio de 2,138.42 m<sup>2</sup> obtenida a partir de la ruta 1, 2 y 3 de los transectos realizados en la primera visita a la laguna en el mes de junio



**Figura 72.-** Perfil Batimétrico de la Boca Sur con un área promedio de 4,209.15 m<sup>2</sup> obtenida a partir de la ruta 15 de los transectos realizados en la primera visita a la laguna en el mes de junio

Aplicando el mismo concepto de prisma de marea, pero trabajando los datos de velocidades de entrada y salida obtenidos de las salidas numéricas y conocemos el área transversal de cada boca, se obtiene que el  $Vol_{Entrada}$  medio al final de mes. en la boca norte es de 553,640 m<sup>3</sup> y en la boca sur 1,706,000 m<sup>3</sup>. cuantificando una masa de entrada de 2,259,640.00 m<sup>3</sup>. el

$Vol_{salida}$  medio al final de mes en la boca norte es de 554,050 m<sup>3</sup> y en la boca sur 1,705,700 m<sup>3</sup>. Cuantificando una masa de entrada de 2,259,750.00 m<sup>3</sup>.

$$Volumen\ laguna = 115,836,000\ m^3$$

$$V_{Pleamar} = 115,836,000 + 2,259,640.00 = 118,095,640\ m^3$$

$$V_{Bajamar} = 115,836,000 - 2,259,750.00 = 113,576,250\ m^3$$

$$P = (118,095,640 - 113,576,250) = 4,519,390\ m^3$$

$$TR = \frac{(4,519,390 + 113,576,250) (12.4)}{4,519,390}$$

$$TR = \frac{324.02}{24} hr = 13.5\ dias$$

Obteniendo un valor un poco más elevado, sin embargo, este método general está comprobado que obtiene valores muy por debajo (subestimación) del tiempo de evacuación real porque la suposición de mezcla completa no se cumple en la realidad, pues ni el agua de ríos y drenes (descargas) tiene alcance suficiente para llegar hasta la boca ni el agua salada proveniente del océano lo tiene para llegar a la cabeza de la laguna, en un ciclo de marea. Existen otros métodos de cálculo como el prisma de marea modificado (Ketchum, 1951) donde se supone que las partículas de agua no recorren toda la longitud de la laguna en un ciclo de marea, sino una distancia limitada, que depende de la batimetría y de la fluctuación de la marea. A la distancia anterior la denomina excursión de la partícula en el ciclo, y subdivide la laguna costera en segmentos de longitud igual a la excursión de las partículas en cada segmento, dentro de cada uno de los cuales se considera aceptable la mezcla total en un ciclo de marea y se realiza la sumatoria como cada prisma de marea segmento.

El procedimiento para determinar el tiempo de recambio de las aguas se obtuvo mediante los siguientes pasos:

- a) En el interior de la laguna se tienen puntos de control, **Figura 75** los cuales son valores de elevaciones, que se promedian para obtener el comportamiento del rango de marea en el interior

$$E(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_{i=1}^k)$$

Ecuación 17

- b) De igual manera en cada una de las bocas se tienen 4 puntos de control, **Figura 75** los cuales son vectores que contienen datos de velocidades, los datos de velocidades se suman vectorialmente y se obtiene un vector resultante de ingreso a cada una de las bocas

$$v(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (v_{i=1}^k)$$

Ecuación 18

Donde  $k = 1536$  para el escenario actual y  $k = 1920$  para los escenarios de mejora (son la cantidad de datos de salidas)

- c) Con la información de los 17 transectos presentados en la **Figura 14**, en donde cuatro corresponden a la Boca norte y uno a la Boca sur, se realizó un promedio para obtener un perfil batimétrico representativo de cada una de las bocas, los resultados se muestran en las **Figura 73** correspondiente al perfil Boca Norte y **Figura 74** correspondiente al perfil Boca Sur.
- d) Una vez determinado el perfil se calculó que el área transversal en la boca norte es de  $2,138.42 \text{ m}^2$  con una longitud de  $600 \text{ m}$  y para la boca sur se tiene un área de  $4,2019.147 \text{ m}^2$  y una longitud de  $900 \text{ m}$ .
- e) El flujo de ingreso o egreso hacia la marea se realizó considerando la magnitud y dirección del vector velocidad en un periodo marea, aplicando el producto escalar al vector normal del transecto de ingreso a la boca, establecido en el punto anterior, multiplicado por la magnitud del área transversal, como se indica en la ecuación siguiente:

$$Q(t) = \int_A \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA = \sum VA$$

Ecuación 19

Donde  $\mathbf{q}$ , vector velocidad;  $\mathbf{n}$ , vector normal al transecto de la sección transversal de la boca (sur o norte);  $A$ , área de la boca, y  $V$ , velocidad integrada en la vertical y promediada a todo lo largo de la sección transversal, que obtiene de las salidas numéricas del modelo ADCIRC.

Determinación de flujo de entrada ( $Vol_I$ ) o salida ( $Vol_E$ ) a la laguna, en este caso se considera el signo de los valores discretos obtenidos en la ecuación 19, entonces se tiene:

$$Vol_I = \sum_{t=1}^T \delta QI_t$$

Ecuación 20

$$\delta QI_t = Q \cdot \Delta t [\theta, 0]$$

Ecuación 21

$$Vol_E = \sum_{t=1}^T \delta QE_t$$

Ecuación 22

$$\delta QE_t = Q \cdot \Delta t \llbracket -\theta, 0 \rrbracket$$

Ecuación 23

Donde:  $\llbracket A, B \rrbracket$  considera el valor más grande;  $\theta$ , es el valor de la orientación de la componente del vector velocidad  $[-\pi, \pi]$ . Para la acumulación se tiene un intervalo de análisis  $\Delta t = 1800s$  y el número de veces que se realiza es  $T = 1536$ , que corresponde a las salidas numéricas del modelo ADCIRC en periodo de marea.

