



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESCRIPCIÓN DE LA HIDRODINÁMICA DEL
SISTEMA ESTUARINO XEL-HÁ. INFORMACIÓN
BASE PARA SU PRESERVACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN MANEJO SUSTENTABLE DE
ZONAS COSTERAS

P R E S E N T A:

JAVIER ROBLES CAMACHO



DIRECTOR DE TESIS:
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTIZ

Sisal, Yuc., 2017



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.

Datos del alumno	Javier Robles Camacho Tel. (999) 907 15 31 javier.rc606@gmail.com Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación - Sisal Licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras 107004033
------------------	--

Datos del jurado

Presidente **Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara**
UMDI – Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM

Secretario **Dra. Cecilia Elizabeth Enríquez Ortiz**
UMDI – Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM

Vocal **Dra. Laura Elena Vidal Hernández**
UMDI – Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM

Suplente **Dra. Dalila Aldana Aranda**
CINVESTAV – Mérida, IPN

Suplente **Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia**
CINVESTAV – Mérida, IPN

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una formación académica de excelente calidad y contribuir en mi desarrollo personal como miembro de la sociedad civil; es todo un orgullo ser universitario.

Al personal del Parque Xel-Há por el apoyo logístico y facilidades que proporcionó durante los días de muestreo.

A la Dra. Cecilia Enríquez por introducirme en el campo de la oceanografía física, permitirme trabajar a su lado (aceptando el ritmo y atención que llego a demandar) y por dirigir mi trabajo de tesis. Soy consciente del potencial de las herramientas que estoy adquiriendo al trabajar contigo y créeme, Ceci, que te agradezco enormemente por ello.

A mi comité sinodal por involucrarse en este trabajo y contribuir con sus observaciones a la mejora del mismo.

A la SEP y a la Universidad por las becas otorgadas durante la licenciatura y para la culminación del proceso de titulación. Así como al pueblo de México, que gracias a todos nosotros esto es posible. Realmente espero poder retribuir algo de lo mucho que me ha dado para mejorar las condiciones de nuestro país.

Agradecimientos personales

A mis padres, quienes siempre me han apoyado en todas las decisiones que he tomado. Es gracias a su dedicación, valores y amor que hoy soy una persona con grandes ideas, ganas de comerme el mundo y de contribuir en la medida de lo posible. Todos mis logros son de ustedes y aquí un pequeño resultado de su constante esfuerzo.

A mis hermanos, que me han regalado tantas emociones y siempre han estado al pendiente de mí, apoyando y siempre dispuestos a auxiliarme.

A mis abuelos, tíos y primos por ser otro pilote importante en mi desarrollo personal y por siempre recibirme con los brazos abiertos.

A mis compañeros/amigos de la fabulosa séptima generación, amigos y personas que conocí durante mis estancias en Sisal, Melaque y Alicante; han hecho de mi licenciatura una experiencia maravillosa que me ha enriquecido en muchos sentidos.

Resumen

Xel-Há es un parque acuático al sur de la Riviera Maya que cuenta con una caleta que recibe importantes flujos de agua continental en forma de descargas de agua subterránea (DAS) que interactúa con agua del mar Caribe que se adentra en el sistema. La configuración natural del sistema y las características fisicoquímicas de las diferentes masas de agua provocan que la columna de agua se divida en dos capas, una salobre superficial y la otra salada en el fondo. Tales características hidrodinámicas hacen posible la presencia de una riqueza enorme de especies en un sitio de dimensiones pequeñas; lo que a su vez resulta atractivo para el turismo. Sin embargo, a pesar de la riqueza natural e importancia económica del sistema, no existe en la literatura información de su comportamiento hidrodinámico, del cual depende su salud y condición. El presente trabajo caracteriza la hidrodinámica del sistema estuarino Xel-Há a partir de mediciones *in situ* de salinidad, temperatura y niveles de agua y de modelación numérica. Los resultados de las observaciones indican que Xel-Há es un sistema estuarino altamente estratificado desde el sitio de descarga de agua subterránea hasta la conexión con el mar. La salinidad se ve influenciada por la descarga de agua continental y por la oscilación de la marea de pequeña amplitud; mientras que la temperatura del sistema está controlada por calentamiento diurno debido a la radiación solar. El modelo hidrodinámico validado muestra que la circulación está dominada por la descarga de agua continental. Los tiempos de residencia del estuario son sumamente cortos (<11 h) debido al alto volumen de agua continental que es descargado en el sistema de manera constante y a la configuración morfológica de la caleta. Esta información científica de la dinámica del sitio constituye la base de su funcionamiento, que debe tomarse en cuenta para preservar la naturaleza y diversidad de ecotonos del lugar.

Palabras clave: estratificación, modelación numérica, tiempo de residencia, descargas de agua subterránea, caleta

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	6
2. Marco teórico	7
2.1. Hidrogeología en costas carbonatadas	7
2.2. Estratificación en estuarios	8
2.2.1. Estuarios altamente estratificados	8
2.3. Tiempo de residencia	9
2.4. Modelo Delft3D	10
3. Zona de estudio	13
3.1. Características de la laguna	13
3.2. Climatología	14
3.2.1. Características atmosféricas	14
3.2.2. Clima marítimo	15
4. Materiales y métodos	17
4.1. Mediciones de campo	17

4.2. Modelación numérica	20
4.2.1. Malla	20
4.2.2. Batimetría	20
4.2.3. Fronteras y parámetros físicos	21
4.2.4. Pruebas de sensibilidad y validación del modelo	23
4.2.5. Experimentos numéricos	26
4.3. Tiempo de residencia	26
5. Resultados	29
5.1. Mediciones <i>in situ</i> : Anclajes	29
5.2. Perfiles	31
5.3. Validación del modelo	37
5.4. Velocidades residuales	38
5.5. Tiempo de residencia	42
6. Discusión	45
6.1. Características hidrodinámicas	45
6.2. Tiempo de residencia	49
7. Conclusiones	51
8. Bibliografía	53

Índice de figuras

2.1. Clasificación de los estuarios en base a la estructura vertical de salinidad (tomada de Valle-Levinson, 2010).	9
3.1. Estuario Xel-Há en el estado de Quintana Roo, México (modificada de Aldana <i>et al.</i> , 2016).	14
3.2. Localización del Mar Caribe mexicano. La figura muestra la rosa del oleaje (a) del sureste (tomada de Ruiz de Alegria-Arzaburu <i>et al.</i> , 2012) y la rosa del viento (b) proveniente del este, noreste y sureste (tomada de Soler-Bientz <i>et al.</i> , 2009).	15
4.1. Sitios de instalación de anclajes con CTD (círculos) y localización de las estaciones de medición de perfiles verticales de parámetros fisicoquímicos con YSI y CastAway (cruces).	18
4.2. Colocación de los anclajes CTD en la boca: CTD SeaBird en fondo, asegurado con un bloque de concreto y CTD <i>diver</i> a la mitad de la columna de agua.	19
4.3. Malla numérica elaborada en el módulo Delft3D-RGFGRID y utilizada para los estudios numéricos.	21
4.4. Datos batimétricos medidos en Xel-Há utilizados para construir la batimetría para la malla numérica utilizando el módulo Delft3D-QUICKIN. . . .	22
4.5. Batimetría utilizada en la modelación de este estudio.	23
4.6. Energía cinética calculada para las diferentes resoluciones espaciales de malla y dt (ver Tabla 4.1).	24

5.1. Mediciones con los sensores CTD instalados en sitios específicos de Xel-Há (ver Figura 4.1) del 18 al 20 de marzo de 2015 durante mareas vivas. a) nivel de agua. b) salinidad. c) temperatura.	30
5.2. Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la parte central de la boca lagunar durante un ciclo de marea; datos medidos con CastAway-CTD.	31
5.3. Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la cabeza norte; datos medidos con CastAway-CTD.	32
5.4. Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la estación del puente en la cabeza sur; datos medidos con CastAway-CTD.	33
5.5. Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la estación cercana a la descarga de agua subterránea en la cabeza sur.	34
5.6. Variación temporal de la temperatura en la columna de agua a lo largo del ciclo de marea en la cabeza sur, estaciones “puente” (centro) y “río” (bajo).	35
5.7. Presencia de los valores más altos de temperatura (arriba) y oxígeno disuelto (abajo) a las mismas profundidades. Estaciones boca (izquierda) y cabeza norte (derecha).	36
5.8. Oxígeno disuelto en las dos estaciones de la cabeza sur.	36
5.9. Validación del modelo numérico a partir de los niveles de agua observados y modelados en dos estaciones (boca lagunar y cabeza norte) de Xel-Há.	37
5.10. Corrientes residuales [m s^{-1}] del Experimento 01 para las capas superior (izquierda) e inferior (derecha). Los gráficos contienen 1 de cada 5 vectores de velocidad para una mayor claridad en los patrones de transporte.	39
5.11. Corrientes residuales [m s^{-1}] del Experimento 05 para las capas superior (izquierda) e inferior (derecha). Los gráficos contienen 1 de cada 5 vectores de velocidad para una mayor claridad en los patrones de transporte.	41
5.12. Distribución espacial del tiempo de residencia (horas) para la capa superficial de la laguna Xel-Há.	43
5.13. Distribución espacial del tiempo de residencia (horas) para la capa del fondo en Xel-Há.	44

Índice de tablas

4.1. Pruebas de sensibilidad realizadas con malla fina (3.3 m), mediana (6.6 m) y variación de dt en segundos.	25
4.2. Experimentos numéricos realizados para modelar la hidrodinámica de Xel-Há simulando diferentes escenarios.	26
5.1. Valores mínimos y máximos de oxígeno disuelto de las diferentes estaciones de Xel-Há.	37
5.2. Velocidades residuales máximas de los experimentos numéricos en las capas de superficie y fondo. Marea, V: viva, M: muerta.	38
5.3. Valores máximos para los tiempos de residencia de acuerdo a las fases de la marea. Simulaciones forzadas con series de tiempo de tipo armónico con frecuencia de 30° h^{-1} y amplitud de 0.2 m, descarga alta de $2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y viento del SE.	42

Capítulo 1

Introducción

La gran variedad de actividades que se pueden realizar en las costas y la belleza de los diversos ecosistemas costeros han generado un interés particular en el ser humano por establecerse en las zonas costeras o trasladarse a ellas para realizar actividades productivas, recreativas y turismo. En las últimas décadas dicho interés ha ido aumentando de manera considerable, y con ello, la población en las costas; lo que ha alterado los ecosistemas costeros en todo el mundo llevándolos a la degradación y pérdida de bienes y servicios que proveen (Burke *et al.*, 2001).

De las zonas costeras, los estuarios son ambientes en los que la riqueza de la tierra se encuentra con la abundancia del océano, combinando flujos de agua dulce y agua salada, sedimentos fluviales y marinos creando ambientes complejos con alta diversidad, dinamismo y productividad. Estos ecosistemas costeros sirven como zonas de crianza, refugio y alimentación para muchos animales marinos; lo que da cabida a varios nichos biológicos y alta biodiversidad. Lo anterior se traduce en bienes y servicios ambientales (p. ej. proveen alimentos, regulan procesos de calidad del agua, brindan protección ante temporales, funcionan como almacenes de carbono, dan soporte a actividades recreativas, proveen belleza) que se ven reflejados en las pesquerías, economías locales y nacionales, en el bienestar de otros ambientes costeros y del ser humano en general (Trujillo y Thurman, 2011; Diop *et al.*, 2016; Valle-Levinson, 2010; Ghermandi *et al.*, 2011).

Un ejemplo muy claro de la gran diversidad que sostienen los estuarios es Xel-Há, un estuario natural en la costa de Quintana Roo, México; que desde 1974 se usa como parque acuático. Abarca un área de 84 ha de selva baja subcaducifolia y manglares que rodean una caleta donde confluyen aportes continentales y marinos. En el Parque habitan más de

100 especies de aves, alrededor de 230 especies de plantas, flores y árboles, y en el estuario, 63 especies de peces (Promotora Xel-Há, 2007; Aldana *et al.*, 2016). El clima y la belleza natural del sitio lo hacen un gran atractivo turístico en la Riviera Maya para el turismo nacional e internacional.

Sin embargo, cualquier sistema lagunar costero destinado a usos por el hombre está expuesto a ser impactado y modificado. La forma de minimizar los impactos requiere de un conocimiento profundo del funcionamiento natural del sistema. En particular, el estudio de la hidrodinámica de ecosistemas lagunares costeros es vital para planear y usar adecuadamente el ambiente y permite prevenir alteraciones y/o proponer soluciones viables a los problemas asociados al flujo de agua con que se encuentren, ya sean debidos a la acción natural o a la antropogénica (Cárdenas, 2007). Información detallada de cómo es la circulación y cuáles son los tiempos de recambio en distintas localidades dentro de un sistema lagunar costero debería ser parte de la información de base para conocer la capacidad de carga de un sitio sin que se afecte su salud o se modifique su naturaleza.

En este sentido, el presente trabajo se vale de mediciones de campo y de estudios numéricos para caracterizar por primera vez la hidrodinámica del estuario de Xel-Há. Con el modelo hidrodinámico validado se obtiene información de flujos e intercambios de agua (así como de sus propiedades) entre el agua continental y el mar adyacente, se determina la circulación en las distintas zonas del sistema y sus tiempos de residencia y los niveles de estratificación y distribución de las masas de agua. Esta información científica es la base para comprender la dinámica del sitio que puede tomarse en cuenta para preservar la naturaleza y diversidad de econotnos del lugar.

En los capítulos siguientes se presenta el trabajo realizado organizado de la siguiente manera:

El capítulo 1. Introducción, presenta de manera breve la historia y administración del Parque Xel-Há, que a su vez se distingue como modelo de turismo sustentable. Se presenta información de los estudios de la hidrología en sistemas lagunares de la región y se describen las características particulares del estuario Xel-Há; lo que lleva a la presentación de los objetivos del presente trabajo.

En el capítulo 2. Marco teórico, se presentan las peculiaridades hidrológicas de las costas carbonatadas; la estratificación de estuarios y la relevancia de su estudio; la importancia de los tiempos de residencia en los estuarios; así como el modelo Delft3D empleado en este estudio para la caracterización numérica de la hidrodinámica.

El capítulo 3. Zona de estudio, ubica geográficamente el estuario Xel-Há, con una breve descripción morfológica e hidrológica del mismo. Se describe el clima, los eventos hidrometeorológicos que afectan la región y el clima marítimo presente.

En el capítulo 4. Materiales y métodos, se describen los procedimientos seguidos durante las mediciones en campo llevadas a cabo con anclajes CTD y perfiles en la columna de agua y la implementación del modelo numérico para la simulación hidrodinámica.

El capítulo 5. Resultados, presenta la caracterización de la hidrodinámica obtenida a partir de las mediciones y la modelación; se identifican las zonas de menor circulación, se estiman los tiempos de residencia y se representan visualmente en un mapa.

En el capítulo 6. Discusión, se comparan los resultados obtenidos con aquellos reportados en estudios previos tanto en Xel-Há como en sistemas lagunares de la región.

Finalmente, en el capítulo 7. Conclusiones, se retoman los aspectos hidrodinámicos más importantes de Xel-Há aportados por este estudio y se presenta una serie de recomendaciones enfocadas a redistribuir el uso en zonas de menor circulación con el fin de preservar la estructura y función (y con ello la belleza natural) de la caleta.

1.1. Antecedentes

La región del Caribe Mexicano es muy atractiva para el turismo nacional e internacional por su clima y belleza natural; en 2016 la Riviera Maya recibió 4.79 millones de turistas y captó 3,017.74 millones de dólares (SEDETUR, 2017).

Uno de los destinos turísticos favoritos es Xel-Há (que en maya significa “donde nace el agua”), un parque ecoturístico ubicado 125 km al sur de Cancún, en el Municipio de Cozumel, Quintana Roo. Es operado por la empresa Experiencias Xcaret S. A. de C. V. mediante una concesión por parte del gobierno de Quintana Roo desde 1994. La principal atracción del lugar es su configuración natural, que genera las características hidrodinámicas que hacen posible la presencia de una riqueza enorme de especies en un sitio de dimensiones pequeñas (comparado con otros estuarios del mundo). En la caleta se puede practicar *snorkeling* desde la cabeza (río del estuario) hasta la boca estuarina (conexión con el mar) en tan solo unas horas y admirar la fauna marina que se encuentra en el cuerpo de agua en estado libre y de forma natural. Otras actividades que se pueden realizar en el Parque consisten en recorrer senderos y admirar la flora y fauna de la selva baja, nado

con delfines, encuentro con rayas y manatíes, *snuba* (buceo sin tanque), tirolesa acuática, entre otras. En promedio, el Parque recibe 2,100 visitantes al día; de modo que genera una cantidad importante de ingresos (Experiencias Xcaret, 2014).

La administración del Parque se realiza bajo buenas prácticas ambientales ya que cuenta con un Sistema de Gestión Ambiental enfocado al monitoreo y conservación de especies endémicas, a la investigación y al desarrollo de iniciativas que disminuyan el impacto ambiental. Destacan, el manejo integral del agua y de residuos sólidos, el programa de conservación del caracol rosa en alianza con CINVESTAV-Mérida y el programa de intercambio de bloqueadores libres de químicos. Xel-Há cuenta con diferentes reconocimientos y certificaciones debidas a sus buenas prácticas, responsabilidad social y calidad en el servicio turístico; quizá, la más importante sea la Certificación Internacional para el Turismo Sustentable EarthCheck Oro obtenida en 2014 (Experiencias Xcaret Parque, 2016).

Aunque hasta el momento no existen estudios de su hidrodinámica, algunos estudios de otros aspectos (Back *et al.*, 1979; Aldana *et al.*, 2016) muestran que el estuario de Xel-Há presenta estratificación. La estratificación hace referencia a la existencia de un gradiente vertical estable en salinidad o densidad; esto es, un fluido más pesado situado por debajo de un fluido más ligero, de manera que si se mantienen estables la mezcla entre las masas de agua superficial y la de fondo se inhibirá.

La forma más completa de estudiar la dinámica de un sistema de esta naturaleza es mediante la combinación de estudios observacionales y de estudios numéricos. Los modelos numéricos son herramientas que ayudan a evaluar el detalle espacial y temporal de los procesos físicos y biogeoquímicos en estuarios; la selección de la técnica de modelación más apropiada debe basarse en el propósito de la implementación del modelo y en la complejidad del sistema estuarino a ser modelado. En el caso de los estuarios altamente estratificados y parcialmente estratificados se requiere la implementación de modelos numéricos sofisticados (van Ballegooyen *et al.*, 2004). Particularmente, en la Península de Yucatán existen escasos estudios hidrológicos de los cuerpos de agua costeros (p.ej. Herrera, 2006; Mariño y Enríquez, 2011; Tenorio-Fernández *et al.*, 2015; Marín-Coria y Enríquez, 2016); de los cuales se puede concluir que muchos de estos sistemas son de tipo estuarino-lagunares. Además de los estudios anteriores, existen otros orientados a la modelación de la hidrodinámica de este tipo de sistemas (p.ej. Chiappa-Carrara *et al.*, 2003; Marín, 2016; Robles y Enríquez, 2016); sin embargo, antes de este estudio, no se han reportado en la literatura sistemas estuarinos estratificados en la región.

