



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
OCEANOGRAFÍA FÍSICA

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

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

ETZAGUERY JANETH MARIN CORIA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTIZ

UNIDAD MULTIDISCIPLINARIA DE DOCENCIA E INVESTIGACIÓN. SISAL, YUCATÁN

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. XAVIER CHIAPPA CARRARA

UNIDAD MULTIDISCIPLINARIA DE DOCENCIA E INVESTIGACIÓN. SISAL, YUCATÁN

DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, XOCHIMILCO.

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

DR. DANIEL ARCEO CARRANZA

UNIDAD MULTIDISCIPLINARIA DE DOCENCIA E INVESTIGACIÓN. SISAL, YUCATÁN

SISAL, YUCATÁN DICIEMBRE DE 2016



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.

Sin dudas no hay progreso.

Charles Darwin

A mis amados padres:

Francisca Coria Sánchez

Francisco Marín Crisóstomo

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Unidad Académica Yucatán. Se agradece a esta última por proporcionar el material de campo y el transporte para las salidas.

Sin intención de dar orden en importancia, rindo algunas palabras a aquellas personas que estuvieron presentes durante la elaboración de mi tesis de maestría.

Doy las gracias a los miembros de mi comité tutorial por los acertados comentarios, sugerencias y aportaciones mencionadas en la evaluación de la presente tesis. A mi directora de tesis la Dra. Cecilia Elizabeth Enríquez Ortiz por su guía, apoyo e incontables enseñanzas, risas y calma en momentos de estrés. Agradezco al Dr. Javier Aldeco, mi amigo y sensei, por sus tantas palabras y ánimos para que yo decidiera entrar a la maestría y concluirla, además de guiarme y ser crítico en lo que depara mi futuro, gracias por su amistad incondicional. Al Dr. Xavier Chiappa por sus comentarios a mi tesis y su cordialidad en mi estancia en Yucatán, además de su gran aporte a mi enseñanza en el área físico-biológica, y agradezco mucho los momentos de risas en la escuela. Al Dr. Arceo por su tiempo y enseñanzas para afinar los detalles de la parte biológica de mi tesis. Y al Dr. Rodolfo Silva por sus acertados y certeros comentarios sobre la importancia de mi tesis con sus limitaciones y posibles alcances.

Un sincero agradecimiento a la Unidad Académica Yucatán por el recibimiento y las incontables horas hombre que me permitió estar en sus aulas trabajando para terminar la tesis.

En mi estancia en Yucatán percibí hermosos atardeceres, contemplé miles de flamings volar sobre el inmenso cielo, tantos granos de arena tocaron mis pies sobre la playa, encontré una familia en el bello Puerto de Sisal, amigos pescadores y amigos en la unidad académica, que me brindaron momentos de descomunal alegría y sosiego. Agradezco con el alma a mi hermana y amiga Elizabeth Coria, por acompañarme a distancia al inicio de la

maestría y en presencia al final de la misma, gracias por tu presencia en tantas alegrías y tristezas. Y sobre todo agradezco el apoyo a distancia brindado por mi familia, mi madre y padre que siempre estuvieron para apoyarme y nunca me dejaron sola, por preocuparse de mí y por apoyarme para irme a estudiar a Yucatán; a mis hermanas: Lupe gracias por mostrar siempre interés en lo que amo en la vida y por hacerme reír tanto, Nancy gracias por mantenerte en contacto y siempre darme fuerza, Karina gracias por escucharme y por las sonrisas; tienen como yo de ustedes amistad y hermandad incondicional. A mis pequeñas sobrinas (Ximena, Fernanda, Gretel y Quetzalli) y mis cuñados Luis y Marco, gracias por los ánimos, sonrisas y confianza en mi persona, significan mucho para mí. Gracias también Xurxo, por acompañarme y ser parte indispensable de mis alegrías en el bello Puerto de Sisal.

Agradezco a todos quienes me ayudaron a mantener en orden las ideas para concluir la tesis a lo largo de estos años.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	ANTECEDENTES	2
i	Estudios hidrodinámicos.....	2
ii	Estudios biológicos	5
1.2.	OBJETIVO GENERAL.....	6
i	Objetivos específicos	6
2.	MARCO TEÓRICO	7
2.1.	Las lagunas costeras.....	7
2.2.	Lagunas costeras del estado de Yucatán	8
2.3.	Península de Yucatán	9
2.4.	Climatología de la Península de Yucatán.....	10
i	Forzantes atmosféricos que afectan la hidrodinámica	10
ii	Forzantes oceanográficos que afectan la hidrodinámica	12
2.5.	Relación de la hidrodinámica con las comunidades de peces.....	13
2.6.	Modelación numérica para estudiar la hidrodinámica de lagunas costeras	16
i	Descripción del modelo DELFT3D	17
3.	ÁREA DE ESTUDIO	19
3.1.	Laguna la Carbonera	19
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1.	Datos observacionales.....	22
i	Atmosféricos (en Sisal).....	22
ii	Mareográficos (Puerto de abrigo de Sisal)	22

iii	Marinos (anclajes con CTD's).....	22
iv	Análisis de datos observacionales.....	25
4.2.	Implementación del modelo numérico.....	26
i	Malla numérica.....	27
ii	Batimetría.....	29
iii	Número de Courant.....	31
iv	Parámetros físicos y numéricos.....	33
v	Condiciones de frontera.....	33
vi	Validación del modelo numérico.....	35
vii	Caracterización de la hidrodinámica.....	37
viii	Simulación del gradiente salino.....	37
4.3.	Análisis del componente biológico.....	38
5.	RESULTADOS.....	40
5.1.	Observaciones meteorológicas.....	40
i	Precipitación.....	41
ii	Temperatura atmosférica.....	42
iii	Viento (magnitud y dirección).....	42
5.2.	Observaciones oceanográficas.....	43
i	Salinidad.....	44
ii	Temperatura del agua.....	45
iii	Nivel del agua en la laguna.....	46
iv	Marea: nivel del agua del mareógrafo de Sisal.....	47
5.3.	Efectos atmosféricos en las características termohalinas de la laguna.....	48
5.4.	Análisis espectral.....	51
5.5.	Experimentos numéricos.....	54

i	Calibración del modelo numérico	57
ii	Validación del modelo numérico	61
iii	Caracterización de la hidrodinámica	63
iv	Simulación del gradiente salino	75
5.6.	Análisis del componente biológico	89
6.	DISCUSIÓN	100
i	Características atmosféricas	100
ii	Características hidrográficas	101
iii	Hidrodinámica de la laguna la Carbonera	103
iv	Componente biológico	106
7.	CONCLUSIONES	109
8.	BIBLIOGRAFÍA	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio, laguna la Carbonera, Yucatán, México. La figura incluye la localización de los sitios instrumentados con sensores de CTD.	21
Figura 2. Fotografía aérea de la laguna la Carbonera que muestra la boca lagunar en el año de 1943. La fotografía fue proporcionada por el Dr. Rodolfo Silva Casarín del Instituto de Ingeniería de la UNAM.	21
Figura 3. Instalación y fijación de CTD's en vegetación aledaña.	24
Figura 4. Colocación de CTD en anclajes de concreto enterrados en el fondo de la laguna.	24
Figura 5. Descarga de los datos de CTD, configuración del nuevo muestreo y reinstalación de los instrumentos.	25
Figura 6. Malla Arakawa-C utilizada en el modelo Delft3D para modelar la hidrodinámica de la laguna la Carbonera.	27
Figura 7. Malla numérica generada para la modelación numérica de la hidrodinámica de la laguna la Carbonera. La figura muestra también los datos topobatimétricos utilizados para generar la batimetría del modelo.	29
Figura 8. Rutas batimétricas en la laguna la Carbonera (líneas oscuras). Localización inicial de instrumentos (CTD's) en el sistema lagunar, los distintos colores hacen referencia a los colores en los gráficos de salinidad y temperatura.	30
Figura 9. Batimetría generada para el modelo numérico de la Carbonera.	31
Figura 10. Distribución espacial del número de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) en el modelo generado para La Carbonera al utilizar un paso del tiempo de 0.1 min.	33
Figura 11. Implementación del modelo de la Carbonera. La figura muestra la malla numérica con su batimetría asociada, las fronteras abiertas en el mar y los puntos de monitoreo detallado.	35
Figura 12. Precipitación medida en la estación meteorológica UAY-Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Las siglas representan las temporadas: LL (lluvias), N (Nortes) y S (secas).	41
Figura 13. Temperatura del aire medida en la estación meteorológica UAY, Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Las siglas representan las	

temporadas: LL (lluvias), N (Nortes) y S (secas).....	42
Figura 14. Rosa de viento mostrando la dirección, magnitud (colores) e histograma de frecuencias (tamaño de las barras) del viento registrado en la estación meteorológica UAY, Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a mayo del 2015.	43
Figura 15. Salinidad registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015.	45
Figura 16. Temperatura registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015.	46
Figura 17. Nivel del agua registrado por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo del 5 al 11 de septiembre de 2014.	47
Figura 18. Marea medida por el mareógrafo ubicado en el puerto de Sisal de septiembre de 2014 a septiembre de 2015.	48
Figura 19. Momentos de dilución de la salinidad en el sitio Noreste (arriba) y su relación con registros de precipitación en estación la meteorológica UAY, Sisal (abajo).	49
Figura 20. Relación de eventos de sobre elevación del nivel del mar (arriba) con registros de picos de máxima salinidad (medio) y disminución de la temperatura (abajo) en el “ojo de agua” de la Carbonera.....	50
Figura 21. Variaciones en el nivel del agua en el sitio Sureste (arriba) y su relación con registros de viento registrados en la estación meteorológica de la UAY-UNAM (abajo); las flechas indican la dirección del viento.	51
Figura 22. Espectro de frecuencias de la serie de tiempo correspondiente a los datos de marea registrados en el mareógrafo en Sisal.	52
Figura 23. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de nivel en el punto de la Boca.	52
Figura 24. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de temperatura en el punto de la Boca.	53
Figura 25. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de nivel en el punto del “ojo de agua”.	53
Figura 26. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de temperatura de la estación meteorológica en Sisal.....	54
Figura 27. Mapa de rugosidad variable en el dominio, el color azul corresponde a los	

valores más bajos de rugosidad usados para la validación (0.018), el verde al medio (0.07) y el rojo al más alto (0.11).	58
Figura 28. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC01 a LC08 en la estación de la Boca. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el mareógrafo de Sisal y LC03-LC08 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.....	60
Figura 29. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC01 a LC08 en la estación NE de la laguna. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el mareógrafo de Sisal y LC03-LC08 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.....	60
Figura 30. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC10 a LC17 en la estación de la Boca. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el CTD de la Boca y LC10-LC17 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.	61
Figura 31. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC10 a LC17 en la estación NE. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el CTD de la estación NE y LC10-LC17 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.	61
Figura 32. Niveles de agua medidos (línea negra) y simulados (línea roja) en la estación la Boca para la prueba LC09.	62
Figura 33. Niveles simulados para la estación la Boca en el experimento C06, las flechas indican un momento para marea vaciante y uno para marea llenante Unidades del tiempo (h).	64
Figura 34. Magnitudes de la corriente de marea (m/s) reportadas para el experimento C06 en marea llenante.....	64
Figura 35. Magnitudes de la corriente de marea (m/s) reportadas para el experimento C06 en marea vaciante.	65
Figura 36. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea muerta sin forzamiento de viento.	66
Figura 37. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva sin forzamiento de viento.	67
Figura 38. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NE.....	69
Figura 39. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de brisas marinas.	69

Figura 40. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NO.	70
Figura 41. Patrones de circulación (magnitud en m/s) por viento del NE en la laguna la Carbonera.....	71
Figura 42. Patrones de circulación por brisas marinas (magnitud en m/s) durante la mañana en la laguna la Carbonera.	72
Figura 43. Patrones de circulación por brisas marinas (magnitud en m/s) al mediodía en la laguna la Carbonera.	73
Figura 44. Patrones de circulación por viento del Norte (magnitud en m/s) en la laguna la Carbonera.....	74
Figura 45. Patrón de circulación residual durante un ciclo de marea muerta sin forzamiento de viento y nivel del agua cero.	75
Figura 46. Gradiente salino simulado en el experimento C14.	76
Figura 47. Gradiente salino simulado en el experimento C21 y utilizado como condición inicial en los experimentos numéricos con distribución termohalina.....	77
Figura 48. Gradiente salino simulado en el experimento C22.	78
Figura 49. Gradiente salino simulado en el experimento C25.	79
Figura 50. Máxima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C26.....	80
Figura 51. Máxima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C27.	81
Figura 52. Mínima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C26.	81
Figura 53. Mínima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C27.	82
Figura 54. Máxima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C28.....	83
Figura 55. Máxima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C29.	83
Figura 56. Mínima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C28.	84
Figura 57. Mínima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C29.	84
Figura 58. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NO en la prueba C30.....	85
Figura 59. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NO en la prueba C30.....	86
Figura 60. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NE en la prueba C31.	87

Figura 61. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NE en la prueba C31.	87
Figura 62. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de Brisas marinas en la prueba C32.	88
Figura 63. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de Brisas marinas en la prueba C32.	88
Figura 64. Estaciones de muestreo de ictiofauna reportadas por Gallardo-Torres et al. (2012). Los colores corresponden a la zonación delimitada de acuerdo a la variación de salinidad (zona marina (negro), zona estuarina (azul) y zona dulceacuícola (verde)).	90
Figura 65. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de marzo del año 2011. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	91
Figura 66. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de diciembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	92
Figura 67. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de abril del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	93
Figura 68. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de noviembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	94
Figura 69. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de octubre del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	95
Figura 70. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de abril del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	96
Figura 71. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de septiembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	97
Figura 72. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino	

(azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de agosto del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	97
Figura 73. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de julio del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campañas de muestreo establecidas para el estudio.....	23
Tabla 2. Puntos de muestreo, coordenadas y número de serie de cada CTD.	23
Tabla 3. Clasificación de los rangos de error para el RMAE (Van Rijn et al., 2002).....	37
Tabla 4. Especies de peces seleccionadas para relacionar con la distribución de las masas de agua, tipo de ambiente en el que viven, límites de tolerancia a la salinidad reportados y categoría de ocurrencia en los muestreos.	39
Tabla 5. . Características de las pruebas de sensibilidad (PC01-PC07) y experimentos de calibración del modelo numérico (LC01-LC16).	55
Tabla 6. Errores obtenidos durante el proceso de ajuste de coeficientes de rugosidad de Manning para la calibración del modelo numérico en la prueba LC09.....	63
Tabla 7. Comparación del rango de tolerancia salina que se reporta en la literatura con los valores salinos en lo que las especies se reportaron.	99

RESUMEN

En el año de 2002, el Huracán Isidoro abrió la barra de arena de la costa permitiendo el intercambio de agua entre el mar y el humedal costero, en una región que presenta importantes descargas subterráneas (DAS) en la franja costera del estado de Yucatán. Como resultado, se creó un sistema lagunar (La Carbonera) cuyas características termohalinas tienen un rango de variación extremadamente amplio. La región tiene relieve poco pronunciado y somero y una geología kárstica. Mediciones *in situ* con CTD's *divers* muestran que este pequeño sistema tiene una región que desarrolla condiciones hiperhalinas (>80 ups, zona este), una región dominada por agua marina (Boca lagunar), una región estuarina (zona oeste) y una región con un afluente permanente de agua dulce ("ojo de agua"). Se caracterizó la hidrodinámica de la laguna mediante la implementación y validación del modelo Delft3D en dos dimensiones. Distintos escenarios de modelación (marea de sicigia y cuadratura, viento de los sectores NO, NE y brisas marinas, distribución de salinidad y variación en la descarga de agua dulce en la localidad del "ojo de agua") muestran la distribución espacial y temporal de las masas de agua. Las mayores magnitudes de corriente se observan en la región oeste de la laguna, incrementándose durante eventos de viento del norte, dicha región está dominada por el intercambio de agua marina de la boca lagunar y de agua dulce del "ojo de agua". En la zona oriental de la laguna las corrientes son escasas al igual que el intercambio de agua con el mar. Las zonas de mezcla intensa se encuentran localizadas en la parte central, sur y oeste de la laguna donde se presenta un importante intercambio de agua dulce y marina. El gradiente salino simulado bajo distintos escenarios numéricos es dependiente de la amplitud de marea y de la descarga del "ojo de agua", dicho gradiente se ve modificado durante eventos de Norte que ingresan agua de característica marina al este y sur del sistema y durante bajamar donde una cantidad considerable de agua dulce/salobre ingresa en la parte oeste del sistema. Esto ocasiona la ampliación del ámbito de distribución, por un lado, de algunos peces estenohalinos del componente marino (*P. albigutta*) y estuarino (*M. colei*, *S. barracuda* y *A. rhomboidalis*) a la zona centro, sur y parte de la zona este del sistema donde se presenta agua con característica marina o similar (30-45) y por otro lado de los peces del componente dulceacuícola estenohalino (*G. yucatanana*, *P. velifera*) a gran parte de la zona

oeste (zona estuarina) cuando el momento de la marea o la descarga permiten el ingreso de agua dulce al sistema.

Palabras clave: Hidrodinámica, DAS, gradiente salino, ictiofauna, distribución.

1. INTRODUCCIÓN

La costa norte de la Península de Yucatán está compuesta por una red de humedales interconectados que representan ecotonos entre ambientes marinos, continentales y atmosféricos. Entre estos sistemas destacan las lagunas costeras, distinguidas en la región por ser altamente someras y recibir descargas de agua continental de manera subterránea. Un claro ejemplo de estos sistemas lo representa la laguna costera la Carbonera, la cual tiene un área muy reducida (16.5 km²) con profundidades menores a 1 m; en este espacio confluyen características estuarinas e hiperhalinas, debidas a un aporte intenso de agua continental que recibe a través de un “ojo de agua” localizado al suroeste del sistema, mientras que la región oriental se encuentra sujeta a una intensa radiación solar, pocos aportes de agua continental y comunicación restringida con el mar. En la Carbonera se hace evidente la importancia ecológica y gran diversidad que caracteriza a las lagunas costeras: tienen funciones como la de ser sitio de crianza para diferentes especies (peces, crustáceos, moluscos) que las habitan de modo permanente o temporal (cíclico o estacional), son hábitat migratorio y de reproducción para diversas especies de aves; ayudan a la protección del litoral ya que representan una interfaz entre el mar y el continente que muchas veces está rodeada de mangle, el cual brinda diversos servicios ecosistémicos como la protección ante fuerzas como el viento y el oleaje, evitando la erosión y contribuye al filtrado de las descargas de agua del continente al mar; las lagunas costeras mantienen una alta productividad primaria y son una fuente importante de recursos pesqueros (Barbier *et al.*, 1994; Contreras & Castañeda, 2004)).

México a lo largo de sus litorales posee más de 130 lagunas costeras y estuarios, con una amplia gama de tamaños, regímenes hidrológicos, biota, hábitats y problemáticas ambientales. Todos los factores dinámicos que actúan en estos sistemas determinan el grado de mezcla o estratificación en el que se distribuyen las distintas masas de agua. Esta distribución determina la existencia de los organismos que habitan las distintas zonas de acuerdo a sus características particulares (Sánchez *et al.*, 2012). Son generalmente sistemas ricos en nutrientes por aporte directo del continente y en sitios de poca profundidad la penetración de la luz en la interfaz agua/sedimento suele ser alta, la fricción del fondo y el

viento afectan a toda la columna de agua y por lo tanto promueven la resuspensión de materiales, nutrientes y pequeños organismos de la capa superficial del sedimento a toda la columna de agua.

Las lagunas costeras son consideradas sistemas estresados naturalmente, ya que experimentan frecuentes perturbaciones ambientales y fluctuaciones (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2013). Para poder proteger y preservar estos importantes y frágiles sistemas es necesario entender su dinámica, lo que requiere conocer la variabilidad temporal y espacial de las masas de agua y de los parámetros fisicoquímicos que influyen directamente sobre el desarrollo de los organismos que las habitan.

La manera más completa de estudiar esta dinámica es combinando observaciones con estudios numéricos. Los estudios observacionales proveen una muestra pequeña de la realidad en secciones de tiempo y de espacio. Con estudios numéricos es posible completar la información espacial y temporal observada. En ellos el patrón de movimiento de las masas de agua es resuelto mediante un conjunto de ecuaciones que resuelven las leyes físicas del movimiento a partir de las distintas fuerzas que interactúan en los sistemas reales. Es necesario contar con mediciones que describan el comportamiento hidrodinámico de un sistema y además se usen para validar los resultados de estudios numéricos. La modelación numérica es utilizada en estudios costeros y ecológicos para conocer y predecir condiciones futuras de ecosistemas y es una herramienta auxiliar para la comprensión de procesos que proporcionan información relevante para el entendimiento y manejo óptimo de los servicios de los sistemas litorales.

1.1. ANTECEDENTES

i Estudios hidrodinámicos

La hidrodinámica de lagunas costeras es cada vez más estudiada a partir de la combinación de observaciones directas y modelación numérica, se utiliza para determinar variaciones en el nivel del agua, corrientes, patrones de distribución termohalina y transporte de materia o sustancias suspendidas (en general variables físicas, químicas y/o biológicas) en un

determinado tiempo y espacio.

En la Península de Yucatán la mayor parte de estudios en lagunas costeras están concentrados en disciplinas biológicas y químicas (contaminación) y son pocos los estudios de su hidrodinámica. El estudio de las variables dinámicas en estos sitios es complicado por diferentes razones, entre las que destacan: la ausencia de una frontera bien definida (ya que en Yucatán las lagunas están bordeadas por humedales y manglares con límites poco claros y altamente variables); los aportes de agua continental se encuentran ocultos y dispersos en el sustrato kárstico de la Península (por lo tanto, establecer las descargas de agua dulce es complicado); el terreno es plano y de bajo relieve (lo que permite grandes cambios en las áreas de inundación con tan sólo unos centímetros de gradiente topobatiométrico).

Uno de los primeros acercamientos a estudios hidrodinámicos para la región fue elaborado por Mariño y Enríquez (2011), quienes realizaron estudios batimétricos, hidrodinámicos y de calidad de agua en cuatro lagunas costeras del estado de Yucatán, señalando las complicaciones que representa la estructura kárstica y las fronteras poco definidas para los estudios hidrodinámicos. Dichos autores reportaron que para las lagunas de Chelem, Telchac, Celestún y Bocas de Dzilam existe una amplia variabilidad espacio-temporal en los niveles de agua, la temperatura y la salinidad de las lagunas. Dan a conocer los tiempos de residencia del agua y los flujos de intercambio entre esas lagunas y el mar, que cambian en el tiempo con las distintas fases de la marea y estacionalmente con los variables aportes de agua dulce.

Enríquez *et al.*, (2013) señalan la implicación de los procesos atmosféricos y costeros y con el intercambio de agua (por la presencia de lagunas costeras y descargas de agua subterránea) en la estructura termohalina en la costa de norte de Yucatán, para la temporada de verano desde Holbox hasta Celestún. Los autores muestran las zonas preferenciales de descarga continental de la Península, a través de las intersecciones del anillo externo del cráter de Chicxulub con el mar (localizadas en Dzilam Bravo en el este y el Palmar y Celestún al Oeste) y exponen cómo, en ambientes tan complejos como los tropicales, con altas tasas de precipitación y evaporación extrema, la variación de la salinidad puede presentar desde condiciones marinas a hiperhalinas. Al mismo tiempo, la presencia de descargas subterráneas diluye la salinidad en estos ambientes.

En la laguna La Carbonera, zona del presente estudio, Sánchez (2012) realizó uno de los primeros trabajos de modelación numérica usando como forzamiento principal a la marea astronómica (los principales constituyentes), caracterizando parcialmente la dinámica del agua dentro de la laguna. Dicho autor encontró que la señal de marea se atenúa y desfasa desde la boca lagunar hasta el canal principal que conecta la boca con la parte interna de la laguna. También observó, mediante mediciones en el “ojo de agua”, que su descarga a la laguna está modulada por la marea y que puede comportarse como fuente o sumidero dependiendo de si hay presencia de pleamares o bajamares, respectivamente, al menos en marea viva. En marea muerta, en cambio, el “ojo de agua” se comporta como una fuente, tanto en pleamares como en bajamares, dado que la variación del nivel del mar es relativamente tan leve que no produce variaciones importantes del nivel piezométrico del acuífero y no llega a ser menor que el nivel de la superficie libre en la poza donde se encuentra el “ojo de agua”.

Jerónimo *et al.* (2012) reportan las variaciones estacionales en salinidad y temperatura para la laguna la Carbonera entre el 2009 y 2010 estableciendo cuatro zonas de diferente variabilidad: 1) la zona de la boca, que permanece en constante intercambio con el mar; 2) la zona de mezcla situada al oeste de la laguna con salinidades de 20-40 ups y temperaturas de 29°C a 31°C con una amplitud de oscilación de hasta 16 °C diarios, donde las variaciones en dichas propiedades se dan por la influencia del agua marina y las descargas subterráneas; 3) la zona de dominio de agua dulce, en la parte más austral de la laguna, donde reportan agua con menor temperatura (26 °C y cambios de alrededor de 1°C) además de menor concentración de sal (0 a 8 ups) y mencionan que en dicha zona existe la presencia permanente de agua dulce; 4) la zona este de la laguna con características hiperhalinas (hasta 50 ups) y altas temperaturas (38°C).

Estudios disponibles de variaciones en salinidad para otras lagunas costeras del estado de Yucatán sugieren que de manera general la salinidad varía en gran medida dependiendo de la cantidad de agua dulce que entra al sistema en diferentes temporadas (estiaje y avenidas) y de la alta evaporación típica de zonas tropicales. Los valores máximos reportados incluyen: salinidad de hasta 35 ppm para la laguna Celestún en temporada de secas (Ordóñez-López 1997), hasta 45 ups en temporada de secas en la laguna Chelem, cercanos a los 40 ups en la laguna de Telchac en los meses de junio y julio y valores de casi 40 ups

en Bocas de Dzilam en marzo, teniendo todas ellas zonas con características hiperhalinas al menos en alguna temporada del año (Mariño y Enríquez, 2011).

ii Estudios biológicos

Dentro de la laguna la Carbonera se han realizado diversos estudios de la comunidad ictiofaunística que se enfocan en listados taxonómicos, factores de crecimiento o índices de riqueza. Pero se ha señalado la importancia de realizar estudios que relacionen factores abióticos como la hidrodinámica con la distribución de la comunidad ictiofaunística para entender cómo un hábitat en particular en una temporada específica puede afectar la distribución de una comunidad (Bonilla-Gómez *et al.*, 2012).

Existen estudios que relacionan la temperatura con la estructura de la comunidad de peces. Sin embargo, la información disponible en sistemas estuarinos kársticos tropicales es escasa, particularmente en la península de Yucatán. Diversas especies como *Lagodon rhomboides*, *Sphoeroides testudineus*, *Mugil curema*, *Chriodorus atherinoides*, *Eucinostomus argenteus* y *Eucinostomus gula* han sido consideradas como especies dominantes dentro de lagunas costeras de Yucatán. Sin embargo, pocos estudios analizan la dinámica poblacional de peces con una posible correlación con variables hidrológicas como mencionan Bonilla-Gómez *et al.* (2013).

Algunos estudios han puesto de relieve, por ejemplo, el papel fundamental de la influencia marina en la riqueza y composición de especies en una laguna o estuario, pues se relaciona principalmente con el tamaño y la permanencia de la conexión con el mar (Ecoutin *et al.*, 2005).

Se sabe también que el intercambio entre las lagunas y el mar, aunado a las características de las descargas de agua del acuífero de la zona de Yucatán, crea una dinámica compleja en las propiedades termohalinas de los sistemas y esto tiene implicaciones en la estructura de las comunidades biológicas presentes (Wolanski, 1992; Jerónimo *et al.*, 2012).

Chiappa-Carrara *et al.* (2003) realizaron un estudio en una laguna arrecifal en el estado de Quintana Roo relacionando la distribución de peces con la hidrodinámica de dicho sistema. Estos autores indican que el uso espacial de estos sistemas como hábitat de larvas de peces está fuertemente influenciado por la distribución de la salinidad, además de modularse por

las variaciones anuales del viento. Reportaron dos patrones de viento, uno del noreste el cual propicia que exista la salida de agua del estuario hacia el mar Caribe quedando el sistema con menor cantidad de agua, lo cual provoca que la salinidad disminuya hacia el sur del canal principal y se registren mayores abundancias de larvas de peces para dicha zona; y viento de sur a norte donde una gran cantidad de agua penetra al estuario con registros de salinidad más altos en la parte sur del sistema y menor abundancia de peces desde el sur y hacia el norte del canal. Esto indica una fuerte variabilidad espacial y temporal de la salinidad a lo largo del estuario además de que existe una fuerte correspondencia entre la influencia marina, la salinidad y la expansión del hábitat del ictioplancton.

El presente estudio pretende ampliar el conocimiento acerca de la hidrodinámica de la laguna costera la Carbonera mediante estudios observacionales y de modelación numérica. Se analizó la variación temporal y espacial de las masas de agua del sistema debido a las mareas, el viento y a los flujos de agua del mar y del continente. Adicionalmente, los patrones hidrodinámicos se relacionaron con la distribución de peces en términos de una posible ampliación o reducción del hábitat de los peces en base a su tolerancia a la salinidad, usando para ello especies estenohalinas.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la hidrodinámica de la laguna la Carbonera, Yucatán, México, mediante la combinación de modelación numérica y mediciones de campo para relacionarla con la distribución de ictiofauna en el sistema.

i Objetivos específicos

- Realizar la recolección de datos de clima atmosférico y marino.
- Caracterizar el clima marino a partir del análisis de los datos colectados en campo para obtener las variaciones temporales en diversos puntos dentro de la laguna la Carbonera.

- Caracterizar el clima atmosférico a partir de la recolección y análisis de datos.
- Digitalizar las líneas de costa de la zona de estudio.
- Actualizar los datos de batimetría existentes y realizar un mapa batimétrico de la laguna la Carbonera.
- Implementar un modelo hidrodinámico bidimensional de la laguna la Carbonera para estudios de hidrodinámica que incluya aportes de agua dulce en la laguna.
- Validar el modelo implementado con mediciones de campo.
- Caracterizar la hidrodinámica de la Laguna la Carbonera.
- Relacionar la distribución de especies seleccionadas de peces en la laguna con los resultados del modelo hidrodinámico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Las lagunas costeras

En terminología aplicada a la zona costera es común la variabilidad con la que son conceptualizados algunos de sus rasgos morfológicos. Uno de los casos de mayor relevancia son las lagunas costeras. El término laguna costera hace referencia a una depresión en la zona costera bajo el nivel de pleamar media superior (Lankford, 1976). De manera general sus profundidades son someras (<10 m) en comparación con otros cuerpos de agua y están parcialmente aisladas del mar abierto por barreras costeras (barras de arena o arrecifes) (Brown *et al.*, 1999).

Las lagunas costeras generalmente (pero no exclusivamente) tienen sólo una conexión con el mar abierto ya sea permanente o efímera y usualmente están ubicadas paralelas a la costa (Kjerfve, 1986). Muchas tienen un río adyacente y son el resultado del encuentro de dos masas de agua de diferentes características (Contreras, 1988).

Según Kjerfve (1994) hay tres tipos de lagunas costeras de acuerdo al grado de intercambio de agua con el océano adyacente i) las lagunas restringidas (dos o más entradas, canales o esteros), ii) las cerradas (sólo con un canal de entrada) y iii) las de características

intermitentes (muchos canales de entrada).

Ya que las lagunas costeras son depresiones de origen geológico reciente y de vida corta, éstas se encuentran en permanente alteración por erosión y depósitacion de sedimentos y por fluctuaciones del nivel del mar de carácter eustático (causados por cambios en el volumen de agua del océano) e isostáticos (originados por cambios del nivel de la tierra). Además, debido a las descargas de afluentes de agua dulce que varían permanentemente y de acuerdo a los rangos de marea en la localidad, las lagunas costeras nunca logran alcanzar un estado de equilibrio definitivo (Farreras, 2006).

Su hidrología es regida por una combinación de fuerzas que incluyen: la fricción (por la acción del viento, las corrientes y el fondo), los gradientes de presión generados por la marea, los aportes de agua continental y flujos de calor y de agua con la atmósfera (y los gradientes de densidad resultantes) y la geometría del sistema (su forma, dimensiones de las bocas que comunican estos sistemas con el mar abierto, su localización, batimetría, canales, entre otras) (Carbajal, 2009). El agua en las lagunas costeras puede estar verticalmente mezclada o estratificada en función de la distribución de las fuerzas mencionadas. Las lagunas varían de salobres a hipersalinas, dependiendo del balance entre la evaporación, la precipitación y los intercambios de agua con el mar y con el continente (Brown *et al.*, 1999). En áreas tropicales las lagunas pueden ser hipersalinas durante las estaciones secas, y pueden llegar a ser casi completamente de agua dulce durante estaciones lluviosas. Tienen generalmente una rápida respuesta a calentamientos por radiación solar y a enfriamientos al paso de masas de aire frío y por todo lo descrito anteriormente son sistemas altamente variables temporal y espacialmente.

2.2. Lagunas costeras del estado de Yucatán

El agua continental que ingresa a los sistemas costeros lo hace típicamente a través de un río o en forma diferida en un sistema de escorrentías. En algunas regiones del planeta, entre las que se encuentra la península de Yucatán, el flujo de agua continental hacia las costas ocurre como descargas de agua subterránea (DAS). A lo largo de la parte Norte de la Península de Yucatán se localizan alrededor de 12 lagunas costeras con aporte variable de agua dulce que reciben a través de ojos de agua (descargas puntuales) o fisuras presentes en

el fondo debido a la plataforma kárstica característica de toda la Península. Muchas de estas descargas ocurren en forma difusa a través del sedimento. Por consiguiente, los aportes de agua continental a las lagunas o mar costero no pueden estimarse fácilmente, principalmente cuando la descarga es difusa a través de fracturas en la roca que está cubierta por sedimento. En las cercanías de las costas existe un proceso de mezclado en el subsuelo entre el agua dulce y el agua de mar, que en forma de cuña salina alcanza distancias importantes tierra adentro (Carbajal, 2009).

Por otro lado, la topografía de la península es plana y los sistemas lagunares costeros suelen interconectarse entre sí durante ciertos momentos y no tienen una frontera bien definida ya que se encuentran bordeados por humedales y manglares con límites poco claros y variables. La profundidad y los cambios en el relieve son pequeños por lo que elevaciones pequeñas del nivel del mar provocan la inundación de áreas extensas.

Las lagunas costeras de Yucatán son de diferentes dimensiones y formas, pero tienen en común la escasa profundidad y una marcada variabilidad hidrológica intra-lagunar tanto espacial como temporal. Esto como resultado de la baja amplitud de marea y consecuentemente corrientes moderadas, baja conectividad dentro de la laguna, alta influencia atmosférica en toda la laguna y alta influencia del continente en sitios puntuales donde hay aportes de agua del acuífero costero. Algunas comparten características tipo estuarinas (Celestún, Dzilam, Ascención y Nichupté) o bien características euhalinas (Chelem, Holbox, Chacmchuc y Bojórquez) (Herrera-Silveira, 2006).

2.3. Península de Yucatán

La península de Yucatán está formada por una plataforma caliza emergente de naturaleza kárstica, ligeramente inclinada hacia el norte en la cual no existen ríos superficiales. El agua de lluvia es rápidamente filtrada a una matriz subterránea porosa donde el agua fluye a través de una amplia red de fracturas y cavernas. Sobre esta estructura kárstica de la península de Yucatán, la cuenca sedimentaria de Chicxulub es una estructura que sufrió el impacto de un meteorito durante la transición del Cretácico al Terciario, que dio origen a un cráter de aproximadamente 180 km de diámetro, cuyos principales depósitos sedimentarios son evaporitas y andesitas. El anillo externo del cráter se caracteriza por la formación de

una banda semicircular de anillos múltiples con presencia de dolinas (cenotes) producto de la disolución del material calizo depositado (Bauer-Gottwein *et al.*, 2010; Jerónimo *et al.*, 2012). La alta permeabilidad del karst y la disolución de carbonatos han generado la presencia de cenotes con agua dulce del acuífero.

2.4. Climatología de la Península de Yucatán

i Forzantes atmosféricos que afectan la hidrodinámica

De manera dominante la península de Yucatán es ventilada por los vientos Alisios provenientes del este y noreste, y que localmente se modulan y modifican por un sistema muy marcado de brisas costeras. Adicionalmente la región recibe sistemas atmosféricos de corta duración que modifican este patrón: durante el verano con la presencia de ciclones tropicales y durante el invierno con el paso de frentes fríos localmente llamados “Nortes” (Vidal, 2005; Carbajal, 2009).

Vientos Alisios

Debido a que la Tierra no recibe por igual la misma energía, la superficie no transmite de forma uniforme el calor al aire sobre ella, provocando intercambios térmicos entre zonas para restablecer el equilibrio (López, 2015). En la atmósfera baja, la presión es baja a lo largo del Ecuador, el aire caliente converge aquí, se levanta y se mueve hacia los polos. Debido a que la Tierra es esférica el aire que se mueve hacia los polos por arriba de la tropósfera, se ve obligado a converger, como las líneas de longitud convergen. Como resultado, cerca de los 30 grados de latitud N y S hay un apilamiento de aire, lo que resulta en una alta presión atmosférica en la superficie de la Tierra. Por lo tanto existe un gradiente de presión desde los máximos subtropicales hacia el Ecuador; los vientos viajan de zonas de alta presión hacia zonas de baja presión y en este caso el viento converge de ambos hemisferios en el ecuador y son desviados hacia el oeste por el efecto de la rotación de la tierra (efecto Coriolis), estos son los vientos Alisios. Dichos vientos forman parte de la circulación de Hadley o celdas de Hadley, término que se refiere solamente al componente

Norte-Sur de la circulación. Debido a que el flujo es desviado por el efecto de Coriolis, la circulación sigue un patrón en espiral en tres dimensiones. La fuerza de Coriolis causa que los vientos ecuatoriales se desvíen hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el hemisferio Sur, adquiriendo una componente del este en ambos hemisferios, así, los vientos Alisios soplan hacia el ecuador desde el sureste y noreste (Brown *et al.*, 2001).

Brisas marinas

Las brisas marinas están definidas como un fenómeno local costero en el que el viento cambia de dirección en periodos diurnos del mar a la costa y viceversa como resultado de cambios en la temperatura y presión en la atmósfera durante un día (López, 2015). Dicho fenómeno surge de la respuesta a cambios térmicos entre el mar y la tierra, ya que las masas continentales se enfrían y calientan más rápido que el océano (debido a que la capacidad térmica de éste es más baja). Cuando la temperatura atmosférica es baja, la masa de aire por encima del continente se enfría y se vuelve más densa, por lo que una zona de alta presión superficial se desarrolla generando movimiento del aire con dirección dominante hacia afuera de la masa continental; durante el día al incrementarse la temperatura, el aire sobre el continente se calienta, se vuelve menos denso y asciende generando una baja presión, los vientos son revertidos y soplan desde el mar hacia la masa continental (Brown *et al.*, 2001).