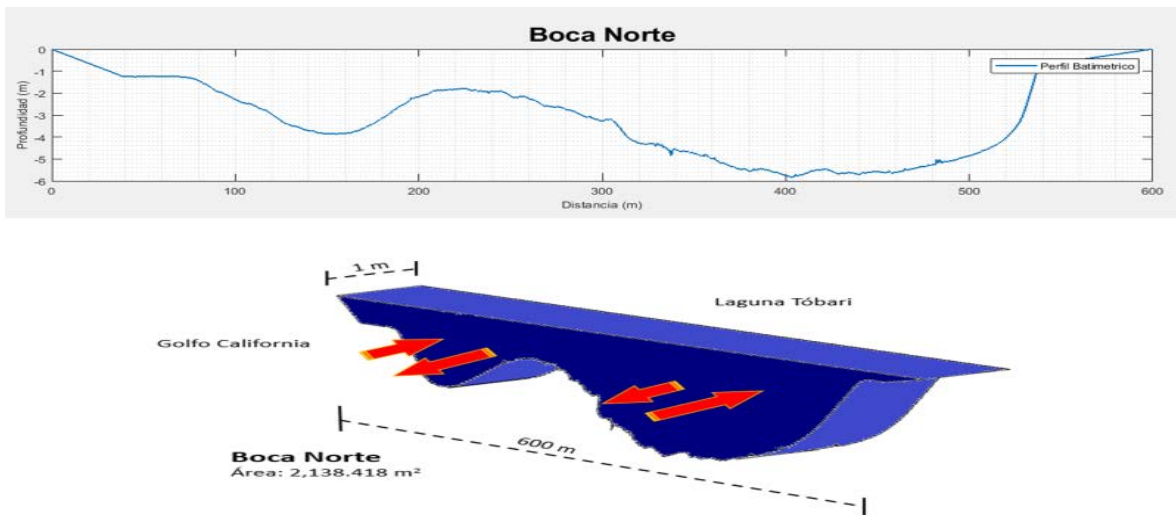


Figura 73.- Área de la Boca Norte

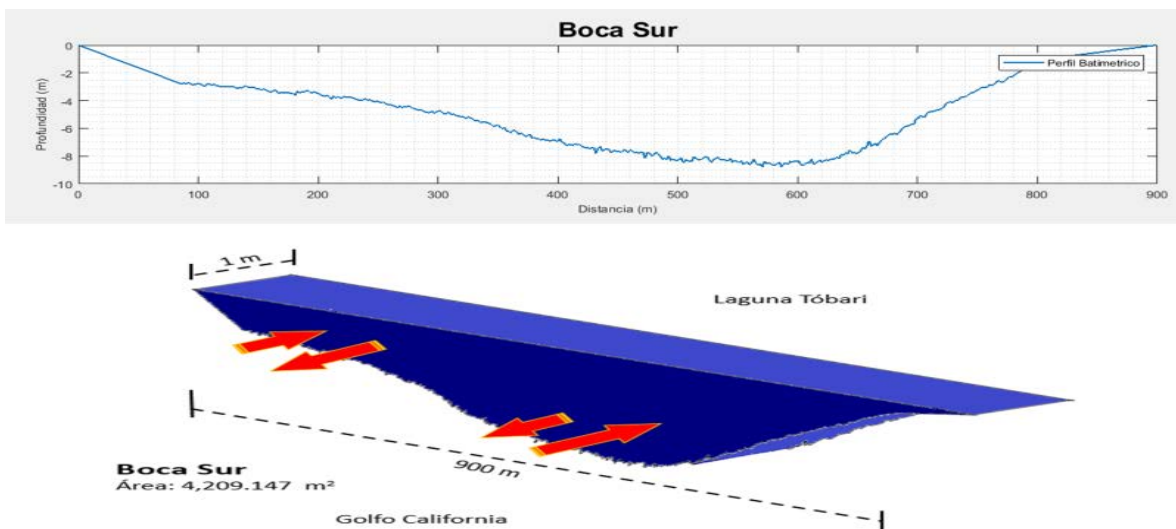
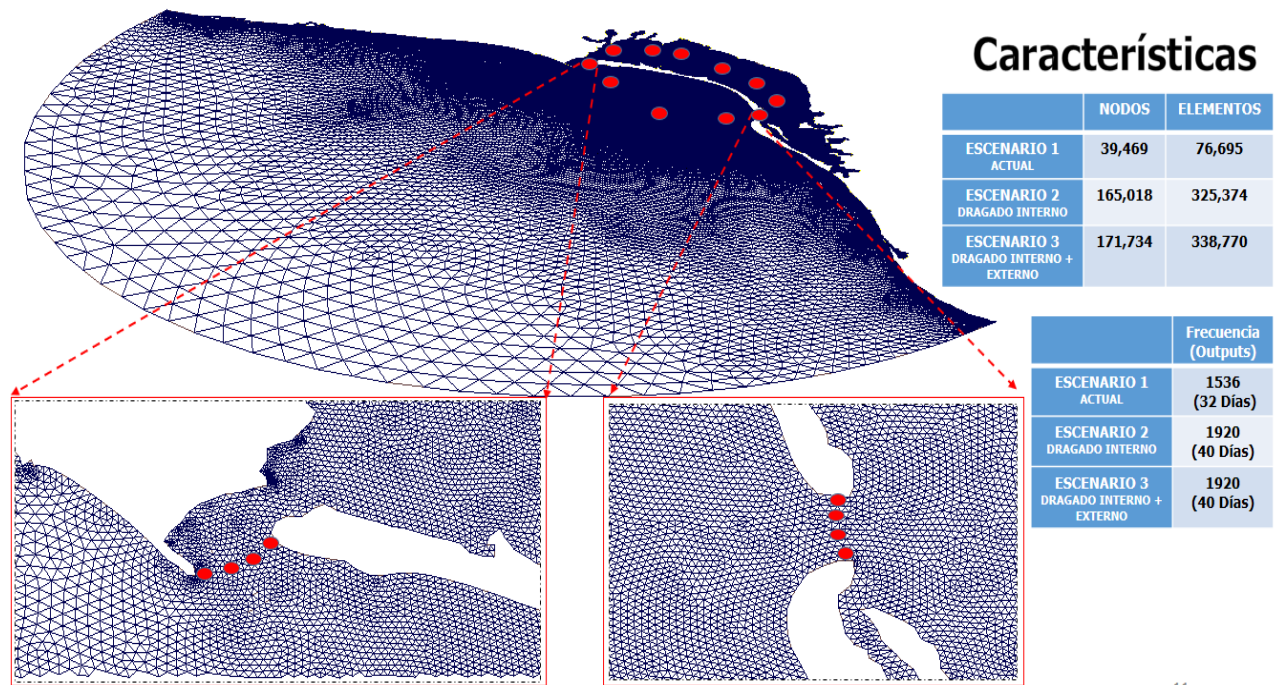
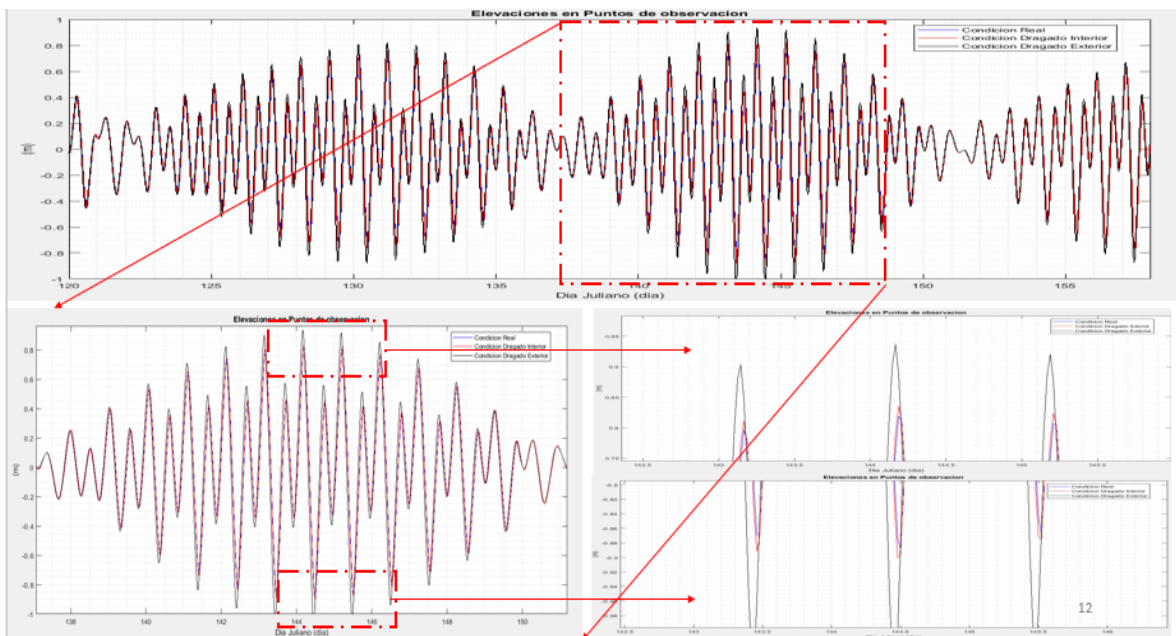