La Península de Yucatán es de **geología kárstica** con abundante acervo de agua dulce y numerosos cenotes y ojos de agua; a lo largo de la costa existen lagunas costeras someras que reciben aportes de agua continental de forma difusa y de magnitud variable. La laguna Xel-Há es un sistema que recibe un afluente continental sustancial muy localizado en la cabeza sur, y en una cuenca pequeña el agua dulce confluye con agua marina, generando las características hidrodinámicas que permiten que Xel-Há presente amplia diversidad de especies y ambientes. Algunas de las especies que habitan en el estuario se encuentran bajo algún esquema de protección; el caso más representativo es el caracol rosado *Strombus gigas* de importancia ecológica y socioeconómica que actualmente se encuentra enlistado en el apéndice II de CITES como especie amenazada o que necesita estricta regulación. En este sentido, Xel-Há es considerado un santuario para la conservación del caracol rosado en la Riviera Maya Mexicana (Noguez y Aldana, 2014).

Por otra parte, se ha observado un deterioro regional del recurso hídrico por contaminación, asociada al desarrollo acelerado de actividades tanto en el interior de la Península como en la franja litoral y a la creciente expansión de las áreas de actividades primarias. Las descargas de aguas residuales en el acuífero son uno de los principales problemas de contaminación de agua subterránea. Tan solo el estado de Quintana Roo contribuye con el 77 % de las descargas a nivel peninsular; porcentaje elevado a causa de las zonas turísticas de Cancún y la Riviera Maya. Los problemas medioambientales ocasionados por estos desarrollos a gran escala son evidentes en la eutrofización de lagunas (p. ej. Sistema Lagunar Nichupté), en la reducción en la calidad del agua y del deterioro, en general, de los sistemas costeros (Batllori, 2016).

La calidad del agua, los procesos de transporte y la distribución de masas de agua de los sistemas lagunares costeros dependen de la hidrodinámica local, que está determinada por la acción combinada de distintos procesos como la marea, el oleaje, el viento, características como la configuración del fondo, su batimetría, los aportes de agua continental, los flujos de calor atmosféricos, entre otras. Sin embargo, a pesar de su importancia regional y riqueza natural, no existen estudios en la literatura de la hidrodinámica del estuario Xel-Há. En este estudio, por vez primera, se caracteriza la hidrodinámica del estuario Xel-Há ofreciendo información de las corrientes y distribución de masas de agua. Este tipo de información de base puede coadyuvar a la toma de decisiones de manejo para preservar la salud integral del sistema y ante potenciales situaciones de amenaza; a su vez, los resultados reportados en este trabajo pueden contribuir al desarrollo de futuras investigaciones.

1.2. Objetivos

General:

Caracterizar la hidrodinámica del sistema estuarino Xel-Há a partir de mediciones y de modelación numérica para determinar tiempos de residencia e identificar zonas de menor circulación que pudieran verse amenazadas por la concentración de usuarios y ofrecer recomendaciones para la preservación del lugar.

Particulares:

- Realizar mediciones *in situ* de las variaciones del nivel de agua, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto.
- Determinar la variación temporal y espacial de las mareas y de las características termohalinas de la laguna a lo largo del ciclo de marea.
- Crear un modelo numérico de la hidrodinámica del estuario Xel-Há.
- Realizar experimentos numéricos de la hidrodinámica tridimensional de Xel-Há.
- Describir los patrones de corrientes y distribución termohalina con relación a las mareas, al viento y descarga de agua continental.
- Determinar la variación espacial de los tiempos de residencia e identificar las zonas de menor circulación del estuario Xel-Há.
- Desarrollar recomendaciones/propuestas factibles para la operación del parque.
- Hacer disponible la información de los resultados a la empresa encargada del parque.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presenta una descripción breve de conceptos relacionados con la zona de estudio y de las características hidrodinámicas de este tipo de sistemas. Se presenta también la descripción general del modelo numérico utilizado para este estudio.

2.1. Hidrogeología en costas carbonatadas

La región en la que se encuentra Xel-Há corresponde a costas carbonatadas de karst eogenético. Este tipo de costas presentan una hidrología única con un extenso acuífero drenado por conductos, que se encuentra estratificado e involucra la interacción de un lente de agua dulce sobre agua salada. La interface de mezcla entre ambas aguas puede producir dos diferentes sistemas de cuevas (disolucionales o de margen del flanco) dependiendo de la hidrogeología. El proceso de karstificación en la región se ha dado por la interacción de la hidrología de la zona de mezcla, procesos litorales y glacioeustacia; asimismo, la combinación de estos procesos ha moldeado la morfología de la costa formando caletas y playas de media luna (Kambesis y Coke IV, 2013).

Los sistemas llamados caletas, son entrantes costeros angostos (*inlets*) o lagunas que se extienden algunos cientos de metros en tierra y están asociados con manantiales costeros más grandes (Back *et al.*, 1979). Las caletas se forman en los márgenes donde el agua dulce descargada hacia el mar por conductos subterráneos se mezcla con agua salada, causando un incremento en la disolución de la roca e induciendo al colapso del conducto que migra hacia tierra formando la caleta (Beddows, 2004). La definición de un estuario

de Pritchard (1952) dice que “un estuario es un cuerpo de agua costero semicerrado con una conexión libre con el mar, en el que el agua de mar es mediblemente diluida con agua dulce proveniente del continente”. Desde esta perspectiva hidrodinámica, Xel-Há tiene características de estuario.

2.2. Estratificación en estuarios

La estratificación es una de las características más importantes de los estuarios desde el punto de vista hidrodinámico, de la cual dependerá la distribución vertical de químicos y biota en los estuarios. Esta condición se presenta cuando un ambiente salino semicerrado presenta aportes de agua dulce, en el que la influencia de la gravedad causa que el agua salada se distribuya al fondo y se separe del agua dulce por una fuerte haloclina. La temperatura es otra variable que puede causar estratificación, sin embargo, en la mayor parte de estuarios del mundo, su efecto no es tan importante como el de la salinidad (Geyer y Ralston, 2011). Los grados de estratificación pueden variar en un mismo sistema con las diferentes fases de la marea y en las distintas épocas climáticas, ya que dependen de las características de la descarga, de las mareas y de la configuración del cuerpo de agua.

2.2.1. Estuarios altamente estratificados

Un estuario se considera como altamente estratificado cuando dominan los procesos que aportan a las diferencias de densidad (p. ej. el aporte de agua dulce) sobre los procesos de mezcla (marea, fricción por viento y por rugosidad del fondo). El balance de estas fuerzas genera un rango de características que van desde un estuario fuertemente estratificado, parcialmente estratificado o uno en el que la columna de agua se encuentre mezclada a pesar de que existan gradientes de densidad horizontales (Figura 2.1). De acuerdo a la clasificación tradicional de estuarios de Hansen y Rattray (1966), los estuarios altamente estratificados del tipo cuña salina suelen encontrarse en las bocas de los ríos cuya fuerza de descarga es tan grande que sobrepasa la capacidad de mezcla inducida por la marea, de modo que se mantienen las condiciones de alta estratificación. No obstante, la mezcla que se llega a dar en la pycnoclina es un fenómeno importante en este tipo de estuarios; específicamente por gran esfuerzo cortante vertical (*vertical shear*) que se desarrolla en la presencia de fuerte estratificación (Geyer y Ralston, 2011).

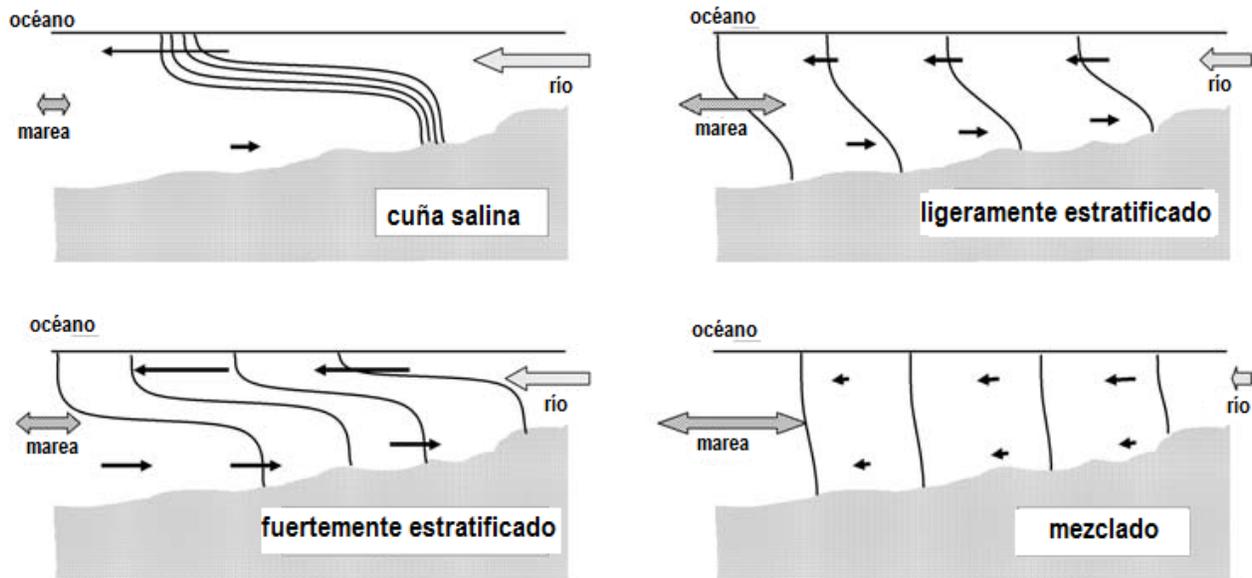


Figura 2.1: Clasificación de los estuarios en base a la estructura vertical de salinidad (tomada de Valle-Levinson, 2010).

El amplio rango de salinidad tiene grandes consecuencias para la ecología y calidad del agua de estos estuarios. La pycnoclina y los frentes longitudinales de salinidad separan dos ambientes muy diferentes en los que además de la salinidad, variables como la temperatura, turbidez, intensidad de la turbulencia y dirección del flujo son diferentes (Geyer y Ralston, 2011). De este modo se crean microhábitats con importantes acumulaciones de organismos y, por otro lado, el largo tiempo de residencia del agua en la capa inferior con agua más salada puede llevar a condiciones de hipoxia y anoxia. Por lo anterior, resulta importante caracterizar el medio abiótico para identificar las variables que mayormente afecten los componentes ecológicos en caso de que se observen cambios.

2.3. Tiempo de residencia

El término “tiempo de residencia” en sistemas acuáticos hace referencia a una escala temporal de transporte, ya sea de agua, sustancias disueltas o partículas; que es ampliamente utilizada en estudios sobre calidad del agua. Debido a su extensa aplicación, existe cierta discusión sobre el tema por el uso de las diferentes definiciones que han surgido (Lucas, 2016). Para evitar tergiversaciones al respecto, se recomienda delimitar bien la definición a emplear con base en el enfoque del estudio, lo cual ayudará a determinar el mejor método de estimación.

En el presente estudio se entiende por tiempo de residencia “el tiempo tomado por una parcela de agua o partícula en dejar un dominio definido” (Lucas, 2016); de modo que, al hacer uso de esta definición, se consideran aspectos tanto espaciales como temporales.

2.4. Modelo Delft3D

El *software* de código abierto Delft3D es un sistema de modelación completamente integrado para enfoques multidisciplinarios y computaciones en 3D para áreas costeras, estuarinas, ríos y lagos. Puede llevar a cabo modelación numérica de corrientes, oleaje, calidad del agua, transporte de sedimentos, cambios morfológicos y ecología. El sistema está compuesto por varios módulos agrupados en una interface mutua, capaz de interactuar dinámicamente para intercambiar datos y resultados (Deltares, 2014a). Delft3D puede usarse para modelar la hidrodinámica en 2D (promediado verticalmente), y en 3D (en un número determinado de capas verticales).

Entre los distintos módulos que integran al sistema se encuentra el módulo Delft3D-RGFGRID, que es un programa para la generación y manipulación de **mallas curvilíneas ortogonales** que permite trabajar en **sistemas de coordenadas cartesianas o esféricas**. Las mallas curvilíneas son aplicadas en **modelos de diferencias finitas** para brindar alta resolución en el área de mayor interés y de baja resolución en el resto del área de estudio y así disminuir el esfuerzo computacional. Cuenta con herramientas para aumentar la ortogonalización y permite el suavizado minimizando errores en las aproximaciones de diferencias finitas y evitando desgastantes procesos de transformación computacional. El programa permite crear un boceto de la malla computacional en el dominio geográfico deseado y, a partir de un proceso iterativo, genera una malla que puede ser suavemente refinada. A su vez, existen varias opciones de manipulación de la malla para colocar sus líneas en la posición correcta y con la resolución correcta (Deltares, 2014b).

El módulo Delft3D-QUICKIN es un programa para la creación, interpolación o manipulación de cantidades variables en el espacio como batimetrías, condiciones iniciales u otros parámetros, en mallas curvilíneas. El programa usa ecuaciones promediadas sobre las dimensiones de la malla para obtener los mejores resultados; para esto, la batimetría modelo se aproxima a la batimetría real en un sentido de promedios más que en un sentido local (Deltares, 2014c).

Por su parte, Delft3D-FLOW es el programa de simulación hidrodinámica multidimensional que resuelve las ecuaciones de movimiento para flujo no estacionario y fenómenos de transporte resultantes del forzamiento meteorológico, de la marea, de diferencias de densidades producidas por la distribución no uniforme de temperatura y salinidad y flujos advectivos en una malla rectilínea o curvilínea ajustada a una frontera. El principal objetivo del módulo es modelar fenómenos de flujo en los que la extensión horizontal y las escalas temporales son significativamente más grandes que las escalas verticales. El sistema de ecuaciones de flujos no estacionarios en aguas someras consiste en las ecuaciones de movimiento horizontal, la ecuación de continuidad y las ecuaciones de transporte para componentes conservativos. El flujo es forzado por la marea en las fronteras abiertas, el estrés del viento en la superficie libre y por los gradientes de presión debidos a los gradientes en la superficie libre (barotrópico) o a los gradientes de densidad (baroclínico) (Deltares, 2014d).

Capítulo 3

Zona de estudio

El área de estudio pertenece a la porción continental del Municipio de Cozumel, Quintana Roo. Se encuentra 10 km al sur del poblado de Akumal y 13 km al noroeste del poblado de Tulum. Entre las coordenadas geográficas de latitud $20^{\circ} 18'$ norte y longitud $87^{\circ} 22.5'$ oeste (Figura 3.1). Es un cuerpo de agua costero que recibe un aporte sustancial de agua continental y que tiene una boca de conexión permanente entre la laguna y el mar. En este capítulo se presentarán las características hidrográficas del sitio y una descripción del clima atmosférico y oceanográfico de la región.

3.1. Características de la laguna

El estuario Xel-Há está conectado al mar Caribe por una boca de 98 m de ancho, se extiende tierra adentro 0.7 km y cubre un área aproximada de 0.3 km^2 ; la forma del sistema está determinada por fracturas estructurales en el área. Recibe importantes flujos de agua continental en forma de descargas de agua subterránea (DAS) con un aporte principal en el extremo sur de la cabeza lagunar; así como la entrada de agua marina. Back *et al.* (1979), reportan que debido a las características fisicoquímicas de las diferentes aguas, la columna de agua está dividida en dos capas, una superior de agua dulce (salobre) con 1 m de grosor, y una capa inferior de agua salada; con termoclina y haloclina estables. Por otro lado, en la cabeza norte la capa superior está compuesta por un 45 % de agua marina y en el brazo sur esta misma capa tiene un 37 % de agua marina.

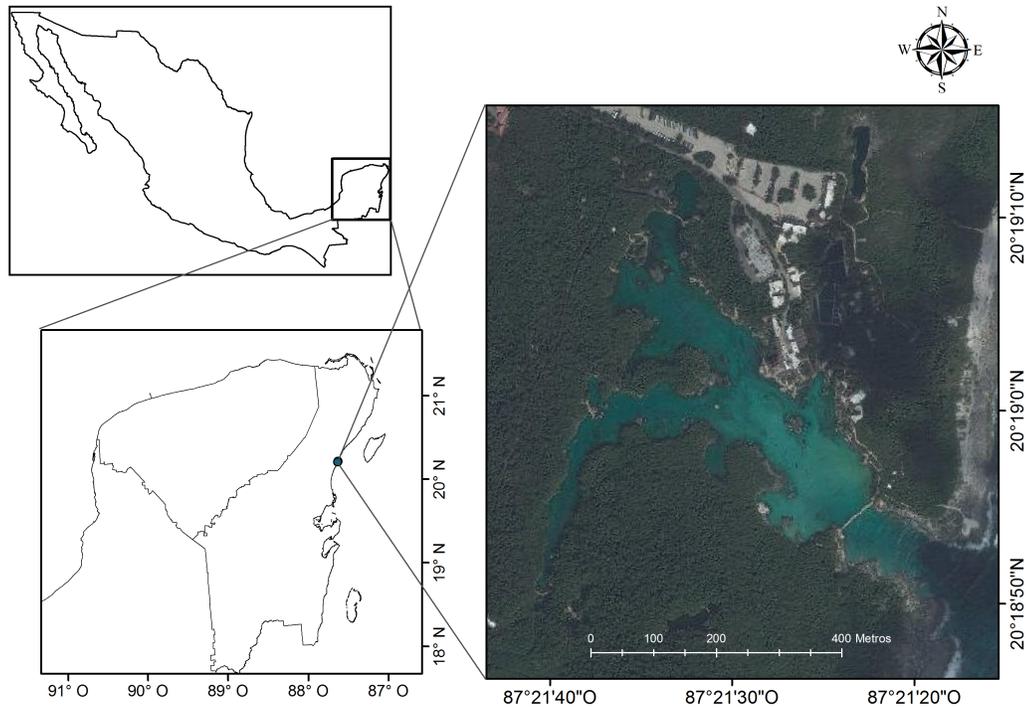


Figura 3.1: Estuario Xel-Há en el estado de Quintana Roo, México (modificada de Aldana *et al.*, 2016).

3.2. Climatología

3.2.1. Características atmosféricas

El clima presente en Xel-Há es cálido subhúmedo con lluvias en verano, época en la que se registran valores mayores de humedad en el aire; la temperatura media anual varía en un rango de 24-28 °C y la precipitación anual en un rango de 1100-1500 mm (INEGI, 2009).

El régimen de lluvias está controlado por los fenómenos que se presentan en el mar Caribe, ya sean depresiones tropicales, tormentas tropicales o huracanes de junio a noviembre. La región está influenciada por los vientos Alisios que fluyen hacia el oeste y suroeste y persisten durante todo el año y se interrumpen durante el paso de frentes fríos de corta duración (2 - 5 días) que atraviesan la región entre noviembre a abril aproximadamente y que generan viento del norte (Figura 3.2); estos sistemas del norte aportan 30 % de lluvia y reducen la temperatura en época invernal (Hernández y Sánchez, 2012).