Nortes

Las masas de aire son grandes regiones de la atmósfera baja con características uniformes que son originalmente definidas por su área de origen. Están definidas por su temperatura (p.e. baja en regiones polares y alta en los trópicos) y por la naturaleza de su área de origen (continental o marítimo). El clima de Norteamérica está dominado por la presencia de dos masas de aire, la tropical marítima (húmeda) y la continental polar (seca). Dichas masas de aire son modificadas al moverse a otras áreas con temperaturas o topografías diferentes de su área de origen. Tal es el caso del movimiento de la masa de aire continental polar que se mueve sobre Canadá, pasando por Estados Unidos hasta llegar al Golfo de México. Al

llegar a dicha zona se produce un frente debido al encuentro de la masa de aire frío y seco con la masa de aire que se encuentra en el Golfo de México que es de origen marítimo tropical. La masa de aire polar se encuentra con la masa tropical y, al ser más pesada, se acomoda debajo de ella desplazando el aire caliente hacia arriba. Dicho fenómeno ocasiona disminuciones en la temperatura, nubes de tormenta y fuertes lluvias.

Precipitación, evaporación y temperatura atmosférica

Las lluvias más intensas asociadas a sistemas tropicales en la Península ocurren entre junio y octubre. Durante el invierno también es común que ocurran lluvias asociadas al paso de los frentes fríos o Nortes entre noviembre y febrero (descritos arriba). La precipitación anual varía entre los 444 mm a los 1290 mm y se hace mayor de norte a sur y de este a oeste en el estado de Yucatán. Entre marzo y junio predomina la sequía y altos niveles de radiación solar que generan elevadas temperaturas (Herrera-Silverira, 1994). Como es típico de las zonas tropicales, la evaporación supera la precipitación (aproximadamente 1800 y 1290 mm/año respectivamente). La temperatura atmosférica tiene una clara modulación anual, con máxima en verano. La temperatura media anual es de 26 °C, la máxima promedio mensual es alrededor de 36 °C y corresponde al mes de mayo, la mínima promedio mensual es de 16 °C y corresponde a enero (INEGI, 2002).

ii Forzantes oceanográficas que afectan la hidrodinámica

Corrientes costeras

Reportes de las corrientes predominantes en la playa Sisal indican que tienen dirección oeste y se mueven paralelas a la costa, con velocidades promedio de 0.25 ms⁻¹ y máximas de hasta 1 ms⁻¹ ((González-Herrera *et al.*, 2015; Appendini *et al.*, 2012) En López, 2015). El oleaje es de baja energía con altura media anual de 60 cm, dirección reinante al noroeste, sin embargo, en temporada de Nortes se presenta oleaje dominante del norte y noroeste con alturas máximas de entre 1.60 y 1.80 m asociadas a periodos de 2 y 8 segundos (Bravo, 2016).

Marea

La marea se refiere a la variación temporal en la posición vertical de la superficie libre del agua con respecto a un nivel de referencia arbitrario, causada por cualquier fenómeno o continuo de fenómenos internos o externos. Los fenómenos causales de la marea son de tipo astronómico y de tipo meteorológico. La marea astronómica resulta de la atracción gravitacional de la luna, el sol y otros astros sobre la masa de agua. La marea meteorológica es resultado de la acción del viento y los gradientes de presión atmosférica en la región local, evaporación y precipitación (Farreras, 2006).

La marea de tipo astronómico es periódica y predecible, y generalmente es de mayor magnitud que la de origen meteorológico. Esta última puede presentar periodicidad o no.

En una laguna costera somera la influencia de la marea es alta debido a que ésta provoca el flujo y reflujo en la laguna y contribuye a la mezcla de las masas de agua. Por una parte la fricción que la marea ejerce sobre el fondo genera turbulencia y mezcla, por otra parte la interacción de la onda de marea con la batimetría genera corrientes de mayor escala. La propagación de dicha onda en una laguna depende de la inercia de la masa de agua, la presión causada por la pendiente de la superficie del agua y la fuerza opuesta de la fricción de fondo (Casares, 2015).

Gradientes de densidad

Los intercambios de calor y de agua entre la atmosfera y las lagunas son también importantes en la circulación al generarse variaciones en la temperatura y salinidad del agua, que en conjunto determinan su densidad. Los cambios en la temperatura son causados por los flujos de calor a través del límite agua-aire; los cambios en la salinidad son debidos a la adición o remoción de agua dulce por evaporación, precipitación o por aportes de agua continental. Variaciones espaciales de densidad generan movimiento, conocido como circulación termohalina (Cauich, 2010).

2.5. Relación de la hidrodinámica con las comunidades de peces

En los ecosistemas costeros las comunidades de organismos tienen alta diversidad y una compleja red de transferencias energéticas. Estos ecosistemas son reconocidos como los más productivos del planeta. Su productividad está asociada a la producción fitoplanctónica (máximos de $1 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), la productividad de la vegetación sumergida (fanerógamas de $2 \text{ a } 5 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), de macroalgas y del manglar, además del componente heterotrófico con alta abundancia de recursos pesqueros (Lara-Lara *et al.*, 2008). La productividad está influenciada por la entrada de agua dulce y marina en el sistema, lo cual determina las características fisicoquímicas y biológicas del sistema (Flores-Hernández *et al.*, 2012).

La dinámica de corrientes, oleaje y mareas controla el ritmo de los hábitat costeros tales como los arrecifes coralinos, pastos marinos, lagunas costeras, estuarios, pantanos y manglares, haciendo posible la existencia de organismos que están sujetos a un intercambio permanente de agua, biomasa y materia orgánica (Gallardo-Torres *et al.* 2012). La composición y variedad de la fauna de lagunas costeras y estuarios depende de una compleja matriz de interacciones físicas y procesos biológicos que determinan su ocurrencia, distribución y patrones de movimiento, dentro de dicha matriz destacan el tamaño del sistema, la profundidad y otros factores físicos (particularmente salinidad y turbidez) (Blaber, 1997), los tipos de hábitat (manglar, pastos marinos etc., vistos como espacios de subsistencia) y la presencia de otros organismos (requerimientos tróficos (alimento) o reproductivos) (Díaz *et al.* 2006).

Dentro de la fauna que habita las lagunas costeras y estuarios, los peces representan uno de los principales componentes, su riqueza, distribución (espacial y temporal) y composición varía en función de todos los factores mencionados. Muchos autores sugieren que las comunidades de peces son indicadores de los cambios ambientales y permiten determinar el estado de salud de un ecosistema (Ecoutin *et al.*, 2005).

Diversas especies de peces marinos habitan en estuarios en algún momento de su ciclo de vida y están adaptadas a las cambiantes condiciones físicas. La importancia relativa de los límites de tolerancia fisiológica a los factores abióticos que influyen su distribución y sus ciclos de vida es central para el entendimiento de su ecología. La relación entre muchos de los factores es fuerte y es difícil separar uno de otro, en muchos de los casos un factor puede ser clave para una especie pero no puede generalizarse para todas (Blaber, 1997). Uno de los principales cambios a los que los organismos responden es a los gradientes que

se presentan en las características del agua (Flores-Hernández *et al.*, 2012), entre ellos el de salinidad. Este parámetro es uno de los principales controladores de la distribución de peces ya que éstos están sujetos a sus variaciones espaciales, además de a sus variaciones de alta y baja frecuencia (diurna o estacional). Muchas especies de peces tropicales toleran fluctuaciones extremas en las condiciones físicas a corto y largo plazo, es decir, están adaptadas o cuentan con mecanismos fisiológicos necesarios para soportar dichas fluctuaciones. De esta manera, en sistemas estuarinos confluyen peces dulceacuícolas, salobres, marinos eurihalinos¹ y marinos estenohalinos², que utilizan el sistema de manera permanente, estacional o como visitantes ocasionales (Blaber, 1997). Mientras que algunas especies, por ejemplo, están adaptadas para soportar condiciones hiperhalinas, otras no soportan salinidades mayores a 35 ‰; de igual forma, para algunos organismos salinidades menores a 25 ‰ no representan problemas osmorregulatorios. La mayoría de las especies que habitan estuarios y lagunas tropicales son eurihalinas y pueden tolerar salinidades desde 1 hasta 35 ‰ o mayores. Esta capacidad aparentemente es más frecuente para especies marinas tropicales que para las especies de climas templados. Sin embargo, no todas las especies son eurihalinas, por lo que cierta parte de la ictiofauna de estos sistemas tiene límites de tolerancia más estrechos en relación a la salinidad.

En las bocas de lagunas costeras la influencia del mar es mayor que en zonas internas de las mismas y como resultado de la lluvia y de aportes continentales de agua dulce, se puede producir un gradiente estuarino que determina la distribución de las comunidades de peces (Blaber, 1997) y que limita la distribución de algunos organismos. El transporte de ictioplancton como componente pelágico de estos sistemas, tanto adentro como hacia los cuerpos costeros, está en función del desplazamiento de las masas de agua. El principal mecanismo de transporte de larvas hacia la costa es la circulación y en algunos casos dicho proceso controla la variabilidad de reclutamiento (Chiappa- Carrara *et al.*, 2003).

La clasificación de los peces, al igual que la de lagunas costeras y estuarios, es muy variada y depende de la línea de estudio desde la que se ha propuesto. Los peces pueden clasificarse con base en la tolerancia salina, hábitos de crianza, alimentación o hábitos migratorios. En relación a su tolerancia a la salinidad es posible definir a las especies de peces como

¹ Especies que toleran intervalos amplios de salinidad.

² Especies que toleran intervalos reducidos de salinidad.

eurihalinas o estenohalinas.

Day *et al.* (1981) (en Blaber, (1997)), propusieron una agrupación de especies de peces estuarinos para aguas tropicales y templadas que ha sido modificada y usada hasta ahora, incluyendo los siguientes grupos:

1. Migrantes marinos desde el océano, usualmente son un gran grupo en estuarios y lagunas costeras tropicales y subtropicales. Pueden encontrarse tanto juveniles como adultos, sólo juveniles (p. e. algunas especies de las familias Mugilidae, Carangidae y Polynemidae) o sólo adultos (Ariidae).
2. Especies anádromas, que se crían en agua dulce y se trasladan a los estuarios hasta llegar al mar y vuelven a agua dulce como adultos a desovar. Estas especies son raras en estuarios y lagunas costeras tropicales y subtropicales.
3. Especies catádromas que ascienden hacia aguas dulces como juveniles pero regresan al mar a criarse.
4. Especies estuarinas que completan su ciclo de vida en estuarios. Éstas representan una pequeña pero significativa parte de los peces tropicales estuarinos e incluyen un gran número de cupléidos, gobies, engráulidos, ambassidos, atherinidos y syngnathidos.
5. Migrantes de agua dulce que se mueven distancias variantes descendiendo a estuarios pero usualmente regresan a agua dulce a criarse. En los trópicos este grupo es el mejor representado en estuarios del sur y centro de América donde un gran número de poecilidos y caracidos penetran a aguas estuarinas.

Blaber (1997) propuso una agrupación para los peces en sistemas tropicales tomando en cuenta la variedad de historias de vida pudiendo ser:

1. Migrantes marinos: ingresan al mar a desovar, las larvas entran a los estuarios a alimentarse y ya como adultos vuelven al mar.
2. Residentes estuarinos: todo su ciclo de vida lo cumplen en los estuarios.
3. Migrantes dulceacuícolas: se reproducen y desovan en agua dulce.

2.6. Modelación numérica para estudiar la hidrodinámica de lagunas costeras

Desde los 60' s y 70' s hasta el presente, la modelación numérica ha pasado por un proceso de actualización en el que el poder de cómputo ha sido optimizado con el desarrollo y

utilización de programas (FORTRAN, PYTHON, JAVA, C, R, entre otros), que integran cálculos matemáticos que describen desde balances dinámicos en un fluido hasta el transporte de calor o sal (Dyke, 2001). En oceanografía física todos los modelos numéricos resuelven de una u otra manera las ecuaciones de continuidad y de movimiento del océano. Utilizados con diversos fines, los modelos numéricos de simulación son utilizados para estimar la circulación en regiones oceánicas, ya sea a escala global o bien a escala fina (Cauich, 2010). En las costas los modelos se han utilizado para describir las corrientes, mareas u oleaje de tormenta y pueden resolver la hidrodinámica de diferentes sistemas en dos o tres dimensiones. Los modelos en dos dimensiones requieren menos esfuerzo computacional, pero dependen mucho que las condiciones de la zona de estudio a la que son aplicados lo permitan. Dichos modelos resuelven las ecuaciones de continuidad y de movimiento promediado en la vertical. En este estudio se utiliza el modelo numérico DELFT3D promediado en la vertical.

i Descripción del modelo DELFT3D

El modelo numérico DELFT3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, para agua somera, en dos o tres dimensiones.

Este modelo ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial y regionalmente se ha aplicado a otras lagunas costeras (Celestún, Chelem, Puerto Morelos). El modelo es de libre acceso para los módulos FLOW, MORF y WAVE desde enero de 2011. El libre acceso al módulo de hidrodinámica (FLOW) para usos de investigación y académico es mediante la solicitud de la licencia. Una vez procesada la licencia es enviada por Edward Merger (gerente de productos DELFT3D³), el paquete de software debe ser instalado en los archivos de programa de la computadora y compilados para la instalación del modelo en el equipo.

El sistema de ecuaciones del modelo está conformado por las ecuaciones de movimiento horizontal, la ecuación de continuidad y la ecuación de transporte para elementos conservativos.

Conservación del momento en dirección x:

³ <https://www.deltares.nl/nl/software-oplossingen/>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv + \frac{gu|U|}{C^2(d + \eta)} - \frac{F_x}{\rho_w(d + \eta)} - v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - M_x = 0$$

Conservación del momento en dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + \frac{gv|U|}{C^2(d + \eta)} - \frac{F_y}{\rho_w(d + \eta)} - v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - M_y = 0$$

El primer término de las ecuaciones representa el gradiente de velocidad, el segundo y el tercer término representan la advección, el cuarto término se refiere al gradiente de presión, el quinto término es la fuerza de Coriolis, el sexto integra la fricción en el fondo (que depende de la profundidad, de la velocidad del flujo y de la rugosidad de fondo), el séptimo representa la fricción en superficie por el efecto del viento, el octavo es la viscosidad y el último representa la contribución de fuerzas externas como las estructuras hidráulicas.

Donde:

C = Coeficiente de Chezy

d = Profundidad

f = Parámetro de Coriolis

$F_{x,y}$ = Componentes de fuerzas externas (N/m^2)

u = Velocidad en x del promedio en la vertical (m/s)

v = Velocidad en y del promedio en la vertical (m/s)

ρ_w = Densidad de la masa de agua (Kg/m^3)

η = Nivel del agua sobre el plano de referencia (m)

g = Gravedad (m/s^2)

U = Magnitud absoluta de la corriente $\sqrt{u^2 + v^2}$ (m/s)

La ecuación de continuidad promediada en la vertical es:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (d + \eta)u}{\partial x} + \frac{\partial (d + \eta)v}{\partial y} = 0$$

El efecto de Coriolis depende de la latitud geográfica (φ) de la región que se está modelando y se calcula como $f = 2 \Omega \text{ sen } \varphi$, siendo Ω la velocidad angular de rotación de la tierra. La fuerza de Coriolis se aplica uniforme en todo el dominio a modelar.

Este modelo puede llevar a cabo simulaciones de flujos, transporte de sedimentos, olas, calidad del agua, evolución morfológica y de ecología. Consta de varios módulos, agrupados en una interfaz mutua y Delft3D-FLOW es uno de éstos. En este módulo ya sea en 2D o 3D pueden realizarse simulaciones hidrodinámicas y de transporte, resultado de las mareas o de forzantes meteorológicos. Posee varias características: forzamiento de marea, efecto Coriolis, diferentes tipos de coordenadas (rectilíneas, curvilíneas o esféricas), diferentes opciones para modelar el intercambio de calor a través de la superficie libre, influencia de las olas sobre el estrés de cizalla, flujo conducido por densidad, entre otras.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Laguna la Carbonera

La Laguna la Carbonera, es una laguna costera kárstica ubicada en el noroeste de la Península de Yucatán, México (Figura 1) (Tzeek-Tuz *et al.*, 2012). Limita al oeste con la reserva estatal El Palmar y al este con el municipio de Chuburná. Se trata de una laguna bordeada por un sistema de ciénegas, su apertura hacia el mar se formó durante el paso del Huracán Gilberto en 1988, aunque se tiene registros de su posible conexión al mar desde el año de 1943 en fotografías del Instituto de Geografía de la UNAM (Figura 2). Está bordeada por mangle hacia el continente y por una barrera de arena hacia el mar. La laguna es poco profunda (profundidad media aproximada de 0.5 m) y tiene una superficie de 16.5 km² aproximadamente. Lo que la hace un bajo litoral marino biogénico kárstico. Su entrada de agua dulce está restringida a descargas subterráneas y a la precipitación pluvial local. En la parte sur de la laguna se encuentra un afluente significativo de agua continental en un

islote de manglares y vegetación de selva alta (petén). El sustrato kárstico a través del sistema es de tres tipos de sedimentos: arena, lecho rocoso y fango (Bonilla-Gómez *et al.*, 2012).

En la región de estudio las mareas son mixtas con predominancia diurna, siendo semi-diurnas durante mareas muertas y diurnas el resto del tiempo. La amplitud de la marea varía entre 0.40 m en mareas vivas y 0.08 m en mareas muertas. La temperatura media del aire a lo largo del año es entre 24°C y 26°C, con una oscilación térmica menor a 5°C (Mariño y Enríquez, 2011). Sin embargo, la variación térmica diurna puede ser mayor que la estacional.

Han sido identificados dentro de la laguna, cuatro tipos de hábitat, los cuales están definidos por el sustrato, la salinidad y la vegetación: hiperhalino, pastos marinos, canal y manglar. Este cuerpo de agua representa un mosaico diverso de comunidades vegetales. Está rodeado por pastizales inundables (dominados por gramíneas y ciperáceas), por manglares que se caracterizan por estar permanentemente inundados compuestos por *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Conocarpus erectus* (botoncillo) y en menor número *Languncularia racemosa* (mangle blanco), algunos en ocasiones forman islotes, y su inundación depende del régimen hidrológico; y petenes, que son islas de vegetación arbórea que se presentan en afloramientos de agua dulce. Todas estas comunidades vegetales representan distintos tipos de hábitat para la amplia diversidad de especies que se presenta en la laguna (Sánchez *et al.*, 2012). La Carbonera es un sistema lagunar importante para las pesquerías locales, además de ser un espacio conservado para diversas comunidades de aves como los flamings rosados (*Phoenicopterus ruber*) (Bonilla-Gómez *et al.*, 2013). Se han identificado diversas especies de peces, entre los que destacan: *Sphoeroides testudineus*, especie dominante dentro de la laguna; *Lagodon rhomboides*, *Mugil curema*, *Mugil trichodon*, *Chriodorus atherinoides*, *Eucinostomus argenteus*, y *Eucinostomus gula* considerados como especies dominantes dentro de lagunas costeras de Yucatán (Sánchez *et al.*, 2012). Existen también otras especies endémicas tales como *Fundulus persimilis*, Miller y *Floridichthys polyommus*, Hubbs, que además son especies de importancia ecológica para el ecosistema (Ordóñez, 1997; Badillo-Alemán *et al.*, 2014).

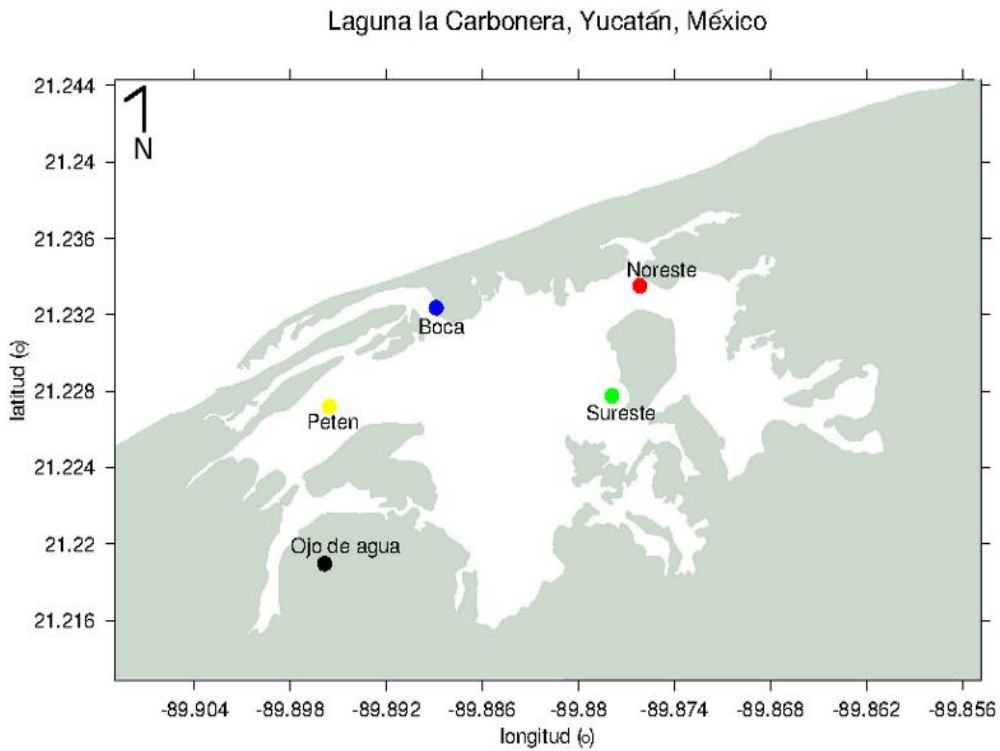


Figura 1. Área de estudio, laguna la Carbonera, Yucatán, México. La figura incluye la localización de los sitios instrumentados con sensores de CTD.



Figura 2. Fotografía aérea de la laguna la Carbonera que muestra la boca lagunar en el año de 1943. La fotografía fue proporcionada por el Dr. Rodolfo Silva Casarín del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Datos observacionales

Se recopiló un año de datos (5 de septiembre de 2014 a 5 de septiembre de 2015) de clima atmosférico y marino.

i Atmosféricos (en Sisal)

Los datos colectados por su relevancia para este estudio son viento, precipitación y presión atmosférica de la estación meteorológica de la UNAM ubicada en la Unidad Académica Yucatán (UAY).

ii Mareográficos (Puerto de abrigo de Sisal)

Adicionalmente se recopiló un año de datos de marea de la estación mareográfica ubicada en el puerto de abrigo de Sisal.

iii Marinos (anclajes con CTD's)

Se instalaron 5 CTD *divers* para recolectar datos continuos de salinidad, temperatura y nivel del agua en sitios estratégicos de la laguna como se describe en los siguientes párrafos.

Se establecieron 6 campañas de campo con el fin de recabar un año completo de datos de salinidad, temperatura y presión que proporcionen las características hidrodinámicas en distintas zonas de la laguna (Tabla 1).

Tabla 1. Campañas de muestreo establecidas para el estudio.

Campaña	Fecha
1	5 de septiembre del 2014
2	27 de octubre del 2014
3	4 de febrero del 2015
4	8 de mayo del 2015
5	8 de julio del 2015
6	8 de septiembre de 2015

Los CTD's instalados fueron previamente programados utilizando el software "Diver office" para medir de manera continua (en intervalos de registro cada 10 minutos) los parámetros establecidos.

Los muestreos se realizaron a bordo de la embarcación de motor fuera de borda "Buil Kay", propiedad de la UNAM, para los tramos donde la profundidad permitió navegar y desde alijos de pesca impulsados con palanca en las zonas muy someras.

Los cinco instrumentos instalados se ubicaron en la boca, en una de las entradas conocidas de agua dulce, en la parte media de la laguna y los otros dos en zonas donde se sabe que se presenta agua hipersalina (Figura 1). Durante la primera campaña de campo se realizó un reconocimiento del sitio de estudio, y se colocaron los cinco CTD's con las especificaciones descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Puntos de muestreo, coordenadas y número de serie de cada CTD.

Nombre del punto	Coordenadas	No. de serie del aparato.
"ojo de agua"	21.21896° N, 89.89586° O	K5071
Boca de la laguna	21.23238 N, 89.88895° O	M3136
Punto Noreste	21. 23351° N, 89.87615° O	K0980
Punto Sureste	21. 22775° N, 89.87791° O	K1012

Dos de los instrumentos fueron colocados directamente en las raíces del mangle (“ojo de agua” y Punto Petén) (Figura 3). En el punto de la Boca de la laguna el instrumento fue fijado en uno de los pilotes de un muelle que se encuentra en este sitio. En los puntos Noreste y Sureste se colocaron los CTD fijados a bases de cemento (Figura 4), para su colocación se cavaron huecos en el sustrato de la laguna y se colocaron las bases enterrándolas en ellos y empujándolas a presión.



Figura 3. Instalación y fijación de CTD's en vegetación aledaña.



Figura 4. Colocación de CTD en anclajes de concreto enterrados en el fondo de la laguna.

A partir de la segunda campaña y posteriores campañas de muestreo (3 a 6) se localizaron los instrumentos mediante el establecimiento de una ruta con GPS a los puntos establecidos en la primera campaña de campo. A los CTD's se les dio mantenimiento y se extrajeron los datos almacenados en la memoria interna de los instrumentos utilizando una computadora de campo y un lector óptico con el que se establece la comunicación entre ambos. Se descargaron los datos al software asociado a los instrumentos. Posteriormente se volvieron a programar los instrumentos para el registro de las distintas variables y se instalaron

nuevamente en cada punto de anclaje ya sea en las raíces de mangle o en las bases de concreto fijadas en la primera campaña de muestreo (Figura 5).



Figura 5. Descarga de los datos de CTD, configuración del nuevo muestreo y reinstalación de los instrumentos.

iv **Análisis de datos observacionales**

Generación de bases de datos

Los datos de CTD's fueron inicialmente convertidos a datos ASCII con el software del equipo. Los archivos generados fueron leídos con una subrutina que permite diferenciar las líneas de texto de encabezados y extraer sólo los datos numéricos e importarlos en matrices de datos a MATLAB para su procesamiento. Las bases de datos fueron revisadas y limpiadas con la finalidad de evitar datos erróneos. Los CTD's registran mediciones de presión absoluta y conductividad, dichos datos son convertidos a nivel del agua y salinidad mediante un postproceso utilizando programas de procesamiento generados para este fin en el software Matlab. A los datos de presión (previamente depurados de datos erróneos) de cada CTD se les sustrae la presión atmosférica, cuyos datos son obtenidos de la estación meteorológica de Sisal. Esta diferencia en los valores de presión proporciona la presión ejercida únicamente por el nivel del agua sobre el sensor y convertida a profundidad en metros a través de una subrutina de Matlab. Posteriormente a los datos se les quitó el promedio de su serie de tiempo para así tener las variaciones del nivel alrededor de cero en cada sitio de la laguna.

A partir de los datos de conductividad y utilizando una rutina de programación que utiliza las mediciones de temperatura y presión asociadas a cada CTD se calcularon las salinidades para cada sitio.

Los datos atmosféricos fueron limpiados y procesados como matrices en Matlab mediante rutinas específicas que muestran las características climáticas de la región en una serie de tiempo.

Finalmente se procesaron las bases de datos finales de clima marino y atmosférico y se generaron gráficos de series de tiempo para analizar el comportamiento temporal de cada variable en los cinco puntos de instalación de CTD además de relacionarlos con variables atmosféricas.

Análisis espectrales

A las series de tiempo de datos atmosféricos y marinos se les realizó un análisis espectral utilizando subrutinas de Matlab. Se utiliza el método del periodograma de Welch, con el fin de interpretar la partición de la varianza como función de frecuencia en cada una de las variables. El periodograma de Welch es utilizado para determinar las distintas frecuencias que están presentes en una señal en el dominio de tiempo, por lo tanto, un pico en el periodograma indica una contribución importante a la varianza de las frecuencias cercanas a éste. Las series de tiempo deben tener un tamaño de 2^n . Las series de tiempo de este estudio tienen una frecuencia de muestreo de 10 minutos durante un año, teniendo un tamaño aproximadamente de 52990 datos medidos. Para poder cumplir con el método de este análisis, la serie de datos se rellenó con ceros hasta ajustarse a un tamaño de 65536. Con estos datos es posible utilizar una ventana de Hanning de máximo un año de cada variable.

4.2. Implementación del modelo numérico

Se implementó un modelo numérico hidrodinámico de La Carbonera utilizando el modelo DELFT3D promediado en la vertical (en 2D) desarrollado por DELFT Hydraulics en Holanda. En esta sección se presentan las especificaciones de malla y batimetría del modelo

y los parámetros de modelación seleccionados para lograr la estabilidad numérica y optimización de los resultados mediante un proceso de calibración y finalmente la validación del modelo.

i Malla numérica

El en módulo FLOW del modelo numérico DELFT3D se eligió un esquema de diferencias finitas en una malla escalonada ARAKAWA C (Figura 6). Para la realización de la malla numérica se utilizó el módulo RGFGRID de DELFT3D.

El dominio del modelo abarca el área total de la laguna la Carbonera, incluyendo parte de la zona marina para integrar el intercambio con el océano. Se construyó una malla rectangular de 431 x 280 puntos con resolución espacial de 11 m. La malla se rotó 20° con respecto al norte en sentido antihorario para que la frontera marina sea paralela a la línea de costa (Figura 7).

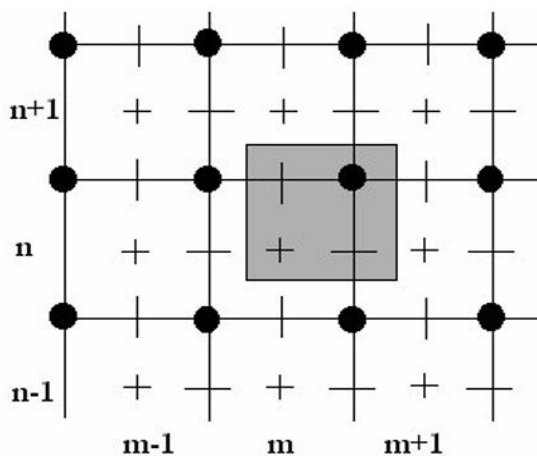


Figura 6. Malla Arakawa-C utilizada en el modelo Delft3D para modelar la hidrodinámica de la laguna la Carbonera.

Las líneas continuas representan la malla numérica y el área gris elementos con el mismo índice de malla (M, N).

- + Nivel del agua. Concentración de constituyentes, salinidad, temperatura.
- Componente horizontal de la velocidad en dirección ξ (también llamado u o dirección m)
- | Componente horizontal de la velocidad en dirección η (también llamado v o dirección n)
- Profundidad bajo la media, nivel del agua (nivel de referencia)

La solución de las ecuaciones en aguas poco profundas de dicha malla que se aproximan numéricamente en la horizontal son las ecuaciones de momento (**a y b**), la ecuación de continuidad y la ecuación integrada de continuidad. El término presión en las ecuaciones de momento se sustituye por los términos de presión de las ecuaciones de momento en dirección x, y, fijando la densidad constante y dejando de lado el gradiente de presión atmosférica, estos términos se reducen a términos barotrópicos (**c y d**).

a)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fv + v_t^H + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_t^V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)$$

b)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fv + v_t^H + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_t^V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)$$

c)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0$$

d)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

U es la velocidad promediada en la profundidad en U

V es la velocidad promediada en la profundidad en V

v_t^H es la viscosidad turbulenta horizontal

v_t^V es la viscosidad turbulenta en la vertical

Fv es Coriolis

H es la profundidad

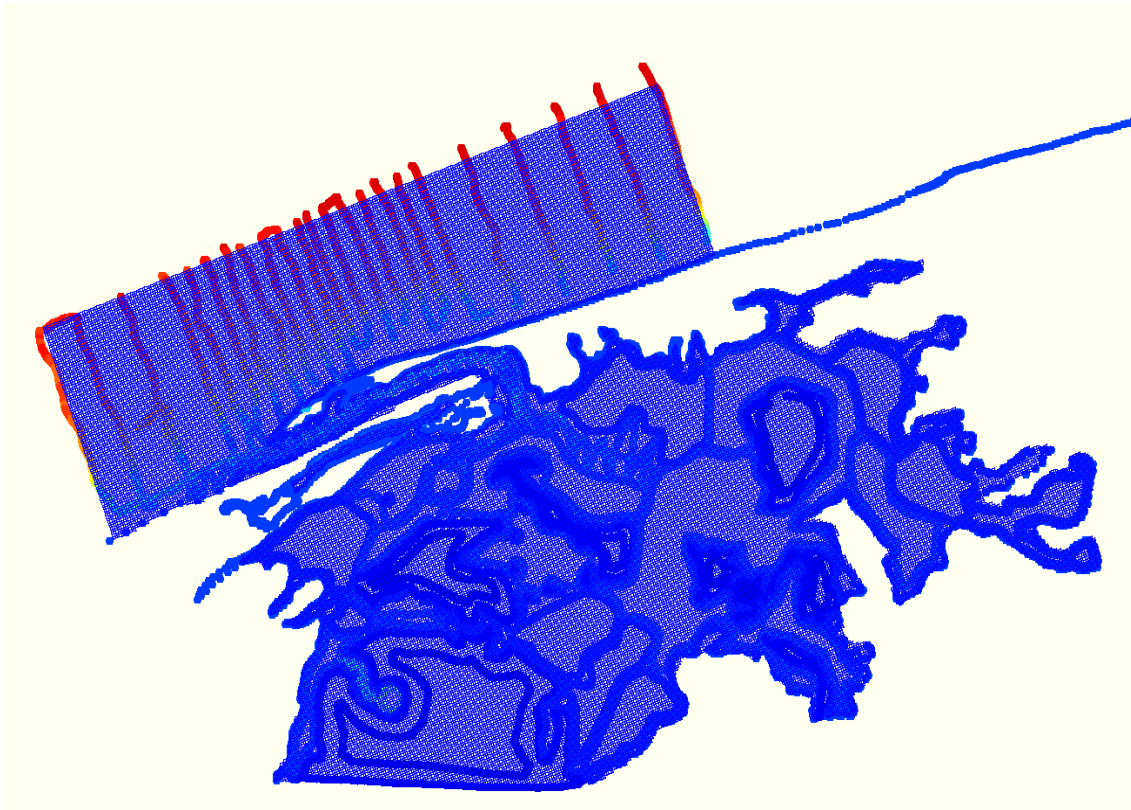


Figura 7. Malla numérica generada para la modelación numérica de la hidrodinámica de la laguna la Carbonera. La figura muestra también los datos topobatimétricos utilizados para generar la batimetría del modelo.

ii Batimetría

Se digitalizó la línea de costa y el límite de islotes y petenes de la zona de estudio utilizando el software Gri Graphical Language en plataforma Linux. Este involucra un lenguaje para la programación de gráficas que son visualizadas en Ghost View el cual genera imágenes en formato PostScript. A lo largo de estos límites de tierra, se generaron líneas de profundidad 0 que se añadieron a los datos batimétricos medidos y que fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería de la UAY, UNAM y corresponden a mediciones de campo en el sitio de estudio realizadas por Sánchez (2012) (Figura 8). Estos datos fueron complementados con información digitalizada de fotografías aéreas para la parte interna de la laguna. Se utilizó además la ruta registrada con un GPS durante los muestreos de campo para determinar las profundidades del canal que drena desde el “ojo de

agua” hasta la laguna asociando la profundidad de acuerdo a los datos de nivel registrados manualmente para dicha zona.

Para la generación de la batimetría a detalle del modelo se utilizaron los métodos de interpolación lineal "triangular interpolation" y de difusión interna "internal diffusion" utilizando el módulo QUICKIN de DELFT3D. La batimetría generada para este modelo se presenta en la Figura 9 donde puede observarse claramente el canal de alimentación en la boca de la laguna con profundidades no mayores a 1.5 m y en la parte interna de laguna se observan profundidades no mayores a 0.5 m a excepción de la zona y canal del “ojo de agua” donde hay profundidades desde 2 m disminuyendo hacia el interior de la laguna.

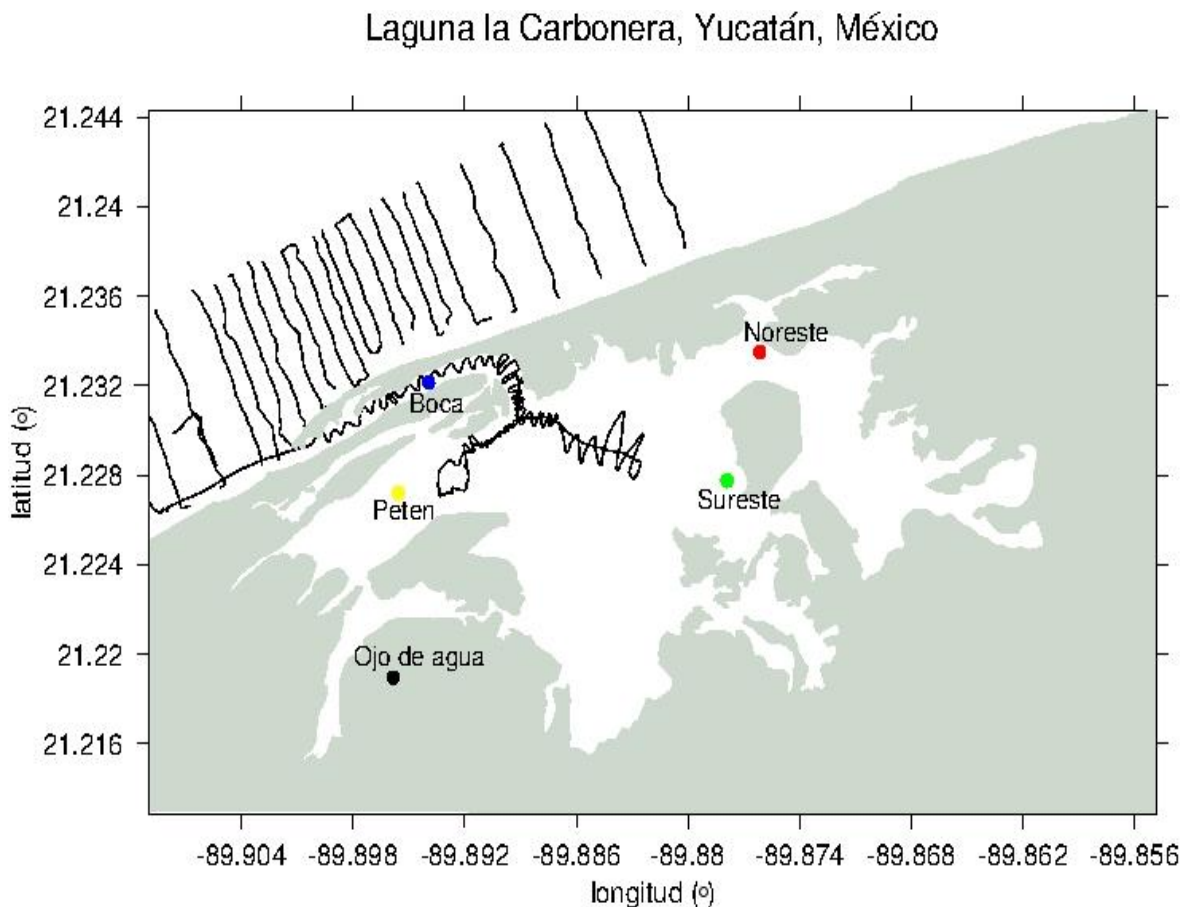


Figura 8. Rutas batimétricas en la laguna la Carbonera (líneas oscuras). Localización inicial de instrumentos (CTD's) en el sistema lagunar, los distintos colores hacen referencia a los colores en los gráficos de salinidad y temperatura.