Figura 74.- Área de la Boca Sur

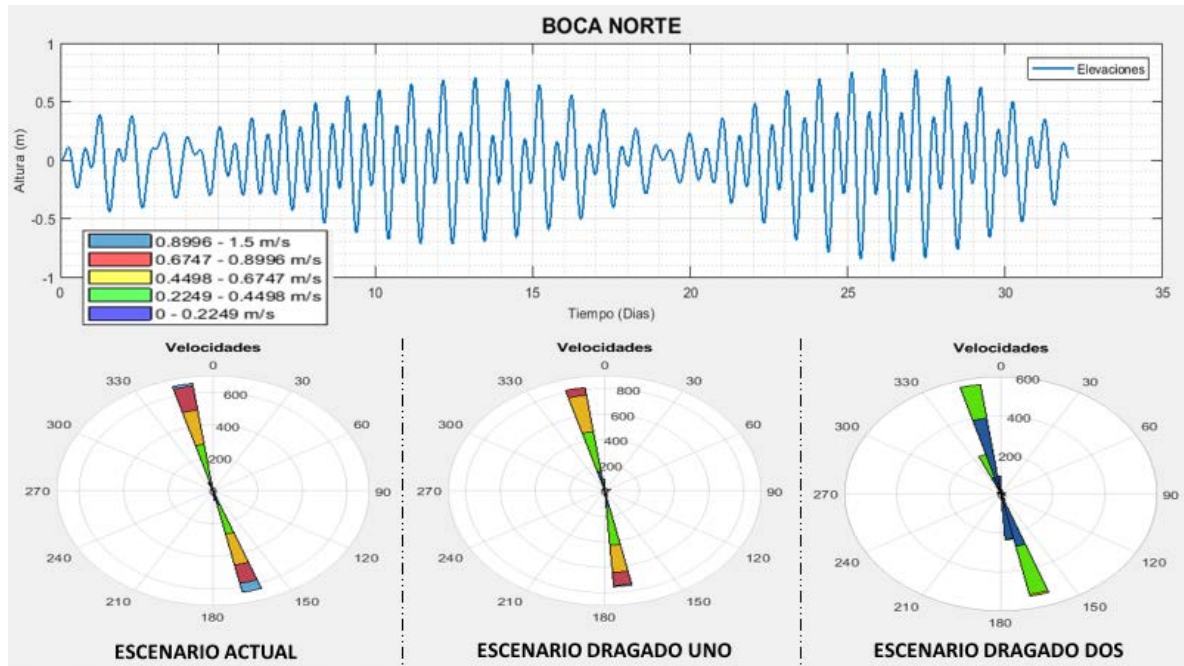


11

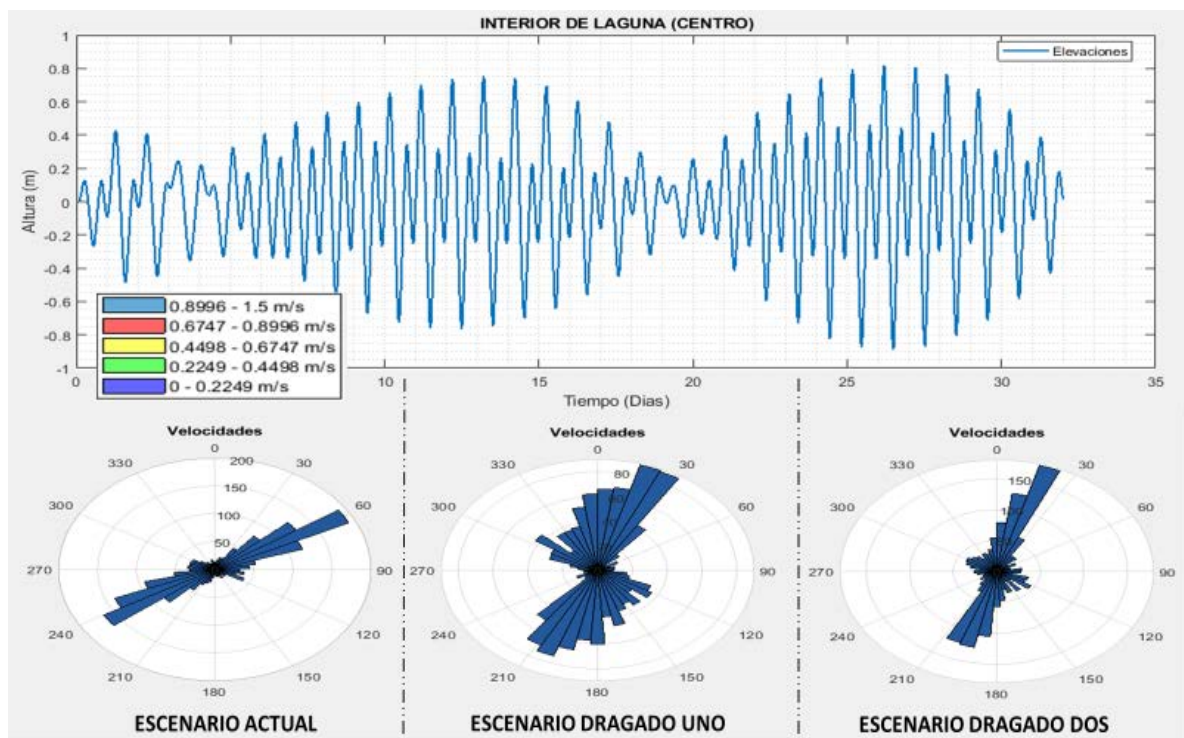
**Figura 75.-** ilustración de la posición de los 17 puntos/ nodos de control de elevaciones y velocidades para análisis comparativo de las propuestas de mejora en la laguna para analizar las variaciones de velocidad y elevaciones dentro y fuera de la laguna.



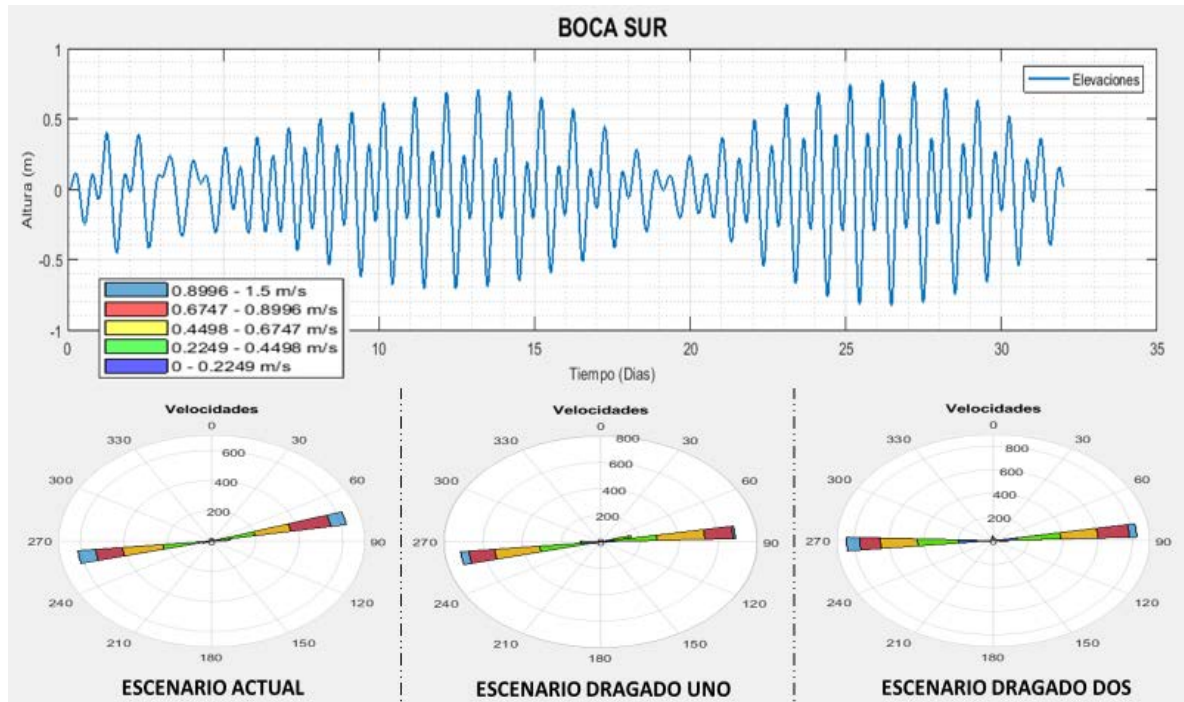
**Figura 76.-** Marea Mixta de la Laguna de Tóbari mediante ADCIRC comparando 3 diversos escenarios (1. Situación actual, 2. Dragado Interior de canales y 3. Dragado Exterior al mar), en donde la propuesta de mejora al realizar unos Dragados que comunican internamente con las bocas produce una mejora significativa en las elevaciones de hasta 10 cm