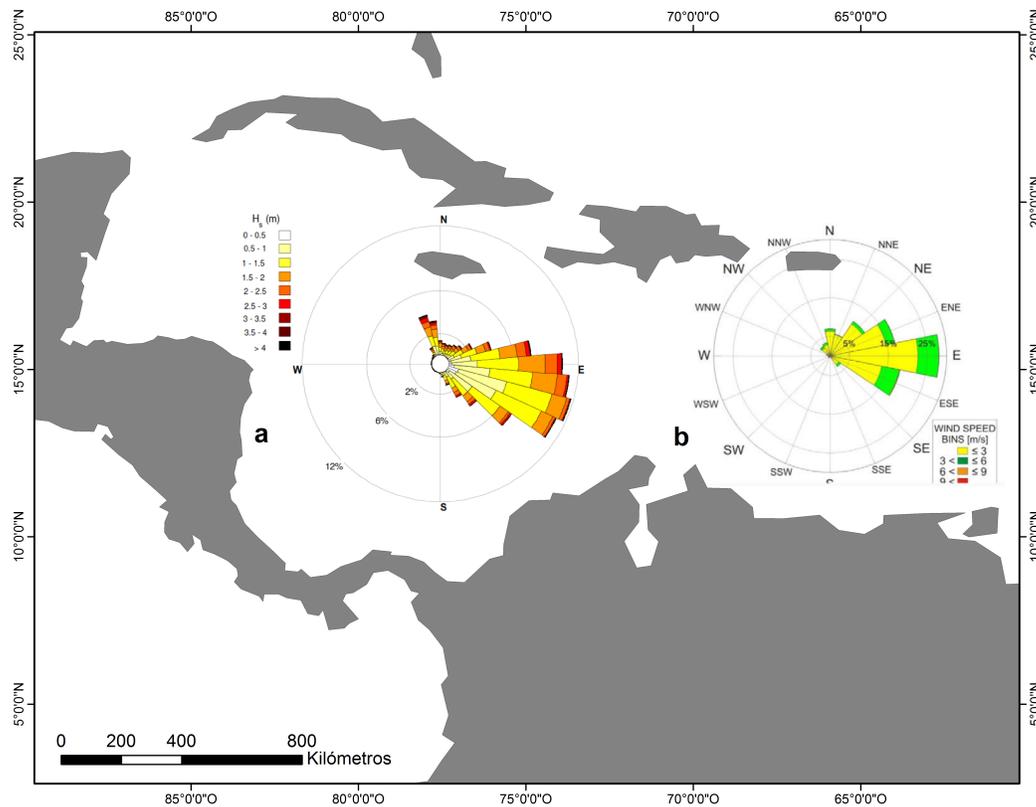


Figura 3.2: Localización del Mar Caribe mexicano. La figura muestra la rosa del oleaje (a) del sureste (tomada de Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2012) y la rosa del viento (b) proveniente del este, noreste y sureste (tomada de Soler-Bientz *et al.*, 2009).

La Estación Meteorológica de Tulum ha registrado que la temporada de mayor precipitación se da en los meses de verano e invierno. El mes más frío es diciembre con temperatura media de 24.2 °C y los meses más calientes son julio y agosto con 28.3°C. Por otro lado, el mes más seco corresponde a marzo con 16.1 mm y el más lluvioso es septiembre con 277.8 mm (Biocenosis, s.a.). La humedad relativa media anual oscila alrededor del 94.4 %, la máxima es del 97 % y la mínima del 60 %, de tal manera que se mantiene casi constante a través del año.

3.2.2. Clima marítimo

El mar costero del Caribe mexicano está sujeto a un régimen micromareal semidiurno y se caracteriza por recibir oleaje moderado (< 1 m) del sureste (como se muestra en la Figura 3.2). La circulación regional está dominada, en parte, por el impacto de la Corriente

Caimán y, en mayor medida, por la Corriente de Yucatán; que es una corriente intensa y dominante ($<2 \text{ m s}^{-1}$) que viaja al norte y comunica al mar Caribe con el Golfo de México a través del Canal de Yucatán.

La Corriente de Yucatán se bifurca alrededor de los 20° de latitud N para circular por el Canal de Cozumel (corriente $>0.4 \text{ m s}^{-1}$) y por el este de la Isla Cozumel ($<0.2 \text{ m s}^{-1}$). Además, existen algunas características de pequeña escala que tienen un efecto en las aguas costeras como lo es el remolino costero “Ascensión-Cozumel”, recirculación ciclónica cercana a esta latitud, reportada por Carrillo *et al.* (2015). Aunado a este efecto, las aguas costeras entre 19° N y 20° N presentan menores salinidades, en comparación con otras áreas costeras del norte de la Península, que coinciden con ubicaciones de descarga de ríos subterráneos y cenotes; sitios donde la descarga submarina del acuífero (DSA) ha sido estimada en $568 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-1}$ de longitud de costa (Carrillo *et al.*, 2016).

Capítulo 4

Materiales y métodos

4.1. Mediciones de campo

Del 18 al 20 de marzo de 2015 se llevó a cabo una campaña de campo intensiva para medir las variaciones termohalinas y niveles del agua a lo largo del ciclo de marea en el estuario de Xel-Há.

La tarde del 18 de marzo se instalaron anclajes instrumentados con CTD Divers, de la marca Schlumberger, en puntos estratégicos de la laguna. Estos instrumentos tienen sensores para medir conductividad, temperatura y profundidad (*Conductivity, Temperature, Depth, CTD*). Los anclajes se fijaron en cuatro sitios: boca de la laguna, cabeza norte, cabeza sur y centro de la cabeza (Figura 4.1). Los CTD se fijaron con cabo y cinchos a un lastre y se colocaron en el fondo de la columna de agua, o bien, a la mitad de la columna de agua asegurados a raíces de mangle. La boca de la laguna fue el único sitio donde se colocaron dos sensores a lo largo de la columna de agua; un CTD de la marca SeaBird en el fondo y un *diver* a la mitad de la columna de agua (Figura 4.2). Los sensores registraron cada 10 minutos conductividad, temperatura y presión durante aproximadamente 39 horas. Durante ese periodo de tiempo se instaló al aire libre y dentro de las instalaciones del Parque Xel-Há un sensor Baro Diver Schlumberger que registró la presión atmosférica y temperatura del aire con la misma frecuencia de muestreo de los CTD.

De manera simultánea a los registros continuos en los anclajes mencionados, el 19 de marzo se realizaron mediciones del perfil vertical de la columna de agua, registrando salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, densidad del agua y sólidos disueltos totales, trasladándose

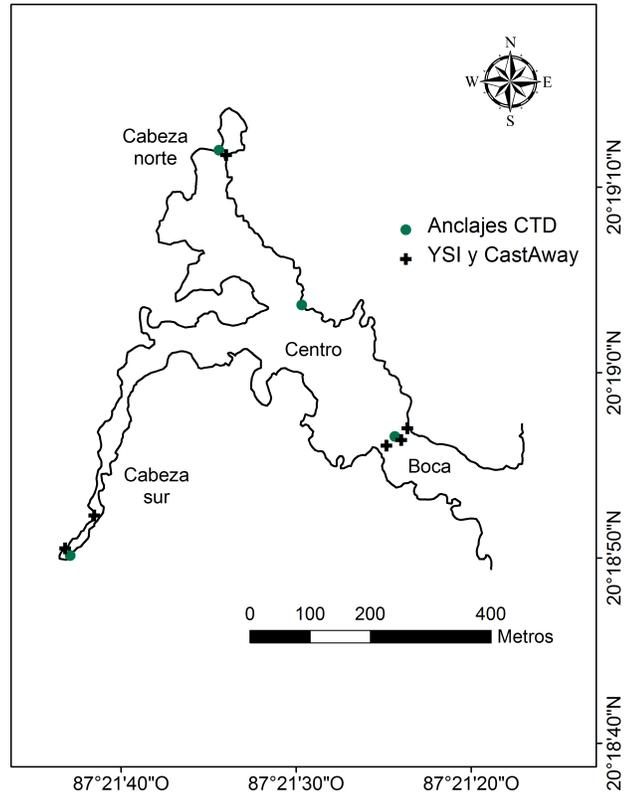


Figura 4.1: Sitios de instalación de anclajes con CTD (círculos) y localización de las estaciones de medición de perfiles verticales de parámetros fisicoquímicos con YSI y CastAway (cruces).

de forma continua durante 14 horas a las diferentes estaciones de la laguna (Figura 4.1). De este modo, cada uno de los puntos fue medido aproximadamente cada 90 minutos (tiempo que tomaba la medición de las distintas variables a lo largo de la columna de agua desde la estación de la boca, al interior de la laguna hasta el afluente de agua continental (“río”) y el regreso a la boca). Para las mediciones se empleó una sonda multiparámetros YSI® programada para registrar cada tres segundos los parámetros, la cual era introducida en el agua y bajada lentamente a través de la columna de agua, una vez que la sonda llegaba al fondo, se detenían los registros. También se utilizó un perfilador CastAway®-CTD que en caída libre registra las distintas variables con una frecuencia de 5 Hz (5 mediciones por segundo); asimismo, en cada medición se tomó registro del tiempo y localización geográfica con un GPS Garmin.

El 20 de marzo por la mañana se procedió a retirar los sensores y los datos fueron transferidos a la computadora de campo con formato de procesador de texto.

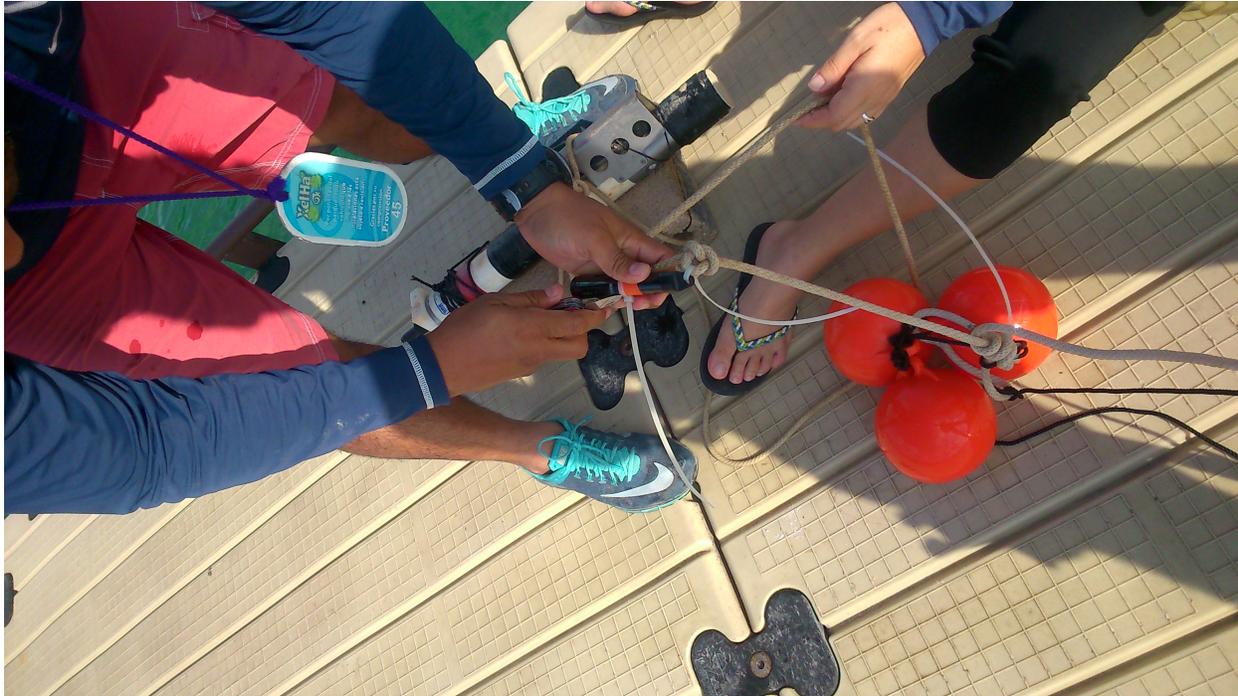


Figura 4.2: Colocación de los anclajes CTD en la boca: CTD SeaBird en fondo, asegurado con un bloque de concreto y CTD *diver* a la mitad de la columna de agua.

Los datos se procesaron en Matlab con subrutinas generadas en el laboratorio de Oceanografía de la UMDI-Sisal y a partir de los datos de conductividad, temperatura y presión del CTD, se determinó la salinidad y la densidad del agua.

Las variaciones del nivel del agua en cada uno de los sitios se obtuvieron a partir de los datos de presión atmosférica, registrados por el barómetro, que fueron restados de los valores registrados por el sensor de presión en el agua de los distintos anclajes.

La salinidad se calcula a partir de los datos de presión, conductividad y temperatura. Algunas dificultades con los sensores anclados impidieron la adquisición de datos confiables de salinidad en algunos de los sitios, por lo que de este parámetro sólo se cuenta con mediciones correspondientes a la boca (fondo y superficie) y al sitio de la cabeza al norte. Asimismo, el CTD colocado en el centro de la laguna tuvo que ser reubicado debido a problemas de logística. Una vez procesados los datos, se generaron series de tiempo de niveles de agua, salinidad y temperatura.

Los datos del perfilador CastAway®-CTD se interpolaron linealmente y se graficaron con respecto a la profundidad; de este modo se obtuvieron perfiles de salinidad, temperatura y densidad por cada sitio. Se siguió el mismo procedimiento para los datos del multiparáme-

tros YSI®, en contraste, estos se graficaron con respecto al porcentaje de la columna de agua debido a que los registros de presión del instrumento fueron poco precisos y no permitieron determinar la profundidad. De la sonda multiparámetros se obtuvieron gráficos de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales.

4.2. Modelación numérica

La modelación numérica se llevó a cabo con el modelo hidrodinámico Delft3D. Para implementar el modelo, primero se digitalizó la línea de costa de la zona de estudio a partir de Google Earth; el archivo se guardó en formato de texto delimitado por tabulaciones, con un formato de dos columnas: con la longitud (x) y latitud (y) en sistema de coordenadas UTM, al cual se le añadió una tercera columna (z) con valores de cero para asignar una elevación de cero con respecto al nivel medio del mar.

4.2.1. Malla

La malla numérica se construyó en el módulo Delft3D-RGFGRID, en un sistema de coordenadas cartesianas. Al dominio regional se importó el archivo de datos de línea de costa, a partir de la cual se elaboró una malla numérica rectangular compuesta de 209 x 180 puntos con una resolución espacial de 6.6 m. La malla abarca todo el cuerpo de agua de Xel-Há, así como una porción marina y está ajustada a la línea de costa (Figura 4.3). Con el mismo módulo se verificó la ortogonalización y refinamiento para asegurar la calidad de la malla.

4.2.2. Batimetría

La batimetría del modelo numérico se generó en el módulo Delft3D-QUICKIN; para ello, se importaron los archivos con los datos batimétricos medidos en diciembre de 2009 por el Dr. Thomas Stieglitz - *Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, France* (Figura 4.4). Desde el mismo módulo los datos se interpolaron triangularmente de manera subsecuente para que cada punto de malla cuente con un dato batimétrico. En este caso, como se disponía con menos puntos de muestra que puntos en la malla, la profundidad en los puntos de la malla se interpoló utilizando un método de

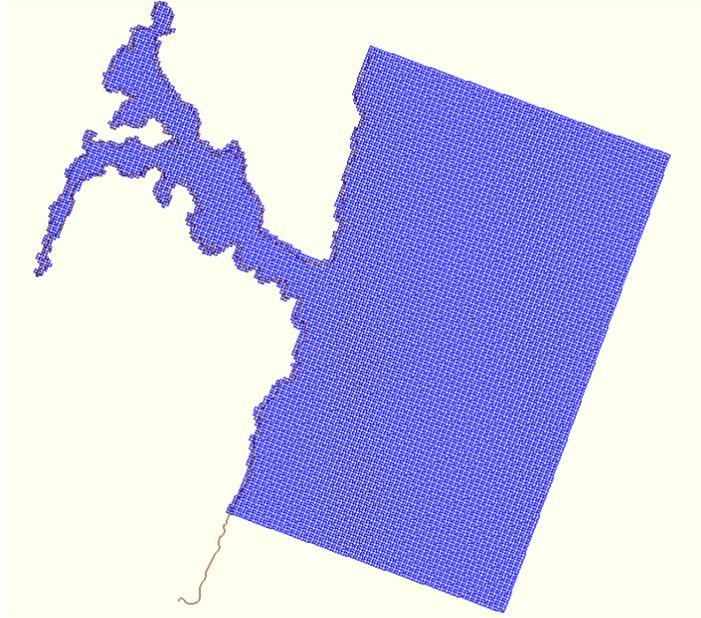


Figura 4.3: Malla numérica elaborada en el módulo Delft3D-RGFGRID y utilizada para los estudios numéricos.

interpolación triangular para el dominio de la malla correspondiente a la caleta. En el caso de la parte marina, al no contar con datos batimétricos de esa zona, se construyó una batimetría sintética con una pendiente con caída desde la playa hacia el mar, cuyas isóbatas siguieran aproximadamente la forma de la línea de costa. Con una función para distribuir datos batimétricos en una región, se propagaron los datos de profundidad asignados a puntos o líneas de la malla en la región marina, manteniendo una transición suave entre la batimetría original y la construida; consecuentemente, se suavizó y se visualizó en 3D. La Figura 4.5 muestra la batimetría utilizada para este estudio.

4.2.3. Fronteras y parámetros físicos

Una vez construidas la malla numérica y la batimetría, en el módulo Delft3D-FLOW se establecieron los parámetros para la implementación del modelo hidrodinámico.

En la frontera del fondo marino se establecieron los valores de profundidad que se generaran en las esquinas de las celdas de la malla y se especificó como valor máximo el del centro de celda.