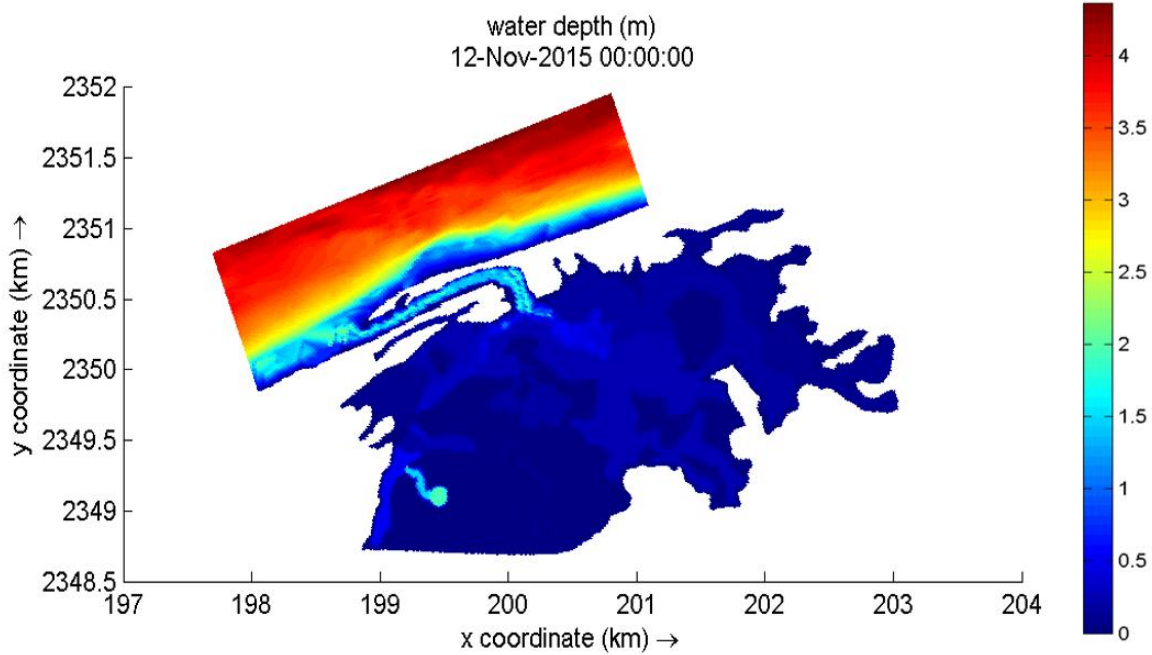


Figura 9. Batimetría generada para el modelo numérico de la Carbonera.

iii Número de Courant

Para que un modelo numérico sea estable, debe ser capaz de resolver en cada paso de tiempo la propagación de las ondas de acuerdo a su celeridad (velocidad de propagación), que depende de la profundidad en cada localidad, y al tamaño de las celdas de la malla numérica. El número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) o sencillamente número de Courant, representa la porción de una celda que un soluto atravesará por medio del transporte advectivo en un paso de tiempo Δt . El número de Courant impone una restricción a los modelos numéricos, para que en un paso del tiempo determinado, pueda viajar un disturbio sin la pérdida de resolución espacial o suavizamiento del fenómeno (difusión numérica).

El número de Courant para la propagación de una onda en una malla bidimensional está dado por:

$$CFL = 2\Delta t\sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}$$

Donde Δt es el paso del tiempo, \sqrt{gH} es la velocidad de propagación o celeridad de una onda y Δx Δy corresponden al tamaño de la celda de la malla numérica.

Para el caso en que $\Delta x = \Delta y$ se puede deducir que:

$$CFL = 2\sqrt{2} \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\Delta x}$$

En mallas numéricas de geometrías complejas, con fronteras irregulares (escaleras), flujos alrededor de islas, flujos en planicies de marea, flujos en zig-zag y canales donde las líneas de la malla no siguen suavemente la geometría del sistema, el número de Courant debe ser menor que $4\sqrt{2}$, es decir, 5.6. Utilizando DELFT3D para situaciones prácticas es aceptable que dicho número sea de 10 y en ocasiones puede ser mayor (Deltares, 2010). Sin embargo, ha sido demostrado que existen casos en los que no es suficiente cumplir con la condición de Courant para obtener resultados adecuados, por lo que se recomienda adicionalmente realizar pruebas de sensibilidad para determinar el paso de tiempo óptimo (Enríquez, *et al.*, 2005).

Dado que el número de Courant depende del paso del tiempo, el cual a su vez determina el tiempo total de cómputo, idealmente se debe elegir el mayor paso de tiempo posible que garantice la precisión y estabilidad en el modelo. Por dichas razones se recomienda realizar pruebas de sensibilidad para determinar el paso de tiempo óptimo y adecuado para obtener resultados precisos. Con base en las pruebas realizadas en este estudio se determinó usar para este modelo un paso de tiempo de 0.1 min. Con este valor, la distribución espacial del número de Courant se presenta en la Figura 10, con valores menores a 5 para toda la malla, (cumpliendo sobradamente las recomendaciones de los desarrolladores del modelo DELFT, que sugieren valores de hasta 10).

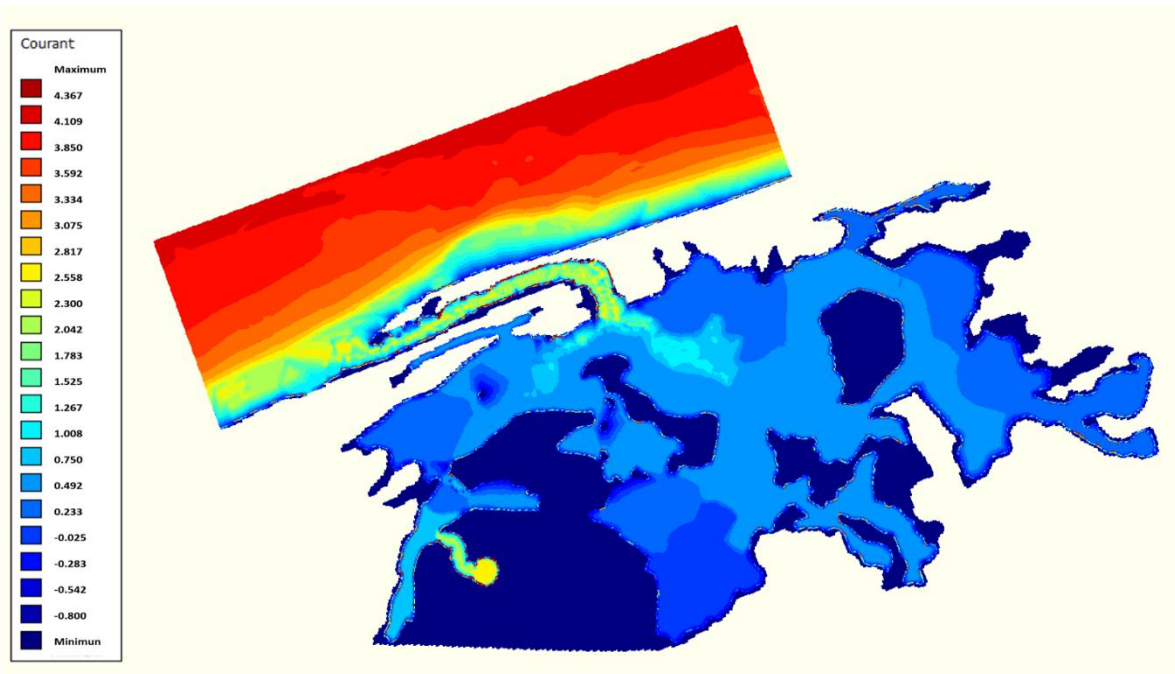


Figura 10. Distribución espacial del número de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) en el modelo generado para La Carbonera al utilizar un paso del tiempo de 0.1 min.

iv Parámetros físicos y numéricos

Las especificaciones generales para el inicio de las pruebas de modelación son las siguientes:

Latitud: 21° N

Paso del tiempo: 0.1 minuto

Gravedad: 9.8 m/s²

Densidad del agua: 1025 kg/m³

Condiciones iniciales: nivel de agua cero

v Condiciones de frontera

Fronteras del modelo

Dentro del modelo se establecen condiciones de frontera que son representadas con

fronteras cerradas o abiertas. Las primeras representan la transición entre agua-tierra y en ellas las velocidades perpendiculares son iguales a cero. Las segundas son fronteras virtuales agua-agua, en éstas las velocidades o la combinación de velocidades debe ser bien definida para obtener valores apropiados. En el DELFT3D hay distintos tipos de fronteras:

Nivel del agua: Se define como $\eta = F_x(t)$

Velocidad: Se define como $U = F_U$

Neumann: Gradiente del nivel del agua. Este tipo de frontera sólo se puede aplicar perpendicular a la costa en combinación con el nivel del agua en la frontera a mar abierto. Esta frontera se rige por $\frac{\partial x}{\partial n} = f(t)$ y se refiere a la derivada normal de la función.

Riemann: O frontera poco reflectiva. La principal característica de esta frontera es que es transparente hasta cierto nivel para ondas salientes, tales como alteraciones de onda corta. Las ondas salientes pueden cruzar la frontera abierta sin que se refleje de nuevo en el dominio computacional como sucede para otro tipo de fronteras. Se define como $U \pm \eta \sqrt{\frac{g}{d}} = F_R(t)$.

La frontera del fondo se define mediante el esfuerzo cortante en el fondo marino inducido por el flujo turbulento, dado por la ecuación de fricción. Y las condiciones de frontera de superficie libre toman en cuenta el viento.

Se asignaron tres fronteras laterales abiertas en el modelo (Figura 11) localizadas en la región marina y fueron alimentadas con diferentes forzamientos:

1. La frontera localizada en la región marina se alimentó con variaciones del nivel del mar.
2. La frontera *este* se alimentó con la corriente litoral presente en la zona de estudio.
3. La frontera *oeste* se asignó con una condición de frontera poco reflectiva que permite al modelo ajustar la hidrodinámica para cumplir la condición conservativa (frontera tipo Neuman).

Se colocaron 12 puntos de observación detallada en la malla numérica, 5 localizados en las coordenadas donde se encuentran ubicados los anclajes instrumentados con CTD y otros 7 se ubicaron en sitios estratégicos para analizar el comportamiento del modelo bajo los

Nash-Suctliffe (E); b) Error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés); c) Error absoluto medio relativo (RMAE, por sus siglas en inglés).

El coeficiente de eficiencia Nash-Suctliffe (E) fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum |O_i - P_i|^2}{\sum |O_i - O|^2}$$

Donde O_i son los valores observados, P_i son los valores predichos (o calculados) de la variable en cada paso de tiempo y O es la media de los valores observados de la variable. Una concordancia perfecta es cuando se alcanza $E=1$. Este parámetro es una medida cualitativa del ajuste del modelo y ha sido utilizada recientemente por De Marchis *et al.* (2014).

El error cuadrático medio (RSME), frecuentemente es usado para la cuantificación de errores, es una medida de las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los realmente medidos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (O_i - P_i)^2}$$

El error absoluto medio relativo (RMAE) es útil para evaluar las velocidades predichas (Kankara *et al.*, 2013), aunque otros autores también lo usaron para evaluar los niveles de agua. Definido por Walstra *et al.* (2001) como:

$$RMAE = \frac{\langle |V_m - V_c| \rangle}{\langle |V_m| \rangle}$$

Donde V_m y V_c son los vectores de velocidad medidos y calculados o bien los valores del nivel de agua respectivamente. Los paréntesis angulares indican una media aritmética. La experiencia con este parámetro es limitada por lo que una interpretación cualitativa basada

en Van Rijn *et al.* (2002) ha sido incluida en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los rangos de error para el RMAE (Van Rijn et al., 2002).

Calidad	RMAE
Excelente	<0.3
Bueno	0.3-0.5
Razonable/Justo	0.6-0.8
Pobre	0.9-1.0
Malo	>1.0

vii **Caracterización de la hidrodinámica**

El modelo numérico resuelve las ecuaciones de movimiento en cada punto de malla del dominio y en cada paso de tiempo. Los datos pueden ser exportados en los intervalos de tiempo que se desee para su postproceso y análisis. Los datos del modelo pueden leerse y visualizarse con el software de postproceso del mismo modelo y de ahí exportarse a archivos de diferentes formatos. En este caso, los datos se exportaron en archivos de Matlab (.mat). En el software Matlab se generaron rutinas de procesamiento donde inicialmente, a partir de los componentes u y v de la velocidad se calcula la magnitud de la velocidad:

$$c^2 = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Donde a y b son los componentes u y v de la velocidad.

Se calcularon las corrientes residuales a lo largo del ciclo de marea para obtener los patrones generales de movimiento neto del agua. Para calcularlas se promedió el valor de los componentes u y v en cada punto de malla a lo largo del ciclo completo de mareas.

viii **Simulación del gradiente salino**

Para la caracterización del gradiente salino en la laguna la Carbonera fue necesario concluir la caracterización de la hidrodinámica de la laguna, una vez establecida ésta, se definieron una serie de experimentos numéricos bajo distintas condiciones de marea y viento (NO, NE y Brisas). Se generaron las figuras del gradiente salino en cada experimento en el módulo QUICKPLOT de DELFT3D de acuerdo a los mínimos y máximos promedio que se reportaron en los datos de campo.

4.3. Análisis del componente biológico

Con el fin de establecer una relación entre los datos obtenidos de la modelación hidrodinámica y la distribución de algunas especies de peces, se realizó un análisis bibliográfico de la composición de peces del sitio de estudio.

En el listado taxonómico realizado por Gallardo-Torres *et al.* (2012) las familias mejor representadas para la laguna la Carbonera son Gerreidae, Poeciilidae y Carangidae. Dichos autores registraron durante un año la diversidad, riqueza y abundancia relativa de peces, considerando como especies frecuentes aquellas presentes en 5 y 10 meses y ocasionales aquellas presentes en 2 y 4 meses. Del listado taxonómico se seleccionaron aquellas especies con carácter estenohalino del componente marino, estuarino y dulceacuícola y de acuerdo a su ocurrencia dentro del sistema (frecuente u ocasional). Adicionalmente se realizó una revisión bibliográfica para obtener datos adicionales de categoría ecológica y tipo de ambiente de acuerdo a la tolerancia que tienen peces de ambientes similares a la salinidad (Castro-Aguirre, 1999; Carpenter, 2002; Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2012; Gallardo-Torres *et al.*, 2014 y; Froese y Pauly, 2015;). Con base en base al análisis mencionado, se seleccionaron las especies a incluir en este trabajo, que se enlistan en la Tabla 4.

El laboratorio de Ecología de la Unidad Académica Yucatán proporcionó registros de casi tres años de datos de la distribución de ictiofauna en la laguna la Carbonera en 12 estaciones de muestreo. La base de datos se delimitó a especies de peces con base en su carácter estenohalino y de acuerdo a su ocurrencia (Gallardo-Torres *et al.*, 2012) con datos desde marzo del 2009 a marzo del 2011.

Tabla 4. Especies de peces seleccionadas para relacionar con la distribución de las masas de agua, tipo de ambiente en el que viven, límites de tolerancia a la salinidad reportados y categoría de ocurrencia en los muestreos.

ORDEN	FAMILIA	ESPECIE	AMBIENTE	LÍMITES DE SALINIDAD (‰)	CATEGORÍA	
Atheriniformes	Atherinopsidae	<i>Menidia colei</i> Hubbs, 1936	Estuarino	30-36.5	Frecuente	
Clupeiformes	Engraulidae	<i>Anchoa lamprotaenia</i> Hildebrand, 1943	Marino	20-35.5	Frecuente	
Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Poecilia velifera</i> (Regan, 1914)	Dulceacuícola/Estuario	25-45	Frecuente	
		<i>Gambusia yucatanana</i> (Regan, 1914)	Dulceacuícola		Frecuente	
		<i>Heterandria bimaculata</i> (Heckel, 1848)	Dulceacuícola		Ocasional	
Perciformes	Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i> (Edwards, 1771)	Estuarino/Marino	25-45	Frecuente	
	Monacanthidae	<i>Aluterus scriptus</i> (Osbeck, 1765)	Marino		30-40	Ocasional
		<i>Stephanolepis hispidus</i> (Linnaeus, 1766)	Estuarino		24-35.5	Ocasional
	Carangidae	<i>Trachinotus falcatus</i> (Linnaeus 1758)	Estuarino/Marino		32.5-40	Frecuente
	Lutjanidae	<i>Lutjanus synagris</i> (Linnaeus, 1758)	Marino		22-40	Ocasional
	Sparidae	<i>Archosargus rhomboidalis</i>	Marino		28-36.5	Frecuente
	Paralichthyidae	<i>Paralichthys albigutta</i> (Jordan y Gilbert, 1882)	Marino		30-40	Frecuente
Mylobatiformes	Myliobatidae	<i>Aeobatus narinari</i> (Euphrasen, 1790)	Marino	30-40	Ocasional	
	Gymnuridae	<i>Gymnura micrura</i> (Bloch y Schneider,	Estuarino	30-40	Ocasional	

	Dasyatidae	1801) <i>Dasyatis americana</i> (Hildebrand y Schroeder, 1928)	Marino	28-35.5	Ocasional
Scorpaeniformes	Echeneidae	<i>Echeneis naucrates</i> (Ziew, 1786)	Marino	30-45.5	Ocasional
Tetraodontiformes	Tetraodontidae	<i>Sphoeroides spengleri</i> (Bloch, 1785)	Estuarino	30-40	Frecuente

Se generaron bases de datos de peces observados con sus coordenadas de localización y la salinidad registrada in situ en los muestreos. A partir de esta información se realizaron mapas de distribución de ictiofauna (presencia/ausencia) mediante una rutina programada en el software Matlab. En esta rutina se identifican y separan las especies de acuerdo a su tipo de ambiente (marinos, estuarinos y dulceacuícolas) y se les asignó el color negro, azul y verde, respectivamente, como indicador de su presencia en las 12 estaciones de muestreo determinadas por dichos autores. Adicionalmente se realizaron interpolaciones espaciales de la salinidad registrada en las 12 estaciones en cada muestreo y el resultado de la distribución de los campos de salinidad se graficó en contornos de isohalinas en cada uno de los mapas de presencia de peses de los distintos muestreos.

Esta información se analizó y se relacionó con la información obtenida de los patrones de salinidad simulados con el modelo hidrodinámico.

5. RESULTADOS

5.1. Observaciones meteorológicas

A partir de los datos atmosféricos recolectados de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio (localizada en la sede Sisal de la Unidad Académica Yucatán), se analizaron los parámetros de mayor relevancia para este estudio. Las variaciones temporales en precipitación, temperatura atmosférica, velocidad y dirección del viento se describen a continuación.

i Precipitación

La temporada de lluvias usualmente abarca los meses de junio a octubre. Sin embargo, durante la temporada de Nortes, entre noviembre y febrero, se presentan también eventos de precipitación frecuentes. Los valores registrados de precipitación del año analizado se presentan en la Figura 12, donde son evidentes varios eventos durante las temporadas de lluvias y Nortes, con variaciones que van desde 0 mm hasta un máximo de 95 mm registrado para el 5 de noviembre de 2014. Los eventos de lluvia presentaron un menor volumen de agua en la temporada de lluvias del 2014 que durante la temporada de lluvias del 2015.

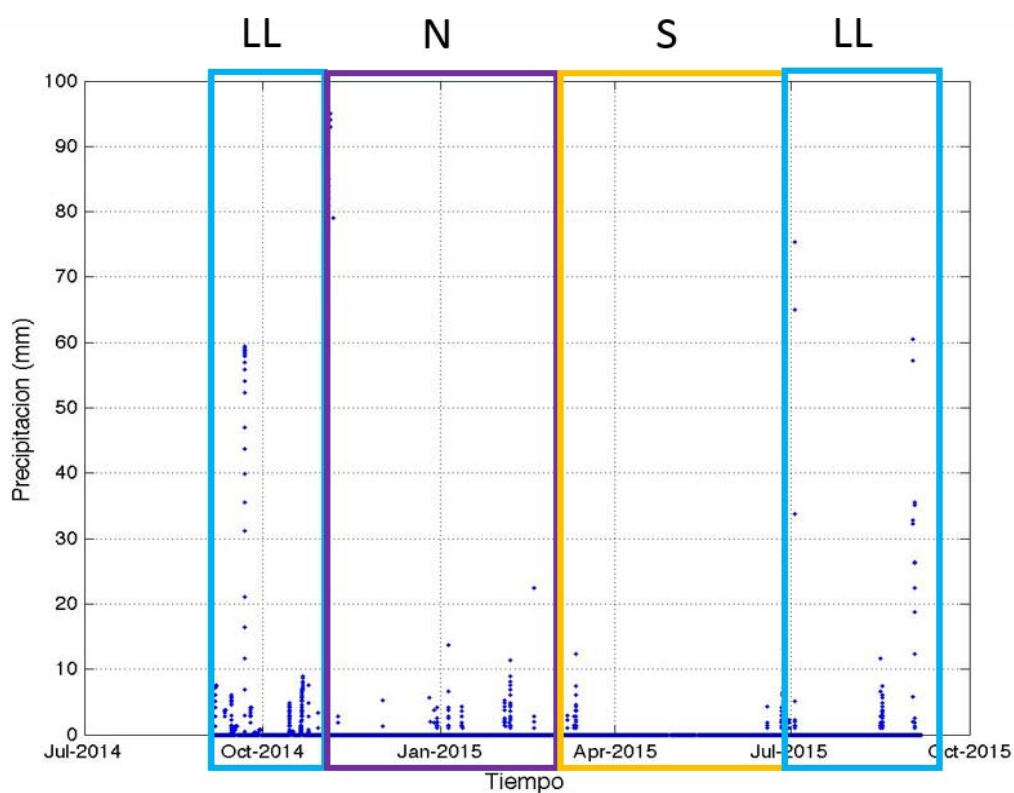


Figura 12. Precipitación medida en la estación meteorológica UAY-Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Las siglas representan las temporadas: LL (lluvias), N (Nortes) y S (secas).

ii Temperatura atmosférica

La temperatura del aire en Sisal, Yucatán osciló entre los 14 °C y los 39.3 °C durante el año de datos colectados (septiembre del 2014 a septiembre del 2015). Se pueden apreciar variaciones importantes con periodos diurnos en toda la serie de tiempo. También se observa una variación estacional con evidente disminución de temperatura en los meses de noviembre a febrero (temporada de Nortes) y un aumento considerable durante los meses de la temporada de secas (marzo a julio) (Figura 13).

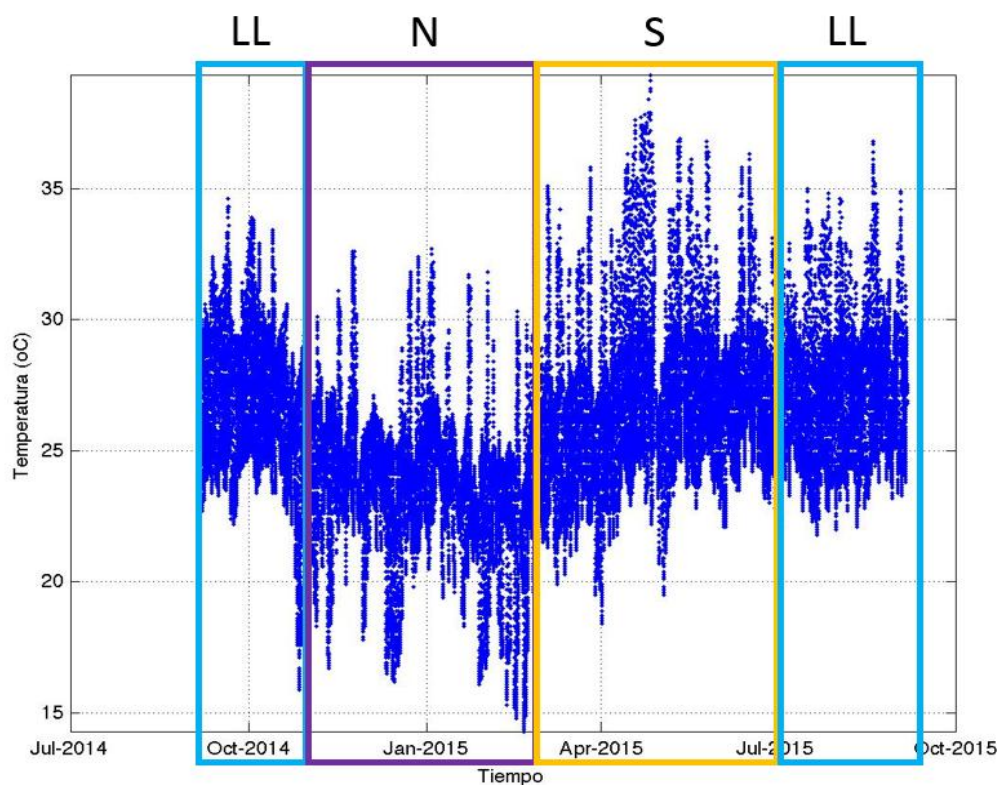


Figura 13. Temperatura del aire medida en la estación meteorológica UAY, Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015. Las siglas representan las temporadas: LL (lluvias), N (Nortes) y S (secas).

iii Viento (magnitud y dirección)

La velocidad del viento osciló entre 0 y 25 km/h, con las mayores magnitudes registradas

durante la temporada de Nortes. La máxima intensidad del viento se registró a principios de la temporada de secas (12 de marzo de 2014) de 48.3 km/h. Los vientos predominantes son del sector NE de moderada intensidad (alcanzando los 16 km/h), mientras que el viento proveniente del sector Norte es de mayor magnitud (alrededor de 25 km/h) (Figura 14).

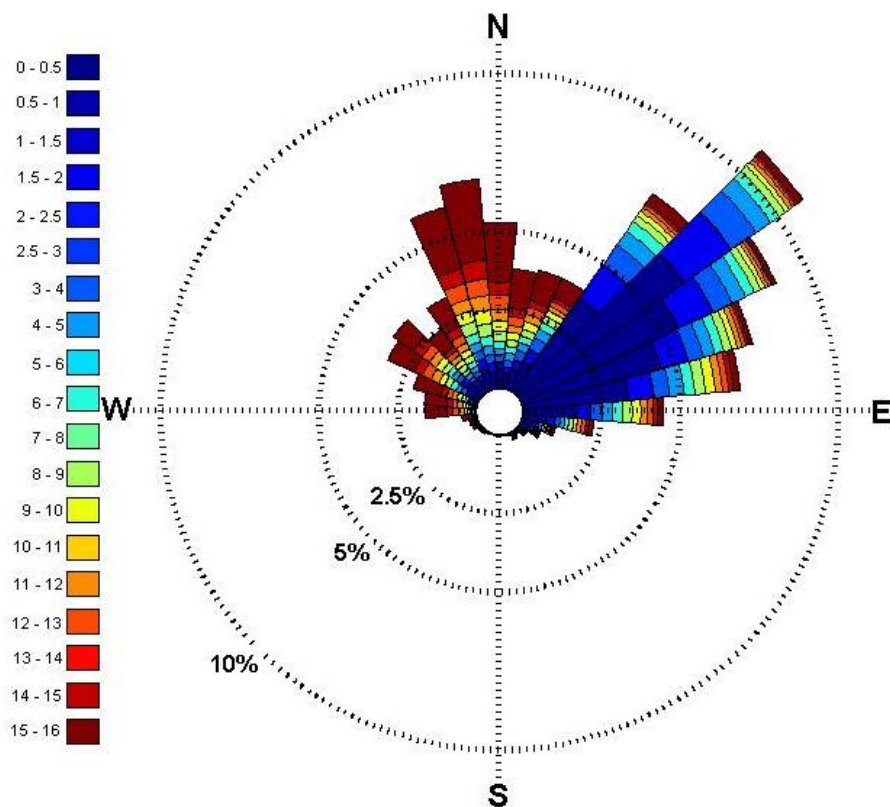


Figura 14. Rosa de viento mostrando la dirección, magnitud (colores) e histograma de frecuencias (tamaño de las barras) del viento registrado en la estación meteorológica UAY, Sisal durante los meses de septiembre del 2014 a mayo del 2015.

5.2. Observaciones oceanográficas

Los datos registrados por CTD's anclados en los distintos sitios dentro de la Laguna La Carbonera fueron procesados como se describe en la sección de métodos. Cada zona muestra variaciones propias y características a su ubicación en la laguna y de acuerdo a la temporada del año como se describe a continuación.

i **Salinidad**

Los datos de salinidad de los cinco puntos de muestreo con CTD's reflejan que existe una variación espacial importante dentro de la laguna (Figura 15). Se presentan condiciones cercanas a las del agua dulce en el “ojo de agua”, agua con salinidad característica del agua marina en las zonas del Peten y en la Boca, y zonas de comportamiento hiperhalino en el Noreste y Sureste. En estos dos sitios los CTDs alcanzaron el máximo límite de detección del sensor de conductividad, que al ser convertido a salinidad en base a los valores de presión y temperatura registrados, sugieren datos de salinidad de alrededor de 80 y ocasionalmente superando las 100 unidades (ups). De todos los sitios, el sureste muestra la mayor salinidad registrada durante la serie de tiempo. El punto Noreste muestra variaciones en la salinidad con marcadas disminuciones en algunos momentos de enero que diluyen el agua desde una condición hiperhalina (>80) a salinidad marina e incluso hasta casi agua dulce en tan sólo unas horas. La menor variabilidad de salinidad en la laguna se presenta en sitio del “ojo de agua” donde la salinidad es muy cercana a cero durante todo el año. Sin embargo, en ese sitio se registran varios momentos de incremento abrupto de salinidad algunos de ellos alcanzaron valores de alrededor de 20 ups (Figura 15).

Las mayores variaciones (amplitud de oscilación) se observan en la zona del Petén, donde diariamente se registra tanto agua marina como agua dulce, dependiendo del momento de la marea; las zonas Sureste y Noreste, que son predominantemente hiperhalinas, frecuentemente son diluidas considerablemente por agua marina y en ocasiones por agua dulce.

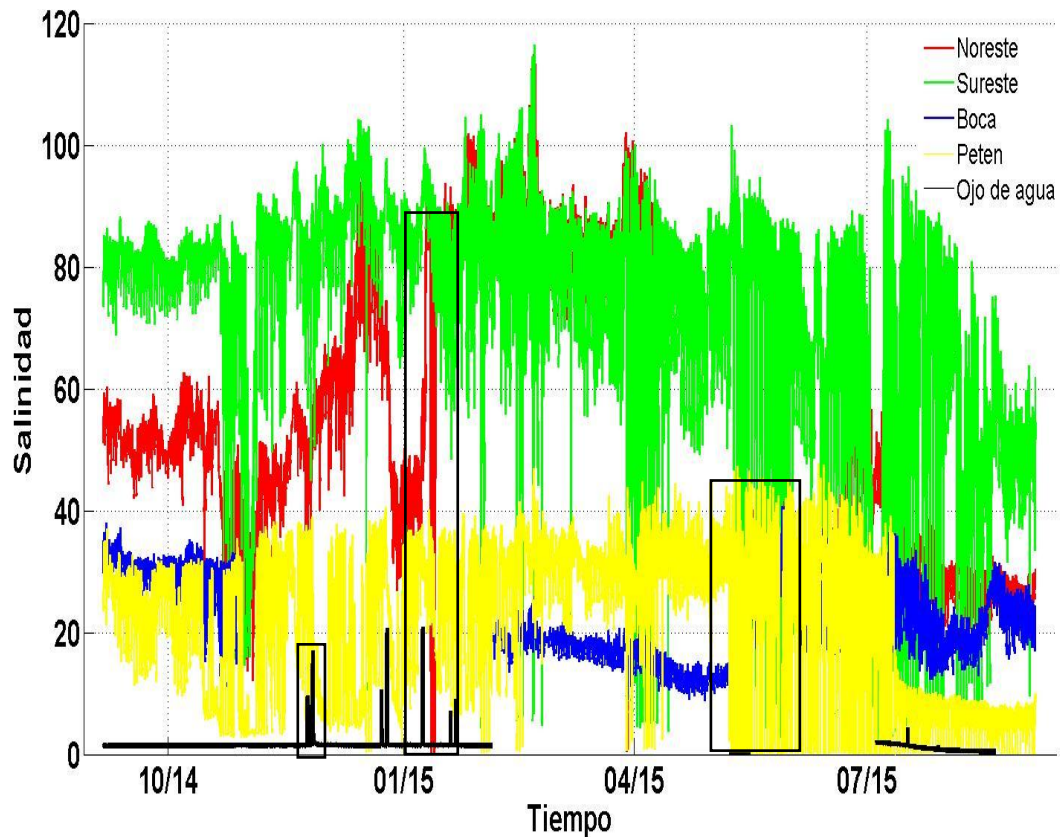


Figura 15. Salinidad registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015.

ii Temperatura del agua

Las variaciones de temperatura en los cinco puntos de muestreo son mostradas en la Figura 16. Durante el tiempo de registro, la temperatura mostró variaciones entre los 15 °C a los 37 °C. El “ojo de agua” muestra escasas variaciones de temperatura durante el año de mediciones, con algunas disminuciones e incrementos de corta duración en diferentes momentos en la serie. Los valores máximos de temperatura registrados se presentan en el Sureste con valores de 37 °C. Durante los meses de noviembre a marzo los puntos Noreste, Sureste, Petén y Boca muestran una disminución de hasta 5 grados con respecto al resto del año. El comportamiento de la temperatura en estos otros cuatro puntos de muestreo es muy similar en sus variaciones diarias.

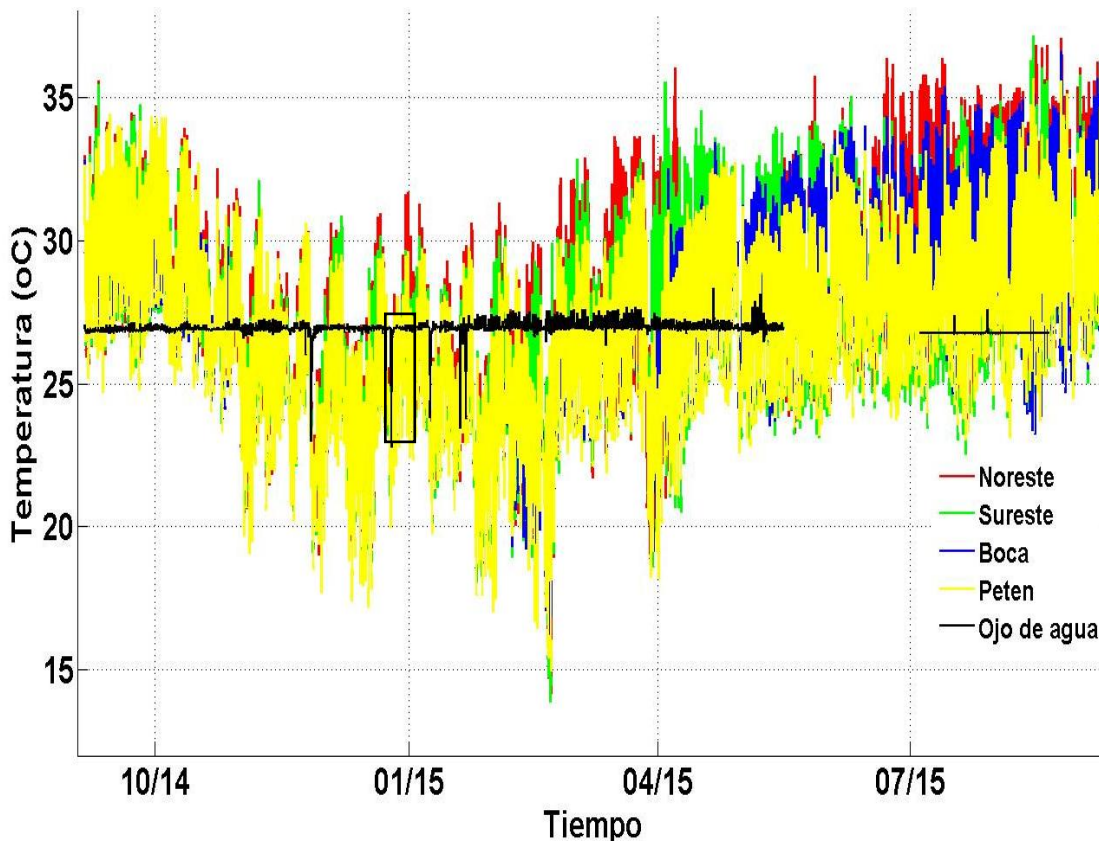


Figura 16. Temperatura registrada por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo durante los meses de septiembre del 2014 a septiembre del 2015.

iii Nivel del agua en la laguna

Con base en los datos de presión registrados con los CTD's en los cinco puntos de muestreo, se analizó el comportamiento del nivel del agua en los distintos sitios. Se observa claramente el comportamiento diurno en las variaciones de nivel para todos los sitios de instalación de CTD (Figura 17). Existe una gran variación espacial del nivel del agua a lo largo de la serie de tiempo en los distintos puntos de instalación de CTD. Como ejemplo, se presenta el detalle de la diferencia de nivel en los distintos sitios durante los días del 5 al 11 de septiembre del 2014. En este tiempo los sitios Noreste y Sureste muestran un ligero desfase y atenuamiento en el nivel del mar con respecto al nivel registrado en la boca del sistema. Estos dos sitios (Noreste y Sureste) tienen un comportamiento muy similar en cuanto a los cambios del nivel de agua, oscilan relativamente en fase y con la misma

amplitud (~20 cm). El nivel del agua tiene un comportamiento muy similar en la boca de la laguna y en el sitio del “ojo de agua”. En contraste, el sitio del Petén, que se encuentra localizado entre estos dos últimos sitios, muestra un comportamiento bastante distinto a los puntos anteriores. Es un sitio influenciado tanto por el mar como por la descarga continental desde el “ojo de agua”, que al tener aumentos y disminuciones simultáneas generan un comportamiento distinto que el del resto del sistema.

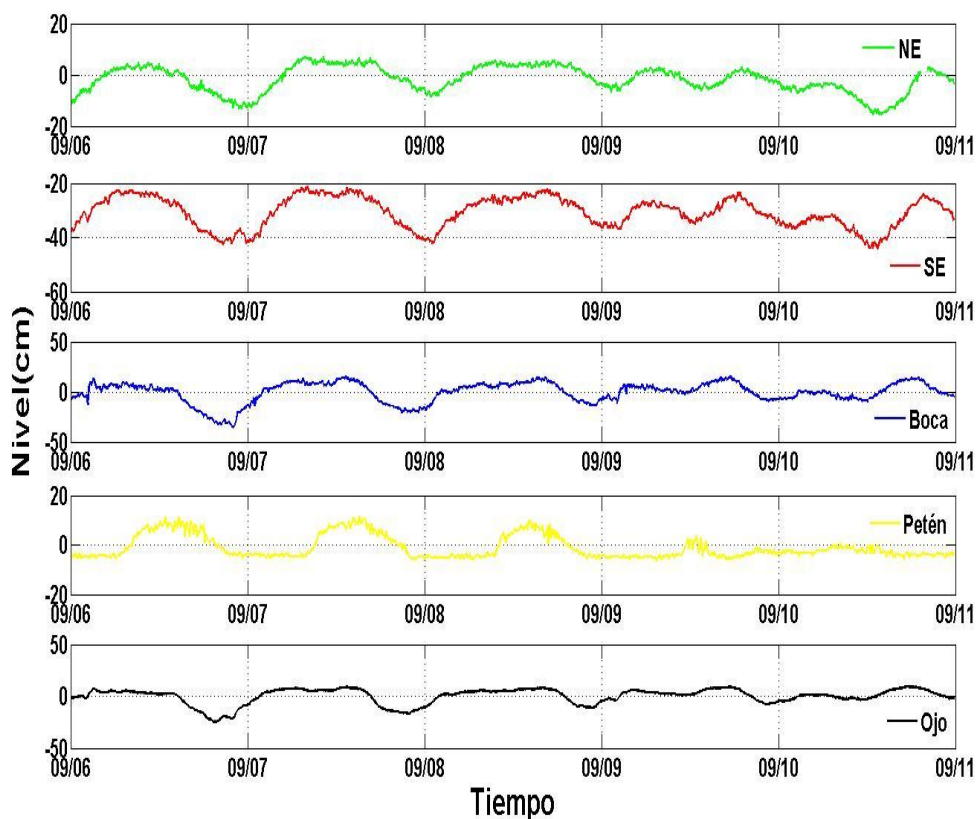


Figura 17. Nivel del agua registrado por los CTD's para cada uno de los puntos de muestreo del 5 al 11 de septiembre de 2014.

iv Marea: nivel del agua del mareógrafo de Sisal

Los datos de marea medidos por el mareógrafo en Sisal a lo largo del año muestran una amplitud de oscilación alrededor de los 0.5 m, superando dicho valor sólo en algunos momentos de la serie de tiempo (Figura 18). La marea es diurna con un ligero matiz semidiurno durante mareas muertas.