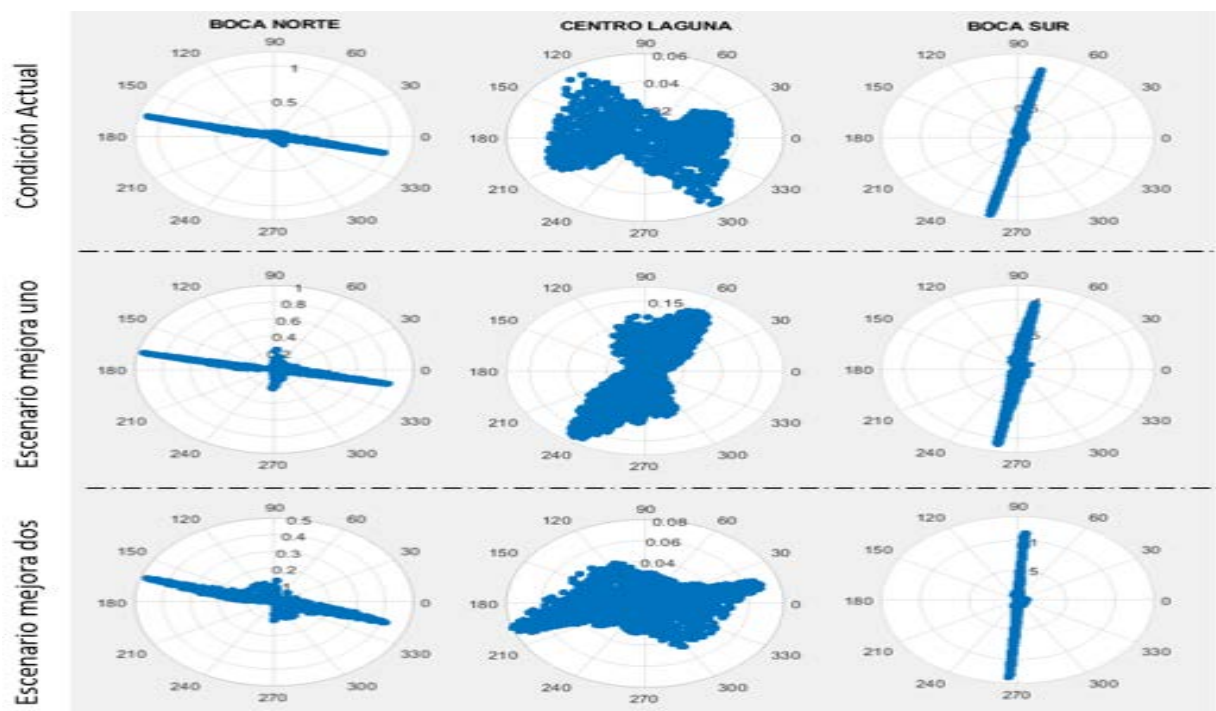
**Figura 77.-** Elevaciones de los niveles de marea en la boca norte y rosa de los vientos con la dirección, sentido e intensidad de valores de las velocidades resultantes obtenidas de los 4 puntos de control tomados en la boca Norte, donde se puede observar el sentido de entrada y salida de la velocidad en la boca que presenta una tendencia de entrada a los 350°-360° y las salidas a 160°-170° aproximadamente.



**Figura 78.-** Elevaciones de los niveles de marea en la parte central en el interior de la laguna y rosa de los vientos con la dirección, sentido e intensidad de valores de las velocidades resultantes obtenidas de los puntos de control tomados en el interior, donde se puede observar la dirección y sentido dispersos de los vectores, pero con valores muy bajos de intensidad, lo que se significa poco movimiento de las aguas.



**Figura 79.-** Elevaciones de los niveles de marea en la boca sur y rosa de los vientos con la dirección, sentido e intensidad de valores de las velocidades resultantes obtenidas de los 4 puntos de control tomados en la boca Sur, donde se puede observar el sentido de entrada y salida de la velocidad en la boca que presenta una tendencia de entrada a los 70°-90° y las salidas a 260°-270° aproximadamente.



**Figura 80 .-**Valores de la velocidad representados mediante un histograma polar, para los escenarios de simulación mediante ADCIRC en el escenario actual las velocidades promediadas en la boca norte y sur son similares en la condición actual y mejora uno, disminuye en la mejora dos debido al incremento del área transversal en las bocas, el centro de la laguna tiene valores muy pequeños en los tres escenarios



Como resultado en la determinación de los tiempos de residencia se tiene que el  $Vol_l$  total al final de mes en la boca norte es de 553,640 m<sup>3</sup> y en la boca sur 1,706,000 m<sup>3</sup>. Por otra parte, el volumen total de la laguna considerando una superficie de 8,274 ha y una profundidad promedio de 1.4 m, es de 115,836,000.000 m<sup>3</sup>, entonces para determinar el recambio de agua se suman los volúmenes de entrada entre el volumen de las aguas alojadas, y dividimos entre el volumen total, con lo cual se tiene un tiempo de residencia de 51.263 meses es un periodo de residencia muy alto. Pero también muestra que una estrategia para mejorar la condición ambiental de la laguna de Tóbari es disminuir el tiempo de residencia, por lo tanto, mediante los dos escenarios de dragado como opciones de restauración ambiental y se reducen los tiempos de residencia de las aguas en la laguna de Tóbari.

Al realizar modificaciones en la morfología de la laguna (batimetría mediante dragados) en las áreas de ingreso, los gastos de entrada y salida se incrementaron, en ambos escenarios modificados mejora el tiempo de recambio de las aguas disminuyendo significativamente de 51 meses a 45 y 37 meses respectivamente, se ilustran los resultados en la **Tabla 10**, sin embargo, no resuelve el problema de la salinidad elevada, en otras palabras, los contaminantes no se logran dispersar hacia en el mar debido a que siguen siendo tiempos superiores a un período de marea; tienden a acumularse.