Se establecieron tres fronteras laterales abiertas en el mar: frontera del sur, de tipo Neumann con forzamiento de series de tiempo; frontera del norte, de tipo Neumann con for-

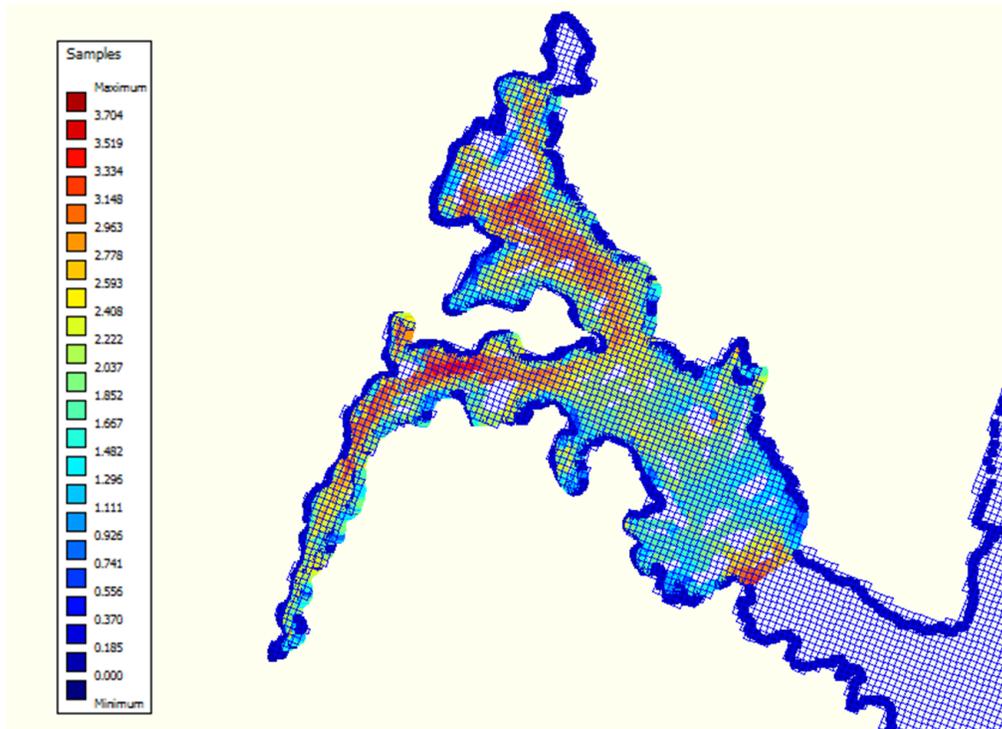


Figura 4.4: Datos batimétricos medidos en Xel-Há utilizados para construir la batimetría para la malla numérica utilizando el módulo Delft3D-QUICKIN.

zamiento de series de tiempo y; la frontera del mar, alimentada con elevación del nivel del mar y forzada con las series de tiempo obtenidas *in situ*. El tipo de frontera de las dos primeras permite que el modelo ajuste los niveles y flujos del dominio para cumplir con las leyes de conservación sin tener un forzamiento predeterminado. Dentro del dominio numérico se establecieron 6 celdas (estaciones) de monitoreo, una en cada sitio de medición con el perfilador y una más en el centro de la zona marina.

De parámetros físicos, se estableció la gravedad como 9.81 m s^{-2} y la densidad del agua en 1025 kg m^{-3} . Para estimar la rugosidad del fondo se utiliza la formulación de Chézy de manera uniforme en todo el dominio. La fricción lateral se estableció como libre y por tanto, el estrés de corte tangencial de cero. La viscosidad turbulenta (*eddy viscosity*) horizontal se estableció como uniforme con coeficiente de $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

El modelo se forzó con marea, viento en la superficie libre y con una descarga de agua continental en la localidad del “río” de Xel-Há. La marea, que en cuerpos de agua costeros conectados al mar es el principal forzante al generar gradientes de presión debidos a los gradientes en la superficie libre (barotrópico) entre el mar y la laguna, se introduce en el modelo a través de la frontera abierta en el lado marino.

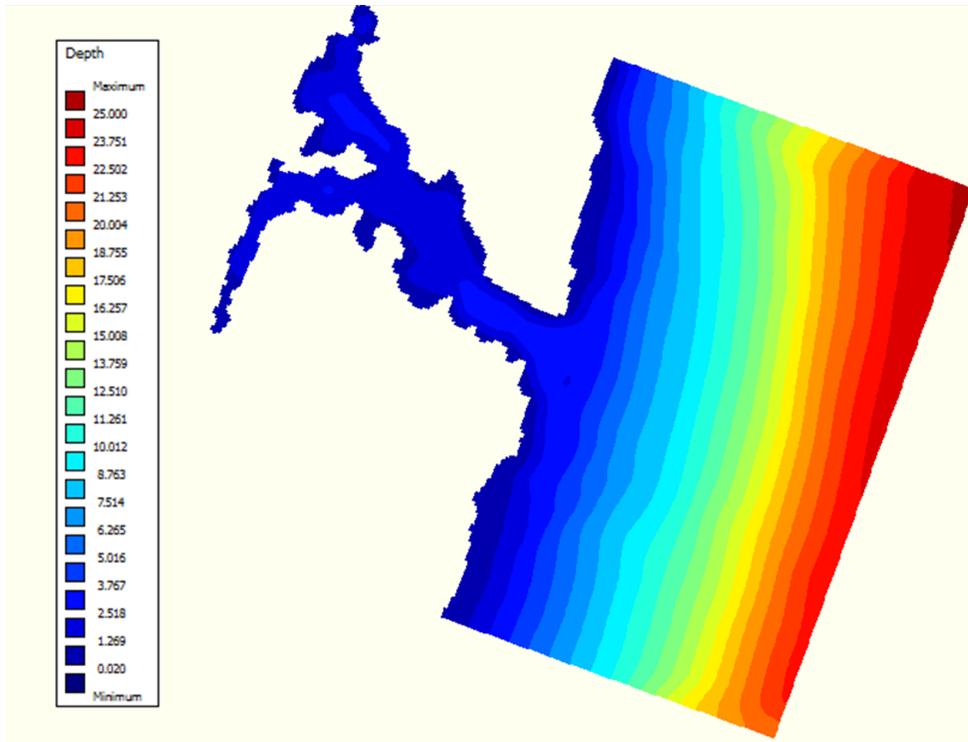


Figura 4.5: Batimetría utilizada en la modelación de este estudio.

La modelación se realizó en 3D ya que el sitio tiene una marcada diferencia vertical de densidades, lo que podría generar una variación significativa en los campos de flujo horizontales por gradientes de densidad. Para esto, el modelo consta de cinco niveles verticales definidos en coordenadas sigma. Este tipo de coordenadas verticales permiten que la malla numérica tenga el mismo número de capas verticales en cada localidad, ajustando su tamaño dependiendo de la profundidad de cada celda.

4.2.4. Pruebas de sensibilidad y validación del modelo

Se realizaron pruebas de sensibilidad a la resolución de la malla numérica y al paso de tiempo (Δt) (Tabla 4.1). La interacción entre ambos factores es crítica ya que determina la precisión del modelo para representar la realidad así como el tiempo y/o esfuerzo computacional requerido para cada simulación. En este caso, se utilizó el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) como argumento de precisión; el cual está definido por:

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}}$$

donde Δt es el paso del tiempo seleccionado (en segundos), g es la aceleración de la gravedad, H es la profundidad máxima y, $\{\Delta x, \Delta y\}$ es la resolución espacial de la malla numérica (por lo regular, es la resolución mínima en cualquiera de las dos direcciones). Para el modelo Delft3D, un valor de CFL inferior a diez es considerado como aceptable (Deltares, 2014d).

Al mismo tiempo, se calculó y graficó la energía cinética total de Xel-Há a partir de los resultados del modelo en cada prueba partiendo de una condición inicial de reposo ($Ec = 0$), como un indicador más cuantitativo de la estabilidad del mismo (Figura 4.6). Al respecto, es importante señalar que las configuraciones establecidas en el modelo (Tabla 4.1) resultan en energía cinética que continúa aumentando en función del tiempo con una tendencia parecida a la lineal sin llegar a la asíntota; esta cantidad de energía cinética es adecuada para los fines de este estudio y de las escalas temporales que se están estudiando como demuestran las pruebas de validación contra las observaciones. Sin embargo, esta configuración podría no ser adecuada para realizar estudios de modelación de procesos que impliquen un rango temporal mayor.

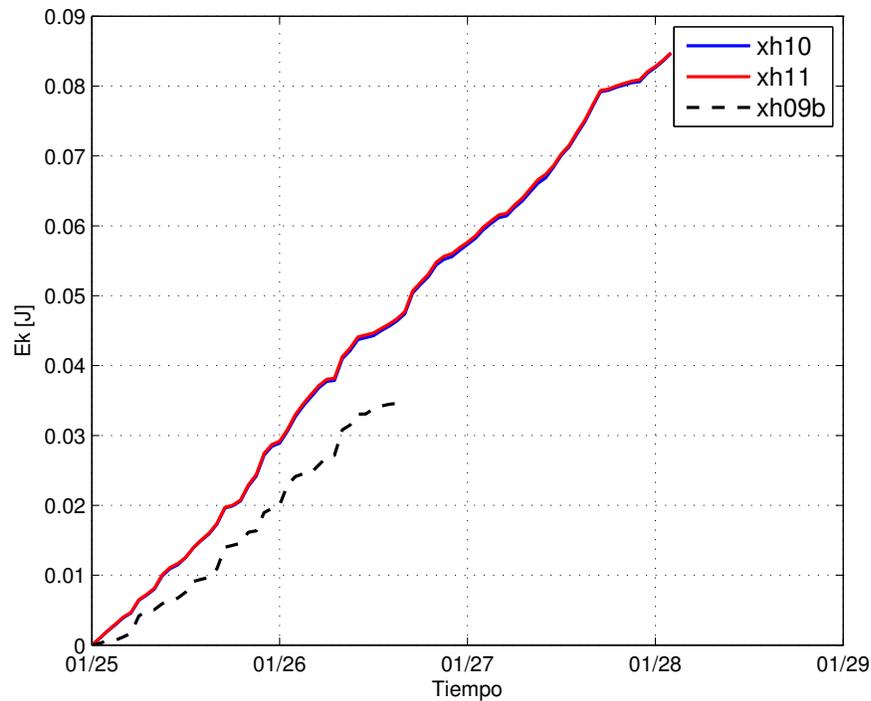


Figura 4.6: Energía cinética calculada para las diferentes resoluciones espaciales de malla y dt (ver Tabla 4.1).

Los resultados para la malla mediana disminuyendo dt mostraron una correlación positiva en la disminución del número de Courant; sin embargo, puede observarse que la energía cinética de ambas pruebas es muy similar y, por otro lado, el tiempo de cómputo requerido en cada simulación respondió de manera inversa (Tabla 4.1). El empleo de la malla fina fue descartado por el gran esfuerzo computacional requerido en sus simulaciones; por lo que se decidió utilizar la malla mediana con dt de 3 segundos.

Tabla 4.1: Pruebas de sensibilidad realizadas con malla fina (3.3 m), mediana (6.6 m) y variación de dt en segundos.

Prueba	Malla	dt [s]	Simulación [días]	Tiempo de cómputo empleado [horas]	CFL	Ek [J]
xh09b	Fina	0.6	1.5	18.7	3.2	0.034
xh10	Mediana	3	3	3.3	8	0.085
xh11	Mediana	1.5	3	6.6	4	0.085

Una vez definidos los parámetros ideales de paso de tiempo y resolución espacial de la malla, para validar el modelo se realizó un experimento numérico simulando un escenario de 39 horas de duración (de acuerdo al número de horas que los CTD registraron datos) con dt= 3 s. Forzado con la marea medida y el reanálisis del pronóstico de viento para ese período de tiempo obtenido del *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*. El modelo parte del reposo con condiciones iniciales uniformes en todo el cuerpo de agua: el nivel del agua 0 m, temperatura de 28 °C y salinidad de 30 ups. Los resultados de esta simulación fueron comparados con los datos medidos en campo mediante el cálculo del Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (E), definido por:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

donde \hat{Y}_i son los valores predichos a cada paso de tiempo, Y_i los valores observados e \bar{Y} es la media de los valores observados (Nash y Sutcliffe, 1970). El Coeficiente arroja valores entre 0 y 1; mientras E se acerca más a la unidad, mayor es la representatividad del modelo.

4.2.5. Experimentos numéricos

Tras la validación del modelo, se realizaron experimentos numéricos combinando diferentes escenarios que tomaron en cuenta la marea astronómica (viva y muerta), la descarga de agua subterránea (alta y baja, de acuerdo a Back *et al.*, 1979), así como viento del sureste (Tabla 4.2). Los experimentos toman como condiciones iniciales los resultados de distribución termohalina obtenidos de una simulación previa de 24 horas que inició con temperatura de 28 °C, salinidad de 30 ups y el nivel del agua medido en campo; esto con el fin de realizar los experimentos con el modelo completamente estabilizado y ya con una columna de agua estratificada, con agua de menor salinidad en la capa superficial y agua marina en el fondo. La descarga de agua se situó alrededor del río, distribuyéndose en las capas superiores de cinco celdas; con temperatura de 26.5 °C y salinidad de 10 ups, de acuerdo a las observaciones.

Tabla 4.2: Experimentos numéricos realizados para modelar la hidrodinámica de Xel-Há simulando diferentes escenarios.

Experimento	Marea		Descarga		Viento SE
	Viva	Muerta	Alta ($2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Baja ($1.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	
E01	x		x		
E02	x			x	
E03		x	x		
E04		x		x	
E05	x		x		x
E06		x	x		x
E07	x			x	x
E08		x		x	x

Los componentes u y v de la velocidad horizontal (resultados de los experimentos numéricos) correspondientes a un ciclo de marea se exportaron a Matlab para calcular la velocidad residual de las capas de superficie y fondo; luego fueron graficados espacialmente representando dirección y magnitud.

4.3. Tiempo de residencia

Para estimar el tiempo de residencia del sistema estuarino Xel-Há, se realizaron cuatro corridas similares a E05 durante 24 horas que contemplaron diferentes momentos de la

marea en el inicio de cada simulación: llenante, pleamar, vaciante y bajamar. A estas simulaciones se les agregó un componente conservativo con tasa de decaimiento de primer orden con concentración de 1 kg m^{-3} que fue liberado en todo el dominio de la malla numérica de manera instantánea al iniciar cada simulación. A su vez, a la frontera marina se le cambió el tipo de forzamiento, que para la validación fue con series de tiempo de los datos medidos, a un forzamiento del nivel del mar armónico con frecuencia de 30° h^{-1} y amplitud de 0.2 m con el fin de estimar tiempos de residencia de mayor representatividad. Estas simulaciones no partieron de condiciones iniciales previas sino que se establecieron como valores uniformes, con salinidad de 30 ups, temperatura de 28° C y nivel de agua en 0 m, 0.2 m y -0.2 m, de acuerdo a la fase mareal.

Los resultados de las simulaciones se exportaron a Matlab y se procesaron con una subrutina programada en el laboratorio específicamente para este propósito. Se calculó el tiempo tomado por la hidrodinámica del sistema en reducir la masa del trazador al factor $1/e$ de la concentración inicial, de acuerdo a Choi y Lee (2004), para cada simulación. Posteriormente, los resultados de las cuatro simulaciones se promediaron con el fin de estimar el tiempo de residencia del sistema independientemente de la fase mareal; estos resultados se graficaron espacialmente para las capas superior e inferior.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Mediciones *in situ*: Anclajes

A partir de los resultados del análisis de los datos registrados por los anclajes, se observó una variación de marea semidiurna y de amplitud pequeña; la mayor amplitud del nivel de agua que se registró durante marea viva fue de 0.17 m. La variación del nivel oscila simultáneamente en los diferentes sitios de Xel-Há, es decir que, el nivel del agua sube y baja al mismo tiempo en toda la caleta (en fase). Aunque de manera general la amplitud de la oscilación del nivel del agua es casi la misma, se manifestó una ligera atenuación de la marea conforme la señal se propaga hacia adentro de la laguna (Figura 5.1a).

La instalación de dos instrumentos CTD en la boca de la laguna permitió apreciar estratificación vertical durante algunos momentos de la marea. Los resultados muestran que el instrumento anclado en el fondo registró una salinidad de ~ 30 ups durante prácticamente todo el periodo de muestreo, excepto en dos momentos. El primero ocurre cuando se registró agua más diluida por el agua continental, lo que coincide con un nivel del mar muy bajo (-0.16 m) a las 14:00 del día 19 de marzo (Figura 5.1b). El segundo ocurre cuando se observa agua marina (~ 36 ups) sin diluir, el 20 de marzo durante marea alta. Regularmente, en marea alta se observa agua de salinidades altas en toda la columna de agua en la boca lagunar, indicando una columna mezclada en esos momentos; sin embargo, en marea baja la columna de agua se estratifica y se observa agua más salada (30 ups) en el fondo y agua más salobre (20 ups) en la superficie. La variación de salinidad en el agua superficial de la boca lagunar oscila en un rango de 11 ups en fase con la oscilación del nivel de agua. La región de la cabeza al norte de la laguna es la que tiene menor variabilidad con una

salinidad ligeramente menor (26.5 ± 1.5 ups) a la de la boca (Figura 5.1b).

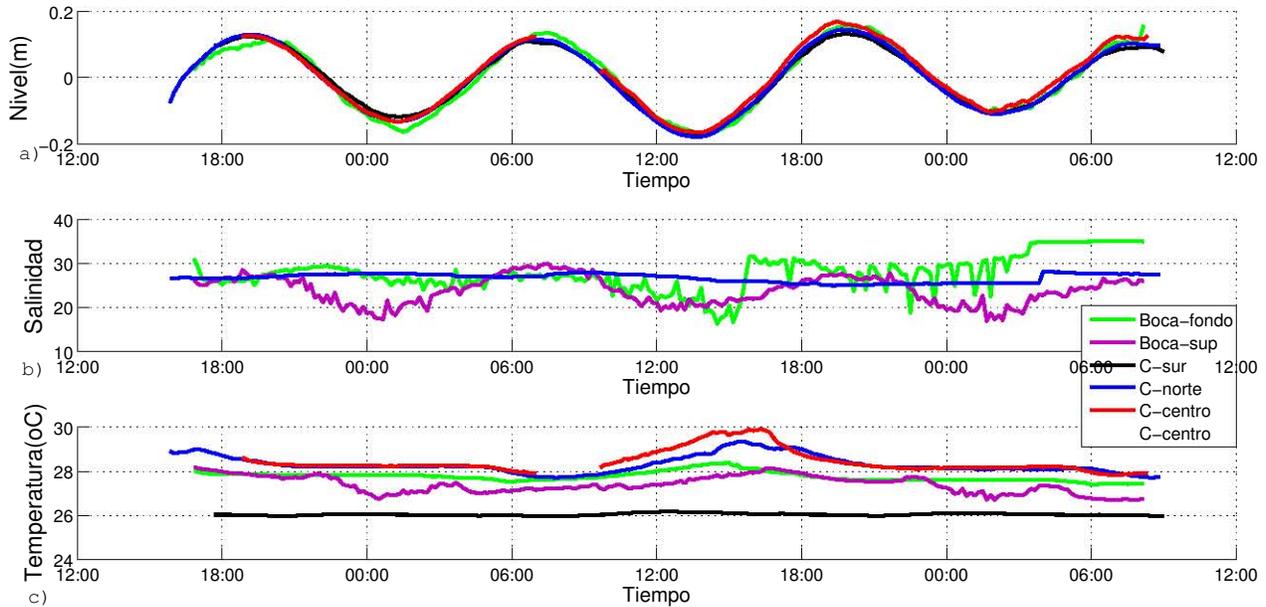


Figura 5.1: Mediciones con los sensores CTD instalados en sitios específicos de Xel-Há (ver Figura 4.1) del 18 al 20 de marzo de 2015 durante mareas vivas. a) nivel de agua. b) salinidad. c) temperatura.