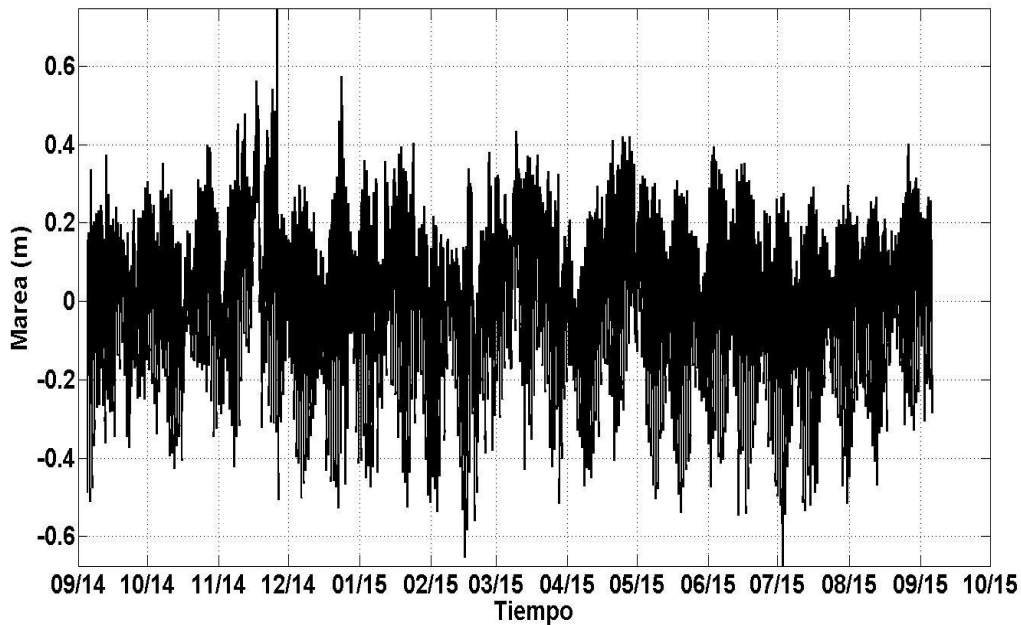


Figura 18. Marea medida por el mareógrafo ubicado en el puerto de Sisal de septiembre de 2014 a septiembre de 2015.

5.3. Efectos atmosféricos en las características termohalinas de la laguna

La hidrodinámica está influenciada por fenómenos meteorológicos, los cuales provocan cambios en las condiciones promedio de temperatura, salinidad y nivel del agua.

Eventos de lluvia en una región como la de este estudio, donde la columna de agua es de muy poca profundidad y la lluvia puede ser intensa y muy localizada, pueden generar cambios muy abruptos en la salinidad. Por ejemplo, la salinidad en el punto Noreste muestra disminuciones abruptas de salinidad, pasando de presentar condiciones hiperhalinas hasta salinidades cercanas a cero (recuadro largo Figura 14). Durante las mismas fechas se registró un incremento en los valores de precipitación en Sisal, dichos eventos se asocian a un proceso de dilución de la salinidad en el punto Noroeste (Figura 19).

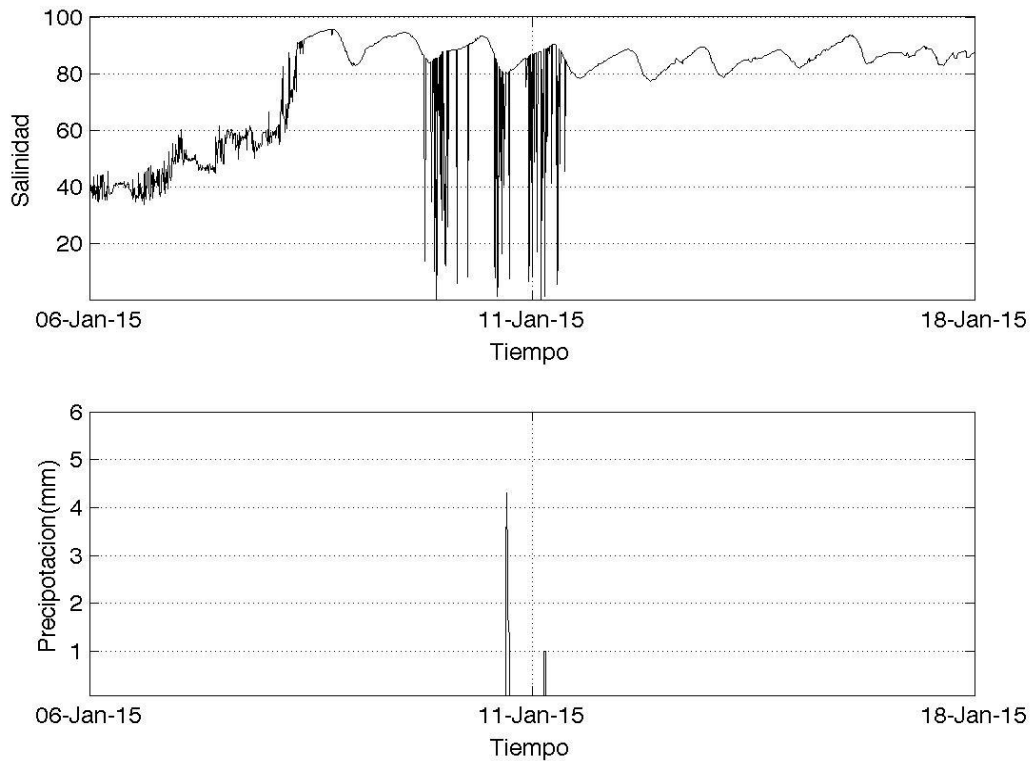


Figura 19. Momentos de dilución de la salinidad en el sitio Noreste (arriba) y su relación con registros de precipitación en estación la meteorológica UAY, Sisal (abajo).

Otro comportamiento eventual, de relevancia y preocupación, se observa en el sitio del “ojo de agua”, con aumentos súbitos de salinidad en distintos momentos de la serie de tiempo (Figura 15, recuadro pequeño). En La Carbonera, este comportamiento está asociado al cambio en el nivel del agua (marea registrada por el mareógrafo ubicado en Sisal), donde se observa que en momentos de marea baja el sensor localizado en el “ojo de agua” registra la presencia de agua salada en el sitio. Cuando estos eventos ocurren en la temporada de invierno, se registra en ese sitio temperatura menor que la que tiene el agua del acuífero (Figura 20). Esto indica que en esos momentos el “ojo de agua” presenta una inversión de flujo y el agua de la laguna penetra hacia el acuífero costero.

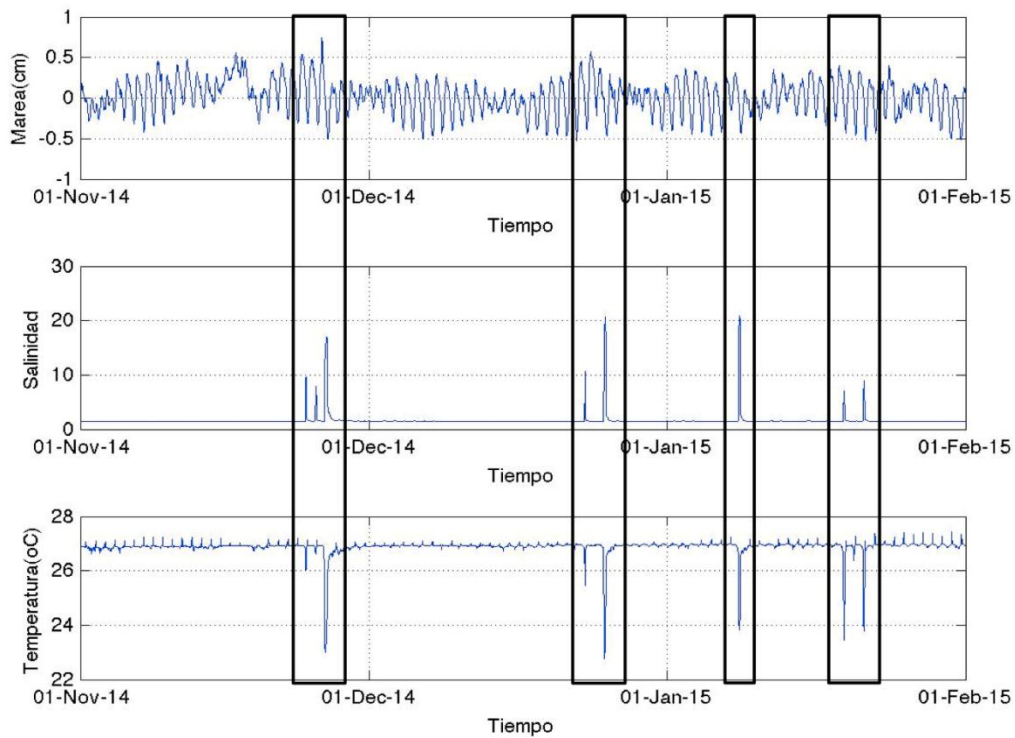


Figura 20. Relación de eventos de sobre elevación del nivel del mar (arriba) con registros de picos de máxima salinidad (medio) y disminución de la temperatura (abajo) en el “ojo de agua” de la Carbonera.

Por otro lado, el viento también puede generar cambios importantes en la laguna, por ejemplo, un aumento repentino en el nivel del agua se registró en el sitio Sureste el día 31 de enero del 2015 que pueden estar relacionados con el aumento en la magnitud del viento, (ráfagas de hasta 20 km/h) y cambios en la dirección del viento (sectores NNE, ENE, E, NE) (Figura 21).

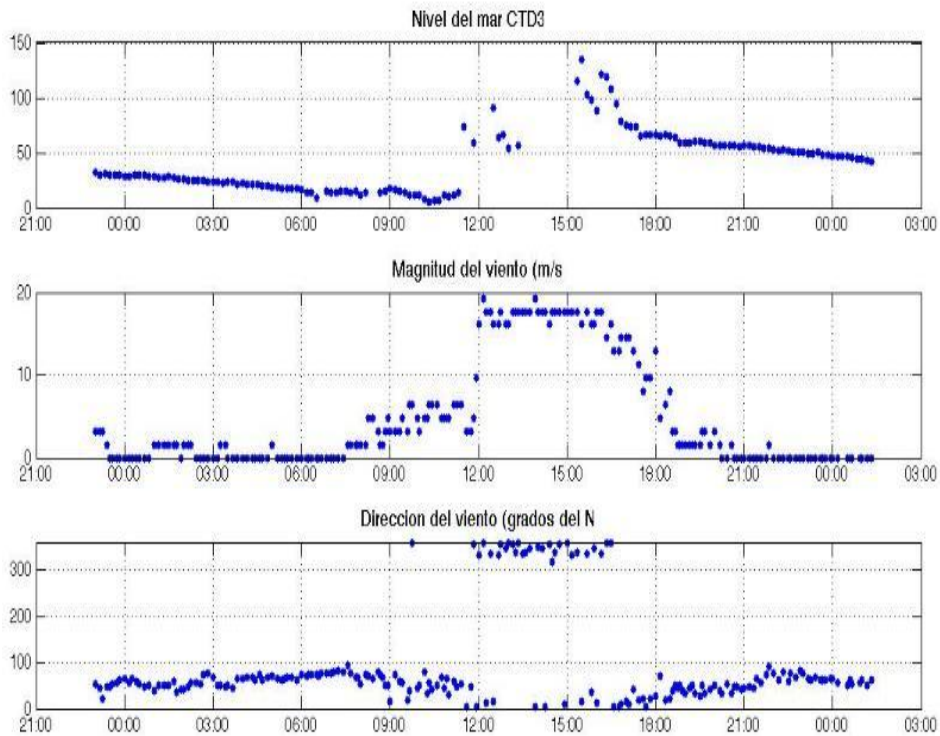


Figura 21. Variaciones en el nivel del agua en el sitio Sureste (arriba) y su relación con registros de viento registrados en la estación meteorológica de la UAY-UNAM (abajo); las flechas indican la dirección del viento.

5.4. Análisis espectral

Se realizó un análisis de frecuencias para las diferentes variables registradas. En el caso de la marea y los niveles medidos por cada CTD en los diferentes puntos de la laguna se observa una concordancia entre los picos de frecuencia que se registran: Uno correspondiente a una variación diurna, otro correspondiente a una variación semidiurna y otro a una componente tridiurna. A manera de ejemplo se muestra el análisis de frecuencias para la serie de tiempo del mareógrafo de Sisal y la boca (Figuras 22 y 23 respectivamente).

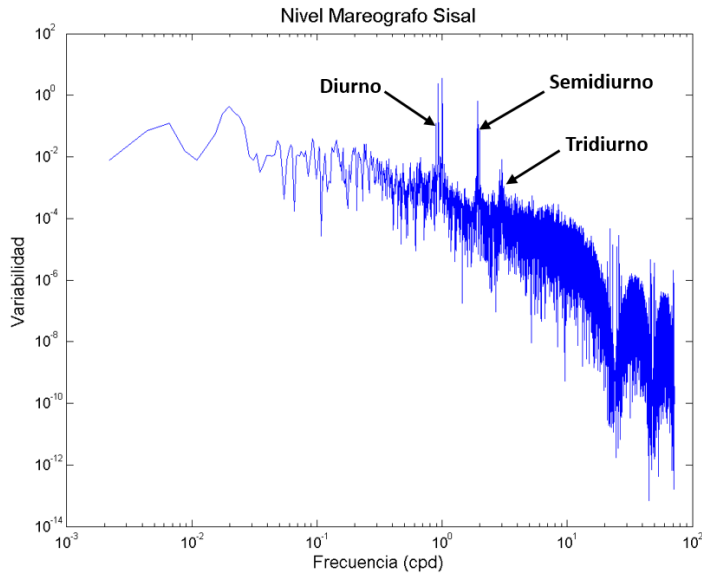


Figura 22. Espectro de frecuencias de la serie de tiempo correspondiente a los datos de marea registrados en el mareógrafo en Sisal.

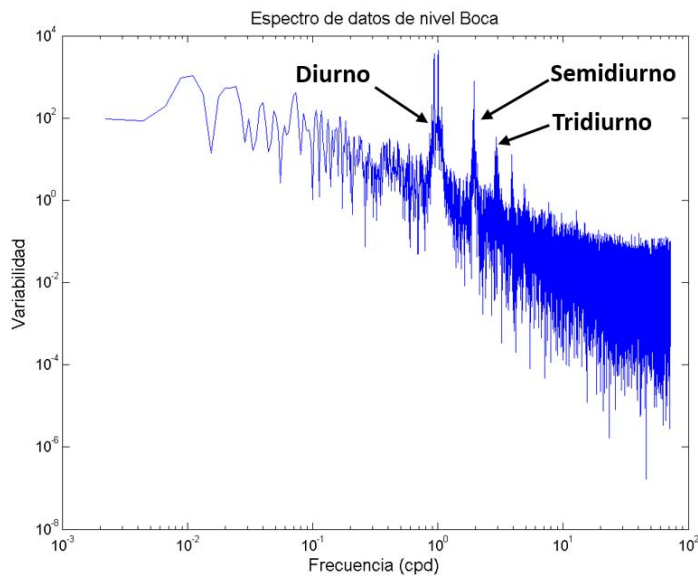


Figura 23. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de nivel en el punto de la Boca.

En el caso de la temperatura del agua se observa la misma correspondencia entre los picos de frecuencia para los puntos de la Boca, Noreste, Sureste y Petén, esto es, diurno,

semidiurno y tridiurno (Figura 24), una excepción la representa el punto del “ojo de agua” donde no hay un pico claramente visible en el periodograma (Figura 25).

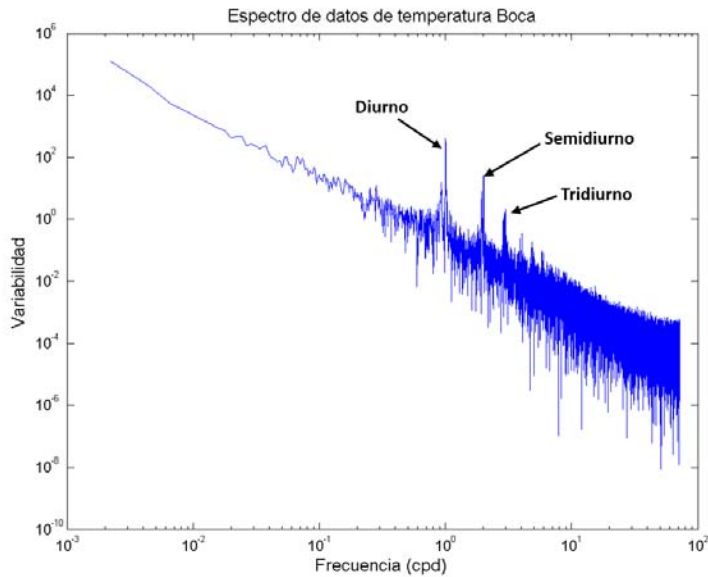


Figura 24. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de temperatura en el punto de la Boca.

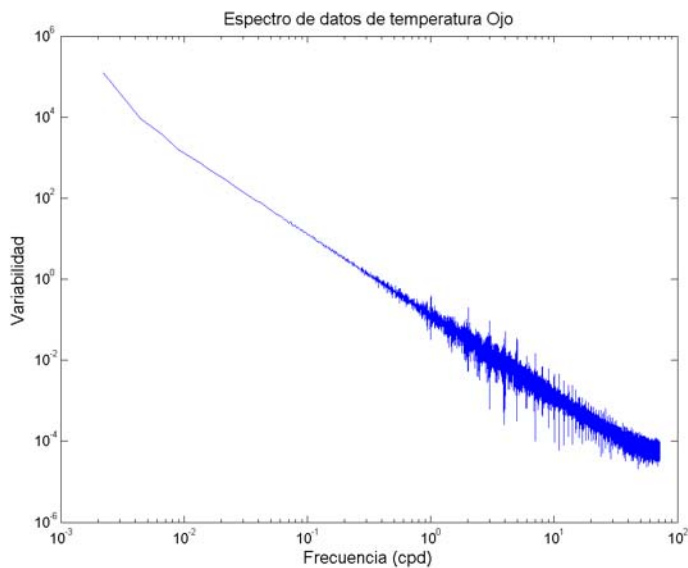


Figura 25. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de nivel en el punto del “ojo de agua”.

Para la temperatura atmosférica de igual manera se observan de manera contundente únicamente los picos de frecuencia, diurno y semidiurno, (Figura 26).

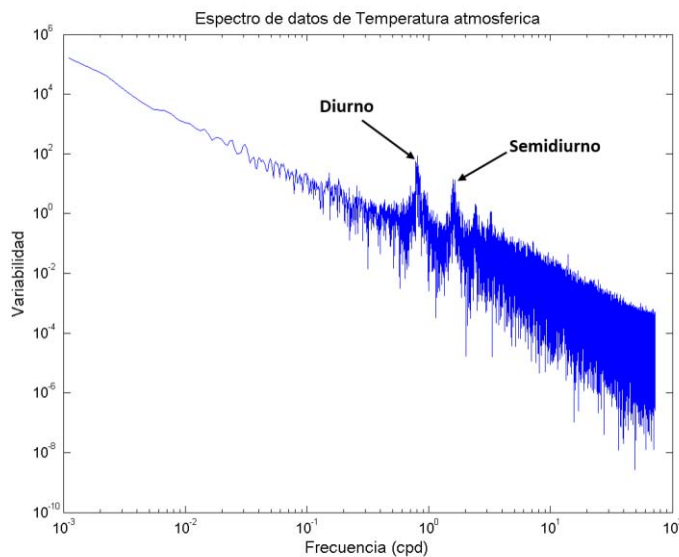


Figura 26. Espectro de frecuencias para la serie de tiempo correspondiente a los datos de temperatura de la estación meteorológica en Sisal.

5.5. Experimentos numéricos

Los ensayos numéricos dieron inicio con 7 pruebas de sensibilidad (PC01 a PC07) para comprobar la estabilidad del modelo ante la malla numérica, determinar el paso de tiempo adecuado y evaluar los tipos de fuerza aplicada en las fronteras abiertas transversales a la costa. Posteriormente se realizaron 16 simulaciones numéricas (LC01 a LC16) dirigidas a calibrar y validar el modelo numérico (Tabla 5). Posteriormente se llevaron a cabo una serie de experimentos para caracterizar la hidrodinámica bajo diferentes forzantes (C01 a C13). Se simuló el gradiente salino que se presenta de manera natural en el sitio de muestro bajo distintas condiciones de marea y viento para establecer una relación entre el movimiento del agua con sus características salinas y la ictiofauna del sistema lagunar (C14 a C32).

Tabla 5. . Características de las pruebas de sensibilidad (PC01-PC07) y experimentos de calibración del modelo numérico (LC01-LC16).

Experimento	Frontera paralela a la costa	Fronteras transversales a la costa, Tipo (valor)	Forzamiento de viento	Descarga (m3/s)	Coefficiente de Rugosidad	Periodo de simulación	Duración	Propósito del experimento
PC01	Nivel 0	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	No	Chezzy (default 65)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Probar la estabilidad del modelo ante la malla numérica y evaluar los tipos de fronteras transversales a la costa
PC07	Nivel 0	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	No	Chezzy (default 65)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Determinar el paso de tiempo óptimo del modelo numérico
LC03	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	5	Chezzy (default 65)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar el coeficiente de rugosidad establecido por default en el modelo
LC04	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	5	Manning uniforme (0.018)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar un coeficiente de rugosidad bajo y uniforme
LC05	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	25	Manning uniforme (0.018)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar el efecto de una descarga de agua mayor
LC06	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	25	Rugosidad Manning variable (0.018, 0.07 y	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar el efecto de una descarga grande y valores de rugosidad variables en el dominio

					0.11)			
LC07	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	5	Rugosidad Manning uniforme (0.11)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar el efecto de una rugosidad alta en todo el dominio
LC08	Nivel (nivel del mareógrafo)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	5	Rugosidad Manning variable (0.018, 0.07 y 0.11)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar el efecto de una descarga pequeña y valores de rugosidad variables en el dominio
LC09	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.018)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar los efectos del forzamiento local (nivel CTD Boca)
LC10	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.01)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Calibrar modelo con descarga pequeña y un menor valor de rugosidad
LC11	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.01)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Calibrar el modelo usando una batimetría con 0.3 a 0.5 m aumentados a cada punto de malla
LC12	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	No	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.01)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Calibrar el modelo usando una batimetría con 0.3 m aumentados a cada punto de malla
LC13	Nivel (nivel del CTD)	Neumann y corriente hacia	No	2.5	Rugosidad Manning	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Calibrar el modelo usando batimetría original, rugosidad baja y descarga

	correspondiente al punto de la Boca)	el oeste (cero)			uniforme (0.01)			baja
LC14	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	Serie de tiempo de datos viento registrados en la estación meteorológica	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.01)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Calibrar el modelo usando serie de tiempo de datos de viento
LC15	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	Viento constante del N	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.018)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar los efectos de utilizar un viento del Norte.
LC16	Nivel (nivel del CTD correspondiente al punto de la Boca)	A fronteras tipo Neumann y corriente hacia el oeste (cero)	Serie de tiempo de datos viento registrados en la estación meteorológica	2.5	Rugosidad Manning uniforme (0.018)	10-11-2015 a 12-11-2015	2 días	Evaluar los efectos de la serie de tiempo de datos de viento y una nueva frontera abierta.

i Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo numérico consistió en seleccionar las condiciones de frontera, así como los parámetros físicos y numéricos que reproducen más adecuadamente las mediciones en campo, particularmente los niveles de agua. Por tal razón se realizaron una serie de experimentos numéricos dirigidos a comprender los efectos de los diversos forzamientos (incluyendo variaciones en los aportes de agua a la laguna) y elegir los más adecuados.

Inicialmente se asignaron en las primeras pruebas (PC01 a PC07) el coeficiente de rugosidad establecido en el modelo por default (Formulación de Chezy con coeficiente de fricción=65) y nivel del agua cero, además de que se incluyeron las fronteras abiertas.

Se probaron diferentes pasos de tiempo (de 0.5, 0.25, 0.15 y 0.1 de minuto), y con base en los resultados de las pruebas de sensibilidad realizadas se determinó que el paso de tiempo óptimo para los experimentos numéricos es de 0.1 minuto. Así mismo, las fronteras abiertas en el mar se designaron como corriente costera al Este, tipo Neumann al Oeste y variaciones de marea al Norte.

Una vez definido el paso del tiempo y las fronteras abiertas se realizaron experimentos para probar distintos valores en la descarga de agua dulce en el sitio del “ojo de agua”, diferentes valores en el coeficiente de rugosidad Manning en el fondo, y se realizaron ajustes y modificaciones a la batimetría. También se realizaron pruebas del efecto de introducir el forzamiento de viento en la superficie usando datos medidos en la estación meteorológica de Sisal y también con escenarios de viento uniforme.

Un coeficiente de rugosidad alto corresponde a una pérdida de energía alta y viceversa. Se utilizaron diferentes valores, desde los más bajos (0.01 a 0.018) hasta el más alto (0.11) que de acuerdo a lo reportado por Chow, (1959), los valores más bajos representan planicies de marea y zonas marinas (inicio de la plataforma continental) con escasa o nula vegetación (matorrales o zonas de pastos marinos) mientras que el valor más alto corresponde a planicies de inundación con una gran cantidad de vegetación. Se utilizaron en distintas pruebas dichos valores (0.018 y 0.11). Se realizó además una prueba con valores de fricción variables espacialmente. Para ello se generó una distribución de la zonificación de rugosidad asignando coeficientes de Manning variables (0.018, 0.07 y 0.11) (Figura 27).

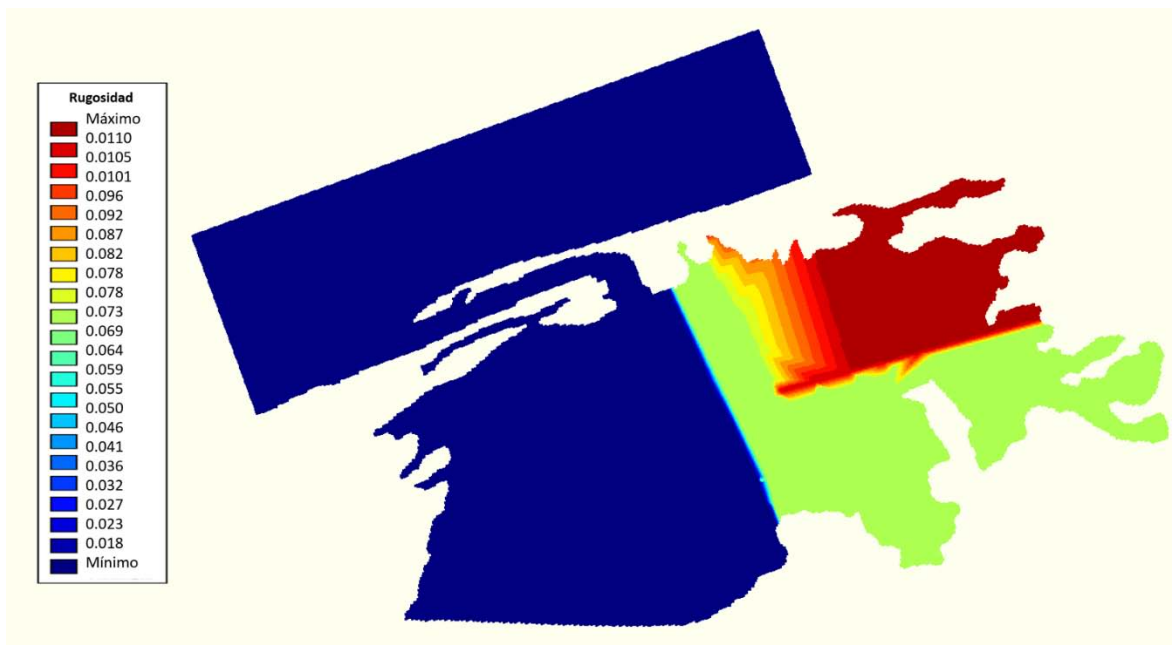


Figura 27. Mapa de rugosidad variable en el dominio, el color azul corresponde a los valores más bajos de rugosidad usados para la validación (0.018), el verde al medio (0.07) y el rojo al más alto (0.11).

En los resultados se encontraron diferencias entre utilizar un alto o bajo coeficiente de rugosidad; al emplear coeficiente de fricción bajo, se obtuvieron mejores resultados (basándose en los cálculos de error descritos en la metodología) al validar los niveles de agua simulados con los datos medidos (experimento LC04, línea amarilla en Figuras 28 y 29), no así para coeficientes de calibración altos (experimento LC07, línea verde en Figuras 28 y 29). Por otro lado, al utilizar valores de rugosidad espacialmente variables no se encontraron diferencias entre usar una rugosidad uniforme baja (0.018) y utilizar rugosidad variable (experimento LC08, línea magenta Figuras 28 y 29). Con base en estos resultados se determinó que el parámetro de fricción a utilizar en los experimentos numéricos sería con la formulación de Manning con un coeficiente uniforme de 0.018.

Se probaron valores de volumen de descarga en el “ojo de agua” de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $25 \text{ m}^3/\text{s}$, y se encontraron diferencias importantes entre la descarga de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Con una descarga pequeña se obtuvieron valores cercanos al orden de los reales (experimento LC08, línea magenta Figuras 28 y 29) y valores lejanos a los reales con el uso

de una descarga grande (experimento LC06, línea negra Figuras 28 y 29).

El forzamiento en la frontera abierta ubicada al Norte en la zona marina, fue también sujeto a distintas pruebas (experimentos LC03 a LC16); durante las primeras simulaciones (LC01 a LC08) se utilizaron en dicha frontera los datos medidos en el mareógrafo de Sisal para alimentar las mareas en el sitio de estudio. Sin embargo, estos datos tienen un desfase temporal significativo en la señal de marea que se propaga hacia la Laguna la Carbonera (Figura 28 y 29). Por lo anterior, se realizaron pruebas (LC10-LC17) en las que se forzó la frontera marina con los datos medidos por el sensor de presión del CTD ubicado en la Boca de la laguna, con lo que se corrigió el desfase temporal de la señal de marea sin que se alterara la señal en cuanto a la amplitud de las oscilaciones con respecto al mareógrafo de Sisal (Figuras 30 y 31).

En el caso de los datos del viento incluidos en el modelo se asignaron dos pruebas (LC14 y LC15, líneas cian y negra de las figuras 30 y 31 respectivamente) para observar los efectos del viento en el modelo. En la prueba LC14 se utilizaron datos medidos en la estación meteorológica de Sisal y en la prueba LC15 se utilizó un viento constante del Norte. No se encontraron diferencias importantes en el nivel del agua entre los efectos de las dos series de viento; y se calibró el modelo utilizando los datos de la serie de tiempo medida en la estación meteorológica.

Debido a que en la zona de estudio existen otras entradas y salidas de agua al estar rodeada de un sistema de humedales se realizaron algunas pruebas añadiendo una nueva frontera abierta tipo Neumann en la parte más occidental para explorar si al añadir otras fuentes de descarga de agua los resultados se ajustarían mejor a las observaciones. Los resultados (prueba LC16-línea verde en las figuras 30 y 31) no mostraron mejoría y, por el contrario, dieron valores más alejados de los datos reales medidos. Por lo anterior, se quitó dicha frontera.

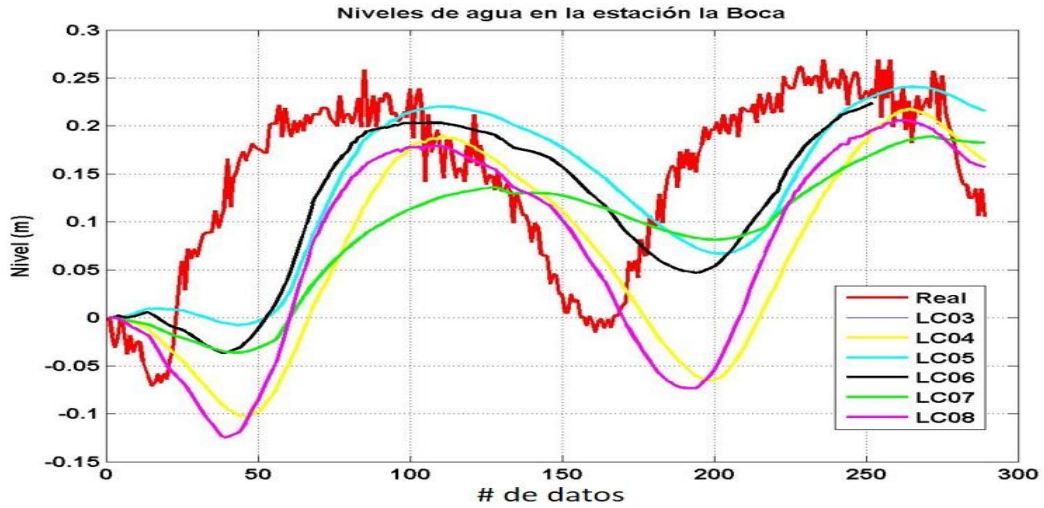


Figura 28. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC01 a LC08 en la estación de la Boca. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el mareógrafo de Sisal y LC03-LC08 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.

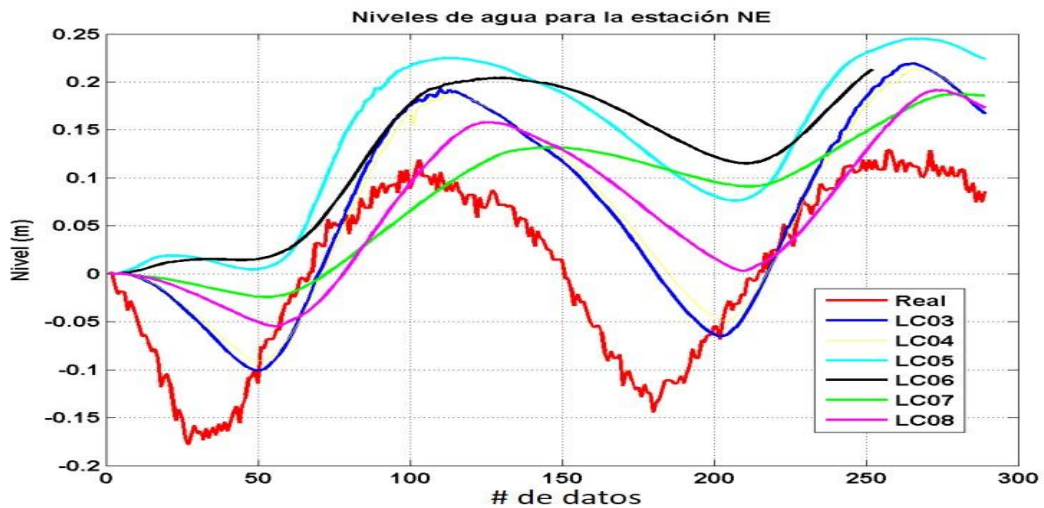


Figura 29. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC01 a LC08 en la estación NE de la laguna. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el mareógrafo de Sisal y LC03-LC08 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.

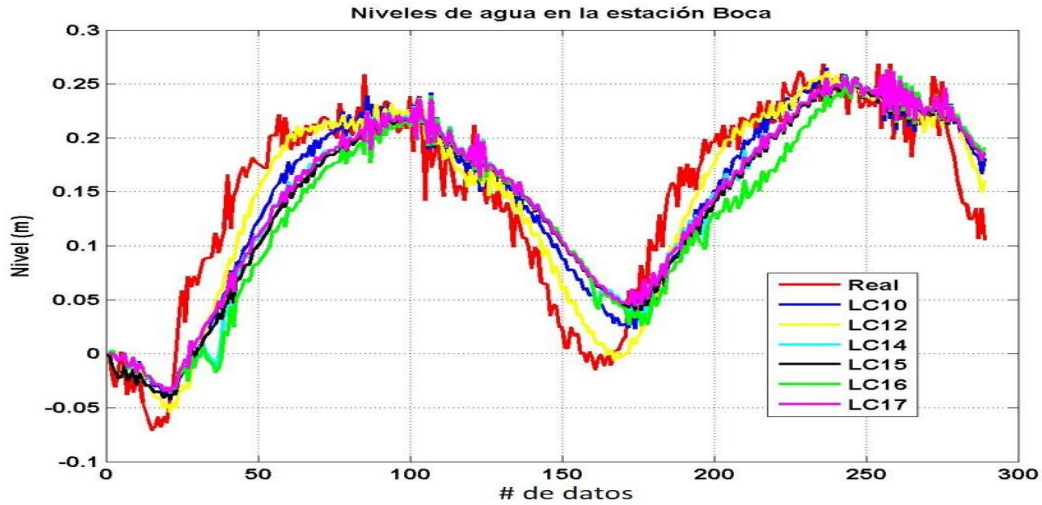


Figura 30. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC10 a LC17 en la estación de la Boca. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el CTD de la Boca y LC10-LC17 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.

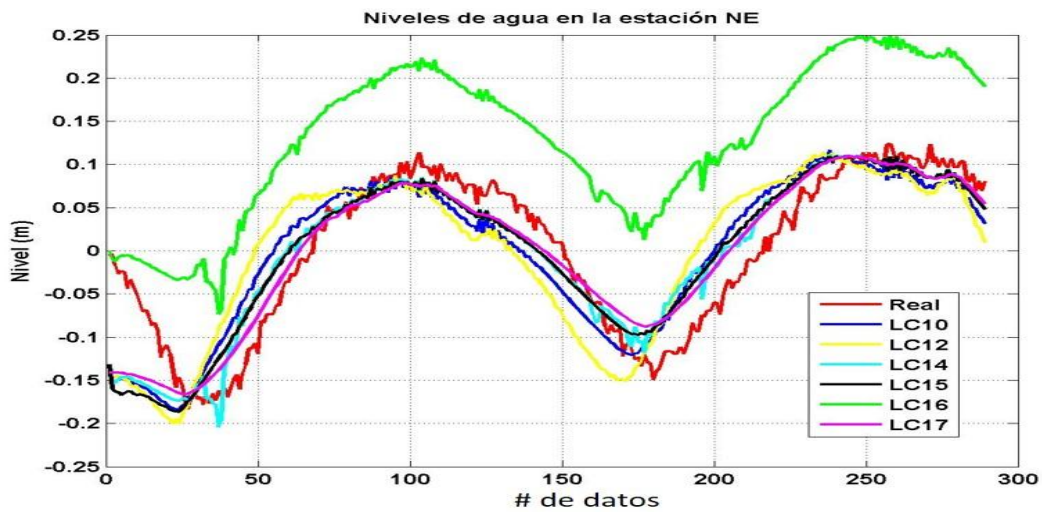


Figura 31. Datos simulados del nivel del agua en los experimentos LC10 a LC17 en la estación NE. Real corresponde a la serie de tiempo medida en el CTD de la estación NE y LC10-LC17 a las distintas simulaciones. El eje x es el número de datos.

ii Validación del modelo numérico

Como se mencionó anteriormente, el modelo fue forzado con mareas, viento y descarga de

agua continental. Los datos utilizados son: mediciones de variaciones del nivel del agua medidos en la boca de la Carbonera, mediciones de viento en la estación meteorológica Sisal, descarga de agua continental de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, fricción de fondo utilizando rugosidad uniforme con la formulación de Manning y un coeficiente de 0.018. En la Tabla 6 se presentan las estimaciones de error entre los resultados del modelo calibrado (de acuerdo a lo descrito en la sección anterior) y los datos medidos en las estaciones de observación. No se incluyó la estación del “ojo de agua” ni la estación del Petén debido a que se presentaban huecos importantes de datos medidos del nivel del agua debido a fallas en el sensor de presión de esos instrumentos. La calidad para los niveles de agua para la prueba LC09 fue excelente con base a RMAE, mientras que los valores de E, fueron cercanos a 1 (Tabla 6). Las especificaciones utilizadas en la validación del modelo son las utilizadas en la prueba LC09. En la Figura 32 se puede apreciar el nivel medido en la estación la Boca contra el nivel modelado en la prueba LC09.