### RESULTADO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Con el vector resultante de velocidades de entrada y salida en cada boca, se parte de la ecuación de la energía y se puede obtener un estimado energético, el resultado se presenta en cada boca de manera independiente debido al comportamiento de las velocidades en cada una de ellas:

De la ecuación de la energía:

$$E = \frac{1}{2} m |q|^2$$

Ecuación 24

Donde,  $E$ , energía cinética;  $q = Ui + Vj$ , es el vector de velocidades,  $m$ , es la masa del fluido.

$$m = \rho Vol$$

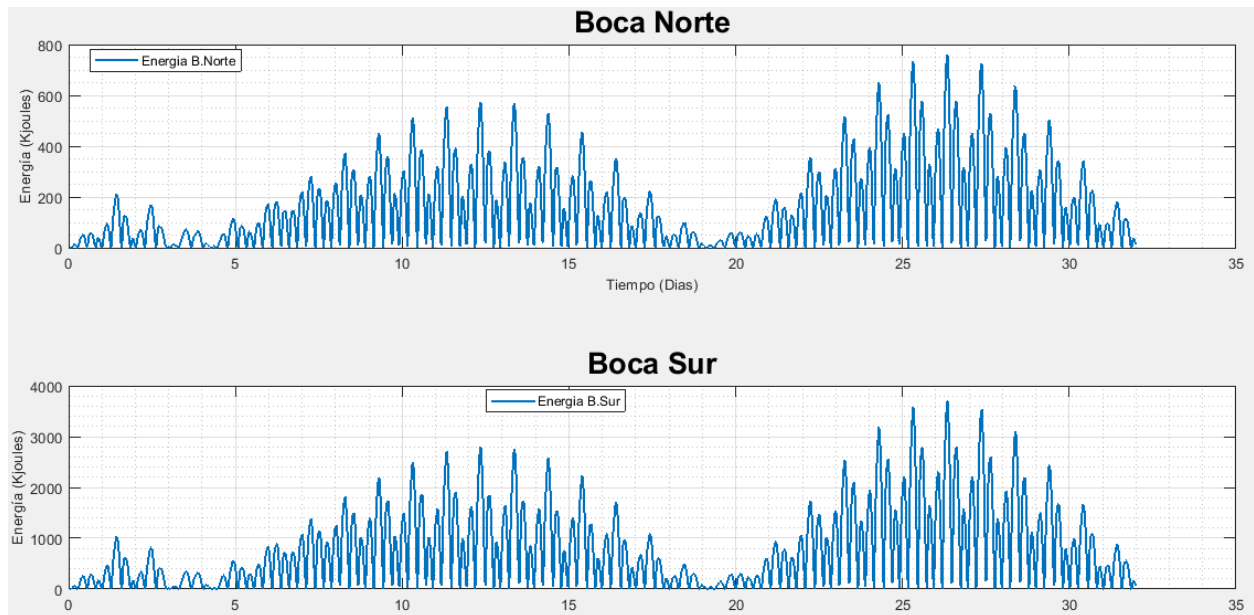
Ecuación 25

Donde  $Vol$ , volumen de control corresponde al área multiplicada por una unidad de longitud.

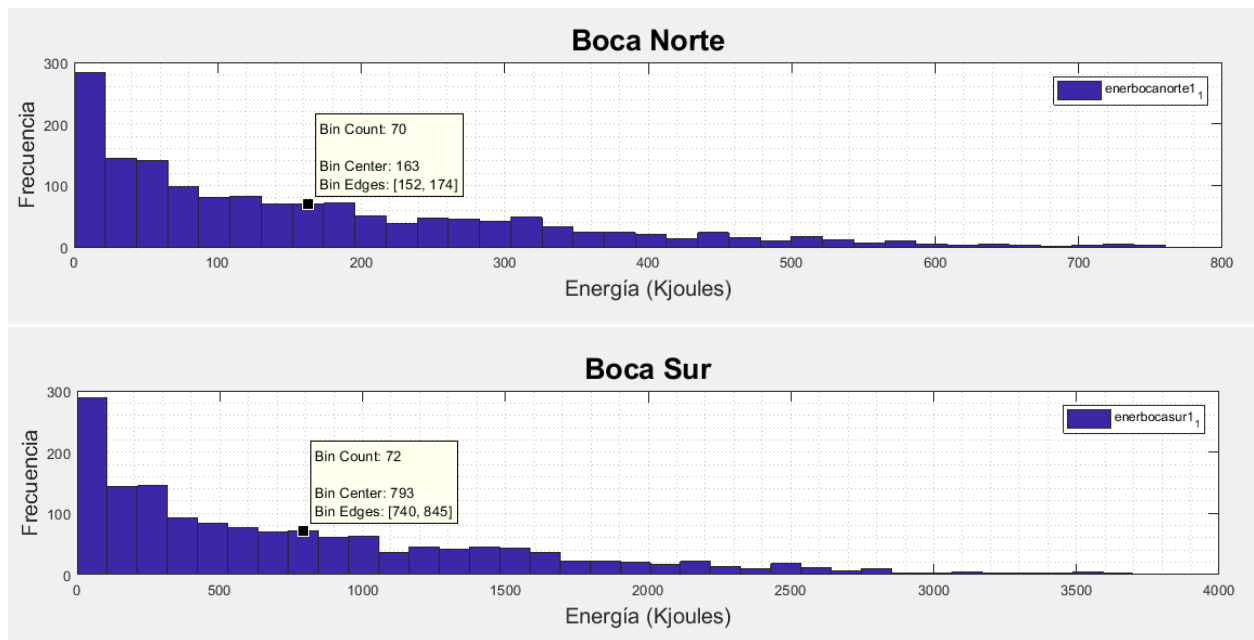
$$Vol = A * (1)$$

Ecuación 26

El análisis del volumen se realiza multiplicando en la sección transversal de cada boca (área) y tomando una unidad lineal de profundidad para el análisis. El análisis de energía se presenta a continuación que varían en función de los vectores de velocidad oscilante en cada boca como se presenta en la **Figura 81** a continuación:



**Figura 81.-** Energía que se presenta en cada una de las Bocas de la Laguna en función del vector resultante de velocidades, para el análisis de estimación energética se localiza la energía media que se presenta en cada boca.



**Figura 82.-** histograma de frecuencias de las energías que se presentan en cada una de las bocas, se señalizan las energías promedio en la boca norte donde se repite 70 veces a lo largo de un mes de análisis y la energía en la boca sur que se repite 72 veces a lo largo del mismo periodo de análisis, con estas frecuencias se obtiene un estimado de energía que se producen en las bocas de la laguna, sin embargo el aprovechamiento y eficiencia de dicha energía no se encuentra dentro de los alcances de este trabajo.

Se realiza un análisis de frecuencia de la periodicidad de en qué se presentan las energías y se obtiene la energía media y la cantidad de veces que se repite en el periodo de análisis, con lo cual se realiza una multiplicación de la energía media en el periodo de análisis por su frecuencia y podemos obtener que la energía  $E_l$  promedio que más se presenta se presenta

en la boca norte es de 161.152 kJ y en la boca sur 779.592kJ. Al multiplicarla por la frecuencia en que se presentan 70 y 72 veces en el periodo mensual de análisis se obtiene que la energía  $E_I$  Total al final de mes en la boca norte es de 11,280.638 kJ y en la boca sur de 56,130.657 kJ dando un total de 67.411 Mega Joules.

**Tabla 9.-** Comportamiento de los flujos de entrada y salida promediados en cada una de las bocas obtenidas y su comparación energética

	Escenario Actual	Escenario uno	Escenario dos
Gasto Entrada Boca Norte	729.431 m <sup>3</sup> /s	908.348 m <sup>3</sup> /s	521.085 m <sup>3</sup> /s
Gasto Salida Boca Norte	713.066 m <sup>3</sup> /s	885.281 m <sup>3</sup> /s	530.749 m <sup>3</sup> /s
Gasto Entrada Boca Sur	2,195.617 m <sup>3</sup> /s	1,768.680 m <sup>3</sup> /s	2,669.477 m <sup>3</sup> /s
Gasto Salida Boca Sur	2,247.301 m <sup>3</sup> /s	1,721.442 m <sup>3</sup> /s	2,716.464 m <sup>3</sup> /s
Energía Boca Norte	11,280.638 kJ	18,855.838 kJ	5,495.428 kJ
Energía Boca Sur	56,130.657 kJ	48,322.967 kJ	73,003.803 kJ
<b>Energía Total</b>	<b>67,411.30 KJ</b>	<b>67,178.81 kJ</b>	<b>78,499.23 kJ</b>

**Tabla 10.-** Comparación de los escenarios, se observa una mejora sin embargo los tiempos de residencia de las aguas siguen siendo muy elevados y superiores a un periodo de marea, lo que significa que no existe la dispersión de contaminantes ni el recambio de las aguas de una manera rápida.