El comportamiento de la temperatura en toda la laguna es muy similar excepto en el sitio donde ocurre la descarga de agua continental (Figura 5.1c), donde se registró una temperatura constante de $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. La variación entre los distintos sitios siempre es menor a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tanto al norte y parte central de la cabeza lagunar como en la boca (fondo y superficie), muestran una variación diaria con un incremento de temperatura durante el día (a partir de las 9:00) alcanzando el pico máximo ($29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) alrededor de las 15:00 horas. La temperatura desciende cerca de las 18:00 horas y se muestra más estable ($27 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante la noche. En la región norte de la cabeza y el centro de la laguna el rango de variación durante el periodo de las mediciones alcanzó los $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que en la boca fue de $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De toda la laguna, la menor temperatura registrada ($25.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) fue en la cabeza sur asociada con la descarga de agua dulce (en el resto de la laguna fue de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el agua de mar $27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Figura 5.1c). Por otra parte, en la boca, en promedio se registró menor temperatura en el agua superficial ($27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) que en el agua del fondo ($27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5.2. Perfiles

A continuación se describen los perfiles de salinidad, temperatura y densidad del agua obtenidos con el CastAway-CTD; del multiparámetros YSI únicamente se describen los perfiles de oxígeno disuelto ya que los perfiles de salinidad y temperatura fueron similares a los obtenidos con CastAway.

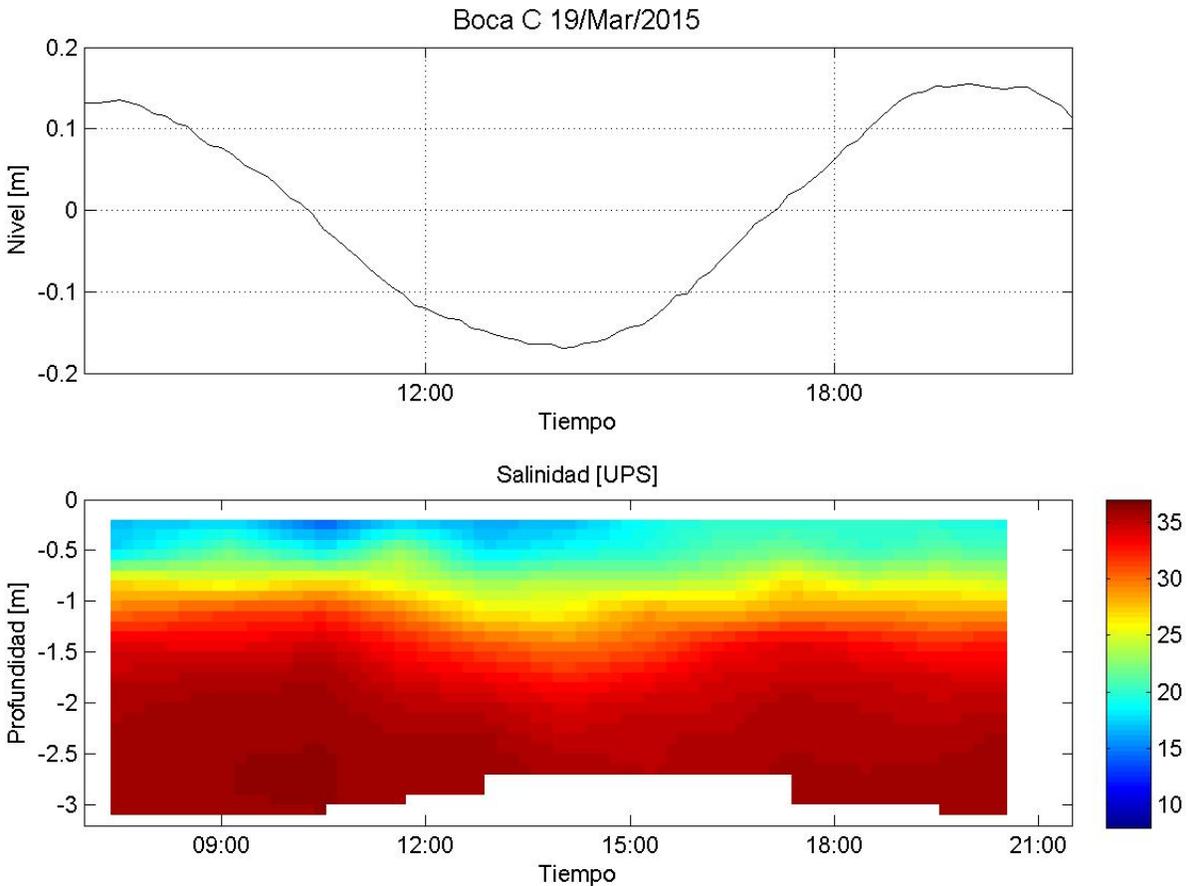


Figura 5.2: Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la parte central de la boca lagunar durante un ciclo de marea; datos medidos con CastAway-CTD.

Los perfiles de salinidad muestran estratificación por salinidad con presencia de una haloclina en todas las estaciones y, por tanto, una capa superior de agua salobre y una capa inferior de agua más salada; la estabilidad entre ambas capas se ve afectada por la marea en algunos sitios. En el centro de la boca la capa de agua superior presenta salinidad de ~ 20 ups y abarca los primeros 0.7 m de profundidad, que se amplía algunos centímetros durante marea baja (Figura 5.2). La haloclina es estable con salinidad alrededor de 27 ups

y se desarrolla en una amplitud de 0.35 m. La capa inferior con salinidad mayor (31-36 ups) se presenta a partir de 1.25 m de profundidad en marea alta y 1.4 m de profundidad en marea baja.

En la cabeza norte el grosor de la capa de agua salobre es más variable en comparación con la boca, abarca desde la superficie a los primeros 0.65 m o 1.5 m de profundidad, dependiendo de la oscilación de la marea (Figura 5.3). Al ocurrir la marea baja se observa el menor grosor de esta capa y mayor mezcla en la columna de agua; a su vez, la salinidad de la capa inferior cambia de ~ 34 ups a ~ 27 ups y se vuelve a reestablecer nuevamente en marea alta.

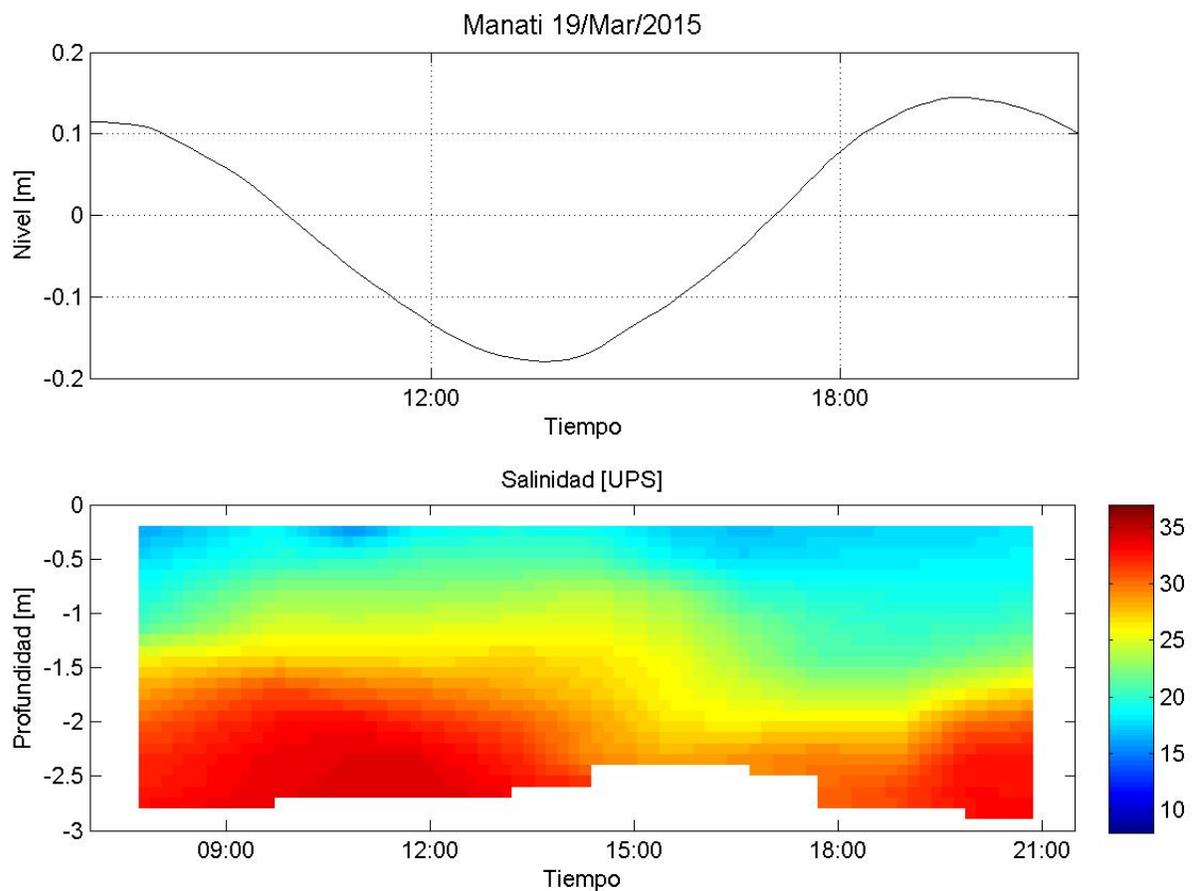


Figura 5.3: Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la cabeza norte; datos medidos con CastAway-CTD.

En el caso de la cabeza sur, la capa superior en la estación de mediciones del puente tiene salinidad de ~ 10 ups y comprende hasta los primeros 1 o 1.5 m de profundidad, teniendo

su mayor grosor en marea baja (Figura 5.4). La haloclina muestra un cambio de 17 ups a 27 ups; con agua marina (34 ups) en el fondo y salinidad ligeramente inferior a la marina durante marea baja (27 ups).

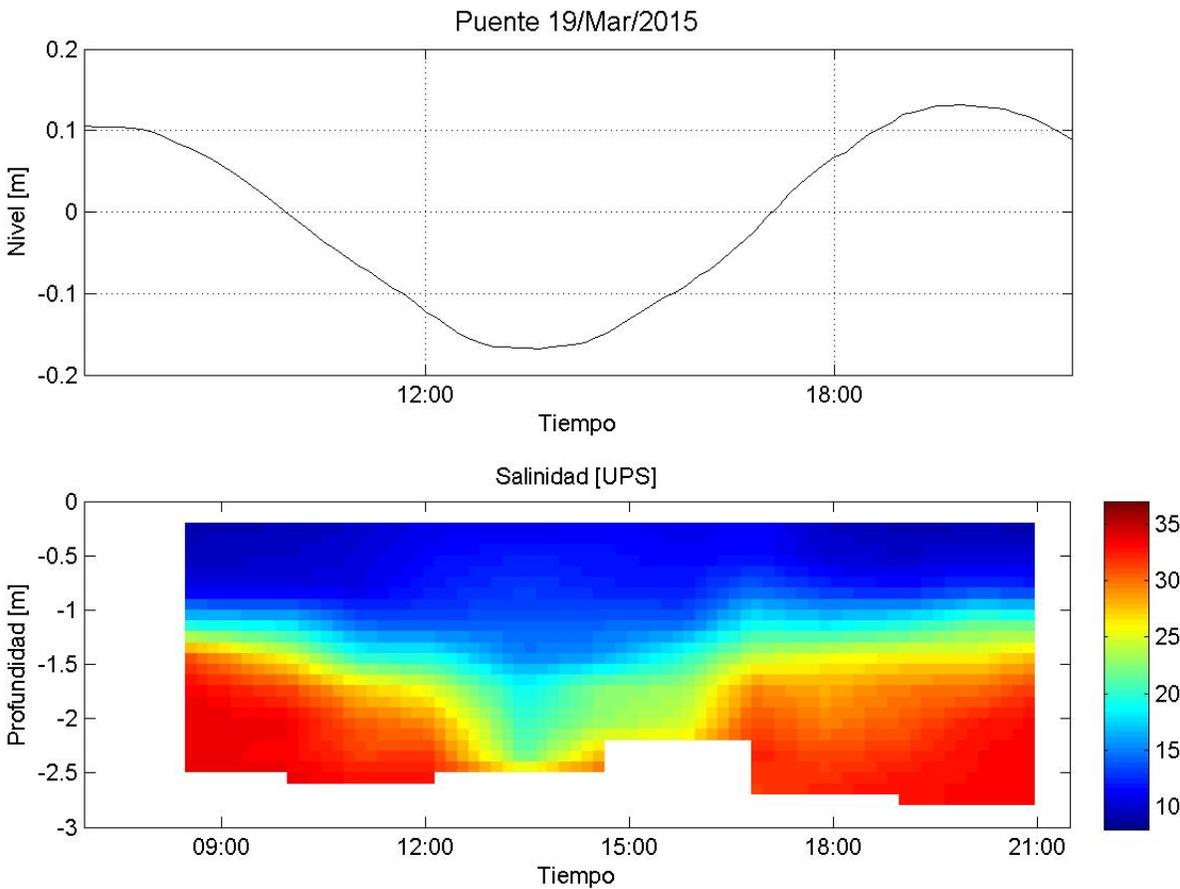


Figura 5.4: Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la estación del puente en la cabeza sur; datos medidos con CastAway-CTD.

Para el sitio cercano a la descarga de agua subterránea, la capa de agua salobre tiene salinidad desde 8 ups y abarca los dos primeros metros de profundidad; en la haloclina la salinidad se incrementa hasta las 20 ups y se tiene presencia de agua marina en una capa de poco grosor en el fondo (Figura 5.5).

Los perfiles de densidad del agua muestran gran similitud con los perfiles de salinidad. De manera general, el agua en Xel-Há tiene una densidad comprendida en un rango entre los 1003 kg m^{-3} y los 1023 kg m^{-3} . La distribución de las masas de agua con diferencias de densidades muestra un gradiente tridimensional, en el cuál se tiene dominancia de masas

de agua de menor densidad en la cabeza sur (cerca de la descarga de agua subterránea) mientras que cerca del mar predominan masas de agua de mayor densidad.

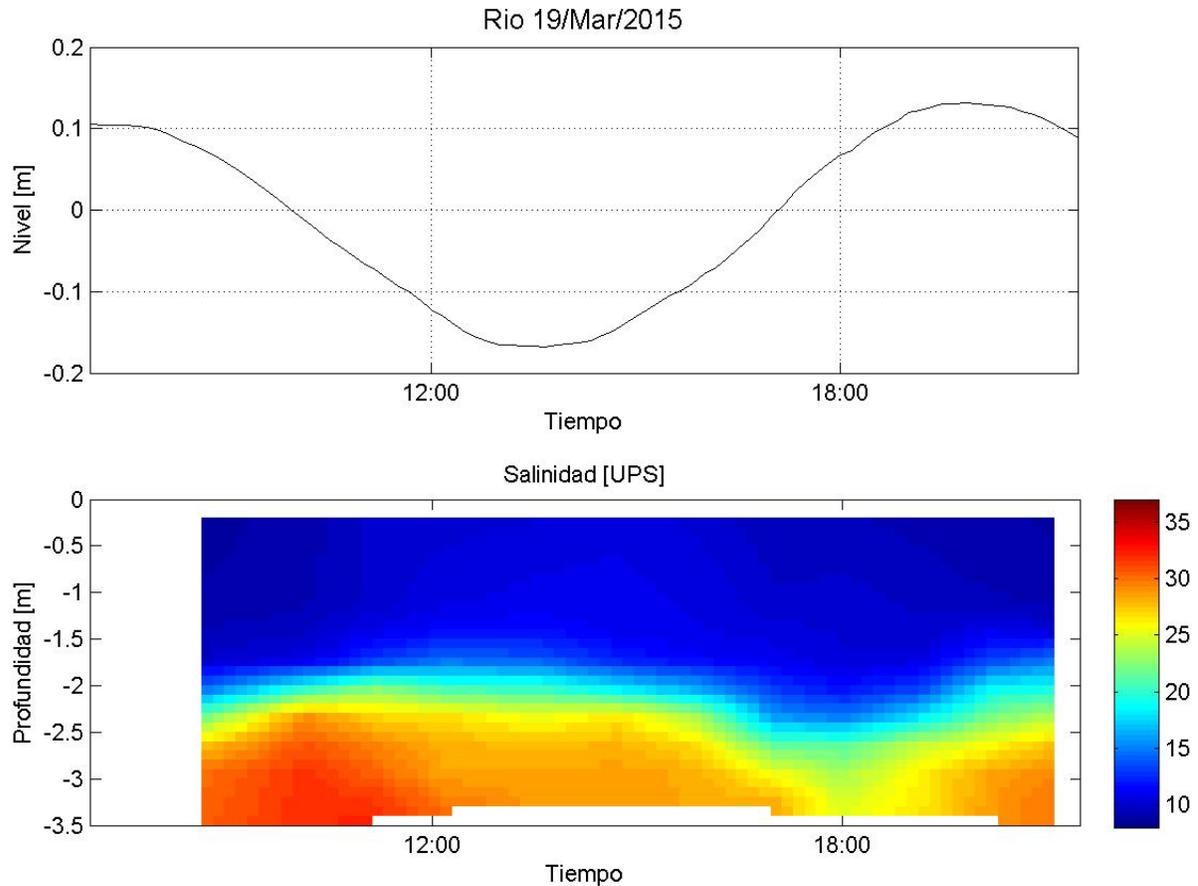


Figura 5.5: Variación temporal de la salinidad en la columna de agua en la estación cercana a la descarga de agua subterránea en la cabeza sur.

Los perfiles de temperatura mostraron dos patrones de comportamiento diferentes en Xel-Há; el primero, que abarca la boca y cabeza norte y el segundo, correspondiente a la cabeza sur (estaciones puente y río). En los primeros dos sitios, a partir de las 7:00 horas (inicio de las mediciones) y hasta el mediodía se encuentra en superficie una capa de agua muy delgada de menor temperatura que el resto de la columna de agua (Figura 5.7). Después, conforme transcurre el día, la temperatura en la columna de agua se vuelve más homogénea; además, es posible encontrar algunos puntos de mayor temperatura en el fondo.

Por otro lado, en la cabeza sur, durante todo el día se pueden apreciar dos capas de agua de diferentes temperaturas, la de menor temperatura ($\sim 26^\circ\text{C}$) en superficie y la más cálida ($\geq 27.5^\circ\text{C}$) en el fondo (Figura 5.6). En la estación del puente la variación de la temperatura muestra una relación con la variación del nivel de agua por efecto de la marea. Al ocurrir la marea baja las diferencias de temperatura en la columna de agua disminuyen; en cambio, durante la marea alta se registra la mayor temperatura del sitio (28.6°C) en el fondo y se aprecia una termoclina (Figura 5.6). En la estación del río, la columna de agua registra menor temperatura y variación; a su vez, no es tan visible el efecto de la marea.