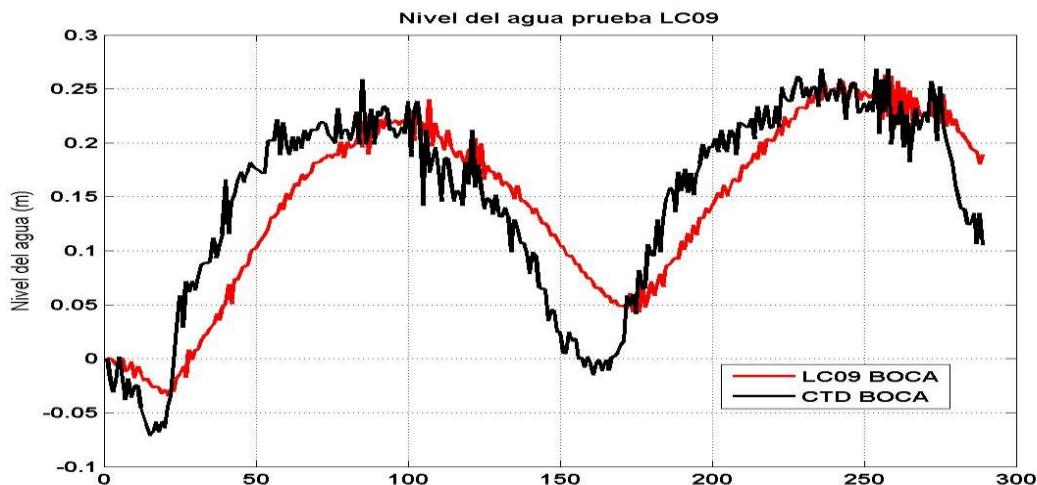


Figura 32. Niveles de agua medidos (línea negra) y simulados (línea roja) en la estación la Boca para la prueba LC09.

Tabla 6. Errores obtenidos durante el proceso de ajuste de coeficientes de rugosidad de Manning para la calibración del modelo numérico en la prueba LC09.

Experimento	Estación	Niveles de agua			
		E	RMSE	RMAE	RMAE (calidad)
LC09	Boca	0.7261	0.0516	0.2554	Excelente
	SE	0.8423	0.0301	0.3401	Bueno
	NE	0.7251	0.0471	0.5752	Bueno

iii Caracterización de la hidrodinámica

Se realizaron una serie de experimentos numéricos (C01 a C13) para caracterizar la hidrodinámica de la laguna la Carbonera bajo distintos forzamientos.

El nivel de agua simulado en la estación la Boca en el experimento C06 durante un ciclo de marea se presenta en la Figura 33 y los vectores de velocidad en el mismo sitio para el mismo período se muestran en las Figuras 34 y 35. Durante la marea llenante las mayores magnitudes de flujo (0.8 m/s) son en el canal de la Boca de la laguna y al final de este en el interior de la laguna. En marea vaciante la magnitud de velocidad de las corrientes es menor (0.5 m/s) que durante la llenante. Los patrones de circulación dentro de la laguna muestran algunos giros y reflejan zonas de menor circulación que otras.

Durante marea llenante la corriente que entra por la boca se separa en tres ramas en el interior de la laguna, la primera toma dirección oeste, la segunda avanza en dirección a la zona sur de la laguna y la tercera hacia el este del sistema (en el centro del sistema) como resultado de la que avanza al sur. Se aprecian giros ciclónicos en la corriente que llega al sur del sistema y giros anticiclónicos en la corriente que permanece en la zona centro del sistema (más visibles durante marea vaciante).

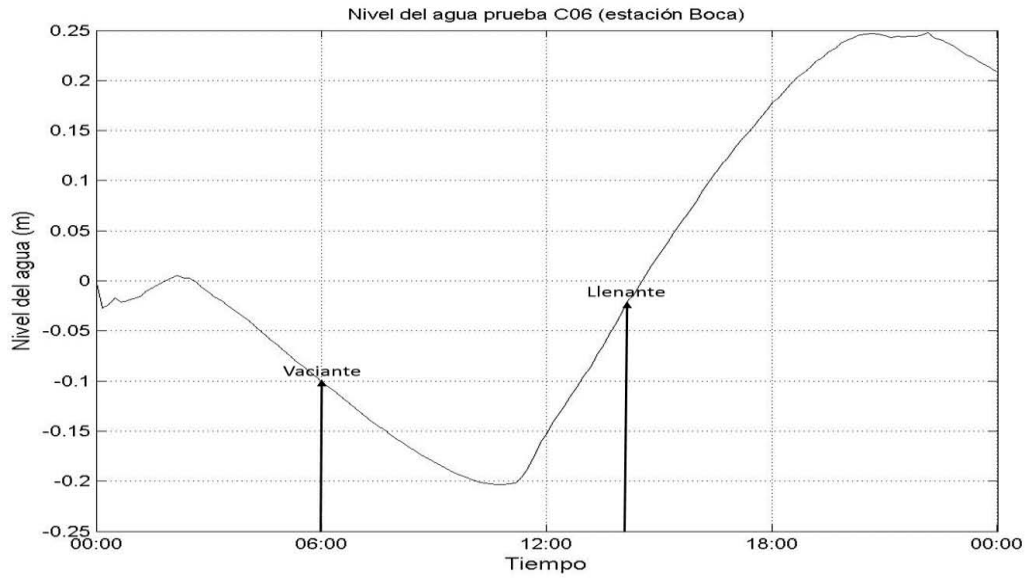


Figura 33. Niveles simulados para la estación la Boca en el experimento C06, las flechas indican un momento para marea vaciante y uno para marea llenante Unidades del tiempo (h).

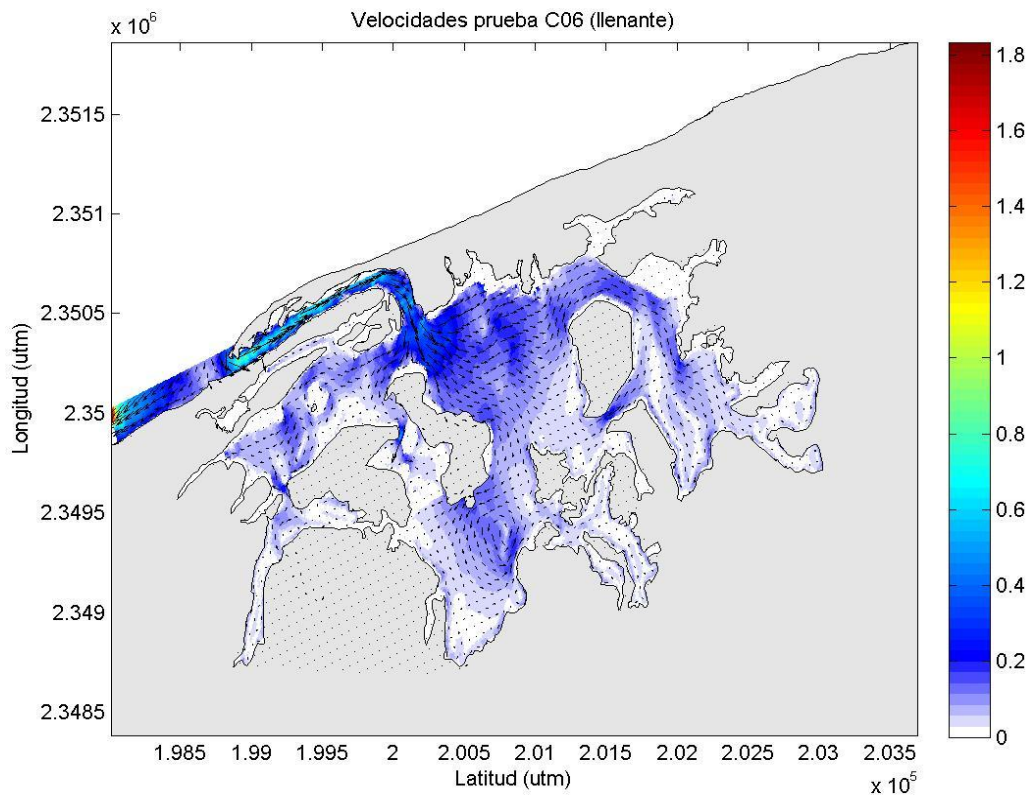


Figura 34. Magnitudes de la corriente de marea (m/s) reportadas para el experimento C06

en marea llenante.

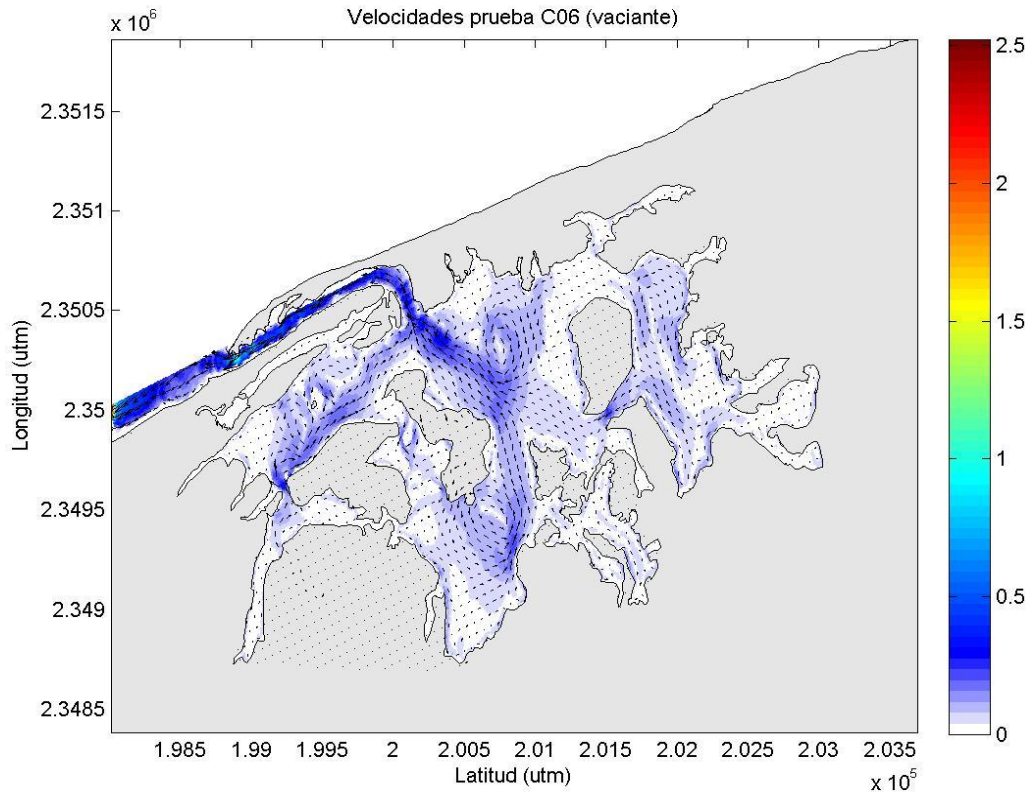


Figura 35. Magnitudes de la corriente de marea (m/s) reportadas para el experimento C06 en marea vaciante.

La circulación neta en la laguna se determina a través de los patrones de corrientes residuales, que promedian las corrientes durante un ciclo de marea completo. Dicho cálculo se aplicó para los experimentos numéricos C01 a C13.

Durante los primeros experimentos (C01 y C02) se forzó el modelo con datos de marea del mareógrafo de Sisal durante un ciclo de marea muerta y uno de marea viva respectivamente. El resultado de corrientes residuales durante marea muerta (Figura 36) refleja un patrón de corrientes donde las mayores velocidades (0.08 a 0.18 m/s) se encuentran en el canal de la Boca de la laguna, desde el mar y se dirigen hacia adentro de la laguna. Con menor magnitud (0.02 a 0.05 m/s) la zona occidental de la laguna muestra un patrón de corrientes con una dirección predominante hacia afuera de la laguna desde el “ojo de agua” y hasta el centro del sistema. El resto de la laguna, desde la zona central y la oriental tienen velocidades cercanas a cero con corrientes que tienen un flujo neto hacia

adentro del sistema. Este patrón de corrientes neto en la laguna durante la marea muerta muestra un flujo de entrada del mar hasta el fondo y hacia la parte oriental de la laguna mientras que refleja un flujo neto de salida desde el “ojo de agua” y al oeste del sistema. (Figura 36). Por otro lado, las corrientes residuales en marea viva son de mayor magnitud que en marea muerta, para la parte de la boca y zona oeste de la laguna (0.02 a 0.04 m/s) y 0.1 a 0.15 y hasta 0.3 en algunas partes del canal de la Boca y en el canal a la zona de descarga del Ojo. Los patrones de flujo neto durante marea viva son principalmente de entrada de agua desde el mar en prácticamente toda la laguna (Figura 37). Desde el canal del “ojo de agua” hasta la laguna se muestra flujo de descarga claro, al igual que en mareas muertas.

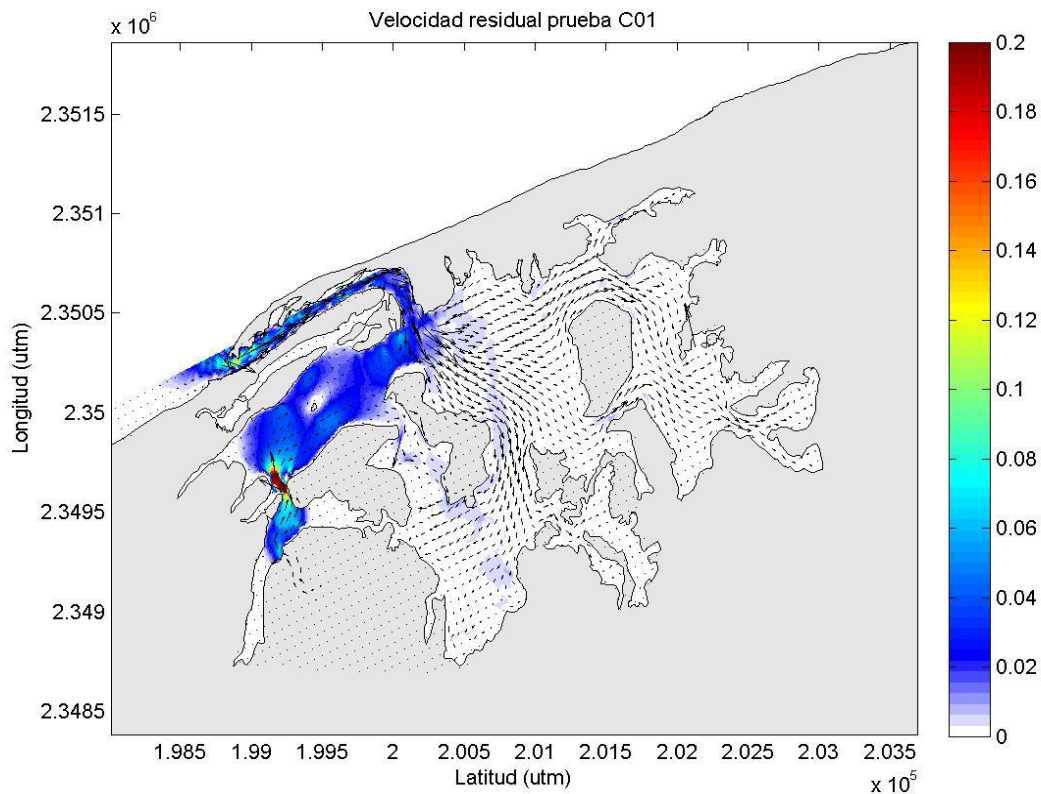


Figura 36. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea muerta sin forzamiento de viento.

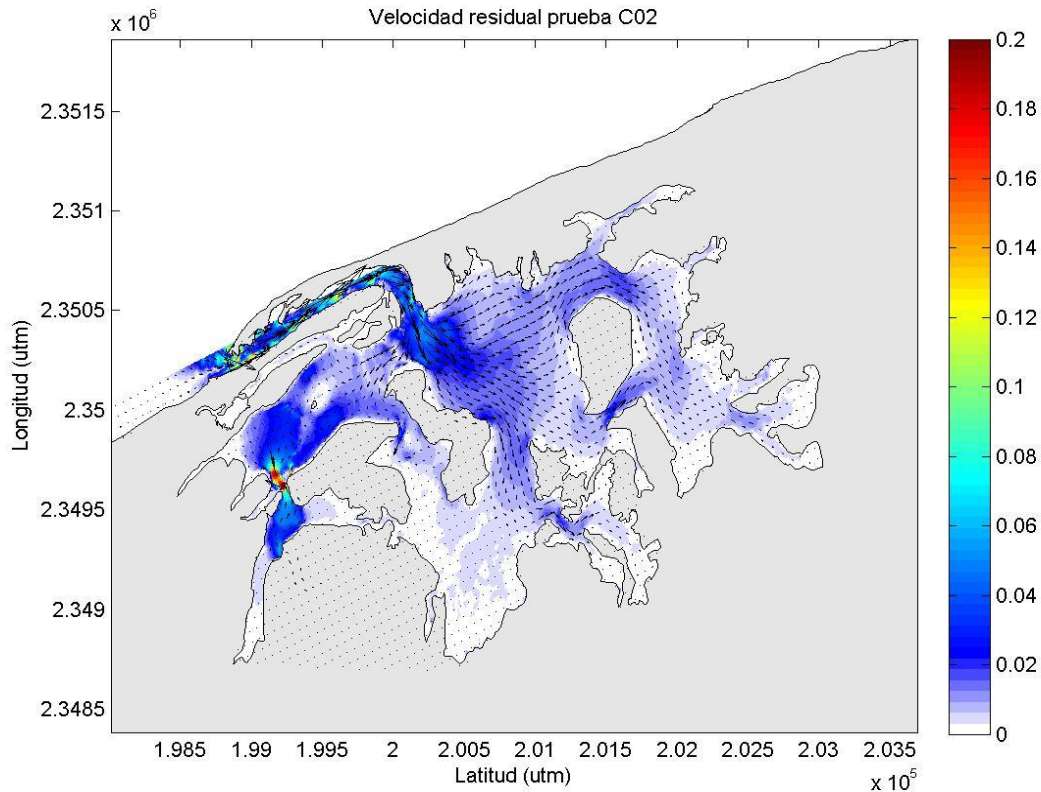


Figura 37. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva sin forzamiento de viento.

Para ver los efectos del viento en la circulación residual, se llevaron a cabo 6 pruebas con marea viva forzando el modelo numérico con dos escenarios de viento dominantes de la región: vientos moderados del NE durante casi todo el año (simulación con viento de 4 m/s del NE) y vientos de mayor intensidad del NO durante el paso de frentes fríos o “Nortes” (simulación con viento de 15 m/s del NO). Ambos se aplicaron espacialmente uniformes para todo el dominio. Un tercer experimento de viento se llevó a cabo con vientos temporalmente variables simulando un efecto de brisas marinas para lo que se generó una serie de tiempo sintética de vientos variando de forma diurna tanto en dirección como en intensidad dando un patrón de viento “idealizado”.

Los patrones de movimiento del agua forzando el modelo con viento del sector NE tienen magnitud de velocidad de entre 0.02 a 0.04 m/s, tanto en marea muerta como viva, para casi todo el dominio, a excepción de en el inicio del canal de la Boca y la zona de descarga del Ojo donde se presentan valores desde 0.08 hasta 0.2 m/s. El patrón de direcciones de flujo

es muy similar al que se obtiene durante mareas vivas sin viento, predominando en la zona desde el mar y hacia el interior y oriente las corrientes hacia el interior de la laguna (Figura 38).

De manera similar, durante la marea viva con viento de brisas marinas no se observan cambios significativos en relación al resultado del experimento sin vientos. Se registraron magnitudes de 0.02 a 0.04 m/s para casi todo el dominio durante marea viva y de 0.08 a 0.16 en algunos sitios en el canal de la Boca y en la zona de descarga del “ojo de agua” (Figura 39).

Por el contrario, el viento del Norte tiene un efecto considerable en las corrientes dentro de la laguna con magnitud de 0.02 a 0.2 m/s tanto en marea viva como muerta en gran parte del dominio. Los patrones resultantes con viento del Norte en el interior de la laguna muestran intensa recirculación en la región occidental y al fondo (sur) del sistema. Es importante destacar que las mayores magnitudes en el interior de la laguna (0.12 a 0.2 m/s) se presentan en estas zonas de recirculación, promoviendo la mezcla y transporte horizontal de las masas de agua, principalmente en el ala oeste donde confluyen el agua dulce proveniente de la descarga del ojo y el agua marina que entra por la Boca de la laguna. Durante eventos del Norte, el patrón neto de corrientes residuales es de flujo hacia el interior de la laguna (Figura 40) en todo el dominio.

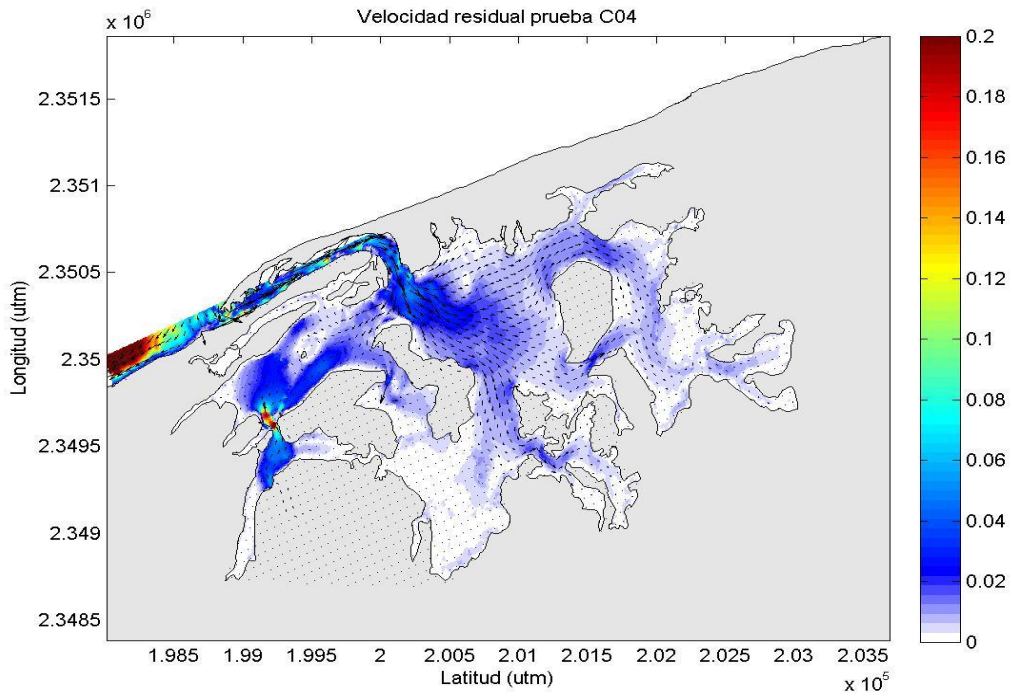


Figura 38. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NE.

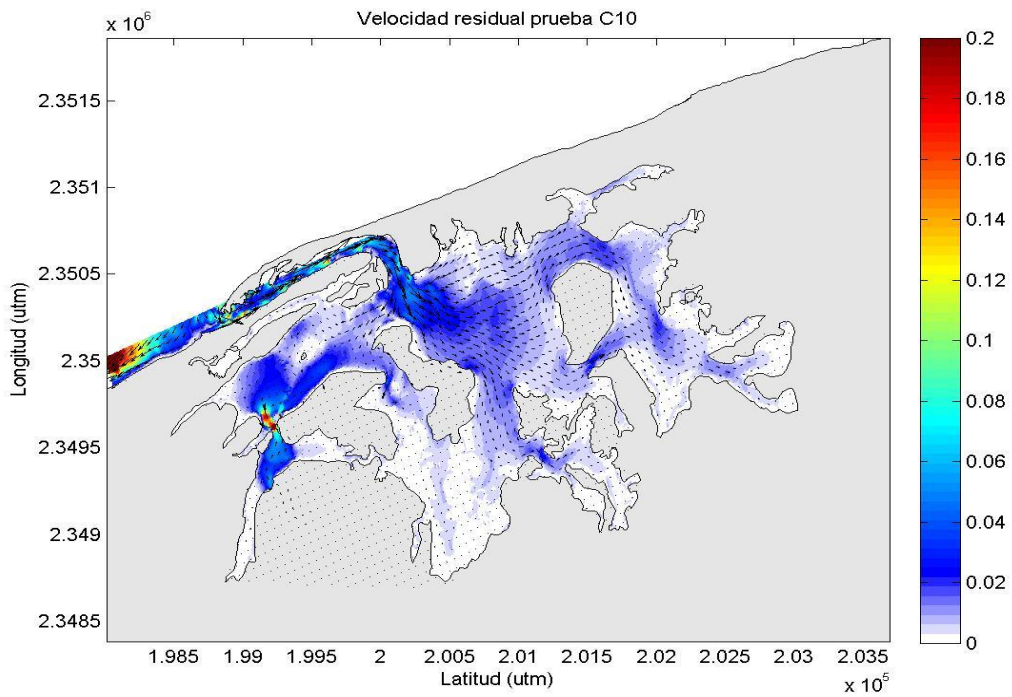


Figura 39. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de brisas marinas.

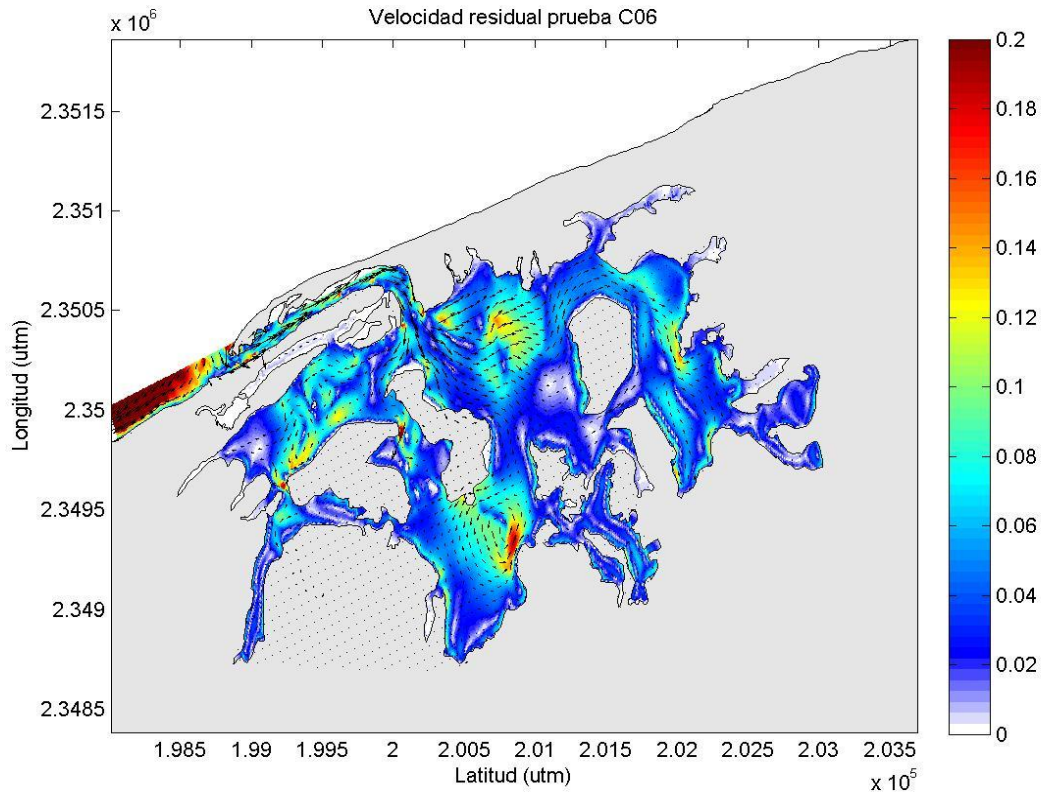


Figura 40. Patrón de circulación residual (m/s) durante un ciclo de marea viva con forzamiento de viento del NO.

Dado que los resultados previos mostraron que la circulación está principalmente dominada por las mareas (excepto en eventos de viento de “Nortes”), para apreciar el efecto de las diferencias por el viento se realizaron tres pruebas (C07, C08 Y C11) sin incluir el forzamiento de las mareas (con nivel del mar 0 en la frontera marina). Cada una de estas pruebas fue forzada con datos de viento del NE, NO y brisas, respectivamente, para caracterizar la hidrodinámica por viento en la laguna la Carbonera.

Los resultados muestran que al actuar el viento sobre la laguna se genera una sobrelevación del nivel del mar (*setup*) en consecuencia del apilamiento del agua ejercido por el viento, este desnivel comienza a generar patrones de circulación que se pueden apreciar claramente en las figuras. Con viento del NE se promueve el flujo de salida en la zona occidental de la laguna, con magnitud de 0.02 m/s hasta 0.05 m/s. En la región oriental se generan giros ciclónicos con magnitud de hasta 0.02 m/s y uno en la parte sur del sistema de similar

magnitud; el extremo oriental de la laguna presenta muy poca circulación (magnitudes de 0.005 m/s) (Figura 41).

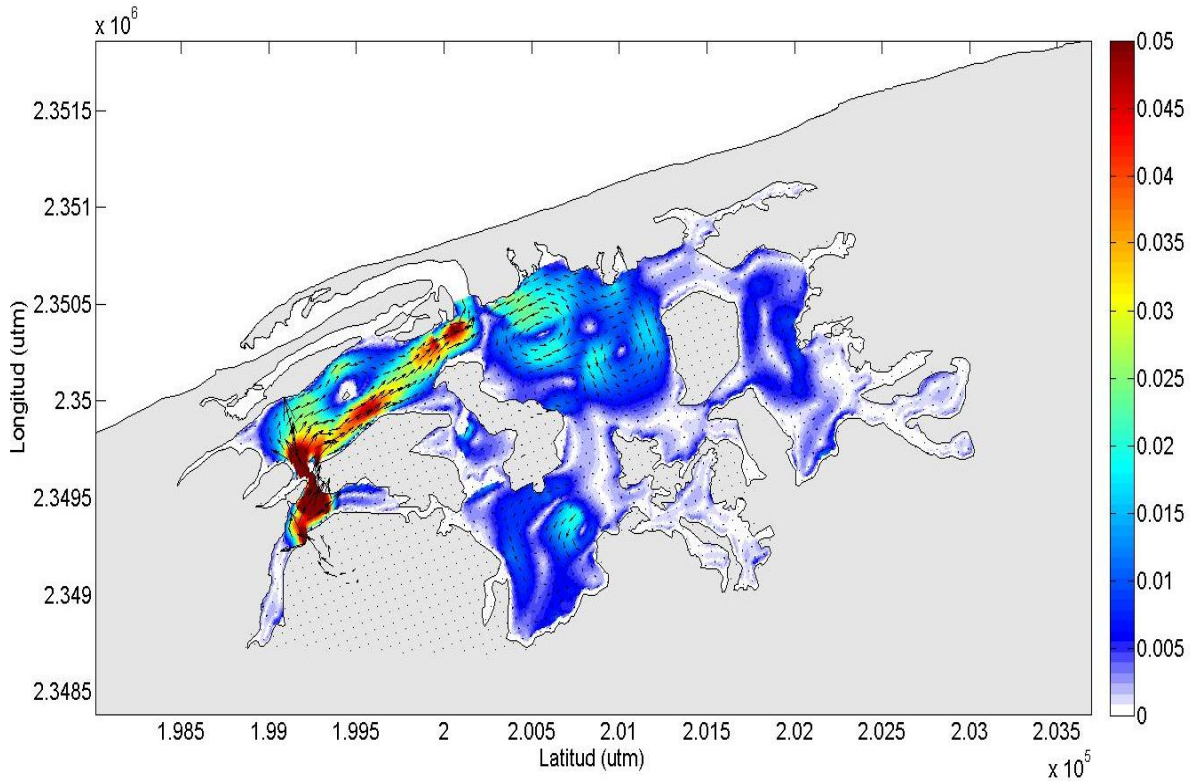


Figura 41. Patrones de circulación (magnitud en m/s) por viento del NE en la laguna la Carbonera.

El experimento de viento con brisas marinas no genera un patrón fijo de circulación ya que al usar viento variable el movimiento del agua responde distinto a lo largo del tiempo. Los patrones resultantes de estos cambios de dirección y magnitud del viento se describen a continuación: Durante la mañana el viento sopla del continente hacia el mar y al irse calentando el continente a una mayor rapidez que el agua marina, se genera una inversión del viento con incremento en la magnitud desde el mar hacia el continente. En consecuencia, la circulación matutina genera un patrón de velocidades que favorece la circulación hacia el mar en la zona occidental del sistema con magnitud de 0.02 hasta 0.05 m/s. La zona este presenta corrientes moderadas (0.005), pero también en dirección al mar con la generación de giros en la zona centro y sur de la laguna (Figura 42). Durante el mediodía la inversión del viento genera el ingreso de agua al sistema para la zona este de la

laguna, en la zona centro y sur se presentan giros con magnitud de 0.01 m/s y la zona este muestra escasa magnitud pero poco mayor que durante el día (0.005 m/s) para casi toda la zona. En la zona occidental la circulación en la zona occidental es similar a la generada por la mañana, esto es, magnitudes de 0.02 hasta 0.05 m/s. (Figura 43).

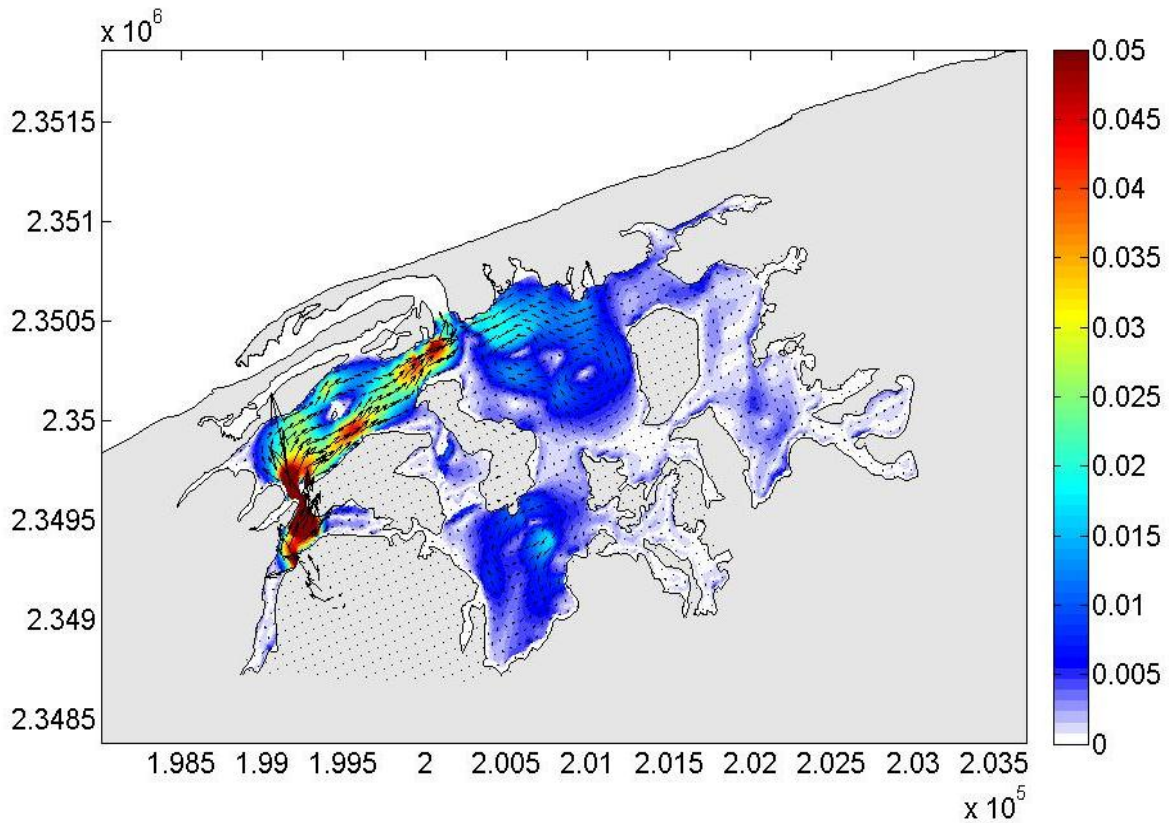


Figura 42. Patrones de circulación por brisas marinas (magnitud en m/s) durante la mañana en la laguna la Carbonera.

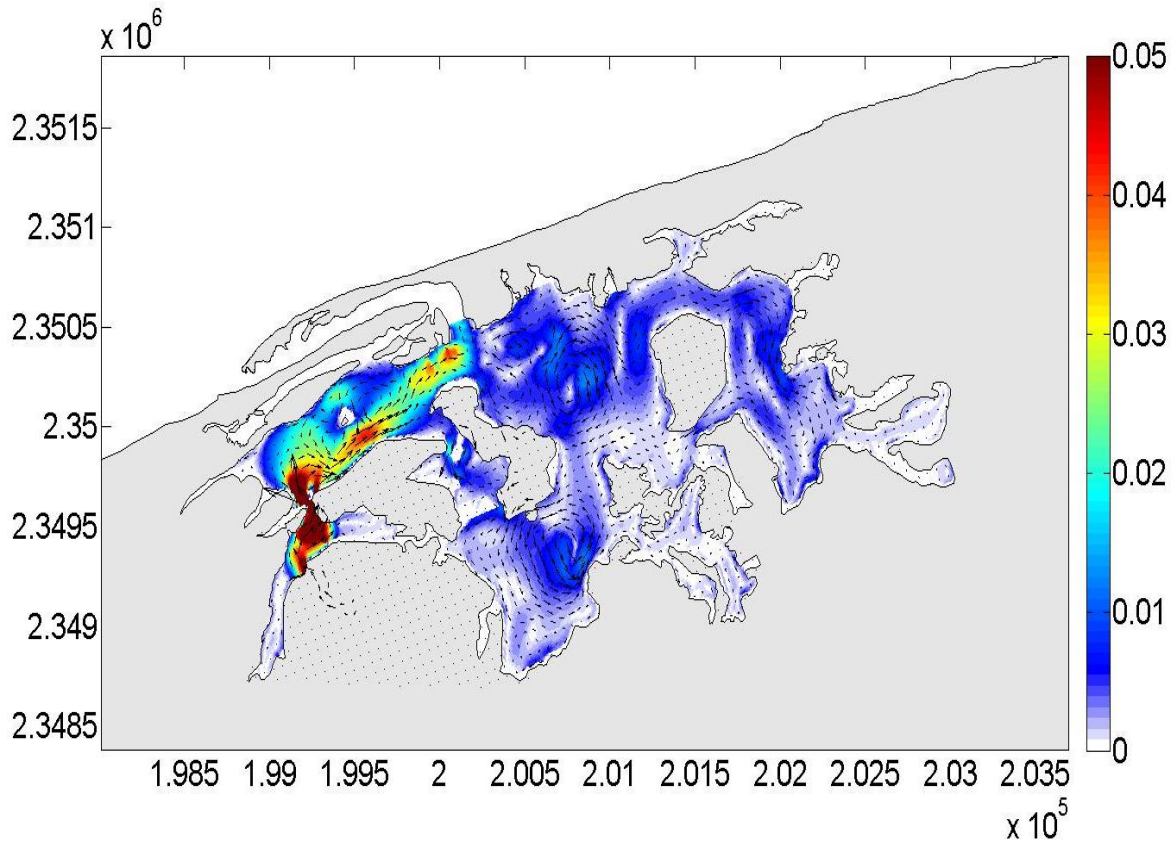


Figura 43. Patrones de circulación por brisas marinas (magnitud en m/s) al mediodía en la laguna la Carbonera.