Escenario	Actual	Dragado Interno	Dragado Interno + Externo
<b>Velocidad Máxima</b>	2.22 m/s	2.86 m/s	1.86 m/s
<b>Tiempo de Residencia</b>	51.3 meses	45.9 meses	37.5 meses
<b>Volumen ingresado por ambas bocas</b>	2,259,633.064 m <sup>3</sup>	2,521,760.059	3,094,845.047 m <sup>3</sup>
<b>Área de las bocas</b>	Norte 2,138.41 m <sup>2</sup> Sur 4,209.147 m <sup>2</sup>	Norte 2,459.2 m <sup>2</sup> Sur 4,840.5 m <sup>2</sup>	Norte 3,100.7 m <sup>2</sup> Sur 6,103.348 m <sup>2</sup>
<b>Potencial Energético</b>	67.41 Mega Joules	67.17 Mega Joules	78.5 Mega Joules

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

En el presente trabajo describe los pasos preliminares para la implementación del modelo ADCIRC en la laguna de Tóbari. El énfasis se centra en la obtención de una batimetría uniforme y consistente, la misma que es fundamental para el cómputo posterior de las mareas y corrientes. Se describen brevemente los procedimientos realizados, mediante el software SMS y se presentan los resultados de las corridas preliminares en ADCIRC.

Las salidas numéricas del modelo ADCIRC permite contar con escenarios en estado actual y posibles mejoras en el manejo ambiental. El modelo implementado en ADCIRC fue ejecutado para una simulación de propagación simple y desarrollada con la malla de la laguna de Tóbari densa cercana a la costa y zona de análisis para mejores resultados.

La comparación de la simulaciones permite validar la simulación y pronosticar adecuados resultados de futuras mejoras, se propusieron tres simulaciones (situación actual, propuesta de mejora uno con un dragado interno y propuesta de mejora dos con un dragado externo más completo eliminando bancos de arena en los bordes exteriores de las bocas mar adentro), las cuales mejoraron los resultados actuales en el comportamiento de la laguna, sin embargo, no fueron suficientes en la obtención de los resultados esperados, se comprobó que realizando dragados se mejora significativamente la hidrodinámica, en análisis de un dragado más complejo, extenso y/o ramificado no está dentro de los alcances del presente trabajo pero es una recomendación a la mejora ambiental.

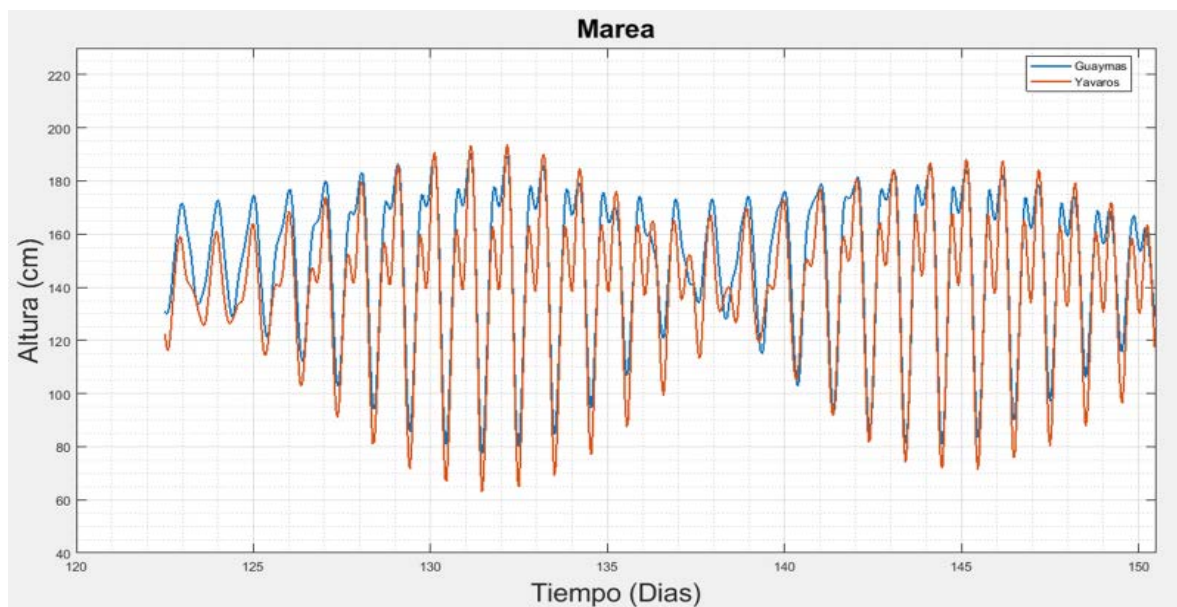
Los escenarios obtenidos con el modelo ADCIRC de la laguna de Tóbari presentan resultados de acuerdo a lo observado en las visitas realizadas a la zona de estudio, es posible notar como la corriente dentro de la laguna se propaga con mayor influencia por los efectos de los dragados (escenario uno y dos), en donde se observa que mejora el movimiento hidrodinámico debido al dragado en los bordes cercanos de la isla y tierra firme, así mismo se observa que el recambio de las aguas no se realiza de una manera rápida, no hay una interacción de las velocidades en la parte central de la laguna o en su defecto es muy baja, incluso en la zona donde se ubicaba el puente que comunicaba a la isla Hiuvulai. Estos resultados no indican el motivo de una elevada salinidad de la laguna, debido a que es una característica de una laguna no estuarina pero lo que si nos indica es en los casos de tener descargas de contaminantes, estos tendrán la tendencia a acumularse en el sistema lagunar.

Para verificar que los resultados de la simulación de las condiciones actuales de la laguna son adecuados, se compara el comportamiento de las mareas próximas a la laguna, por medio de la obtención de bases de datos registrados en las estaciones próximas a la laguna (Yavaros y Guaymas), lo anterior es debido a que en la laguna de Tóbari no cuenta con mediciones mareográficas, las constantes armónicas son obtenidas para cada localidad a partir de observaciones utilizando la técnica de análisis armónico, con la marea simulada en la laguna, al no contar con los datos locales podemos concluir que la comparación entre los datos del modelo y los generados entre las estaciones mareográficas fueron similares en fase, pero en

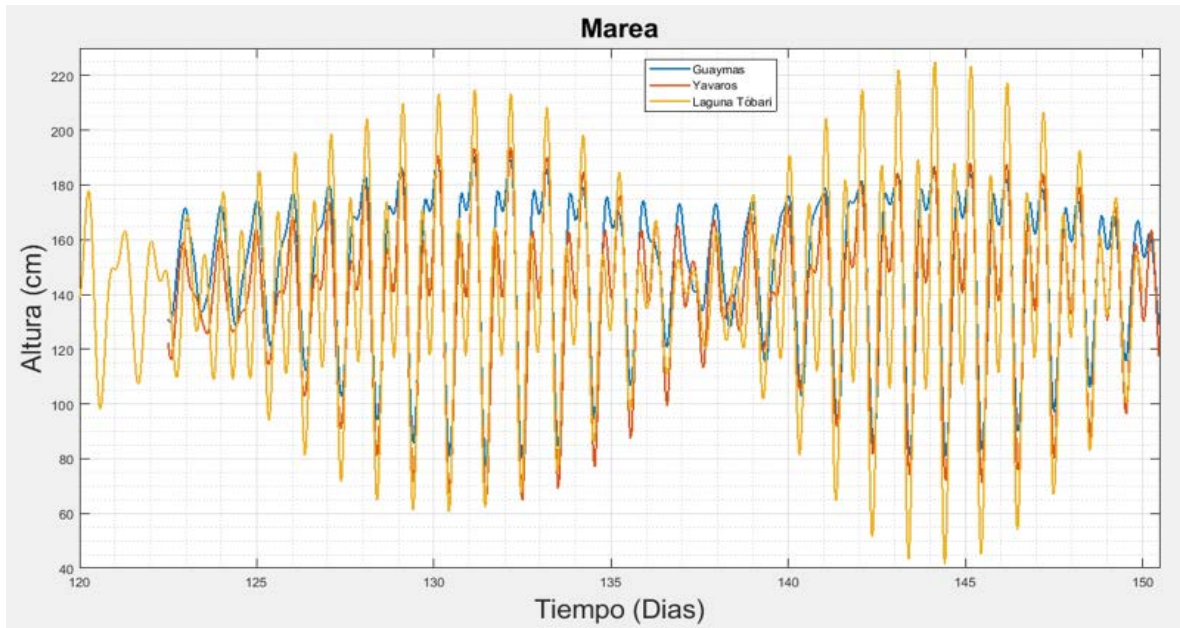
amplitud mayores en el caso del modelo numérico, y en ambos casos, el modelo numérico y los datos de verificación indican que se tiene una marea mixta con predominancia diurna como se muestra en la **Figura 83** y **Figura 84** debido a su factor de forma.