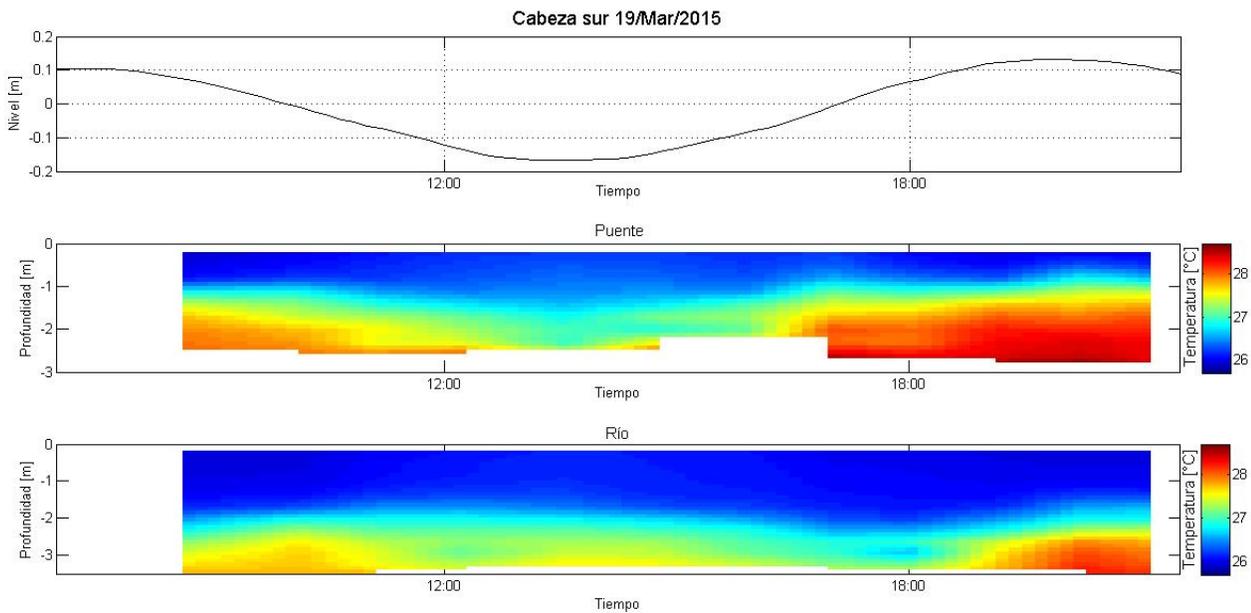


Figura 5.6: Variación temporal de la temperatura en la columna de agua a lo largo del ciclo de marea en la cabeza sur, estaciones “puente” (centro) y “río” (bajo).

Los resultados de las mediciones de oxígeno disuelto realizadas con el multiparámetros YSI muestran una relación de ocurrencia por parte de los valores máximos de esta variable con los valores más altos de temperatura en los perfiles de la columna de agua en todos los sitios (Figura 5.7). Los valores más bajos de oxígeno disuelto en Xel-Há ($\sim 2 \text{ mg L}^{-1}$) se encuentran en la cabeza sur (río y puente) y predominan prácticamente todo el día en la columna de agua; valores más altos de esta variable ($5\text{-}8 \text{ mg L}^{-1}$) en estos sitios se presentan en menor grado (Tabla 5.1, Figura 5.8).

En la cabeza norte y la boca, los valores de oxígeno disuelto son más altos en comparación con la cabeza sur y presentan mayor homogeneidad; con valores de $\sim 5 \text{ mg L}^{-1}$ como

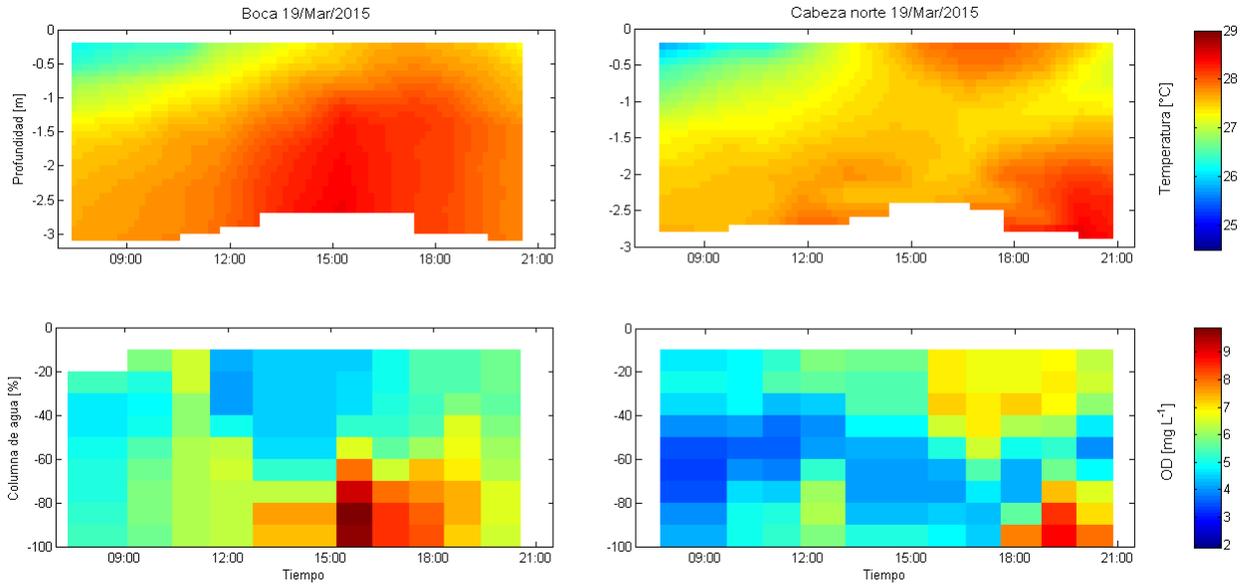


Figura 5.7: Presencia de los valores más altos de temperatura (arriba) y oxígeno disuelto (abajo) a las mismas profundidades. Estaciones boca (izquierda) y cabeza norte (derecha).

los más representativos en el transcurso del tiempo (Figura 5.8). Los valores mínimos y máximos de oxígeno disuelto en cada estación se muestran en la Tabla 5.1.

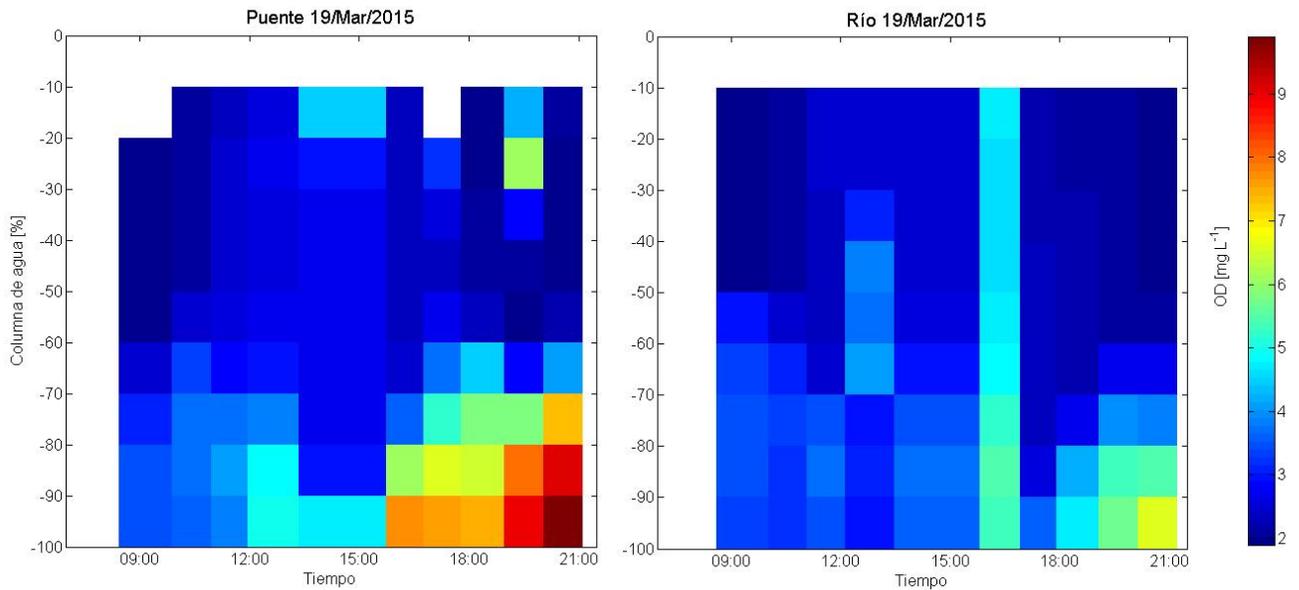


Figura 5.8: Oxígeno disuelto en las dos estaciones de la cabeza sur.

Tabla 5.1: Valores mínimos y máximos de oxígeno disuelto de las diferentes estaciones de Xel-Há.

Estación	Mín. [mg L^{-1}]	Máx. [mg L^{-1}]
Boca	4.1	9.9
Cabeza norte	3.3	9.1
Puente	2.2	8.3
Río	1.9	7

5.3. Validación del modelo

En la Figura 5.9 se comparan los resultados de la simulación realizada para validar el modelo con los datos observados durante un ciclo y medio de marea en dos estaciones, boca y cabeza norte. Ambos resultados del modelo son muy similares y se ajustan en buena medida a las observaciones. De igual forma, el Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (E) tuvo un valor de 0.91 al comparar los datos modelados con las observaciones en la boca, mientras que para la estación de la cabeza norte obtuvo como valor 0.96. Los resultados de la simulación y del Coeficiente de Eficiencia validan el modelo numérico diseñado para este estudio y por lo tanto, brindan certidumbre a los resultados de los experimentos numéricos.

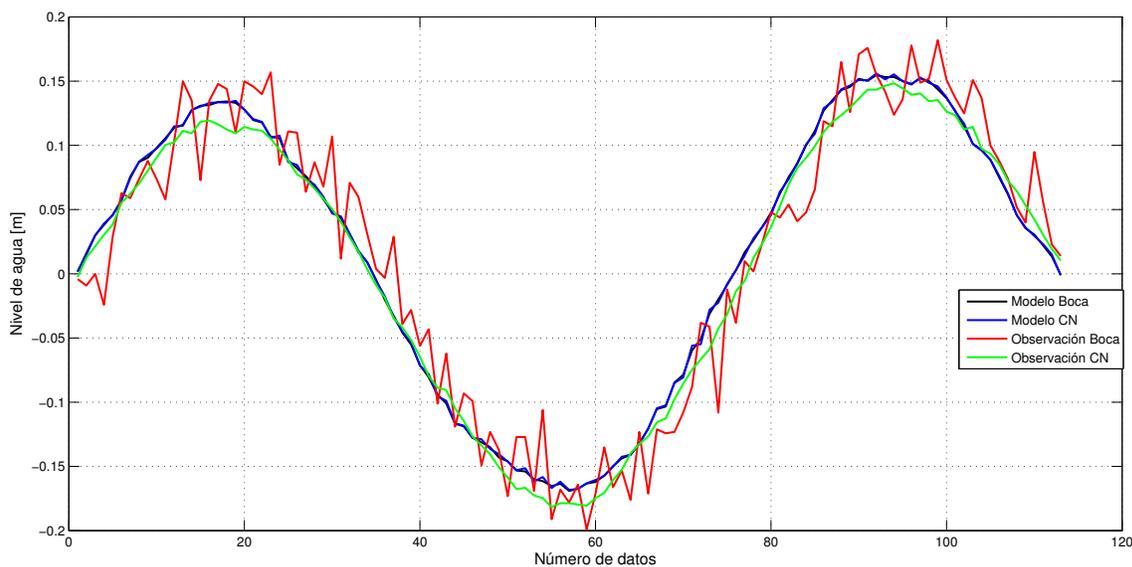


Figura 5.9: Validación del modelo numérico a partir de los niveles de agua observados y modelados en dos estaciones (boca lagunar y cabeza norte) de Xel-Há.

5.4. Velocidades residuales

Los resultados de los diferentes experimentos numéricos forzados con marea, descarga de agua continental y viento del SE fueron utilizados para calcular las velocidades residuales en cada celda de malla. Las velocidades residuales son el resultado neto de las corrientes a lo largo del ciclo de marea e integran a las corrientes de flujo y de reflujos, mostrando el patrón de transporte resultante.

En todos los casos, la velocidad residual máxima se presentó en la cabeza sur, en el sitio donde ocurre la descarga de agua subterránea; este resultado se muestra en la Tabla 5.2 para las capas 1 y 5, correspondientes a superficie y fondo, respectivamente. A continuación se describen los patrones de velocidad residual para las capas de superficie y fondo del Experimento 01 (marea viva y descarga alta de $2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Tabla 5.2: Velocidades residuales máximas de los experimentos numéricos en las capas de superficie y fondo. Marea, V: viva, M: muerta.

Experimento	Marea	Descarga [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	Viento	Velocidad residual máxima [m s^{-1}]	
				Superficie	Fondo
E01	V	2.3		0.23	0.18
E02	V	1.45		0.15	0.12
E03	M	2.3		0.22	0.17
E04	M	1.45		0.15	0.12
E05	V	2.3	SE	0.23	0.18
E06	M	2.3	SE	0.22	0.17
E07	V	1.45	SE	0.15	0.12
E08	M	1.45	SE	0.15	0.12

En la capa de superficie se tiene la mayor velocidad residual en la cabeza sur cerca de las localidades río y puente, con magnitud de 0.23 m s^{-1} y dirección sur-norte perpendicular a la costa, es decir, el agua subterránea que es descargada fluye por toda la cabeza sur hacia el resto de la laguna disminuyendo su velocidad conforme se aleja de su punto de emanación (Figura 5.10a). En la cabeza norte, la velocidad residual presenta dirección desde el centro de la misma hacia las paredes laterales y magnitud $< 0.05 \text{ m s}^{-1}$; sobresale la parte más septentrional por tener velocidad casi nula. En el centro y boca de la laguna, la velocidad residual presenta dirección hacia el mar y magnitud $\sim 0.1 \text{ m s}^{-1}$.

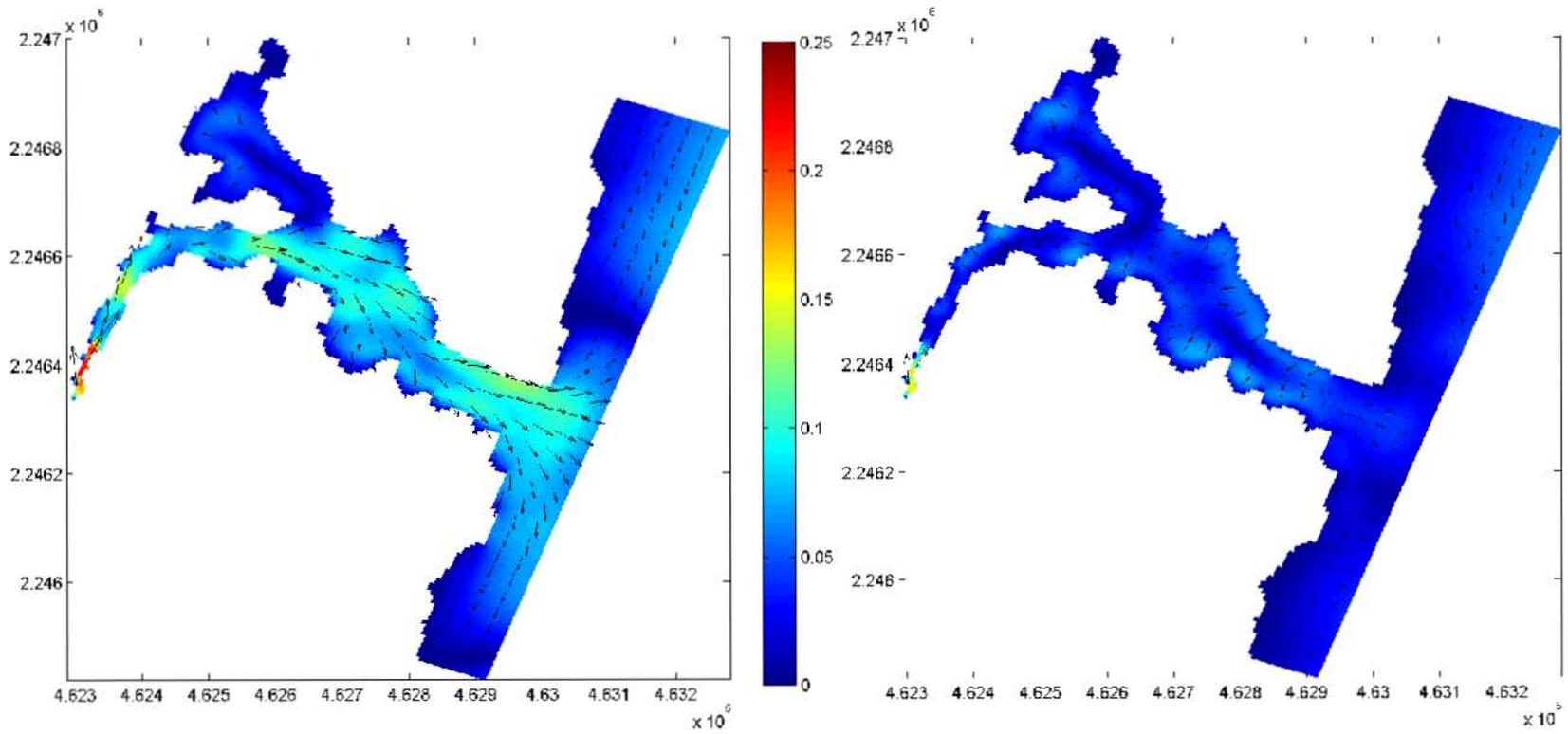


Figura 5.10: Corrientes residuales [m s^{-1}] del Experimento 01 para las capas superior (izquierda) e inferior (derecha). Los gráficos contienen 1 de cada 5 vectores de velocidad para una mayor claridad en los patrones de transporte.

En el fondo de la cabeza sur, cerca de la descarga de agua, la velocidad residual presenta la misma dirección que en superficie aunque con menor magnitud (0.18 m s^{-1}) (Figura 5.10b); sin embargo, después de la estación del puente, la dirección de la velocidad cambia, siendo perpendicular a la costa (oeste-este). Cerca de las coordenadas 462500 O y 2246600 N se crea una convergencia en el fondo, por un lado está la corriente que se dirige del sur de la cabeza hacia la laguna y por el otro, la corriente proveniente del mar y con dirección hacia tierra adentro; en este punto, la velocidad residual es mínima.

En el fondo de la cabeza norte la dirección de la velocidad es completamente opuesta a la superficial y continúa presentándose la zona de poca circulación (Figura 5.10b). En el centro y boca de la laguna la velocidad residual se dirige del mar hacia adentro del sistema y su magnitud es de $\sim 0.03 \text{ m s}^{-1}$ y $\sim 0.06 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Al incluir el forzamiento por el viento y comparar los Experimentos 01 y 05, se puede observar el mismo patrón de dirección de la velocidad residual en la capa superior en ambos experimentos; aunque la magnitud es menor para E05, principalmente en el centro y la boca pero ligeramente mayor en la cabeza norte (Figuras 5.10 y 5.11). De igual forma, en la capa del fondo la dirección de la velocidad residual es la misma y la magnitud menor en E05 con excepción de la cabeza norte.