Los eventos de viento durante los “Nortes” son de mayor intensidad, por lo tanto, tienen un efecto considerablemente mayor en las corrientes resultantes. La magnitud de las corrientes en todo el sistema bajo este escenario es mayor, de 0.05 hasta 0.15 m/s. Los patrones resultantes reflejan un patrón general de entrada de agua hacia el interior con zonas de giros en la zona centro y sur del sistema y son las áreas que presentan las mayores magnitudes en el movimiento del agua en el interior del sistema (Figura 44).

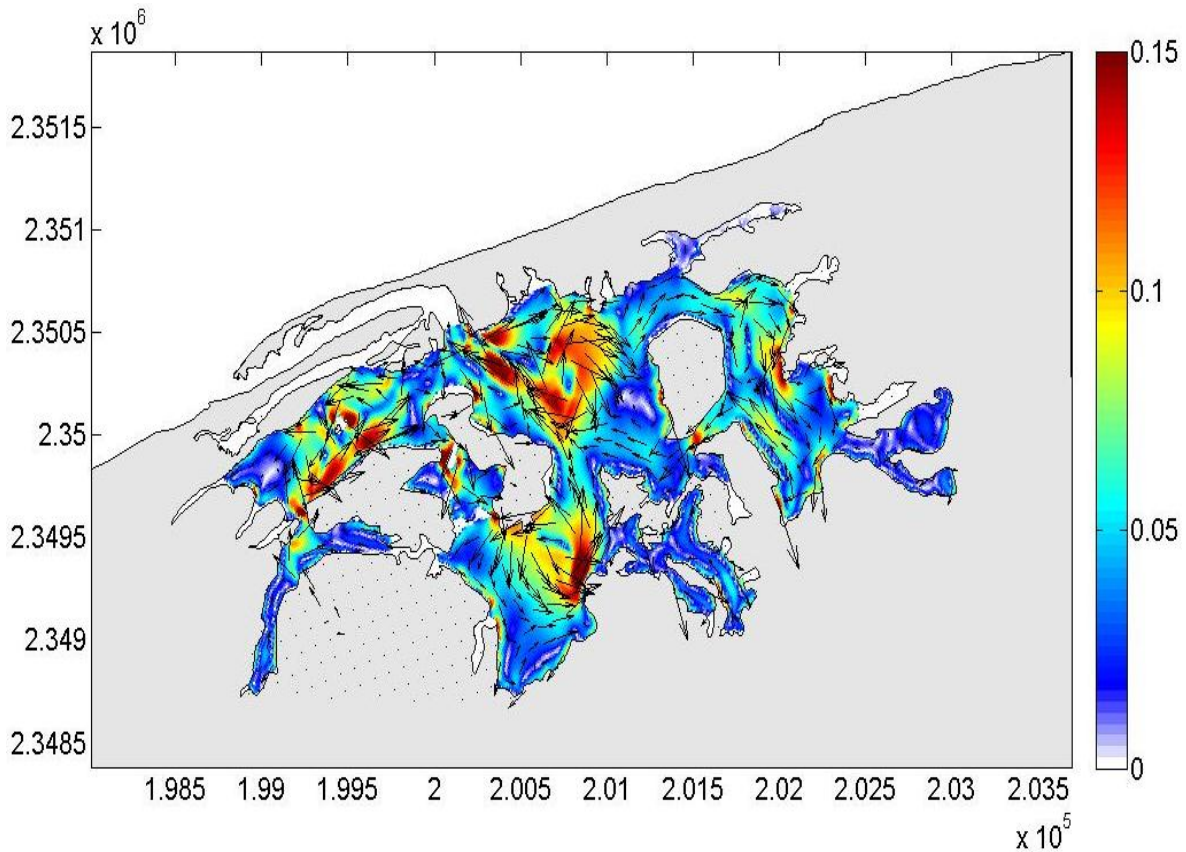


Figura 44. Patrones de circulación por viento del Norte (magnitud en m/s) en la laguna la Carbonera.

Las pruebas anteriores muestran la contribución del viento en las corrientes resultantes al quitar el forzamiento de las mareas, que enmascara el efecto del viento al dominar en las corrientes. Sin embargo, en todos esos escenarios se incluyó la descarga de agua continental en el sitio del “ojo de agua”, lo que mantiene una dominancia de flujo de salida en esa región de la laguna. En el supuesto caso de que se detuviera la descarga de agua continental en el sitio, los patrones de circulación se verían modificados. Para pronosticar el efecto de que se detuviera la descarga de agua del acuífero en la Carbonera, se realizaron pruebas sin descarga ni forzamiento por viento (C12 y C13).

Los resultados muestran que sin viento y sin aportes de agua continental, las corrientes en el sitio generadas por marea (tanto para marea viva como para marea muerta) tienen magnitudes de entre 0.02 y 0.04 m/s y muestran un flujo de ingreso a la laguna predominantemente en la zona oriental de la laguna. Esto es completamente alejado de la

realidad actual, como se muestra en los experimentos anteriores, donde es evidente que tanto el viento como la descarga del “ojo de agua”, además de la marea, influyen en la hidrodinámica de este cuerpo lagunar (Figura 45).

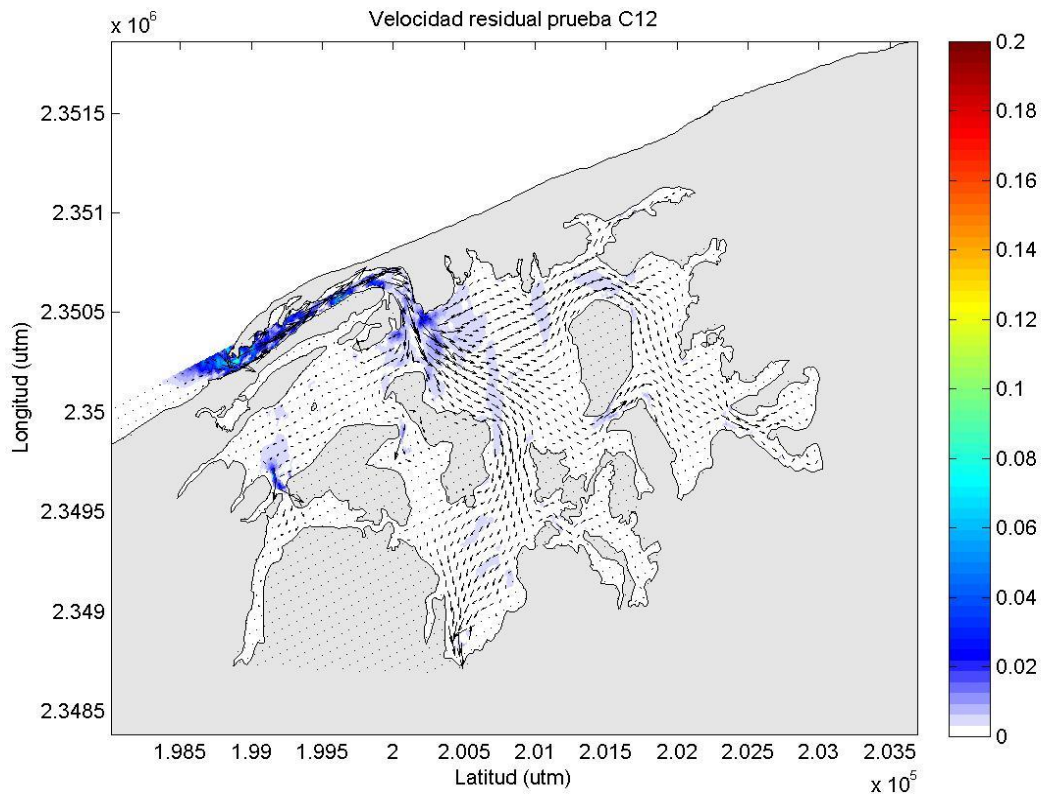


Figura 45. Patrón de circulación residual durante un ciclo de marea muerta sin forzamiento de viento y nivel del agua cero.

iv Simulación del gradiente salino

Para poder establecer la distribución de la salinidad a lo largo de la laguna la Carbonera se realizó una serie de pruebas (C14 a C32) para simular los gradientes que se forman naturalmente en la laguna. Durante las primeras pruebas (C14 a C17) se evaluaron los efectos de tres ciclos de marea viva y tres ciclos de marea muerta con diferentes valores en la descarga del “ojo de agua” (2.5 y $5 \text{ m}^3/\text{s}$), y con una condición inicial de salinidad marina

(34 ppt) y temperatura de 27.5 °C, sin embargo, bajo dichas condiciones no se logró generar los gradientes salinos que se observan en las mediciones en campo (Figura 46). Es importante mencionar que por limitaciones de tiempo, no se realizaron experimentos numéricos que incluyan flujos de calor entre la laguna y la atmósfera (evaporación, radiación solar etc).

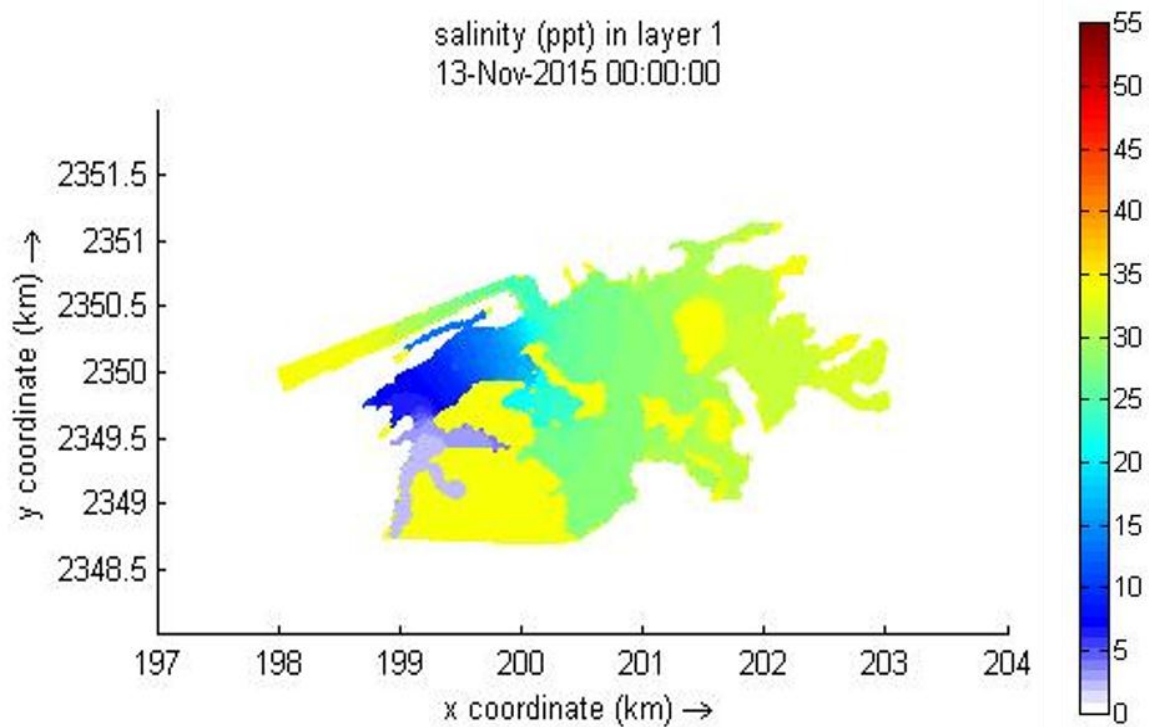


Figura 46. Gradiente salino simulado en el experimento C14.

Ya que las pruebas anteriores no simulaban el gradiente salino que se presenta de manera natural en la laguna Carbonera se realizó un experimento que pudiera generar dicho gradiente salino durante dos ciclos diurnos de marea muerta y viva (C18 y C19) respectivamente; en dichos experimentos se introdujeron descargas de agua hiperhalina en la zona Este (3), (se asignaron valores de flujo de 0.5 m³/s con agua con una concentración de sal de 90 ups. Como resultado, después de dos ciclos de marea se generó un gradiente salino similar al observado en las mediciones de campo, pero la adición de descargas hiperhalinas en la zona este de la laguna provoca además de la generación de una región de agua de alta salinidad, la generación de corrientes por flujos advectivos que no están

presentes en la realidad para dicha zona, por lo que los campos de distribución salina obtenido en los experimentos anteriores se utilizaron como condiciones iniciales de salinidad respectivamente en las pruebas C20 y C21 donde ya no se incluyen estas descargas sintéticas. Dichas pruebas, generan el gradiente formado naturalmente para la laguna la Carbonera: la zona Este con condiciones hiperhalinas, la zona de la Boca con salinidad marina, la zona centro de la laguna (punto Petén) como la zona de mezcla de agua marina y dulce además de la zona con condiciones de agua dulce en la zona del “ojo de agua” (Figura 47).

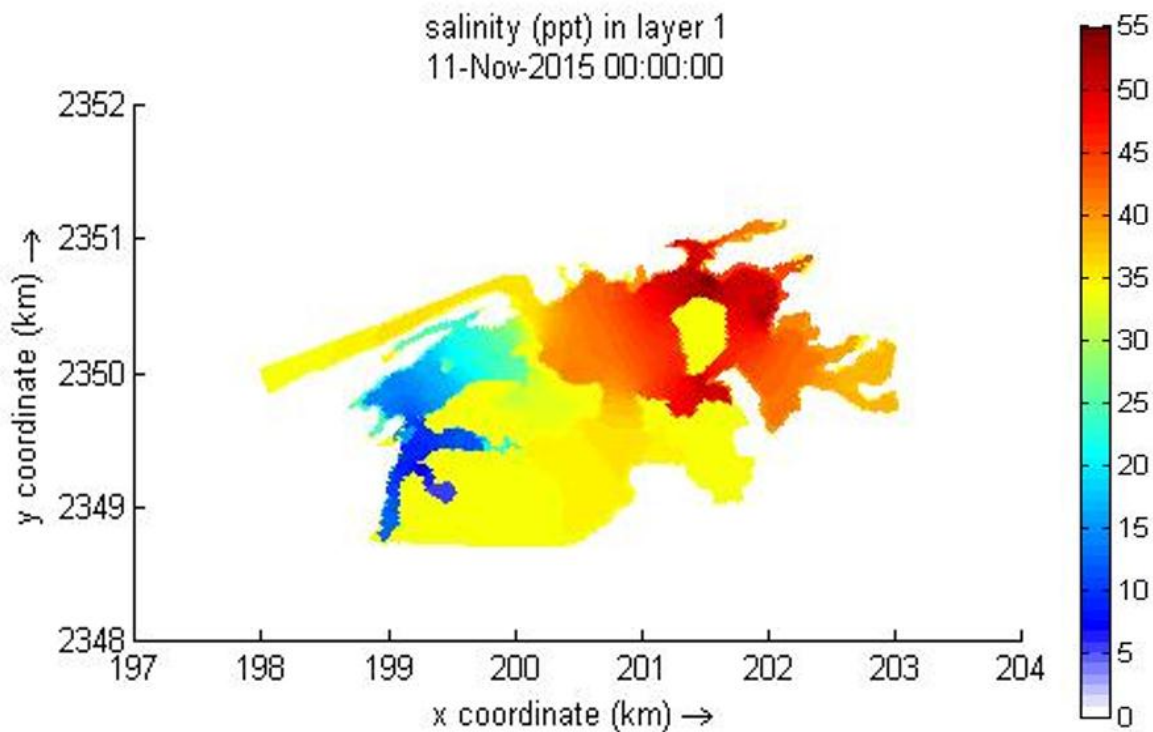


Figura 47. Gradiente salino simulado en el experimento C21 y utilizado como condición inicial en los experimentos numéricos con distribución termohalina.

Para apreciar el efecto de los gradientes de densidad en la circulación de la laguna, se realizaron experimentos (pruebas C22 y C23) que no incluyen mareas (frontera con nivel del agua 0). Los resultados muestran la mezcla que se genera a lo largo de un ciclo de marea, donde al no existir un flujo de entrada del mar por marea, el patrón de salinidad en el lado Oeste es dominado por la descarga de agua dulce mientras que la región del Este se diluye hasta valores de salinidad cercanos a los del mar (Figura 48).

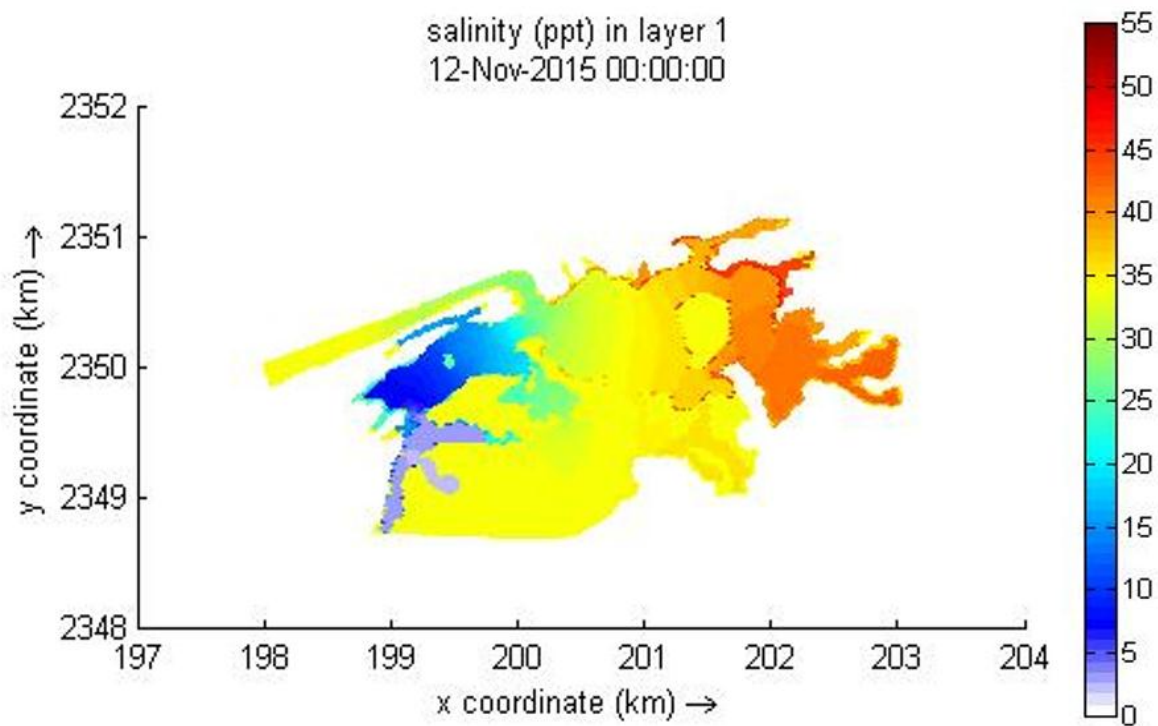


Figura 48. Gradiente salino simulado en el experimento C22.

Se realizaron experimentos con distintas condiciones de salinidad para obtener la mejor aproximación de los gradientes salinos en la laguna. Se realizó una prueba con condición inicial hiperhalina (90 ppt) durante tres ciclos de marea viva (experimento C25), al final del experimento se registraron los patrones salinos presentados en la Figura 49. Es importante señalar que para poder establecer de manera adecuada las variaciones termohalinas en un sistema tan somero como la Carbonera es recomendable utilizar los flujos de calor entre el cuerpo de agua y la atmósfera, sin embargo, el presente trabajo aporta el primer estudio de flujos termohalinos para el sitio y la interacción agua-atmósfera no es parte de los alcances de la presente tesis.

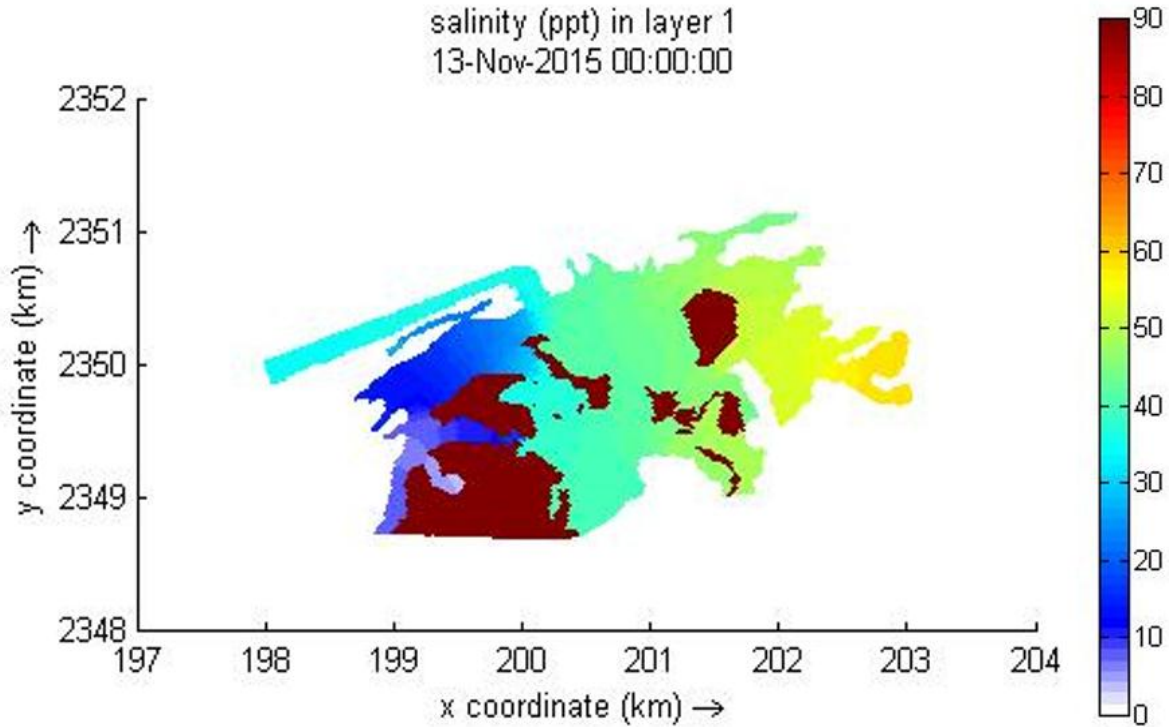


Figura 49. Gradiente salino simulado en el experimento C25.

Ya que se estableció una condición inicial de salinidad en la laguna con valores cercanos a los registrados en campo, se realizaron experimentos que incluyen las fuerzas de marea, gradientes de densidad, aporte de agua dulce y viento en la generación de corrientes en la laguna. Para ello se utilizó en archivo de condición inicial termohalina descrito anteriormente durante dos ciclos de marea viva y marea muerta, vientos de Norte, Noreste y Brisas y variaciones en el flujo de descarga del “ojo de agua”. En las siguientes figuras se muestran los cambios en el gradiente salino durante pleamar y bajamar para cada caso.

Los experimentos que incluyen la fuerza de gradientes de salinidad, marea y una descarga de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, pero no incluyen el forzamiento con viento, reflejan que la máxima excursión de los campos de salinidad dentro del sistema lagunar la Carbonera son mayores durante eventos de marea viva que en eventos de marea muerta (Figuras 50 y 52). Durante la máxima excursión de la marea la zona estuarina de la laguna se comporta de manera similar en mareas vivas y en mareas muertas, con salinidades desde 35 a 15 en la zona occidental de la laguna y de 15 hasta 5 en el afluente de agua dulce en la zona del “ojo de agua”. En el

momento más bajo de la marea la descarga del “ojo de agua” alcanza distancias importantes al interior de la laguna. El agua dulce que aflora en el “ojo de agua” alcanza una mayor distancia hacia el interior del sistema durante marea muerta que durante marea viva. La zona oriental va de característica marina a hiperhalina (35-50) en ambas mareas, aunque la zona de hiperhalinidad (40-50) en la parte más oriental de la laguna es mayor en marea muerta, mientras que en marea vivas la entrada de agua marina y su mezcla ocasiona que la mayor parte de la zona este y sur se diluya y alcance salinidades de 35-40 (Figuras 51 y 53).

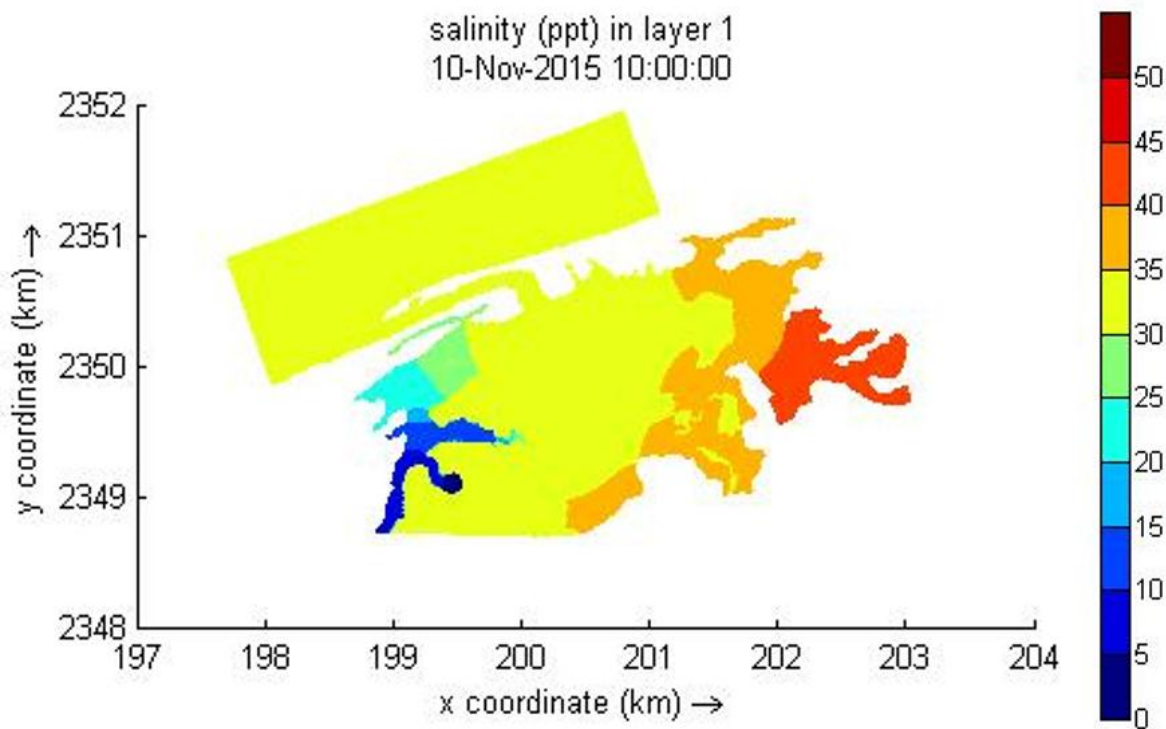


Figura 50. Máxima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C26.

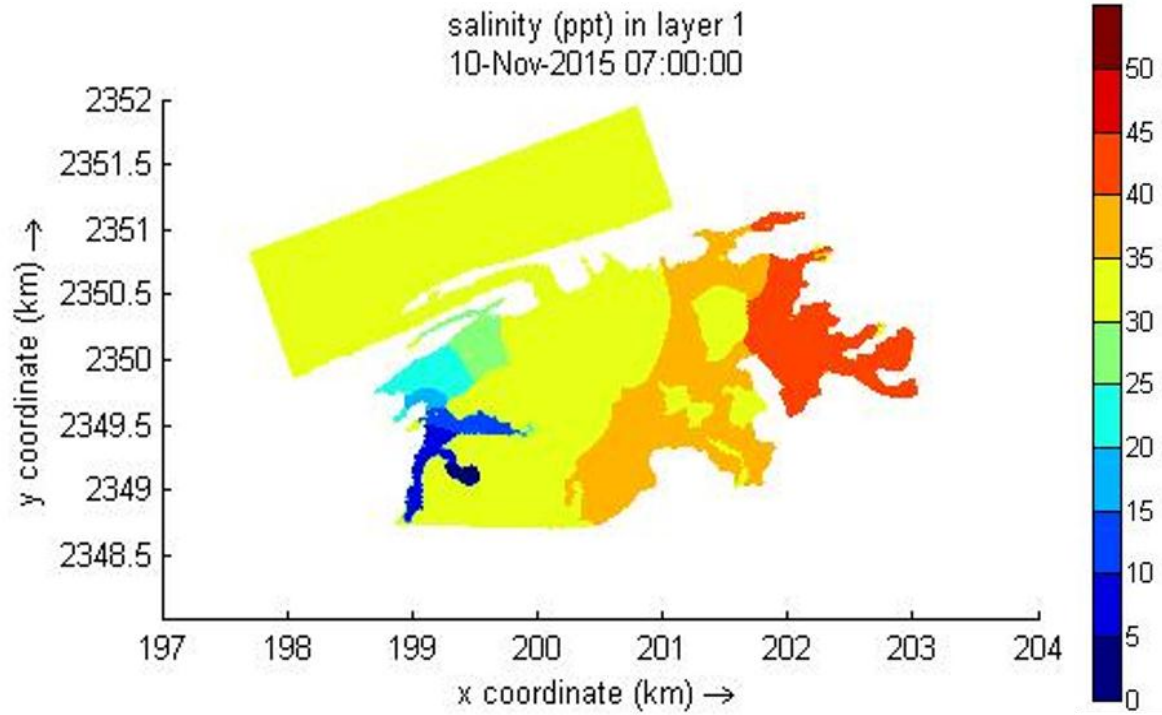


Figura 51. Máxima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C27.

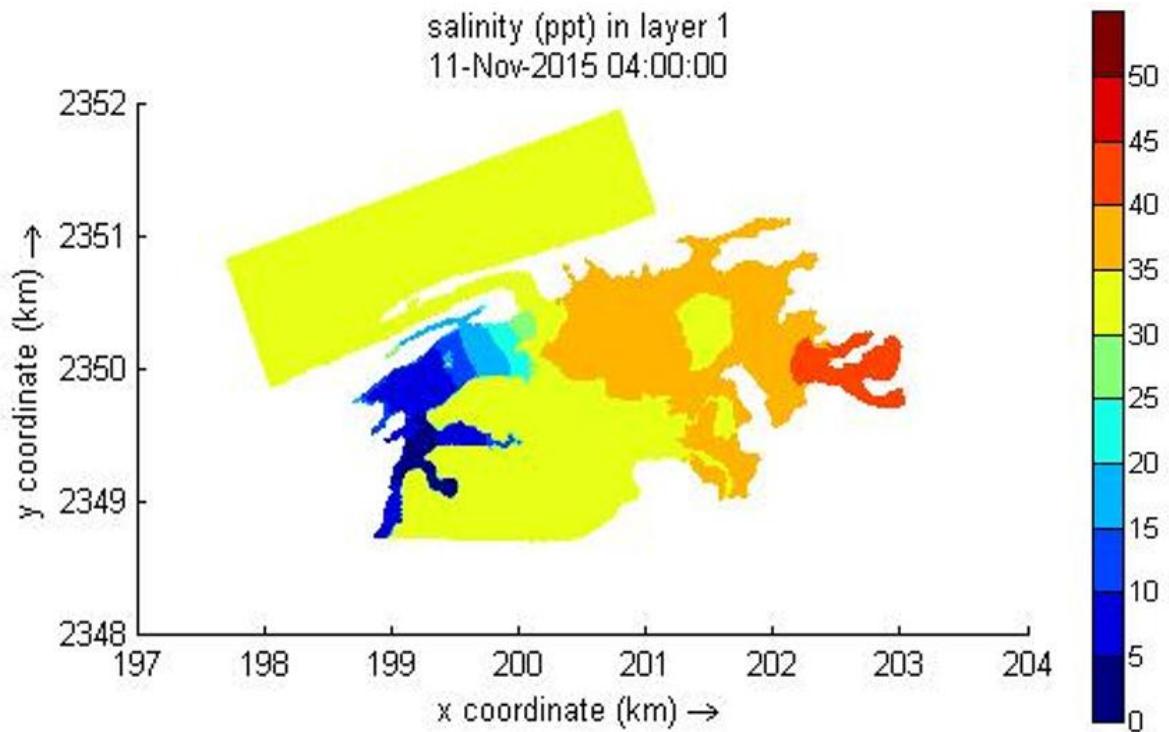


Figura 52. Mínima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C26.

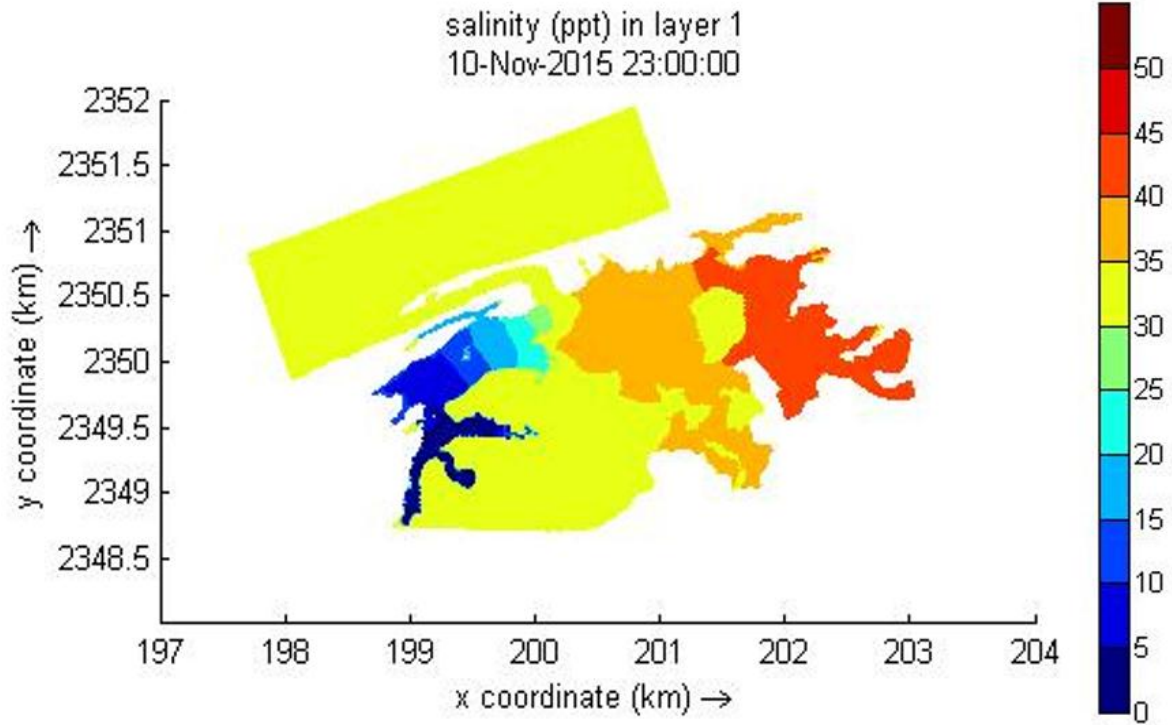


Figura 53. Mínima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C27.

Con una menor descarga de agua en el “ojo de agua” ($1 \text{ m}^3/\text{s}$), con mareas y sin viento, los resultados muestran que, durante la máxima excursión de la marea, la zona estuarina tiene salinidades de 35 a 25 y de 20 a 5 en la zona del afluente del “ojo de agua” durante marea viva; de 35 a 20 en la zona estuarina y de 15 a 5 en la zona del afluente durante marea muerta (Figuras 54 y 56). Durante el momento más bajo de la marea el agua de descarga alcanza distancias importantes dentro de la laguna, siendo mayores durante marea muerta pero menores que en el experimento realizado con una descarga mayor ($2.5 \text{ m}^3/\text{s}$). El patrón de salinidad en la zona oriental de la laguna es poco dependiente del volumen de descarga de agua dulce en el “ojo de agua”. Por otro lado, el área de agua hiperhalina es más amplia durante marea viva que en marea muerta (Figuras 55 y 57).

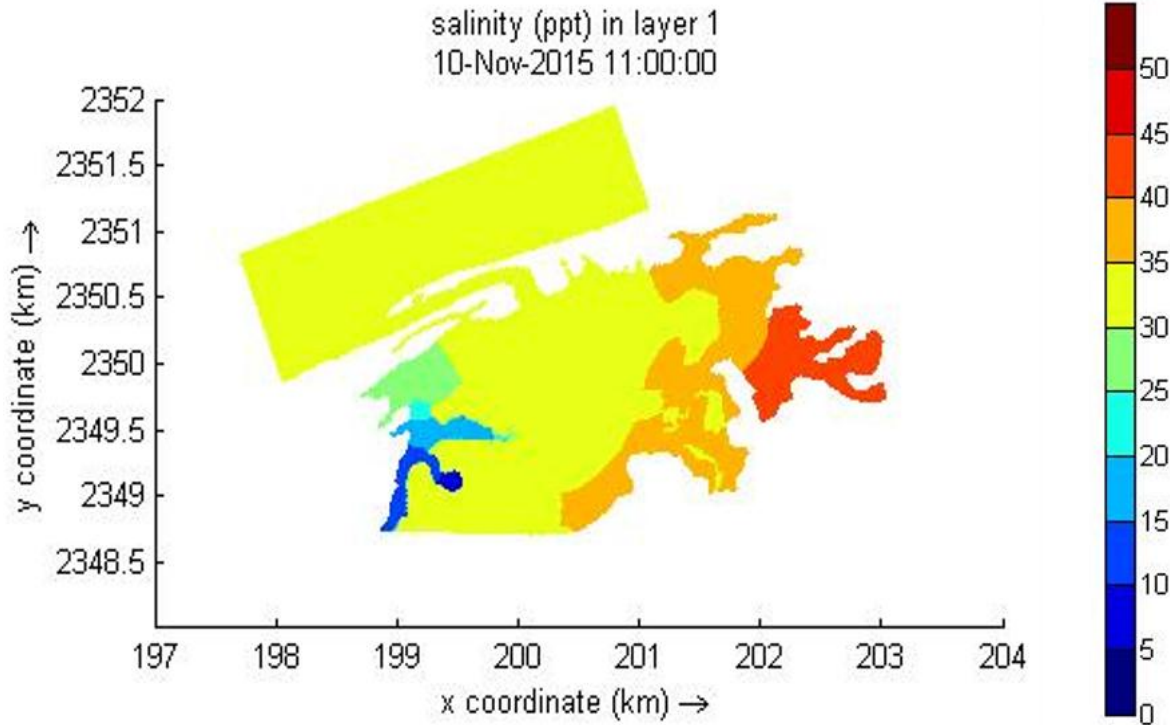


Figura 54. Máxima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C28.