El comportamiento observado en el escenario actual, demostró que los flujos de entrada y salida en cada boca son diferentes, el comportamiento de la boca norte debido a la existencia de un banco de arena en la proximidades al mar abierto, presenta mayores velocidades de entrada que las de salida, caso opuesto ocurre en la boca sur donde el comportamiento obtenido señala que las velocidades de salida resultantes son mayores que las de entrada, en función del gasto en cada boca, el escenario de mejora uno, incrementa el gasto de la boca norte mientras disminuye el de la boca sur, en el escenario de mejora dos, disminuye el gasto en la boca norte y se incrementa en la sur, la energía presenta el mismo comportamiento localizado en cada boca, dichos resultados se presentan en la **Tabla 10** donde se ilustran los valores de gastos que definen el comportamiento mencionado en las bocas y su comparación energética.

Los resultados obtenidos en el comportamiento de la marea demuestran un comportamiento el cual explica el fenómeno que ocurre físicamente en la zona de estudio, y se establecen algunas opciones para mejorar el sistema ambiental mediante la herramienta de soporte mediante la simulación de dragados en la zona para analizar cambios en el estado ambiental de la laguna Tóbari y sus mejoras en el tiempo de residencia y circulación de las aguas, en la **Figura 85** se realiza una comparación de las batimetrías de los tres escenarios, señalando la ubicación de las mejoras batimétricas las cuales fueron las que repercutieron en el modelo de soporte y dieron como resultado una disminución de los tiempos de residencia.



**Figura 83.-** comparación de los datos de las mareas próximas a la laguna, Yavaros y Guaymas, se observa en la figura en un periodo de 28 días ajustada al mes de junio (día juliano), en ambas se comprueba la marea mixta con un factor de forma predominantemente diurno para el mes de junio 2017.



**Figura 84.-** Se observa en la figura, la marea obtenida con la herramienta ADCIRC comparada de Yavaros y Guaymas en un periodo de 28 días ajustada al mes de junio (día juliano) en un punto fuera de la laguna, donde la obtenida mediante simulación presenta mayores amplitudes.

## RECOMENDACIONES

Después de realizar el desarrollo de la investigación y ver las capacidades de la herramienta ADCIRC como modelo de soporte, la recomendación principal ante cualquier estudio o trabajo relacionado a este tema ambiental y mejora hidrodinámica es obtener en primera instancia una buena cantidad y calidad de datos, principalmente batimétricos para las áreas de estudio, y considerar los períodos de análisis más extensos, debido a la morfología y naturaleza de los procesos costeros que si empre se centran en constante modificación geomorfológica y deterioro, debido a los procesos biológicos y ambientales que en ellos se realizan, obtener esta información servirá para poder realizar una simulación más aproximada a las condiciones que se quieran estudiar, el período de análisis en esta investigación fue muy corto pero se pudo obtener información necesaria para poder completar los escenarios de simulación realizando una combinación con batimetrías satelitales y datos obtenidos *in situ*, con esa información y realizando diversas propuestas de ubicación de dragados y estabilidad de sedimentos se puede obtener una propuesta de restauración viable a la zona, favoreciendo las condiciones medioambientales a través de un modelo más aproximado y validado del comportamiento.

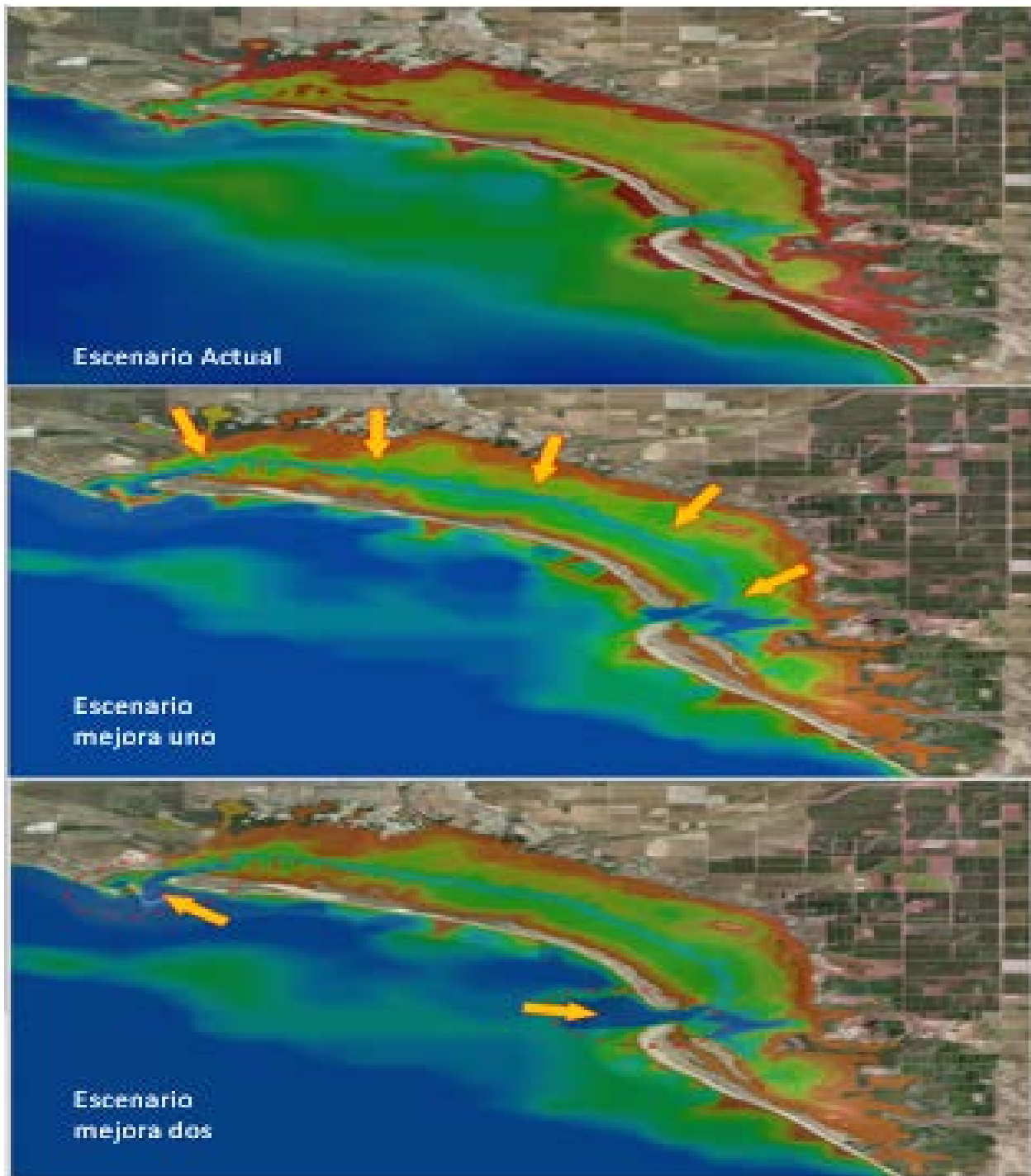
En este trabajo se realiza la actualización de la hidrodinámica de la laguna, comparándola con dos diferentes escenarios de mejora mediante dragados, sin embargo, una recomendación o trabajo a futuro adentrándose en el comportamiento de la laguna será la realización una red de canales de dragado y un eficiente programa de mantenimiento de dichos canales, sin este

mantenimiento o sin esta consideración cualquier propuesta de mejora será efímera desde el punto de vista de azolvamientos.