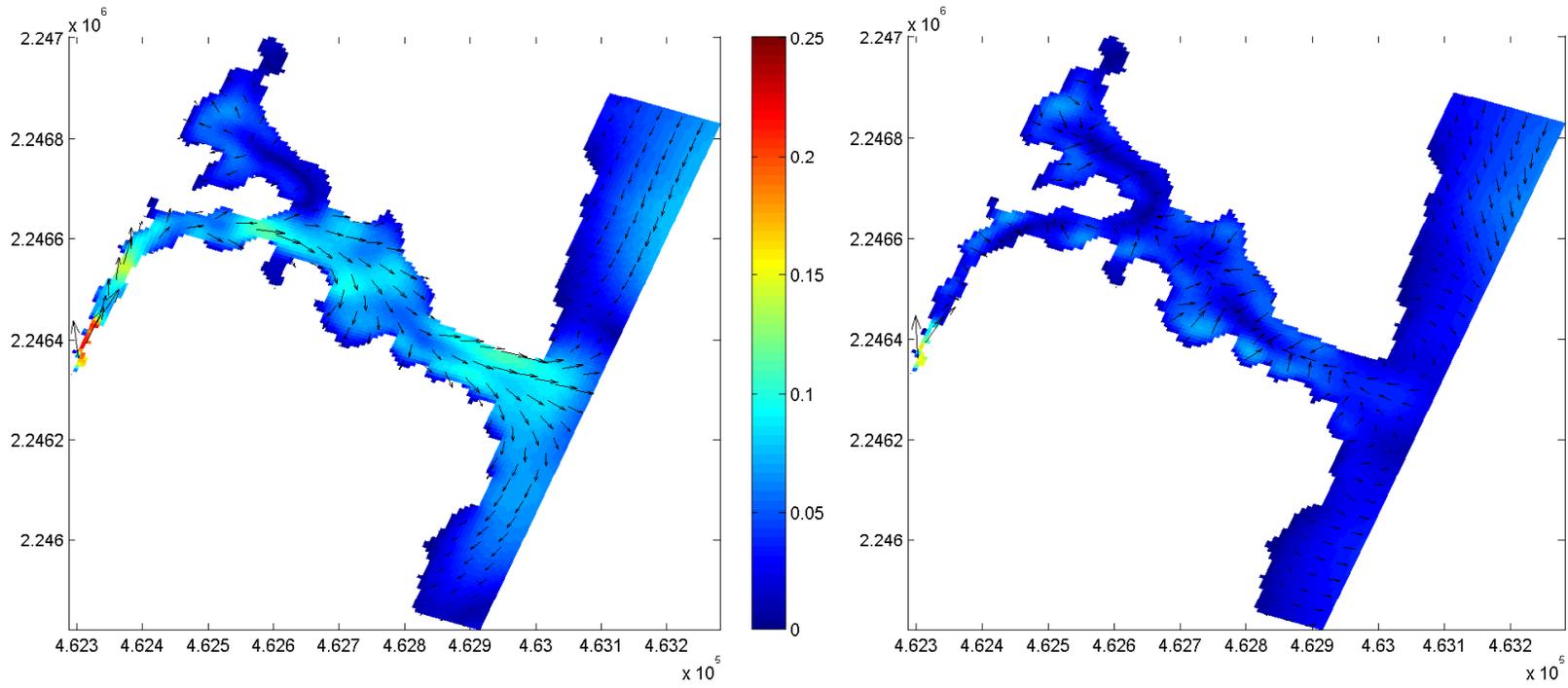


Figura 5.11: Corrientes residuales [$m s^{-1}$] del Experimento 05 para las capas superior (izquierda) e inferior (derecha). Los gráficos contienen 1 de cada 5 vectores de velocidad para una mayor claridad en los patrones de transporte.

5.5. Tiempo de residencia

Las cuatro simulaciones realizadas que tomaron en cuenta la fase de la marea para estimar los tiempos de residencia mostraron pocas diferencias entre sí (Tabla 5.3); razón por la cual, a continuación se hace la descripción de los resultados al promediar los valores de las simulaciones.

Tabla 5.3: Valores máximos para los tiempos de residencia de acuerdo a las fases de la marea. Simulaciones forzadas con series de tiempo de tipo harmónico con frecuencia de 30° h^{-1} y amplitud de 0.2 m, descarga alta de $2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y viento del SE.

Experimento	Tiempo de residencia máximo [h]	
	Superficie	Fondo
TR01 (pleamar)	10.5	10.66
TR02 (vaciante)	9.83	10
TR03 (bajamar)	10.5	10.83
TR04 (llenante)	11.16	11.66
Promedio	10.5	10.79

La Figura 5.12 muestra la distribución espacial en la capa superficial del tiempo (en horas) tomado para que la masa del trazador conservativo cayese a una concentración $\sim 37\%$. Las localidades río y puente, en la cabeza sur, son las zonas en las cuales se reduce la concentración más rápidamente, casi de manera inmediata. En la boca y el canal lagunar, el tiempo de residencia toma un rango de entre 3 y 6 horas, respectivamente. En el centro de la laguna, la escala temporal es de 7-8.5 horas. En la cabeza norte se presentan los mayores tiempos, con valores alrededor de 10 horas.

Por otro lado, en el fondo, el tiempo de residencia de la localidad río es mayor que en la superficie (aumenta a 4.5 h) y se confina más hacia el sitio de la descarga, aumentando rápidamente hasta 7.5 h; a continuación, predomina en gran parte de la cabeza sur un tiempo de residencia ~ 9 h (Figura 5.13). En esta capa de fondo, la parte central de la laguna: la boca, el canal y el centro de la laguna se mantienen prácticamente iguales que en superficie, solamente aumentando cerca de media hora el tiempo de residencia en el fondo. De la misma manera, la cabeza norte obtiene los valores más altos, con 11 horas como máximo en su parte septentrional.

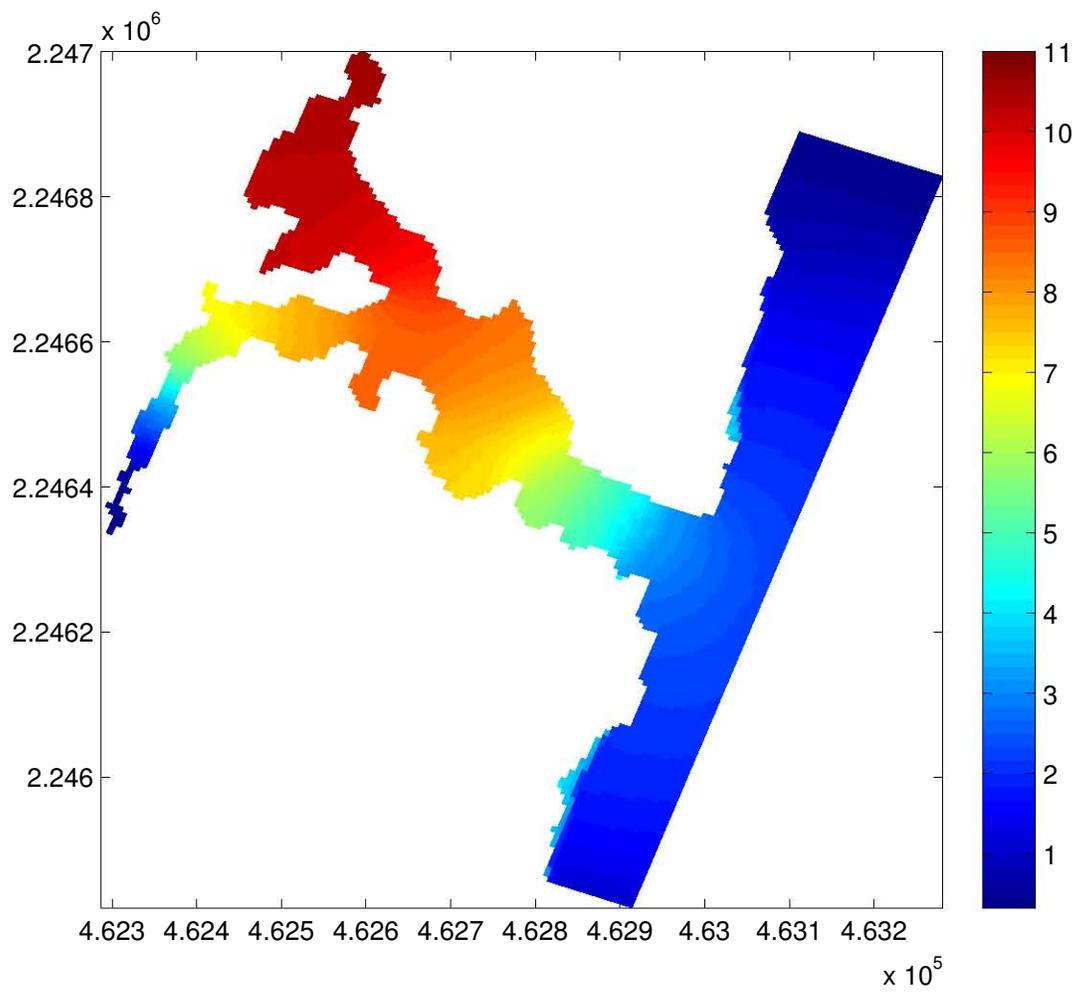


Figura 5.12: Distribución espacial del tiempo de residencia (horas) para la capa superficial de la laguna Xel-Há.

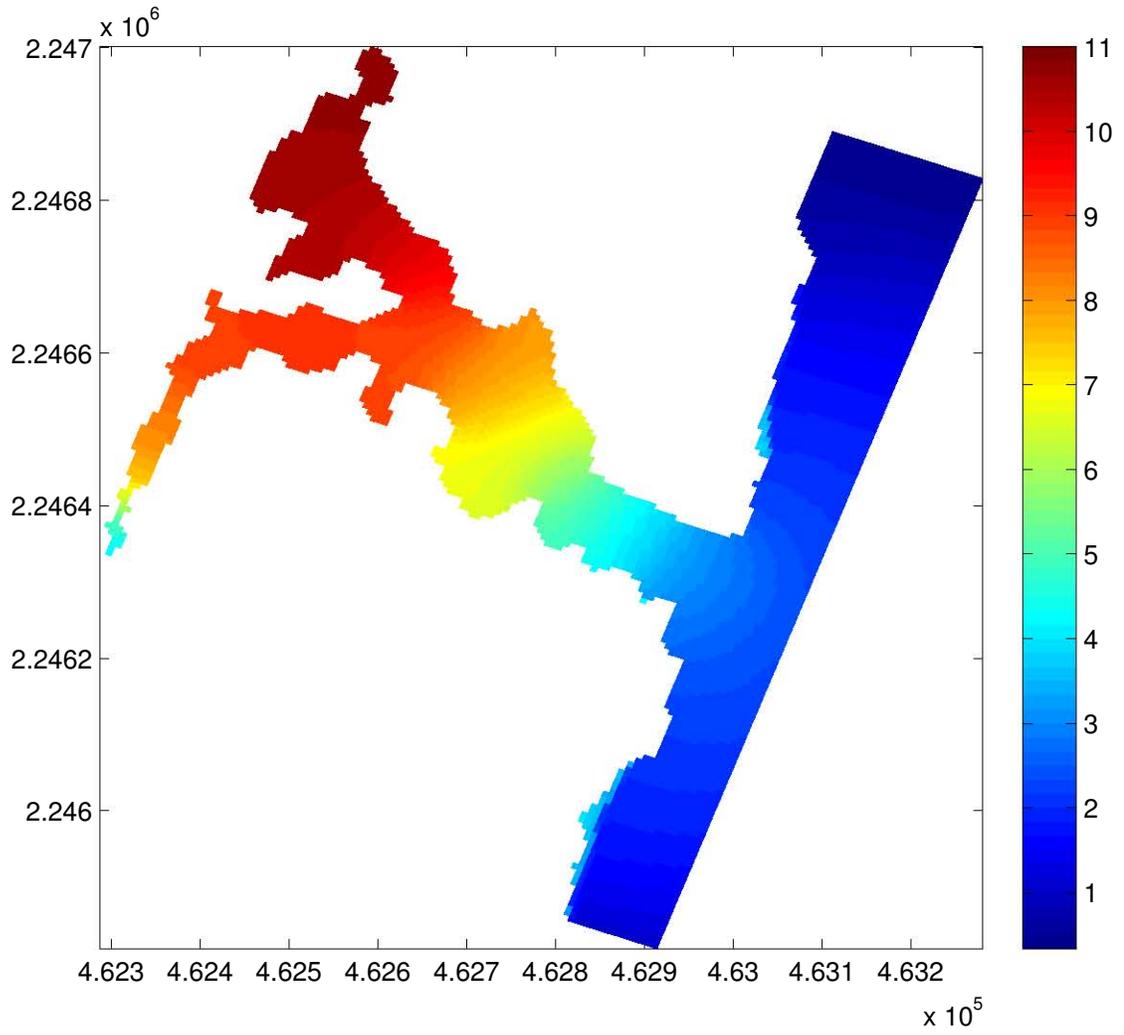


Figura 5.13: Distribución espacial del tiempo de residencia (horas) para la capa del fondo en Xel-Há.

Capítulo 6

Discusión

6.1. Características hidrodinámicas

La distribución de salinidad dentro de Xel-Há muestra un sistema estuarino altamente estratificado. Hay un aporte de agua continental importante en la cabeza sur de la caleta que fluye de forma persistente hasta la boca del estuario; en este último sitio el agua de mar penetra y se adentra en todo el sistema. El gradiente de salinidad es marcado y existe tanto en la horizontal (desde la boca hacia el río) como en la vertical durante todo el ciclo de marea.

El diseño del muestreo permitió hacer comparaciones entre los resultados obtenidos de los anclajes con aquellos de los perfiles para una misma estación y entre estaciones; lo que a su vez permitió diferenciar el comportamiento de la cabeza sur del resto de la caleta para todas las variables medidas en el estudio.

En el estudio realizado por Aldana *et al.* (2016) donde miden salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en fondo y superficie de diferentes estaciones en Xel-Há a lo largo de un año, no encuentran diferencias significativas entre temporadas. Lo anterior sugiere que los resultados obtenidos de los mismos parámetros fisicoquímicos en el presente estudio son representativos de las condiciones hidrodinámicas del sistema estuarino Xel-Há.

De forma distinta, la salinidad en la superficie de la boca se ve influenciada tanto por el aporte de agua continental como por el efecto de la marea. Las diferencias entre los resultados de los anclajes y las mediciones del perfil de columna de agua en este sitio se deben a la colocación del *diver* por debajo de la haloclina y no en superficie. Al analizar

de manera integral los resultados de la boca, se puede confirmar la alta estratificación del estaurio incluso en marea alta.

La menor variabilidad de la salinidad en la cabeza norte indica que tiene menor influencia del aporte de agua dulce, lo que concuerda con lo reportado por Back *et al.* (1979), donde mencionan que el sur de la cabeza es más activa que el norte tanto geoquímicamente como hidrológicamente. Esto, a su vez, se ve reflejado en el mayor tiempo de residencia que presenta dicha zona.

El comportamiento de la temperatura en la caleta indica que está dominada por el calentamiento diurno por radiación solar y por el efecto de la marea en la cabeza sur. La región central de la laguna, seguida de la región norte de la cabeza lagunar, son más susceptibles al calentamiento diurno. La menor temperatura en la cabeza sur se debe a la presencia de la descarga de agua continental, que aflora del subsuelo como descarga submarina del acuífero (DSA). Dado que el origen de esta agua es subterráneo y que no está expuesta a la radiación solar directa esta tiene menor temperatura y menor variabilidad.

La diferencia de temperatura en la columna de agua de la boca, menor en superficie que en fondo, concuerda con las mediciones de salinidad, indicando la influencia del agua de aportes continentales en la superficie, que son de menor salinidad y menor temperatura.

Por otra parte, la correspondencia de valores más altos de oxígeno disuelto en el fondo, en masas de agua de mayor salinidad y temperatura, se explica precisamente con su fuente de origen; ya que al proceder del mar, esta masa de agua interactúa directamente con la atmósfera e intercambia gases mediante procesos como el oleaje, presentando mayor oxigenación en comparación con el agua subterránea.

En este sentido, se evidencia la gran importancia de la conexión permante y libre con el mar, puesto que la marea es el agente que introduce oxígeno al sistema y procesos como la advección y la difusión se encargan de redistribuirlo en la columna de agua (Uriarte *et al.*, 2014). El perfil de salinidad de la cabeza norte (Figura 5.3), donde la inestabilidad causada por bajamar y las diferencias por los gradientes de densidad mezclan la columna de agua, ejemplifica perfectamente lo anterior.

Los valores tan bajos de oxígeno disuelto en la cabeza sur ($\sim 2 \text{ mg L}^{-1}$ e incluso con valores mínimos de 1.9 mg L^{-1}) resultan preocupantes ya que de acuerdo a Diaz (2016), concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de los rangos de $2\text{-}3 \text{ mg L}^{-1}$ en ecosistemas marinos y estuarinos y de $5\text{-}6 \text{ mg L}^{-1}$ en ecosistemas dulceacuícolas, constituyen

condiciones de hipoxia. La magnitud y duración de los eventos de hipoxia en estuarios se encuentran en un rango que va desde eventos de corta duración a eventos temporales que duran meses y, en casos extremos, la hipoxia puede llegar a ser una característica permanente (Eldridge y Roelke, 2011).

En el estudio de Aldana *et al.* (2106), identifican el oxígeno disuelto como la variable que explica el 63 % de la varianza de abundancia de peces por zonas en Xel-Há; por encima de la temperatura (56 %) y la salinidad (54 %). Además, estas variables no presentan diferencias significativas entre temporadas pero crean un gradiente en la abundancia de peces entre zonas, que va de la boca al río; reflejando la gran importancia que tiene el oxígeno disuelto para la distribución de la biota en el sistema.

Lo anterior, aunado a los resultados de los perfiles de oxígeno disuelto, permite presentar la hipótesis de una condición de hipoxia perenne en la cabeza sur, que se da de manera natural y que es característica de Xel-Há debido a la alta descarga de agua subterránea pobre en oxígeno y a la interacción con la marea de poca amplitud que inhibe, justamente en esa zona, la mezcla de la columna de agua y por ende, se produce la mayor estratificación de todo el sistema.

No obstante, es imprescindible realizar más muestreos similares al efectuado en el presente trabajo (con una definición muy precisa en la medición de las variables tanto longitudinalmente como verticalmente) por un periodo de tiempo mayor para confirmar o refutar la hipótesis expuesta. De acuerdo a estudios sobre la circulación regional en el oeste del mar Caribe (Carrillo *et al.*, 2016), la salinidad de las aguas costeras en esta región se ven modificadas por precipitación, escorrentía, surgencias y descargas submarinas del acuífero; efectos controlados en gran medida por variación estacional.

La hipoxia de Xel-Há también se caracteriza por ser mayor en superficie y no en el fondo, como suele ocurrir en la mayoría de los estuarios que comparten tal condición (Eldridge y Roelke, 2011; Xu *et al.*, 2013; Uriarte *et al.*, 2014). Esto se debe a que, en este caso, el agua marina presenta mayor oxigenación que el agua continental. Esta podría ser la clave del éxito y salud del estuario de Xel-Há, un sistema con tiempos de residencia muy pequeños, cuya estratificación le permite continuamente bombear agua rica en oxígeno hasta el sitio de descarga de agua, que a pesar de ser baja en oxígeno, se ve obligada a permanecer en la superficie donde rápidamente puede ser oxigenada por la acción del viento.