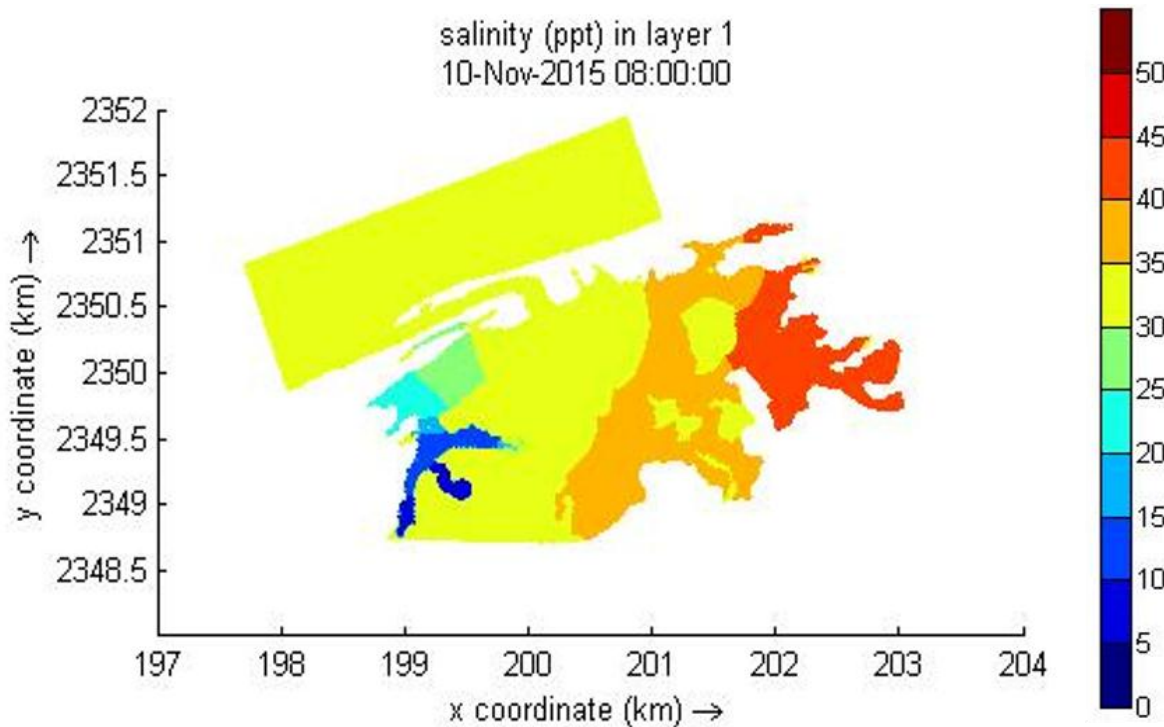


Figura 55. Máxima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C29.

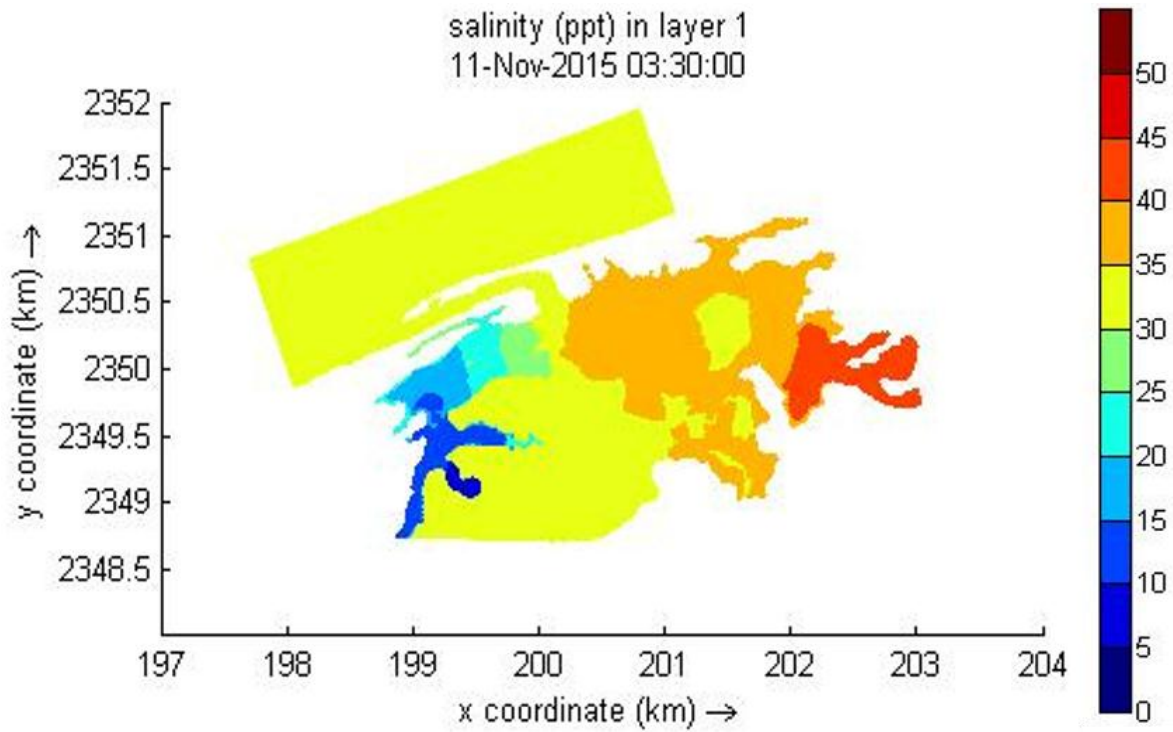


Figura 56. Mínima excursión de la marea durante marea viva en la prueba C28.

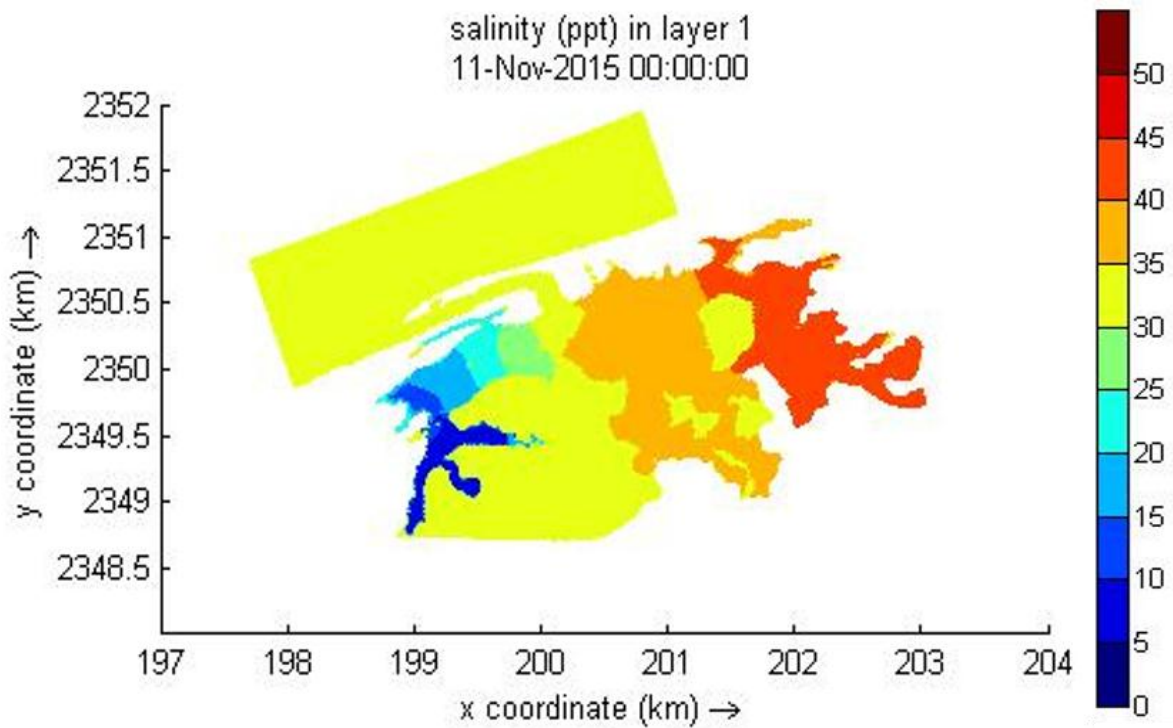


Figura 57. Mínima excursión de la marea durante marea muerta en la prueba C29.

Al agregar el forzamiento por viento a los experimentos que incluyen gradientes salinos, se observó que durante un evento de Norte la máxima excursión de la marea ocasiona que la zona estuarina presente salinidades de 35 a 25 en el interior del sistema y de 5 a 20 en zonas más cercanas al afluente de agua dulce. En pleamar el agua de mar tiene una mayor excursión y alcanza la zona oriental y la parte sur de la laguna hasta distancias mayores que cuando no se utilizó el forzamiento con viento (Figura 58). Durante la mínima excursión de la marea el agua con salinidad de 5 a 15 alcanza una distancia menor dentro del sistema. El agua salobre (25-35) es llevada por acción del viento a toda la zona sur de la laguna. El efecto del viento del Norte provoca la mezcla del agua marina e hiperhalina en toda la zona oriental de laguna y la zona se diluye a salinidades de 35 a 40. La parte occidental de la laguna es dominada por el agua salobre (20-30) (Figura 59).

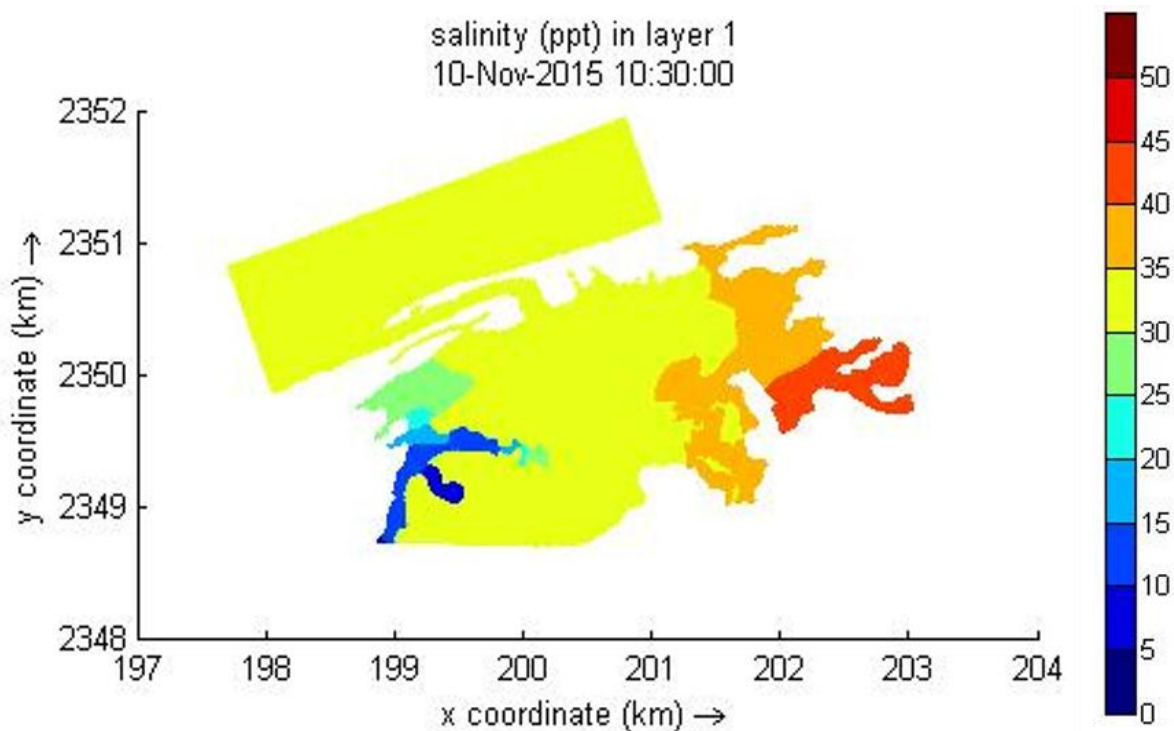


Figura 58. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NO en la prueba C30.

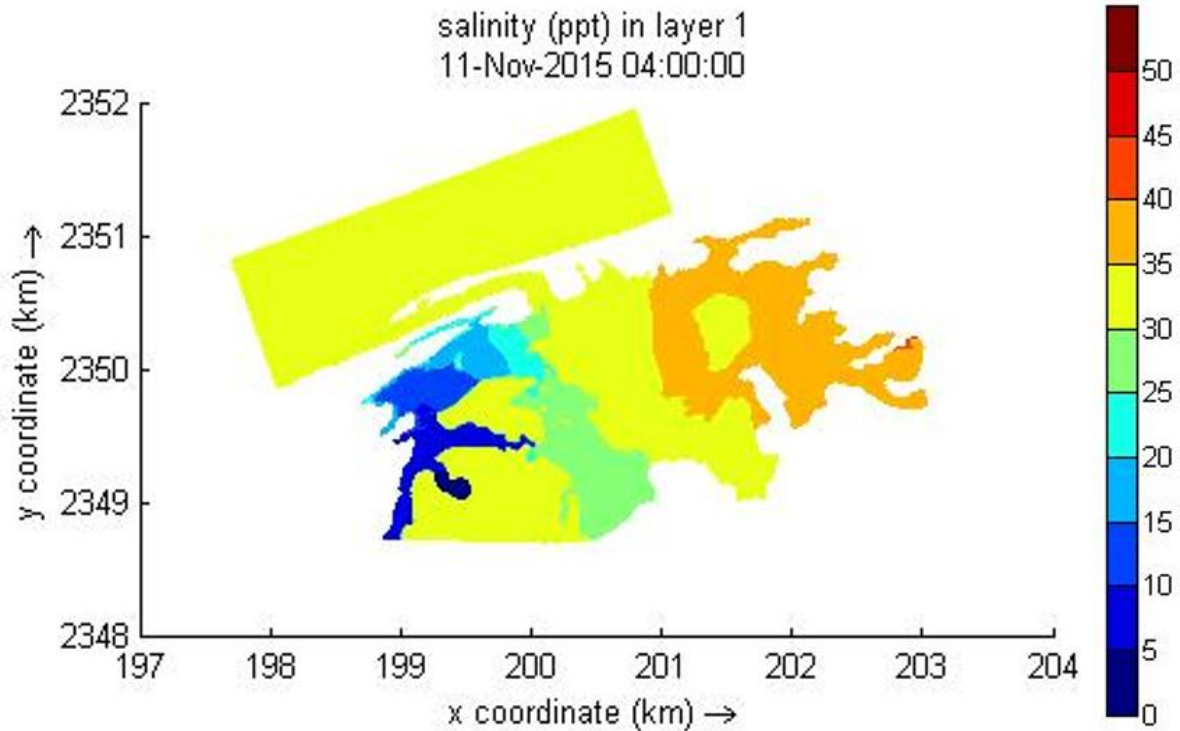


Figura 59. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NO en la prueba C30.

Al forzar con viento del sector NE y con brisas marinas los patrones de salinidad son similares. Durante la máxima excursión de la marea la zona sur de la laguna presenta mayor salinidad (40) que en un evento de Norte. En la zona occidental, el agua con menor salinidad (5-15) alcanza una distancia mayor al interior del sistema que bajo efecto del viento del Norte (Figuras 60 y 62). Durante el momento más bajo de la marea el agua marina cubre la zona sur del sistema y se presentan también agua hiperhalina (40 a 50) en la zona (Figuras 61 y 63).

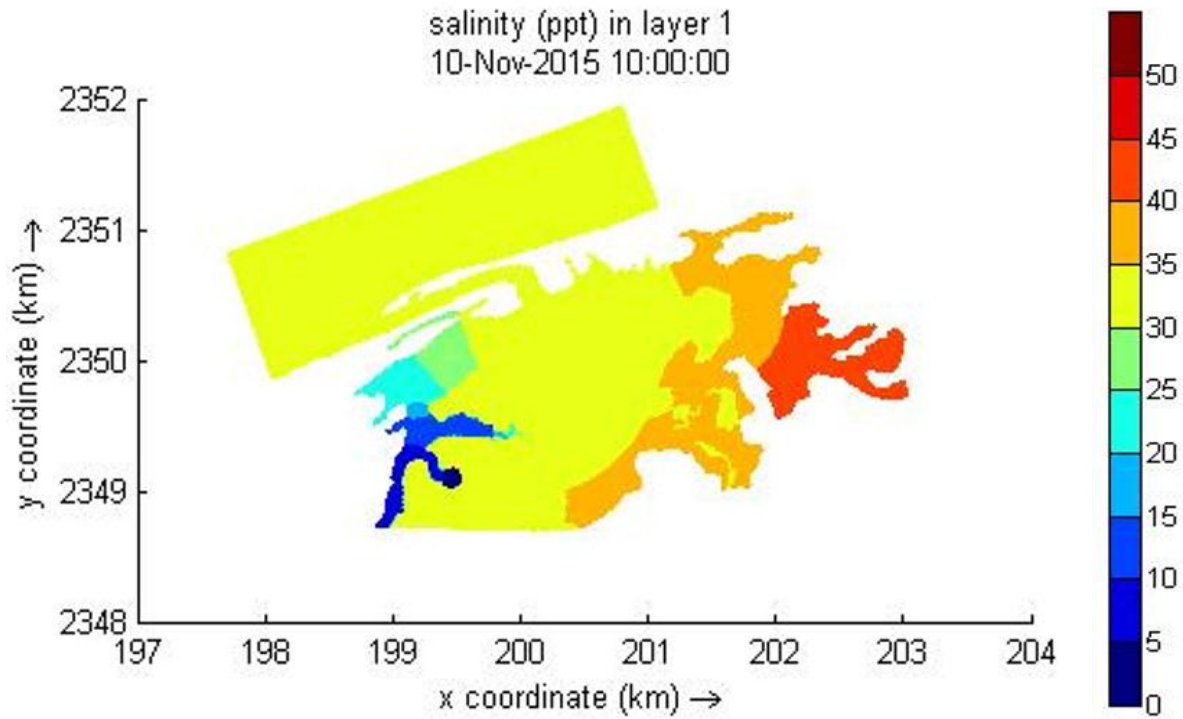


Figura 60. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NE en la prueba C31.

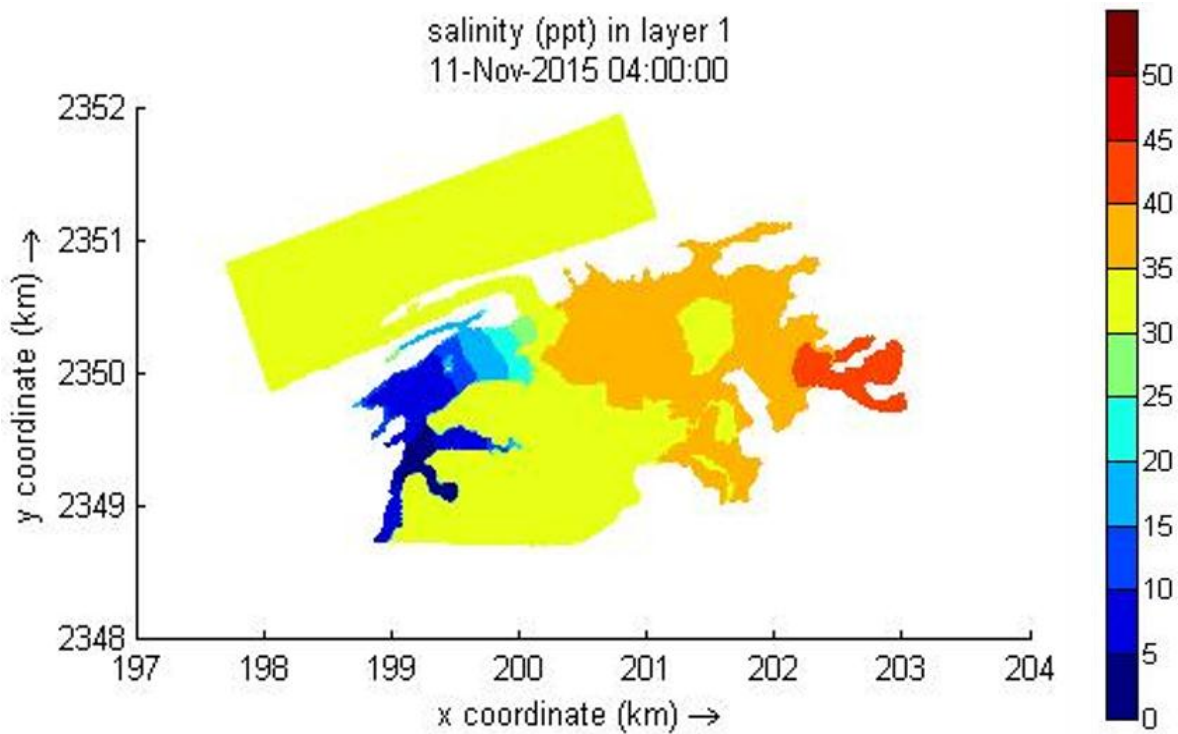


Figura 61. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de viento del sector NE en la prueba C31.

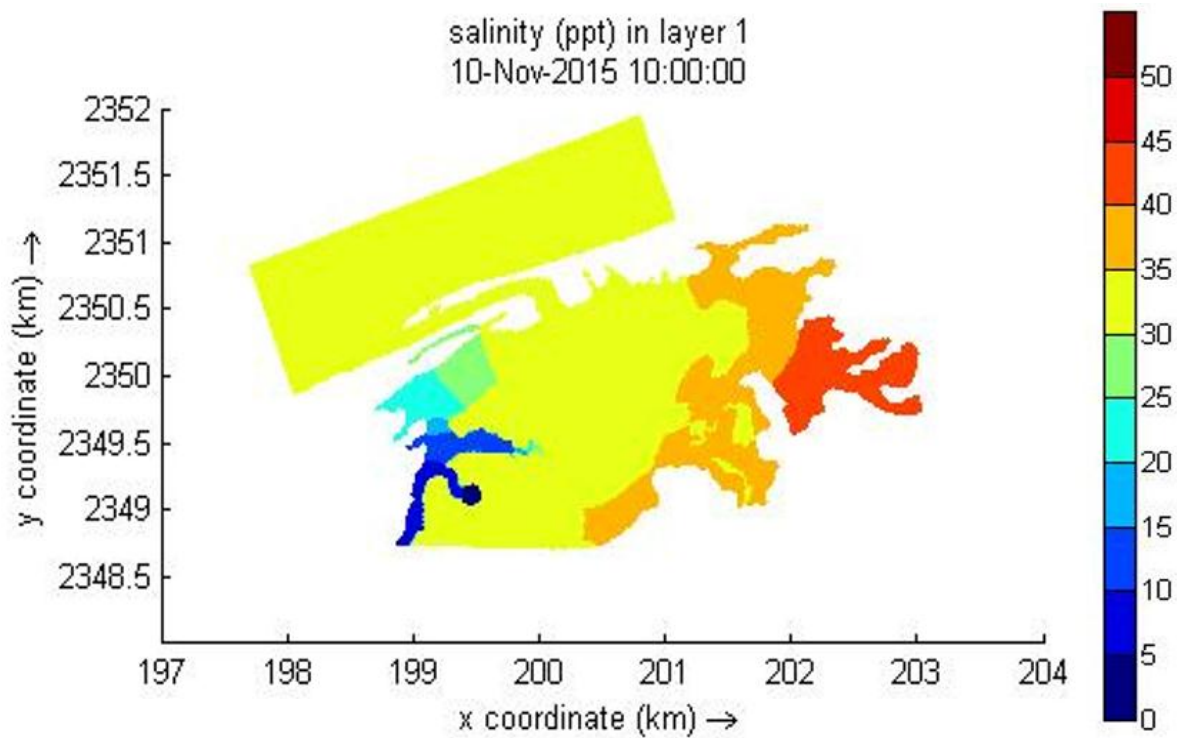


Figura 62. Máxima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de Brisas marinas en la prueba C32.

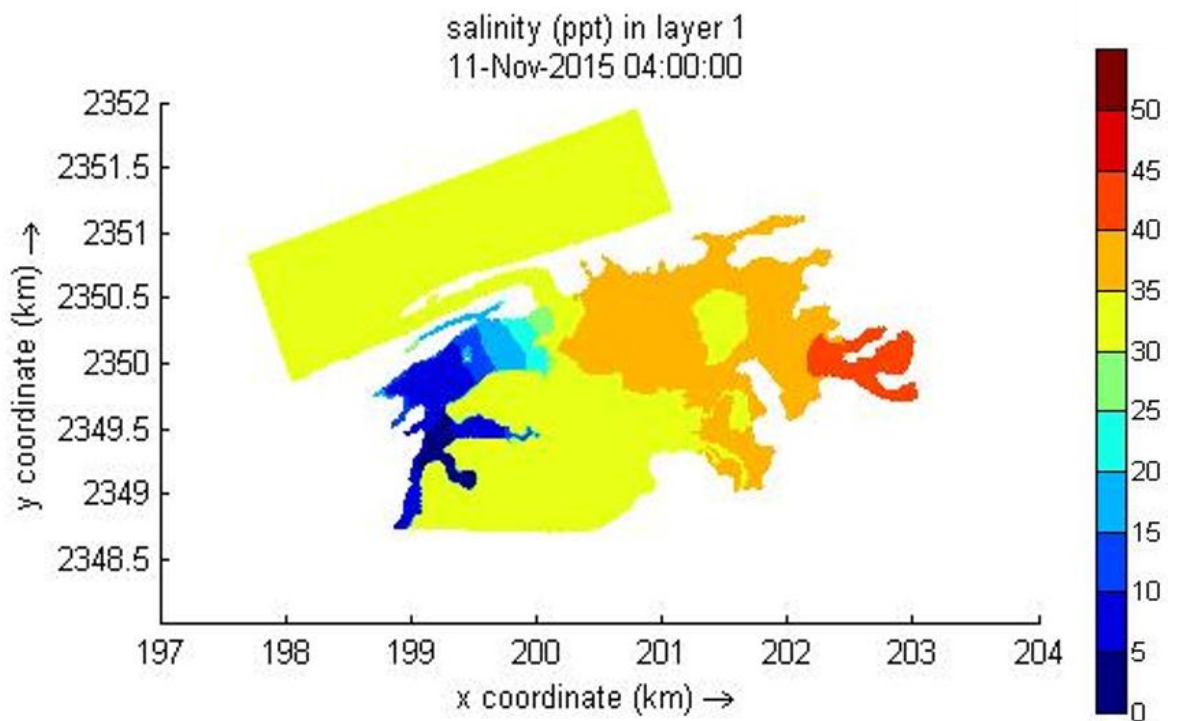


Figura 63. Mínima excursión de la marea durante marea viva con forzamiento de Brisas marinas en la prueba C32.

Las variaciones temporales en los campos de salinidad bajo los diferentes forzamientos a lo largo de los ciclos de marea pueden apreciarse en las animaciones en archivos de video en el anexo digital.

5.6. Análisis del componente biológico

Se estableció la relación entre la distribución de la ictiofauna estenohalina del componente marino, estuarino y dulceacuícola durante 2009 a 2011 con el gradiente salino simulado en el modelo DELFT3D y el gradiente salino medido en la laguna la Carbonera.

En la base de datos de ictiofauna proporcionada por el laboratorio de Ecología de la UAY se tiene registro de la presencia de las diferentes especies de peces en 12 estaciones de muestreo ubicadas en diferentes puntos en la laguna (Figura 64). De acuerdo a los registros de salinidad de los CTD's ubicados en la laguna se definió que las estaciones 1, 10, 11 y 12 corresponden a zona marina, la zona estuarina o de mezcla comprende las estaciones 2 a 7 y la zona dulceacuícola está representada con las estaciones 8 y 9 (Figura 64). Dicha delimitación es definida por las mediciones de los CTD's, sin embargo, es importante destacar que las tres zonas están sujetas a una constante mezcla por lo que existe una fuerte variación en el gradiente salino dependiendo del momento de la marea, la época del año y la cantidad de descarga del "ojo de agua".

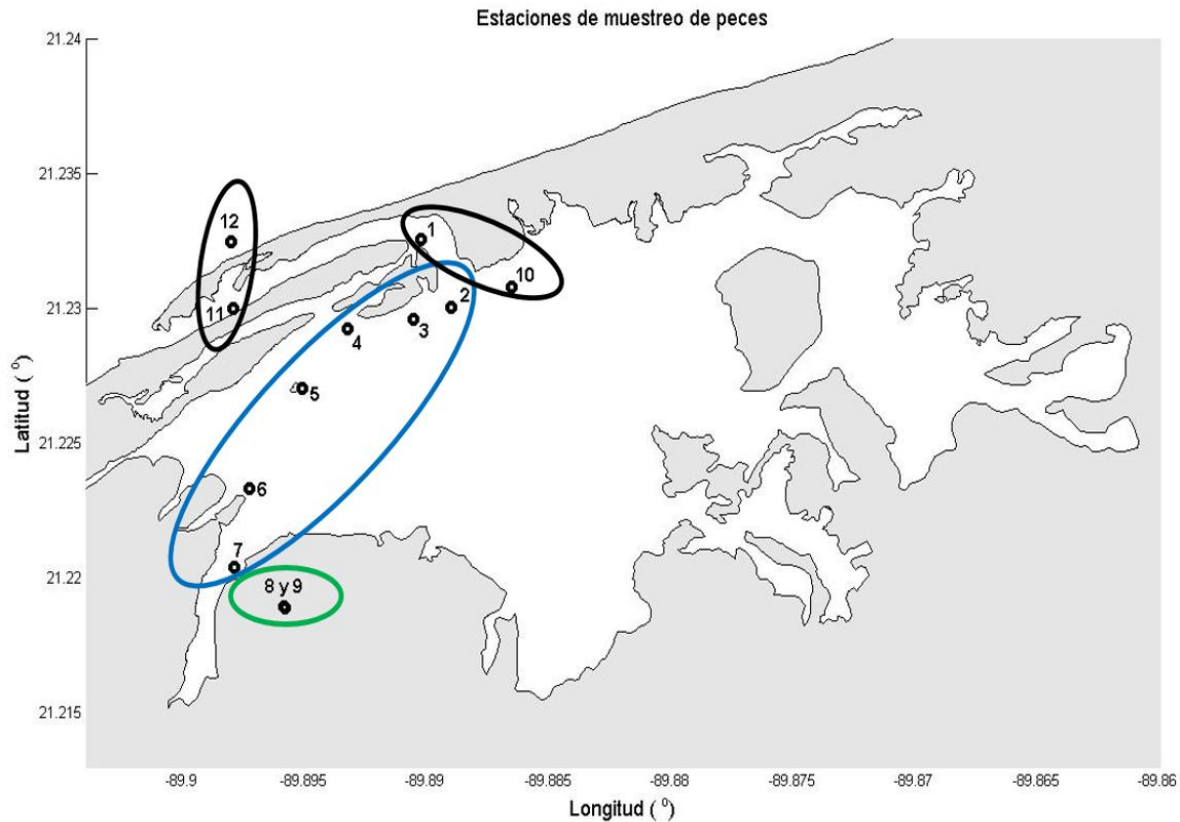


Figura 64. Estaciones de muestreo de ictiofauna reportadas por Gallardo-Torres et al. (2012). Los colores corresponden a la zonación delimitada de acuerdo a la variación de salinidad (zona marina (negro), zona estuarina (azul) y zona dulceacuícola (verde)).

En el presente estudio se reportó la distribución de 3 especies pertenecientes al componente dulceacuícola estenohalino (*P. velifera*, *G. yucatanana* y *H. bimaculata*), la primera reportada como especie dulceacuícola/estuarina por lo que su distribución es amplia a pesar de su carácter primordialmente dulceacuícola, las dos siguientes especies han sido reportadas estrictamente como dulceacuícolas, sin embargo, *G. yucatanana*, especie frecuente, fue reportada en distintos meses en zonas con agua salobre y marina; *H. bimaculata*, de categoría ocasional, únicamente se reportó para la zona dulceacuícola.

Durante el mes de marzo de 2011 se reporta para la zona de descarga de agua dulce (“ojo de agua”) la presencia de las tres especies dulceacuícolas en la laguna la Carbonera, donde se ubican las estaciones 8 y 9 y los registros de salinidad *in situ* son <5 ppt. La especie *G. yucatanana* se presenta también en la zona estuarina (estaciones 4, 5 y 6 en salinidades de 35 a 45 ppt) (Figura 65).

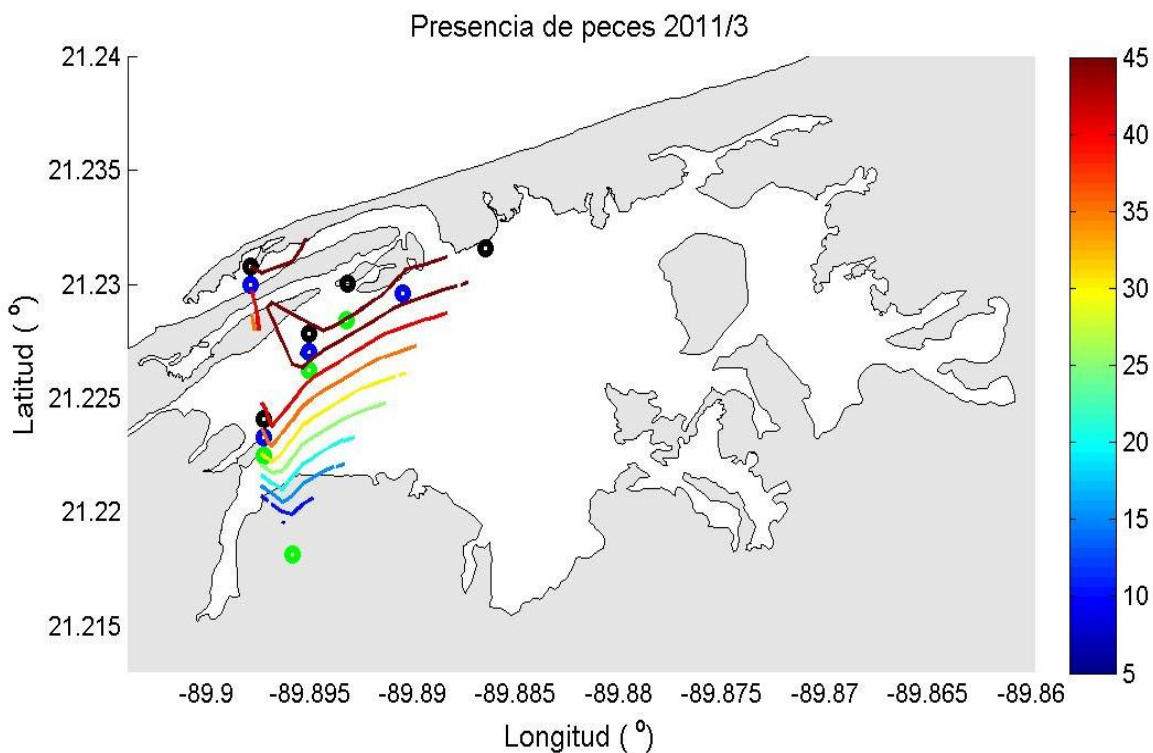


Figura 65. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de marzo del año 2011. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

La distribución de la especie *G. yucatanana* en los datos registrados en las bases de ictiofauna es tan amplia como la de la especie *P. velifera*, los rangos de salinidad en que se reportaron van desde <5 hasta 45 ppt (estaciones 5, 6 y 9 en marzo de 2011 (Figuras 65), estaciones 6 y 8 en diciembre de 2009 (Figura 66), estaciones 9 y 4 en abril de 2009 (Figura 67) y estaciones 7, 8 y 9 en septiembre de 2009 (Figura 71), estaciones 4, 6, 7, 8 y 12 en julio de 2009 (Figura 73).