Es importante considerar en las zonas de estudio la clasificación ambiental, debido a que las propuestas de mejoras influirán directamente, en el caso de la laguna de Tóbari si bien no se encuentra como tal dentro de ninguna área natural protegida (isla de Hiuvulai) si forma parte del área natural protegida con carácter de protección de flora y fauna “islas del Golfo de California”, si bien su delimitación no está definida las propuestas de mejora, deberán ser acorde a la normativa, la CONABIO la considera el área como de importancia para la conservación de aves (AICA N°41), entonces eso limita las opciones de mejoras como son los dragados en el cuerpo de agua y las medidas para mitigar azolvamientos de sedimentos que pueden proporcionar una mejora a la hidrodinámica y fomentar la restauración y estabilidad ambiental. De igual forma se deberá analizar la factibilidad de los proyectos a realizar debido principalmente a los Costos involucrados ya que los programas federales son los que principalmente brindan los recursos necesarios, debido principalmente a que por su naturaleza geológica son cuerpos que constantemente tienden a deteriorarse y son efímeros, aunque ambientalmente sean invaluable.

Estos pasos realizados se deben considerar cualquier modelo que se quiera simular, dentro de la información más relevante a obtener y procesar se encuentra batimetría, debido a la importancia del modelo de aguas someras. Las batimetrías son un dato importante para las simulaciones de aguas someras debido a la ecuación generalizada de onda, las batimetrías de la situación actual fueron explicadas en el capítulo anterior donde se realizó una combinación de mediciones in situ con la base de datos obtenidas de GEBCO's,

Para la validación del modelo y de la herramienta de soporte, la obtención de datos es lo más importante, se deben instalar estaciones de registro en diversos puntos de la laguna con la finalidad de obtener datos de elevaciones y velocidades. Así mismo, hay que tomar en cuenta otras variables que influyan en los factores de simulación que sean adecuados, como velocidad de los vientos y coeficientes de fricción acordes al dominio, transporte de sedimentos y profundizar sobre todas las diversas opciones que ADCIRC ofrece para mejorar los resultados, en este proyecto se consideró una simulación simplificada con enfoque a fines prácticos, ya que actualmente las campañas que se realizaron fueron basadas en tablas de mareas proyectadas a las localidades más próximas las cuales cuentan con estaciones mareográficas, estos registros de datos se comparan con los datos de salidas de elevaciones y velocidades y se esperaría tener el mismo comportamiento para validar la simulación, en este proyecto no pudo ser realizada por no tener el recurso ni estar dentro de los objetivos principales (tiempo y alcances).



**Figura 85.-** Batimetrías de la situación actual, escenario de mejora uno y escenario de mejora dos, realizadas con el mallador SMS 12.2– ADCIRC, donde se puede observar que las zonas rojas son las zonas someras o de baja profundidad que coinciden con lo observado en las visitas, la creación del canal interior de dragado y la mejora de las bocas eliminados los bancos de arena mar adentro



## BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En Ó. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, & R. Márquez-H (Edits.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INECC).
- ADCIRC. (4 de Julio de 2018). *The University of North Carolina at Chapel Hill*. Obtenido de <https://adcirc.org/home/documentation/users-manual-v50/>
- Aguilar Chávez, A. (2002). Propiedades de propagación de esquemas numéricos para la simulación de flujos a superficie libre. *Tesis Doctoral*. México: UNAM.
- Aguilar Chavez, A. (2016). Fenómenos Transitorios (Apuntes Clase). En A. Aguilar Chavez, *Teoría de diferencias Finitas* (págs. 1-51). Jiutepec: UNAM.
- Aguilar Chávez, A. (2017). Curso de Residuos Pesados y Elemento Finito. En A. Aguilar Chávez, *Introducción al Elemento Finito* (págs. 1-14). Jiutepec: UNAM.
- Dyer, K. R. (1979). *Estuarine hydrography and sedimentation*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Farreras, S. (2004). *Hidrodinámica de Lagunas Costeras*. México: Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Gaona, D. E., & Portilla, J. (2014). Elaboración de mallas computacionales para la implementación del Modelo ADCIRC (Advance three Dimensional Circulation Model) en el Archipiélago de Galápagos. *Avances en ciencias e ingenierías*, 1-9.
- Garrido Hoyos, S. E., Aguilar Chávez, A., Esteller Alberich, M. V., Jara Marini, M. E., Saldaña Fabela, P., Gómez Balandra, M. A., . . . Mejía Astudillo, V. (2017). *Estimación y Dispersión de contaminantes en el río Yaqui (Sonora, México); evaluación y riesgos ambientales*. Morelos.
- GS Ingeniería Integral, S.A de C.V. (2008). *Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad particular para la obra de dragado en la bahía del Tóbari, Municipio de Benito Juárez, Sonora*. SAGARPA-CONAPESCA.
- Herrera-Silveira, J. A., Teutli, H. C., Zaldivar, J. A., Caamal, S. J., Alvarado, E., Andueza, T., . . . Cortés, B. O. (2009). *Propuesta metodológica para evaluar el grado de deterioro de los ecosistemas de manglar: El caso Yucatán*. CINVESTAV/SEMARNAT-INE.

- Ketchum, B. H. (1951). The exchanges of fresh and salt water in tidal estuaries. *Journal of Marine Research*, 18-38.
- Lankford. (1976). *Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification in: Estuarine Processes* (Vol. Volumen II). (A. Press, Ed.) New York, N.Y.: M. Wiley.
- Le Provost, C., Genco, M., Lyard, F., & Vincent, P. (1998). A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set. *J. of Geophysical Research*, vol. 103, pp. 5513-5529.
- Liao, J., Chen, J., Ru, X., Chen, J., Wu, H., & Wei, C. (2016). Heavy metals in river surface sediments affected with multiple pollution sources, South China: Distribution, enrichment and source apportionment. *Journal Geochemical Exploration*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.013>
- Marinone, S., & Lavín, M. (1997). Mareas y corrientes Residuales en el Golfo de California. *Contribuciones a la oceanografía Física en México*, 113-139.
- Morales Pérez, R. A., & Gutierrez de Velasco, G. (1988). Mareas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 25-46 vol 28-1.
- Ongley, E. D. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje* (Vols. 1,2 y 5). FAO.
- Pritchard, D. W. (1967). What is a estuary?: Physical viewpoint. (G. H. Lauff, Ed.) *Estuaries*, 83, 3-5.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., & Scavia, D. (2002). Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. *BioScience*, 52, 129–142.
- SENER. (2014). *Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable De Energía*. Mexico.
- Wright, F. F. (1974). *Estuarine oceanography*. New York: Mc Graw Hill Co.
- Yáñez Arancibia, A., Soberón Chávez, G., & Sánchez Gil, P. (1995). Ecology of control mechanisms of natural fish production in the coastal zone. En A. Yáñez-Arancibia (Ed.), *Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: Towards an Ecosystem Integration* (págs. 571- 594). D.F.: UNAM.