Ya que Xel-Há recibe grandes aportes de aguas subterráneas y dadas las condiciones de drenado de aguas residuales y la rápida infiltración de la escorrentía por la porosidad de

la roca calcárea de la Península de Yucatán. Aunado a que se ha reportado que los sitios con descargas de aguas subterráneas en las costas de la Riviera Maya presentan altas concentraciones de nitratos (Carrillo Bibriezca *et al.*, 2008). Se considera la eutrofización como una posible amenaza para el sistema Xel-Há; por lo que es importante llevar a cabo un monitoreo permanente de la calidad del agua en el que se midan variables como: nitritos, nitratos, fosfatos, amonio, pH, OD y clorofila. Con esta información, además de conocer las condiciones instantáneas del sistema, lo cual es importante por el uso turístico que tiene; también se puede crear una base de datos útil para realizar más estudios y buscar posibles relaciones entre las variables físicas y su efecto en el comportamiento de los organismos que habitan la caleta.

A su vez, es necesario realizar más estudios para identificar todos los sitios de descarga de agua subterránea y estimar sus volúmenes. Aunado a esto, es necesario que trabajos futuros realicen experimentos numéricos que involucren escenarios extremos, que en el presente estudio no fueron incluidos, con forzamientos como marea de tormenta, fuertes vientos provenientes del norte, huracanes, entre otros que pudiesen modificar la circulación y las condiciones de estratificación.

El modelo numérico Delft3D implementado en este estudio fue validado a partir de las mediciones *in situ* durante la estación de secas para simulaciones de corta duración (< 5 días); por lo que se considera que es representativo del sistema estuarino Xel-Há para esta temporalidad. Es imprescindible realizar muestreos similares al efectuado en este estudio durante las estaciones de lluvias y nortes para integrar la variación estacional al modelo; así como medir dirección y magnitud de las corrientes y encontrar la configuración que mejor represente escenarios de corta y larga duración para una validación más extensiva.

Los resultados de todos los experimentos numéricos mostraron que la velocidad residual siempre es mayor en la capa superficial que en fondo; sin embargo, las diferencias entre los experimentos para una misma capa corresponden exclusivamente al tipo de descarga (alta o baja), sin mostrar cambios por efecto de la marea astronómica (viva o muerta) o viento del sureste, para este parámetro. Por lo anterior, estudios numéricos que consideren este tipo de variables son también recomendaciones para trabajos futuros.

En la capa superficial, la descarga de agua continental determina la dirección de los flujos de casi toda la laguna, excepto en la cabeza norte, donde tiene la menor influencia. Mientras que en la capa del fondo, la circulación residual parece responder a la interacción con la batimetría de la caleta para la mayor parte del sistema, exceptuando el sitio de descarga

de agua, donde este fenómeno domina la circulación. Asimismo, el viento del sureste tiene influencia negativa en la magnitud de la velocidad residual en ambas capas, disminuyéndola en la cabeza sur, centro y boca, pero favoreciéndola en la cabeza norte.

De acuerdo a Valle-Levinson (2011), la circulación estuarina es el resultado de la interacción de tres factores: la circulación residual de la marea, la circulación ocasionada por la mezcla vertical por asimetría de la marea y, la circulación gravitacional; esta última impulsada por la descarga del río y los gradientes de densidad. A su vez, este autor menciona que en aquellos casos en que la circulación debida a la rectificación mareal y a la mezcla por asimetría de la marea es insignificante, la circulación estuarina será equivalente a la circulación gravitacional.

Ahora bien, cabe subrayar algunas características de Xel-Há previamente descritas: marea de pequeña amplitud, en fase en todo el sistema y con ligera atenuación; velocidades residuales más altas cerca de la descarga de agua y valores muy bajos en zonas con menor influencia de la misma; así como alta estratificación.

Aunado a la presencia de las características anteriores y su interacción en el sistema; se ha visto que en pequeños estuarios micromareales altamente estratificados, los efectos de las corrientes micromareales en sus características físicas son relativamente pequeños (Ljubenkoy, 2015). Lo que sugiere que los flujos residuales de la marea y la mezcla vertical por asimetrías de la misma son pequeños. De este modo, de acuerdo a lo propuesto por Valle-Levinson (2011), la circulación estuarina del sistema Xel-Há durante la temporada de secas estará dada en gran medida por la circulación gravitacional.

6.2. Tiempo de residencia

El tiempo de residencia en Xel-Há presenta diferencias entre las capas de fondo y superficie, siendo menores en esta última capa. Sin embargo, la mayor variación se presenta horizontalmente (la variación vertical más notable se presenta solamente en la cabeza sur y su zona aledaña que conecta con el centro de la caleta). Asimismo, no se observaron grandes cambios atribuidos a la fase de la marea y el momento en que se iniciaron las simulaciones. De esta manera, los resultados del presente estudio concuerdan con los obtenidos por Clavero (2011).

El menor tiempo de residencia (≤ 1 h) se encuentra en la capa superficial, donde se sitúa la descarga de agua subterránea; en este sitio el tiempo es incluso menor que en la boca (~ 3 h). Por otro lado, el mayor tiempo de residencia ocurre en la cabeza norte, en su parte más septentrional, donde llega a sobrepasar las 11 h. En este sentido, el tiempo de residencia del sistema sigue un gradiente que va de la cabeza sur, boca y canal lagunar, centro y cabeza norte. Lo anterior tiene sentido, puesto que se ha visto que en las zonas cercanas a la desembocadura de los ríos, así como en la boca estuarina los tiempos de residencia son más cortos; mientras que en zonas más adentradas a tierra, con menor influencia del río y/o poca circulación, los tiempos de residencia son mayores (Clavero, 2011; Uriarte *et al.*, 2014; Mahanty *et al.*, 2016).

A pesar de las diferencias espaciotemporales, el tiempo de residencia del sistema es sumamente corto, puesto que es capaz de diluir la concentración de un trazador sintético en el modelo en menos de un ciclo de marea. Esto se debe principalmente a varias características del sistema: a) es de dimensiones muy pequeñas (apenas 0.3 km^2); b) el volumen de la descarga de agua es considerable, tomando en cuenta las dimensiones de la caleta, lo que reduce los tiempos de residencia (Uriarte *et al.*, 2014) y; c) de acuerdo a Rynne *et al.* (2016), la configuración geométrica del *inlet* (ancho, largo y profundidad) tiene efectos en el intercambio de la fracción mareal, siendo mayor el intercambio de las fracciones de agua lagunar y oceánica en *inlets* pequeños, lo que también reduce el tiempo de residencia (Rasmussen y Josefson, 2002).

Capítulo 7

Conclusiones

La caleta de Xel-Há presenta un sistema estuarino altamente estratificado con dos masas de agua de densidades y temperaturas diferentes. La circulación está dominada por la descarga de agua continental que aflora del subsuelo en la cabeza sur del sistema. De este modo, los gradientes de densidad se presentan tanto en la vertical como en la horizontal y se ven influenciados por la oscilación de la marea en la localidad que es semidiurna, de pequeña amplitud, y se adentra en el sistema en fase con una ligera atenuación conforme se aleja de la boca.

La temperatura del sistema está controlada por calentamiento diurno debido a la radiación solar. El agua subterránea posee menor temperatura que la marina; así, la capa de superficie presenta menor salinidad y temperatura, mientras que la capa del fondo presenta mayor densidad y temperatura. El oxígeno disuelto en el sistema es introducido por la marea; la fuerte estratificación impide que este se distribuya a lo largo de la columna de agua, presentando valores más altos en la capa del fondo que en superficie.

Todas las variables medidas mostraron un comportamiento distinto para la cabeza sur, diferenciándola del resto de la laguna. Tal es el caso de la condición de hipoxia presente en este sitio, sin embargo la descarga de agua proporciona la mayor circulación del sistema, reduciendo el tiempo de residencia en este sitio.

En superficie, la circulación está dominada por la descarga de agua que tiene influencia incluso en la boca del estuario pero no en la cabeza norte. El viento moderado del sureste disminuye la magnitud de la circulación en casi toda la laguna, aumentándola solamente en la cabeza norte.

En la capa del fondo, la circulación del sitio cercano a la descarga de agua se ve influenciado por esta última; mientras que en el resto de la laguna la circulación responde a las corrientes inducidas por la marea y su interacción con el fondo.

El tiempo de residencia del agua en Xel-Há presenta variación horizontal y vertical, siendo más marcado el gradiente horizontal. El mayor tiempo de residencia se presenta en la parte septentrional de la cabeza norte, correspondiendo a ~ 11 h. En general, el tiempo de residencia del sistema es muy corto (menor a un ciclo de marea, inclusive) debido a su configuración morfológica y la descarga de agua continental, lo cual indica la buena circulación del estuario.

El presente estudio permitió caracterizar la hidrodinámica del sistema estuarino de Xel-Há; sin embargo, es necesario realizar más muestreos con un diseño similar al aquí efectuado para describir en mayor medida el funcionamiento del sistema bajo condiciones extremas y corroborar algunas de las hipótesis expuestas.

Finalmente, se ha evidenciado que la descarga de agua continental tiene un efecto dominante en la hidrodinámica del estuario; por lo que se recomienda mantener el monitoreo del volumen y la calidad del agua para prevenir la posible degradación del sistema. Asimismo, se deben evitar obras o actividades que modifiquen la configuración original del sistema y/o su hidrodinámica (i.e. modificaciones estructurales de la caleta, infraestructura dentro de la caleta y espigones y rompeolas en la porción marina, por mencionar algunos). En caso de que obras o actuaciones similares a las referidas sean indispensables, se recomienda que estas tomen en cuenta los resultados del presente trabajo.

Capítulo 8

Bibliografía

- Aldana, A., Montero, J. M. y Aldana, D. (2016). Spatio-temporal variation of the ichthyofauna in Xel-Ha, Mexican Caribbean Marine Park and its relationship to physico-chemical parameters. *Revista de Biología Tropical*, 64(4):1353-1367.
- Back, W., Hanshaw, B. B., Pyle, T. E., Plummer, L. N. y Weidie, A. E. (1979). Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel Ha, Quinta Roo, Mexico. *Water Resources Research*, 15(6):1521-1535.
- Batllore, E. (2016). Condiciones actuales del agua subterránea en la Península de Yucatán. En Chávez, M. (Ed.). *El manejo del agua a través del tiempo en la Península de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Beddows, P. A. (2004). *Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonate aquifer: Caribbean coast of the Yucatán Peninsula, México*. Tesis de Doctorado, Universidad de Bristol.
- Biocenosis A. C. (s.a.). Manifestación de Impacto Ambiental Particular. Ampliación de estacionamiento para autos y autobuses y construcción de Casa para Guías y Choferes en el Parque Natural Xel-Há. En: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/qroo/estudios/2004/23QR2004T0036.pdf> Consulta 24/03/2014.
- Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenga, C., Spalding, M. y McAllister, D. (2001). *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Coastal Ecosystems*. World Resources Institute, Washington, D. C.

- Cárdenas, S. (2007). *Modelación hidrodinámica de la laguna costera El Colorado, Ahome, Sinaloa*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional.
- Carrillo, L., Johns, E., Smith, R., Lamkin, J. y Largier, J. (2015). Pathways and hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, 109:164-176.
- Carrillo, L., Johns, E., Smith, R., Lamkin, J. y Largier, J. (2016). Pathways and hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 2: Water masses and thermohaline structure. *Continental Shelf Research*, 120:41-58.
- Carrillo Bibriezca, L. E., Ortiz Hernández, M. C., Ramírez Manguilar, A. M., Zavala Mendoza, A., Yescas Corona, M. A., González Lejía, A., Marrufo, M., Medina Esquilano, R. A., Morales Soto, R., Morales Gutiérrez, S., Palacios Hernández, E., Sheinbaum, J., Zavala, J. (2008). Estudio de la calidad del agua y dispersión de contaminantes en la zona costera de la Riviera Maya (Playa del Carmen, Quintana Roo). Informe Técnico. CONACyT-CONAGUA, pp. 121 http://www.ocean-ecosur.com/images/ofe/publicaciones/pdf/informes/INFORME%20FINAL%20CNA-2004-C02-3_ANEX01.pdf.
- Chiappa-Carrara, X., Sanvicente-Añorve, L., Monreal-Gómez, A. y Salas de León, D. (2003). Ichthyoplankton distribution as an indicator of hydrodynamic conditions of a lagoon system in the Mexican Caribbean. *Journal of Plankton Research*, 25(7):687-696.
- Choi, K. y Lee, J. (2004). Numerical determination of flushing time for stratified water bodies. *Journal of Marine Systems*, 50(3):263-281.
- Clavero, G. (2011). *Comparación entre los tiempos de residencia calculados por métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao)*. Tesina de especialidad. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Deltares. (2014a). *Delft3D, Functional Specifications*. Delft, The Netherlands.
- Deltares. (2014b). *RGFGRID, User Manual*. Delft, The Netherlands.
- Deltares. (2014c). *QUICKIN, User Manual*. Delft, The Netherlands.
- Deltares. (2014d). *Delft3D-FLOW, User Manual*. Delft, The Netherlands.
- Diaz, R. J. (2016). Anoxia, hypoxia and dead zones. En Kennish, M. J. (Ed.). *Encyclopedia of Estuaries*. Springer Netherlands, Dordrecht.

- Diop, S., Scheren, P. y Ferdinand Machiwa, J. (Eds.). (2016). *Estuaries: A Lifeline of Ecosystem Services in the Western Indian Ocean*. Estuaries of the World. Springer International Publishing.
- Eldridge, P. y Roelke, D. (2011). Hypoxia in waters of the coastal zone: Causes, effects, and modeling approaches. En Wolanski, E. y McLusky, D. (Eds.). *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham.
- Experiencias Xcaret. (2014). En: http://www.xcaretexperiencias.com/nuestra_empresa.php Consulta 25/02/2014.
- Experiencias Xcaret Parque. (2016). En: <http://es.xelha.com/sustentabilidad-xelha.php> Consulta 14/10/2016.
- Geyer, W. y Ralston, D. (2011). The Dynamics of Strongly Stratified Estuaries. En Wolanski, E. y McLusky, D. (Eds.). *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham.
- Ghermandi, A., Nunes, P., Portela, R., Rao, N. y Teelucksingh, S. (2011). Recreational, cultural, and aesthetic services from estuarine and coastal ecosystems. En Wolanski, E. y McLusky, D. (Eds.). *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham.
- Hansen, D. V. y Rattray, M. (1966). New Dimensions in Estuary Classification. *Limnology and Oceanography*, 11(3): 319-326.
- Hernández, L. y Sánchez, P. (2012). Caracterización del agua en la laguna costera de Yal ku, en el Caribe mexicano. En Sánchez, A., Chiappa, X. y Brito, R. (Eds.). *Recursos acuáticos costeros del sureste*. Recorecos, Mérida, pp. 131-146.
- Herrera J. (2006). Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *ECOTROPICOS*, 19(2): 94-108.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Cozumel, Quintana Roo.
- Kambesis, P. N. y Coke IV, J. G. (2011). Overview of the Control on Eogenetic Cave and Karst Development in Quintana Roo, Mexico. En Lace, M. J. y Mylroie, J. E. (Eds.). *Coastal Karst Landforms*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Ljubenkov, I. (2015). Hydrodynamic modeling of stratified estuary: case study of the Jadro River (Croatia). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(1):29-37.

Lucas, L. V. (2016). Residence Time. En Kennish, M. J. (Ed.). *Encyclopedia of Estuaries*. Springer Netherlands, Dordrecht.

Mahanty, M., Mohanty, P., Pattnaik, A., Panda, U., Pradhan, S. y Samal, R. (2016). Hydrodynamics, temperature/salinity variability and residence time in the Chilika lagoon during dry and wet period: Measurement and modeling. *Continental Shelf Research*, 125: 28-43.

Marín, E. J. (2016). *Modelación de la hidrodinámica de un sistema lagunar en humedal costero con descargas de agua subterránea (DAS) y su relación con la distribución de algunas especies de ictiofauna*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

Marín-Coria, E. y Enríquez, C. (2016). Variaciones de temperatura y salinidad en el sistema lagunar La Carbonera, Yucatán, México. *Revista digital E-BIOS*, 11:35-45. NÚMERO ESPECIAL NO. 4, AÑO 6. ISSN: 2007-5782. 35 – 45.

Mariño I. y Enríquez, C. (2011). Estudios batimétricos, hidrodinámicos y de calidad de agua en lagunas costeras de Yucatán. Reporte Técnico, Fondo mixto –CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán, Clave: 000000000066254. 121p.

Nash, J. y Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282-290.

Noguez, M. y Aldana, D. (2014). Basic eco-ethology of the queen conch, *Strombus gigas* (Mesogastropoda: Strombidae) in Xel-Há, Yucatán, Mexican Caribbean. *Revista de Biología Tropical*, 62(3):215-222.

Pritchard, D. (1952). Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, 11(2):106-123.

Promotora Xel-Há. (2007). Balance social y ambiental 2007. En: <http://www.rodolfozagahon.com/docs/balancexh.pdf> Consulta: 25/02/2014.

Rasmussen, B. y Josefson, A. (2002). Consistent estimates for the residence time of microtidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(1):65-73.

Robles, J. y Enríquez, C. (2016). Variación termohalina en el estuario Xel-Há en relación a las mareas. *Revista digital E-BIOS*, 11:102-109. NÚMERO ESPECIAL NO. 4, AÑO 6. ISSN: 2007-5782.

Ruiz de Alegria-Arzabulu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva-Casarín, R. y González-Leija, M. (2012). Morphodynamics of a caribbean fringed beach by a coral reef. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), sediment. 119.

Rynne, P., Reniers, A., van de Kreeke, J. y MacMahan, J. (2016). The effect of tidal exchange on residence time in a coastal embayment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172:108-120.

SEDETUR. (2017). Indicadores turísticos 2016. En: <http://sedetur.groo.gob.mx/estadisticas/indicadores/2017/Indicadores%20Tur%20-%20Enero%20-%20Diciembre%202016.pdf>

Soler-Bientz, R., Watson, S. e Infield, D. (2009). Preliminary study of long-term wind characteristics of Mexican Yucatan Peninsula. *Energy Conversion and Management*, 50(7):1773-1780.

Tenorio-Fernández, L., Gómez-Valdés, J., Mariño-Tapia, I., Enríquez, C., Valle-Levinson, A. y Parra, S. (2016). Tidal dynamics in a frictionally dominated tropical lagoon. *Continental Shelf Research*, 114:16-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2015.12.008>.

Trujillo, A. P. y Thurman, H. V. (2011). *Essentials of Oceanography* (10^a ed.). Pearson.

Uriarte, I., Villate, F., Iriarte, A., Duque, J., Ameztoy, I. (2014). Seasonal and axial variations of net water circulation and turnover in the estuary of Bilbao. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 150:312-324. Special issue on Problems of Small Estuaries.

van Ballegooyen, R., Taljaard, S., van Niekerk, L. y Huizinga, P. (2004). Using 3D modeling to predict physico-chemical responses to variation in river inflow in smaller, stratified estuaries typical of South Africa. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6):563-577.

Valle-Levinson, A. (2010). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.

Valle-Levinson, A. (2011). Classification of estuarine circulation. En Wolanski, E. y McLusky, D. (Eds.). *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham.

Xu, X., Ishikawa, T. y Nakamura, T. (2013). Three-dimensional modeling of hydrodynamics and dissolved oxygen transport in Tone River estuary. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 1(1):194-213.