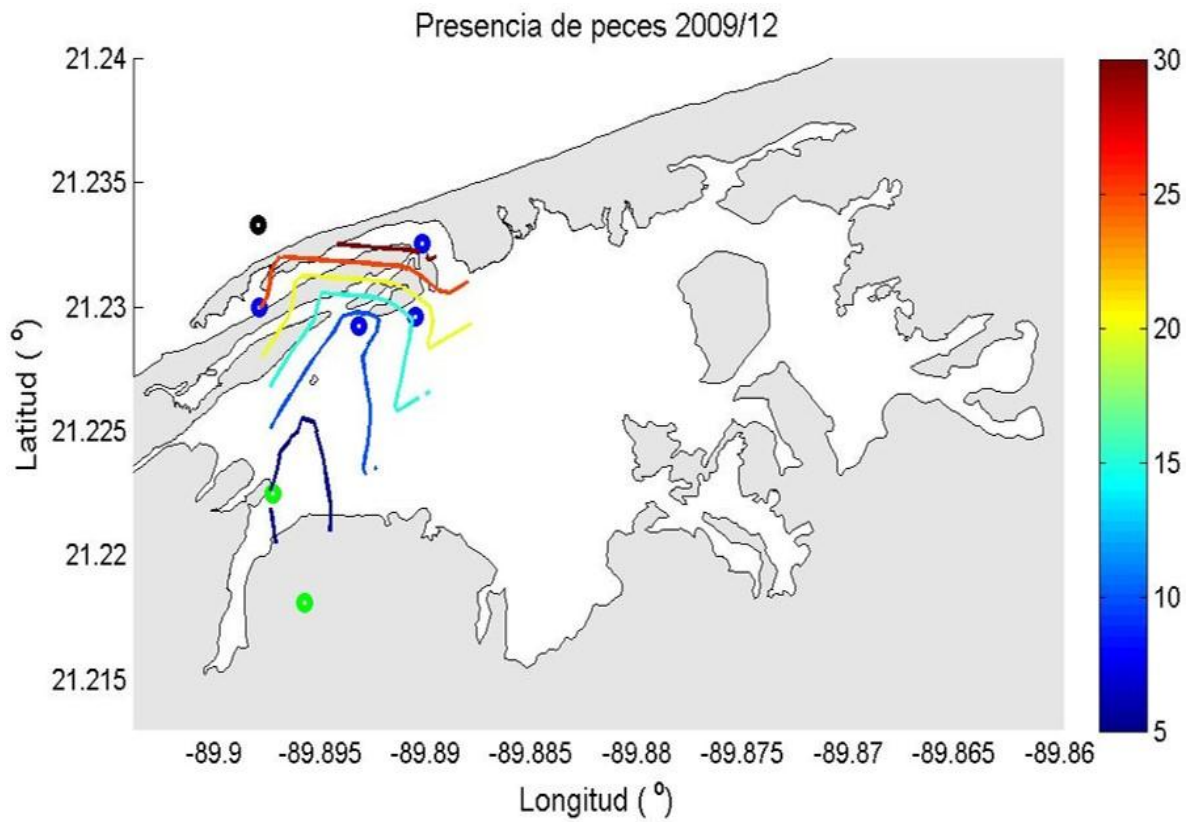


Figura 66. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de diciembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

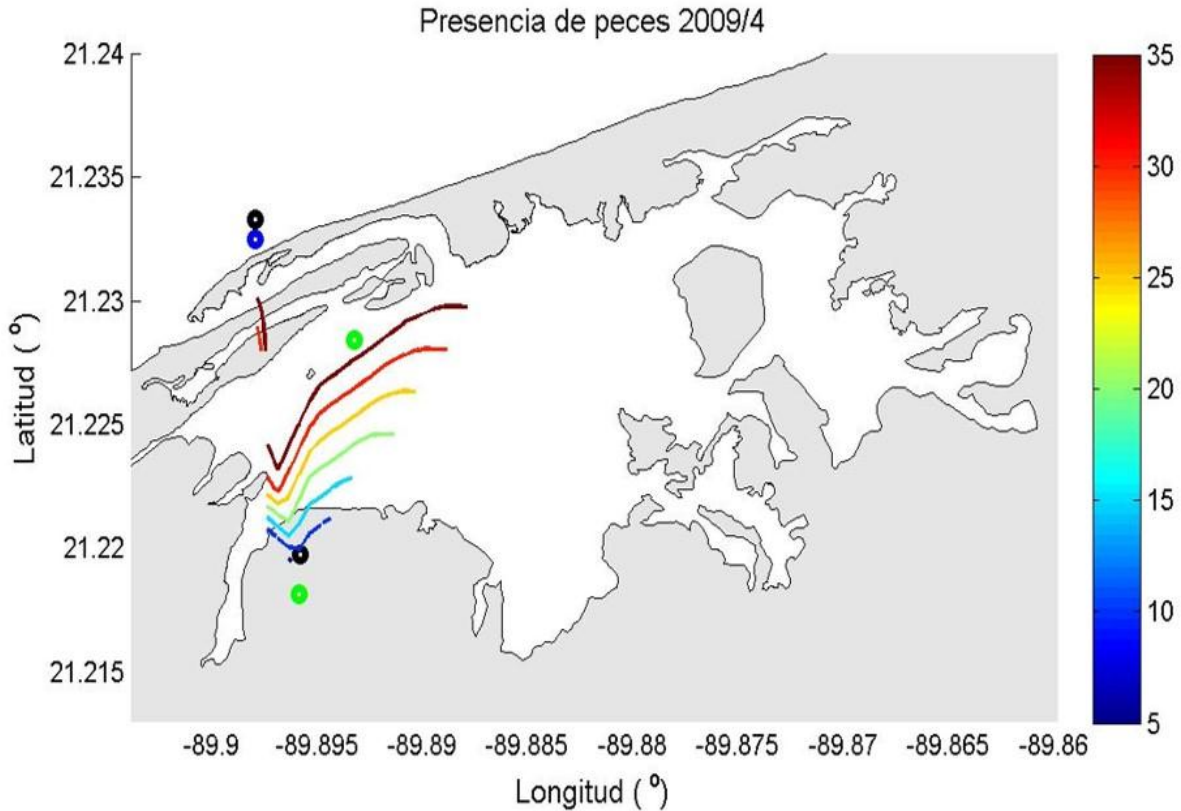


Figura 67. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de abril del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

Las especies de carácter estuarino se distribuyen a lo largo de todo el gradiente que se forma por la mezcla del agua dulce proveniente de la zona de descarga con la de carácter marino que entra a través de la Boca lagunar por la acción de la marea. Las especies frecuentes (*T. falcatus*, *M. colei*, *S. barracuda* y *S. spengleri*) y ocasionales (*S. hispidus* y *G. micrura*) presentes en la zona estuarina y marina son indicadoras de dicho gradiente (con salinidades desde 5 hasta 45 ppt), aunque es importante destacar que el gradiente salino medido *in situ* que se reporta en las isohalinas de los mapas de distribución de ictiofauna tiene importantes cambios y la distribución de éstas especies está sujeta a dichos cambios de la zona (Figuras 68 y 69). Los cambios en el gradiente salino están sujetos al cambio en la cantidad de descarga de la zona del Ojo y el momento de la marea (bajamar/pleamar), en ocasiones el agua dulce (<5 ppt) ingresa considerablemente al interior de la laguna y llega hasta la zona del punto de CTD nombrado Petén y a partir de

este punto se mezcla gradualmente con el agua marina y se registran salinidades bajas en la zona cercana a la Boca de la laguna (20-35 ppt) (Figuras 68 y 69). Se reportó a las especies ocasionales *S. hispidus* y *G. micrura* en dicho gradiente, la primera reportada en noviembre de 2009 en la estación 2 (salinidad de 35 ppt) (Figura 68) y la segunda reportada durante octubre de 2010 en la estación 7 (salinidad <5 ppt) (Figura 69). Las especies frecuentes *T. falcatus*, *M. colei*, *S. barracuda* y *S. spengleri* se reportan en las estaciones (1, 2, 3, 4, 5, 10, 11 y 12 en el mes de noviembre de 2009 en salinidades desde 10 hasta 35 ppt) (Figura 68).

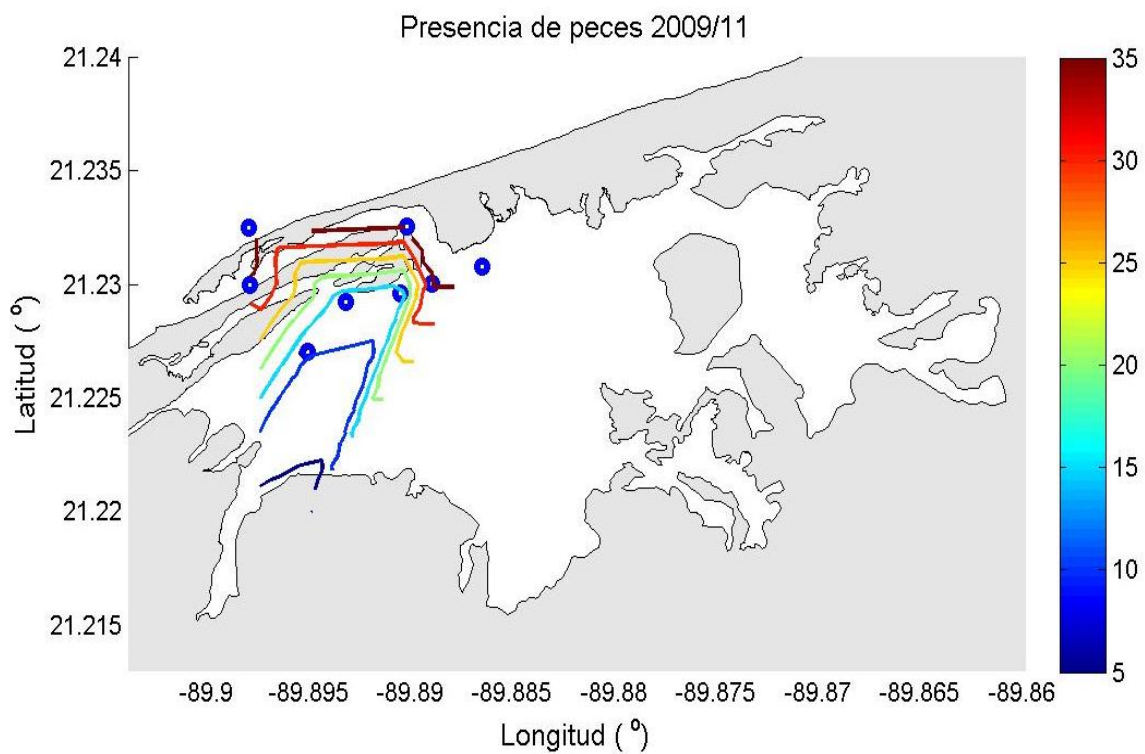


Figura 68. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de noviembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

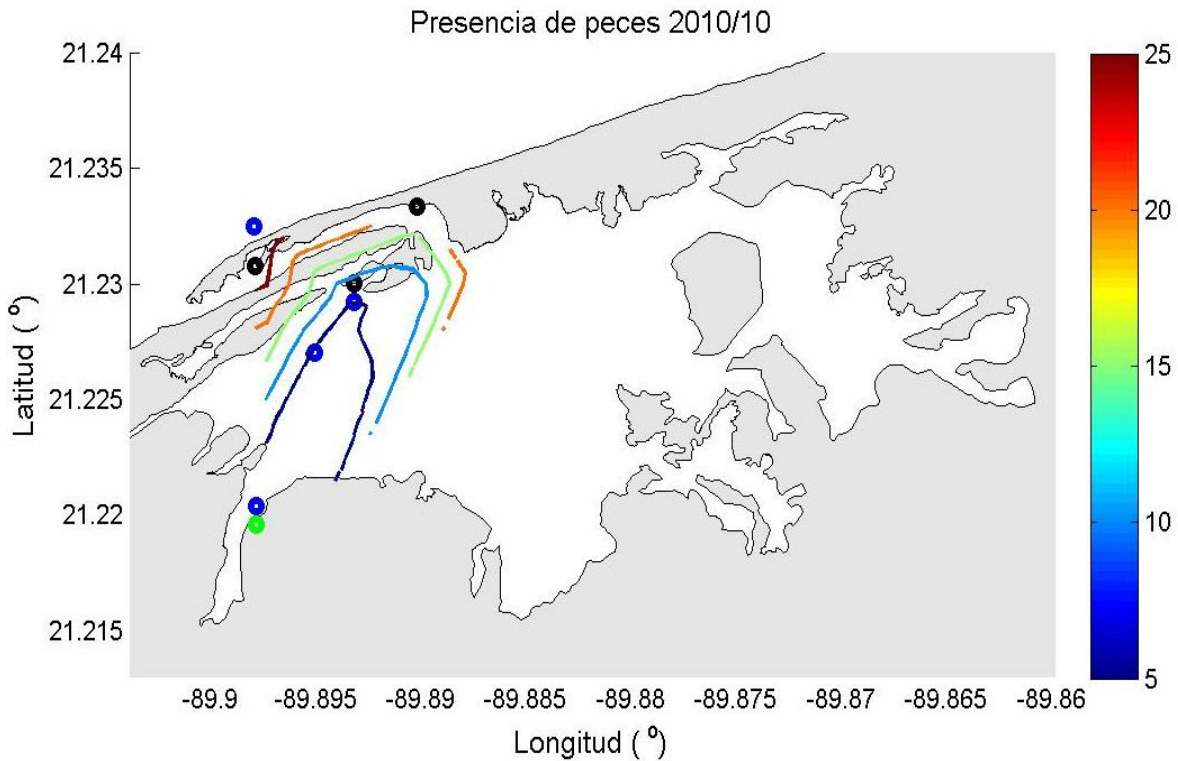


Figura 69. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de octubre del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

En cuanto a la distribución de las especies marinas, éstas muestran un patrón más consistente en los rangos de salinidad que toleran según reportes anteriores. *A. lamprotaenia*, y *L. synagris* reportadas siempre en la zona marina y en la zona estuarina cuando el agua marina penetra distancias importantes al interior de la laguna (hasta la estación 6), la distribución de *A. lamprotaenia* se amplía gracias a la penetración de agua marina (salinidad de 30 a 40 ppt) correspondiente a las estaciones 1, 3, 4, 5, 10, 11 y 12 (Figura 70) y *L. synagris* se reportó en la estación 1 en el mes de septiembre de 2009 (salinidad 35) (Figura 71). La especie marina y frecuente *A. rhomboidalis* también se distribuye en zonas con agua de característica marina, los reportes anteriores de su tolerancia a la salinidad son de 28 a 40 ppt, se reportó en dicho intervalo de salinidad tanto en la zona marina como la estuarina (estaciones 1, 4 y 10, salinidad 30) (Figura 72) y en algunas ocasiones se presentó en salinidades menores (12 a 25 ppt) en las estaciones 1 y 4

en octubre de 2010 (Figura 69). Las especies *L. synagris*, *A. scriptus*, *A. narinari*, *D. americana* y *E. naucrates* se reportan para las estaciones 10 y 11 en septiembre de 2009 (salinidad 35) (Figura 71). Se registró un patrón no consistente de acuerdo a la tolerancia salina reportada en la literatura para la especie *P. albigutta*, de carácter estrictamente marino (30 a 40 ppt). Su distribución es amplia en zonas de salinidad marina (estaciones 11 y 5 de la Figura 65 y estaciones 12, 11, 10, 6, 5 y 4 de la Figura 70;), sin embargo, se reporta su presencia en la zona dulceacuícola (salinidad 10 y <5 ppt) en más de una ocasión (estación 8 y 9 en Figuras 67 y 73).

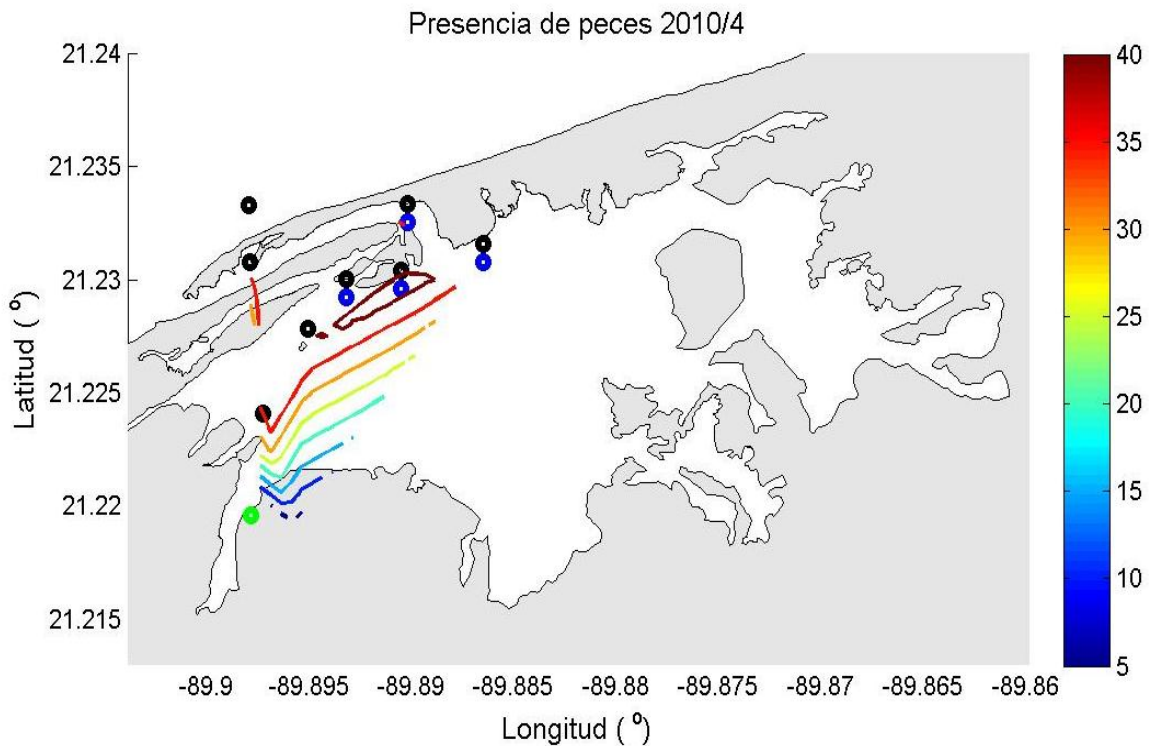


Figura 70. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de abril del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

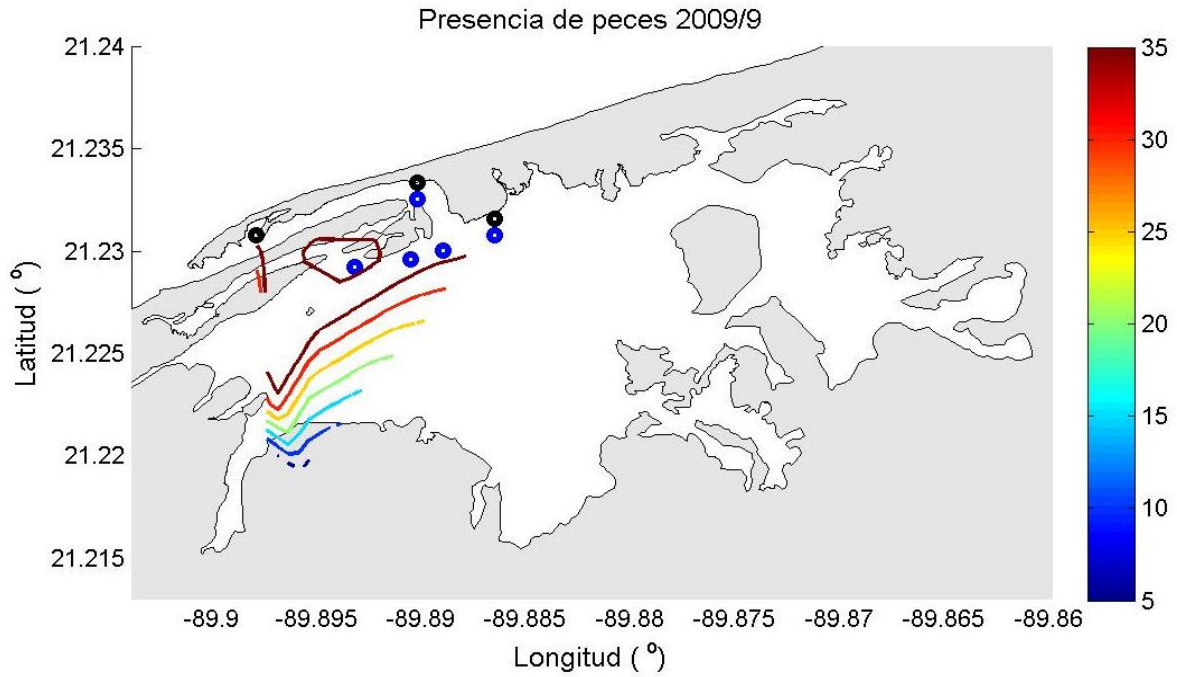


Figura 71. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de septiembre del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

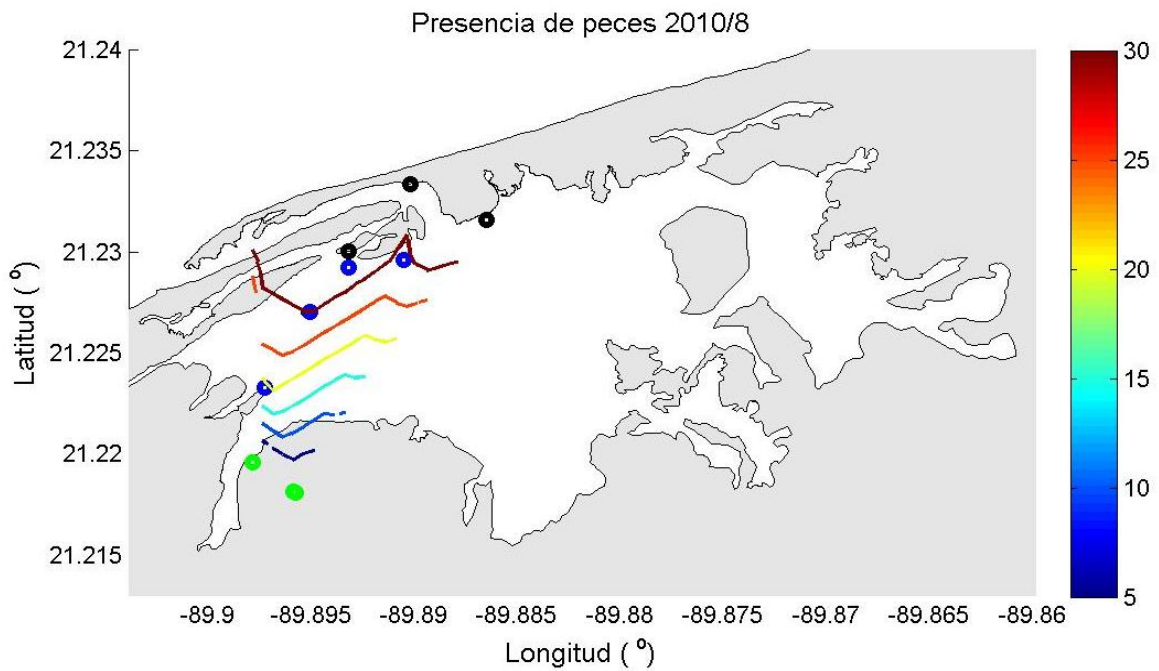


Figura 72. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino

(azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de agosto del año 2010. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

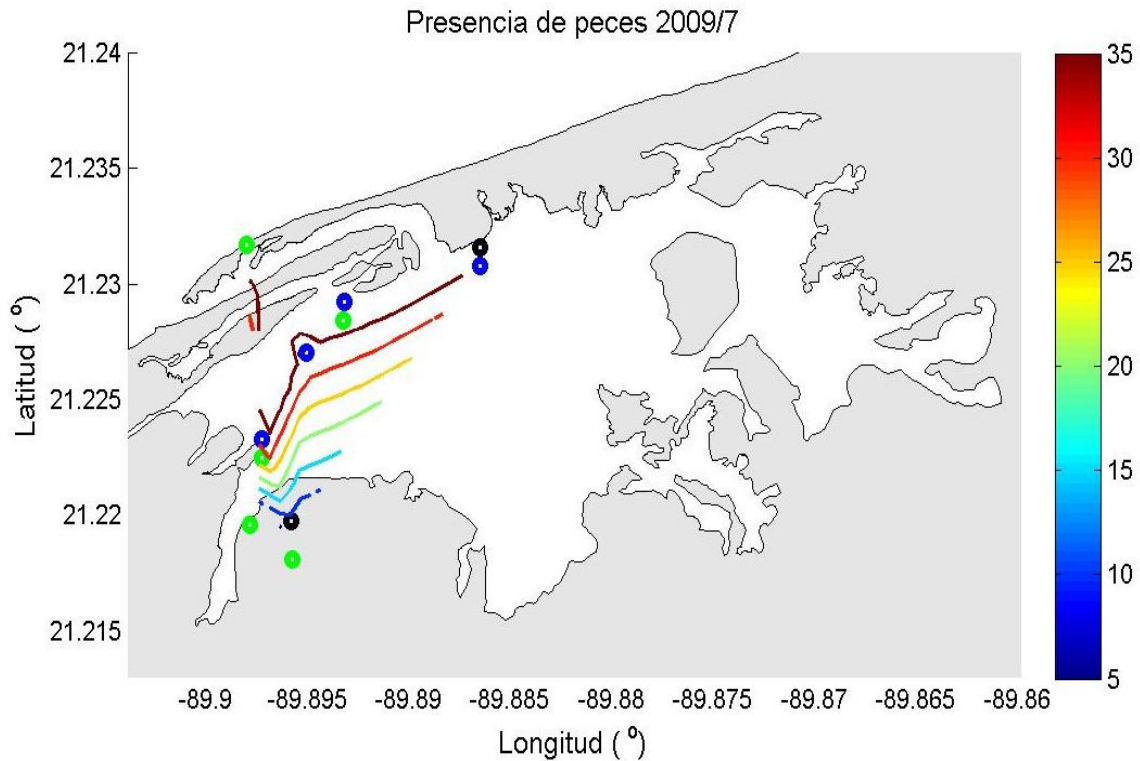


Figura 73. Distribución de peces de acuerdo al tipo de ambiente (marino (negro), estuarino (azul), dulceacuícola (verde)) para el mes de julio del año 2009. La barra de color representa los valores de salinidad (ppt).

Los valores de salinidad en los que las especies frecuentes y ocasionales fueron reportadas en las estaciones de muestreo se comparan con los registros bibliográficos de su tolerancia a la salinidad (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación del rango de tolerancia salina que se reporta en la literatura con los valores salinos en lo que las especies se reportaron.

ESPECIE	AMBIENTE	Salinidades reportadas en bibliografía (ppt)	Salinidades en que se encontró la especie (ppt)
<i>Anchoa lamprotaenia</i>	Marino	20-35.5	30-40
<i>Archosargus rhomboidalis</i>	Marino	28-36.5	12-45
<i>Paralichthys albigutta</i>	Marino	30-40	<5-45
<i>Aluterus scriptus</i>	Marino	30-40	35
<i>Lutjanus synagris</i>	Marino	22-40	35-45
<i>Aeobatus narinari</i>	Marino	30-40	35-40
<i>Echeneis naucrates</i>	Marino	30-45.5	35-40
<i>Dasyatis americana</i>	Marino	28-35.5	35
<i>Sphoeroides spengleri</i>	Estuarino	30-40	10-45
<i>Gymnura micrura</i>	Estuarino	30-40	5-40
<i>Stephanolepis hispidus</i>	Estuarino	24-35.5	35
<i>Menidia colei</i>	Estuarino	30-36.5	15-45
<i>Sphyraena barracuda</i>	Estuarino	25-45	10-45
<i>Trachinotus falcatus</i>	Estuarino	32.5-40	15-45
<i>Poecilia velifera</i>	Dulceacuícola/Estuarino	-	10-35
<i>Gambusia yucatana</i>	Dulceacuícola	-	<5-45
<i>Heterandria bimaculata</i>	Dulceacuícola	-	<10

La distribución de las especies de peces estenohalinos en la laguna la Carbonera guarda una estrecha relación con la hidrodinámica debido al cambio diario en el gradiente salino que ésta provoca. El gradiente salino simulado y las mediciones *in situ* reportadas en cada uno de los mapas de distribución de ictiofauna en la laguna la Carbonera representan las tres zonas en la parte occidental de la laguna con sus características salinas: la zona dulceacuícola, la estuarina y la marina, la distribución de las especies reportada no abarca datos en la zona oriental. La zona oeste de la laguna les brinda a las especies de los diferentes componentes estenohalinos un amplio espacio de distribución, las estuarinas se distribuyen a lo largo de toda la zona estuarina y marina, las especies estrictamente de agua

dulce restringen su distribución a la zona del “ojo de agua” y al interior del sistema cuando el agua dulce ingresa distancias importantes al interior del sistema, lo mismo para las especies marinas que se distribuyen en la zona marina y estuarina cuando el agua marina ingresa a esta zona.

De acuerdo al gradiente salino simulado bajo distintos forzamiento de viento (brisas, NE y NO) las especies marinas y estuarinas tienen la posibilidad de ampliar su distribución a gran parte de la zona oriental de la laguna (principalmente en el centro de la laguna y hacia el sur de ésta) ya que la salinidad que se presenta es de tipo marina; las especies de carácter dulceacuícola estenohalino también pueden ampliar su distribución a gran parte de la zona estuarina en los momentos de mínima excursión de la marea ya que agua con característica dulce ingresa distancias importantes al interior del sistema.

El gradiente salino simulado es una aproximación al real (corroborado en mediciones en campo con CTD y mediciones *in situ* de las bases de datos de distribución de ictiofauna y representa una útil herramienta para conocer la ampliación o reducción del ámbito de distribución de aquellas especies cuya distribución está sujeta a cambios en las variables ambientales, en este caso, la salinidad.

6. DISCUSIÓN

i Características atmosféricas

Las variaciones en las características atmosféricas y marinas en la laguna la Carbonera fueron registradas durante un año (5 de septiembre de 2014 a 5 de septiembre de 2015).

En cuanto a las variaciones atmosféricas reportadas para el puerto de Sisal, algunos eventos de precipitación se registraron a inicio y fin de la temporada de secas 2016, es decir, fuera de los límites reportados por Vidal (2005) para dicha temporada (marzo a julio), aún con la marcada estacionalidad que se reporta, dichos eventos pueden llegar a presentarse. Existe gran variabilidad anual en los eventos de lluvia en la península de Yucatán, debido al estrecho vínculo que la zona guarda con los vientos Alisios. La celda anticiclónica de la que provienen los vientos Alisios registra cambios anuales importantes de intensidad, magnitud

y posición, lo que provoca cambios en los sistemas nubosos que tienen como consecuencia eventos de precipitación (Sánchez-Santillán *et al.*, 2012).

ii Características hidrográficas

Para las características hidrográficas, en el caso de la temperatura del agua, su comportamiento indica que las variaciones diurnas obedecen a un forzamiento atmosférico más que a una influencia del mar para los puntos de instalación de CTD (a excepción del “ojo de agua”), el rango de variación diaria es alto, como es de esperarse, ya que la columna de agua es somera y está sujeta a una mayor influencia térmica por radiación solar durante el día (Mariño y Enríquez, 2011).

Los registros de temperatura y salinidad en la laguna La Carbonera muestran zonas de grandes variaciones a lo largo del sistema lagunar. Cuatro zonas con sus características termohalinas particulares se comportan de acuerdo a los distintos forzamientos que tienen alrededor; para la zona occidental, donde el agua de característica marina (procedente de la boca de la laguna) y el agua dulce (procedente de la zona del “ojo de agua”) se mezclan, las variaciones de frecuencia diurna se hacen notorias. Con las más altas amplitudes de oscilación, la zona del petén registra cambios de hasta 16 °C en la temperatura y de 20 a 40 ups en la salinidad en un día, además de que dichas variaciones confirman un claro gradiente estuarino en esta zona, ya observado por Jerónimo *et al* (2012).

Los valores máximos de temperatura encontrados fueron al sureste de la laguna (37 °C), Jerónimo *et al.* (2012) reportaron los máximos valores para la zona noreste de la laguna (38°C).

La ubicación de los CTD's en la zona más oriental de la laguna (puntos sureste y noreste) ocasionó que los valores de salinidad tuvieran los registros más altos (>80 ups), dicha zona está sujeta a poco intercambio de agua con el mar y escasas descargas de agua dulce, en dicha zona y cercano a la boca lagunar se han reportado salinidades de hasta 50 ups (Jerónimo *et al.*, 2012). Sin embargo, de manera general para el estado de Yucatán la salinidad varía en los cuerpos costeros dependiendo de la cantidad de agua dulce que entra al sistema en diferentes temporadas (secas y lluvias) y de la alta evaporación típica de esta zona. Se han reportado valores máximos de salinidad de hasta 35 ppm para la laguna

Celestún en temporada de secas (Ordóñez-López 1997). Un estudio exploratorio en algunas lagunas del estado reportó valores de hasta 45 ups en temporada de secas en la laguna Chelem, cercanos a los 40 ups en la laguna de Telchac en los meses de junio y julio, y valores de casi 40 ups en Bocas de Dzilam en marzo; mostraron todas ellas zonas con características hiperhalinas al menos en alguna temporada del año (Mariño y Enríquez 2011); estos valores por debajo de los reportados en el presente estudio en la laguna La Carbonera.

La zona de la boca de la Carbonera presentó variabilidad intermedia en los valores de salinidad y temperatura (zona de influencia de agua marina), en concordancia con lo reportado por Jerónimo *et al.* (2012) quienes atribuyeron esta escasa variación a la influencia de la marea astronómica registrada para dicha zona. Del mismo modo, la menor variabilidad anual tanto en temperatura como en salinidad encontrada en la zona oeste de la laguna (zona del “ojo de agua”) coincidió con los valores reportados por Jerónimo *et al.* 2012 para la misma zona (cambios de alrededor de 1°C en la temperatura y de 0 a 8 ups en la salinidad). Esta estabilidad se observa debido a que la descarga del “ojo de agua” es un aporte directo del acuífero, que está en el subsuelo y se encuentra resguardado de los efectos de enfriamiento y calentamiento solar y atmosférico.

En el “ojo de agua” se registraron cambios abruptos mensuales en las señales de salinidad y temperatura; estos registros confirman intrusión salina, que ocurren en diferentes temporadas del año durante mareas vivas y se presentan como picos de incremento en la salinidad y disminución de temperatura. Este fenómeno ha sido reportado en otros sitios de la Península de Yucatán, en particular en un “ojo de agua” localizado en una laguna arrecifal en Quintana Roo, donde se observó la entrada de agua marina hacia el acuífero durante los picos más altos en la marea de sizigia (mareas vivas) (Parra *et al.* 2015) cuando el gradiente de presión hidráulico entre el acuífero y el océano es menor. La intrusión salina en este tipo de sitios (DSAs) depende tanto del gradiente de presión hidráulico océano-acuífero, como de los gradientes de densidad entre el océano y el acuífero, y representa un riesgo grave de contaminación del agua dulce, especialmente ante la perspectiva del aumento en el nivel del mar y de la posible disminución del nivel del acuífero por la extracción excesiva de agua dulce (ACASA 2011; Werner *et al.* 2013).

Registros en la variación de la salinidad en la entrada al canal de “ojo de agua”, donde la

descarga de agua dulce del acuífero se mezcla gradualmente con el agua salada fueron reportados por Sánchez (2012), sin embargo, dicho autor no asevera si el agua de la laguna puede llegar hasta el “ojo de agua” puesto que no realizó instalación de sensores ahí, en el presente estudio la instalación de un CTD en el “ojo de agua” reportó eventos de incremento de la salinidad en distintos momentos de la serie de tiempo, sin embargo, debido a fallas en el sensor de presión para el “ojo de agua” en dichos momentos no es posible conocer los niveles entre el “ojo de agua” y la estación la Boca. Esta información contribuiría a conocer lo que comúnmente se sabe: cuando se presentan bajamares máximas la presión del acuífero es mayor y por ende se presenta una entrada de agua dulce a la laguna, o bien durante las pleamares máximas la presión al acuífero disminuye provocando la entrada de agua con mayor salinidad a éste (Sánchez, 2012).

Dichos casos requieren de atención en estudios futuros ya que en zonas kársticas y de bajo relieve, donde la alta permeabilidad y la porosidad de las rocas favorecen la penetración de sal, el riesgo de contaminación del agua dulce por intrusión salina ha sido reportado como un problema (Graniel *et al.* 2004; Vera *et al.* 2012). Estos eventos, como se mencionó, también se deben a la disminución del gradiente de presión hidráulica del continente hacia el mar, debido a la sobreexplotación causada por la demanda de agua, la elevación del nivel del mar por marea de sicigia y por anomalías por fenómenos meteorológicos extremos. Aunado a la perspectiva de un aumento en el nivel del mar por cambio climático aumentaría la incidencia de estos eventos de intrusión salina (Van y Lee 2014).

iii **Hidrodinámica de la laguna la Carbonera**

El software Delft3d mostro versatilidad para los objetivos de modelación numérica hidrodinámica en este trabajo. La hidrodinámica de la laguna la Carbonera fue caracterizada bajo distintos forzamientos variando entre marea viva y marea muerta. Una de las primeras observaciones en la validación del modelo numérico fue el retraso que los datos de la onda de marea (mareógrafo) tienen, tanto en la boca lagunar como en los puntos más orientales de la laguna, además del desfase de la onda de marea registrada en el punto de la Boca respecto de los puntos internos de la laguna. La onda de marea es retrasada desde la zona marina hasta la boca de la laguna, principalmente por el efecto que ejerce la

fricción de fondo debido a los cambios de profundidad desde el mar hacia la boca (zonas de mayor profundidad en la zona marina y de menor profundidad en la boca lagunar), además de que la posición de la laguna, paralela a la costa, provoca que la incidencia de la onda de marea tenga obstáculos geomorfológicos a través del paso hacia la boca lagunar (Mariño y Enríquez, 2011). Una vez que la onda de marea entra a la laguna continua el proceso de pérdida de energía por efectos de fricción, y esto a su vez genera cambios de fase en dicha onda, del mar a la cabecera de la laguna existen reportes de cambios en fase y energía de la componente M2 de la marea, dicha componente pierde un 43.48% de su energía y tiene un retardo de la propagación de la onda de 0.81 horas (Sánchez, 2012).

La hidrodinámica de la laguna la Carbonera está controlada principalmente por la marea, pero también hay una importante entrada de agua dulce. Existe un afluente principal en la zona suroeste de la laguna (“ojo de agua”) que contribuye a la hidrodinámica del sistema, sin embargo, se sabe que en la zona sureste del sistema existen otras entrada de agua dulce que no fueron consideradas para la caracterización de la hidrodinámica del sitio de estudio. Dichas entradas de agua también pueden tener un impacto en la hidrodinámica de la laguna y se tiene evidencia de que la zona centro y sureste del sistema es una zona de mezcla, dicha aseveración se logró a través de un análisis de conglomerados y localización de grupos utilizando parámetros físico-químicos y nutrientes en la columna de agua realizado por Camacho (2011). La zona de mezcla reportada para la zona este está relacionada con los mapas de caracterización de la hidrodinámica de la laguna donde bajo distintos forzamientos la zona centro y sureste de la laguna presentan giros ciclónicos o anticiclónicos y se presentan las mayores magnitudes.

La configuración somera y con obstrucciones topográficas y vegetales de las lagunas costeras de estado de Yucatán provocan modificaciones en el flujo de entrada y salida de la onda de marea, cambiando dirección y magnitud de la misma. Las mayores magnitudes reportadas en la caracterización de la hidrodinámica fueron en los momentos donde se presentaba el flujo de entrada en mareas vivas, como se ha observado en otros sistemas lagunares similares como el de Chelém (Mariño y Enríquez, 2011).

Las características del flujo de marea en el interior de la laguna la Carbonera están influenciadas por la batimetría y la hidrografía del sistema. La parte occidental de la laguna la Carbonera se comporta como un sistema estuarino, donde se presentan corrientes de magnitud considerable como consecuencia del encuentro entre la onda de marea que ingresa a través de la Boca de la laguna y el agua dulce proveniente de la zona de descarga del “ojo de agua”. Dichas corrientes son, en parte, generadas por el fuerte gradiente de presión consecuencia de la estratificación longitudinal en dicha zona, como ocurre en partes someras de sistemas estuarinos como la Bahía de Chesapeake (Valle-Levinson y Lwiza, 1997) y en parte por la influencia misma de la onda de marea y la descarga del “ojo de agua”.

La influencia del viento en las condiciones hidrodinámicas para sistemas lagunares someros ha sido reportada por otros autores en Yucatán. Los vientos locales (brisas marinas) provocan cambios mínimos en el nivel del agua en sistemas similares como la laguna de Celestún (1.9 cm), los vientos del Norte influyen la hidrodinámica aunque con cambios en el nivel del agua también mínimos (3.9 cm) (Casares, 2015). Las sobreelevaciones en el nivel del agua por efecto del viento tienden a ser más notorias cuando se trata de eventos de Norte, sin embargo, debido a que las velocidades son promediadas en la profundidad para modelos 2D dichos cambios pueden no ser tan visibles. Pero es importante destacar que los patrones más evidentes en el movimiento del agua para la laguna la Carbonera son ocasionados por efecto de vientos del Norte, sumado a que éstos generan procesos de mezcla en la columna de agua (turbulencia) para la parte interna de la laguna y dichos procesos forman gradientes de densidad que contribuyen también a la hidrodinámica de este sistema.

En los resultados de modelación, se observó que el flujo de agua en la laguna la Carbonera fue poco influenciado por viento del sector Este, pero con viento del sector Norte se reportó un mayor efecto en las corrientes residuales en el sistema; esto puede apreciarse mejor en experimentos numéricos que no incluyen el forzamiento de marea. Este resultado es consistente con el encontrado en la laguna de Chelém, que se encuentra unos kilómetros al oriente de La Carbonera, donde durante mareas muertas (cuando la influencia de la marea

es menor) el viento del sector Norte modifica el flujo de agua e incrementa su magnitud (Mariño y Enríquez, 2011).

Una serie de escenarios de modelación con distintas condiciones iniciales realizados para esta investigación (cambios en los aportes de agua dulce, condiciones iniciales de salinidad corroboradas en campo, una batimetría corroborada en campo, entre otras) aportaron resultados novedosos de la hidrodinámica que no habían sido considerados en estudios anteriores para la laguna la Carbonera (Sánchez, 2012), esto es, a la influencia de la circulación termohalina en la hidrodinámica de la laguna. Ya que las zonas de mezcla (oeste, centro y sur) donde se encuentran aguas con diferentes características salinas son los sitios donde se generan corrientes de magnitudes no despreciables y para sistemas someros en zonas tropicales la circulación termohalina, sumado a la marea y al esfuerzo del viento es otro de los principales forzantes de la hidrodinámica de la laguna la Carbonera.

iv **Componente biológico**

Se realizó a partir de datos bibliográficos, la revisión de la distribución de peces estenohalinos del componente marino, estuarino y dulceacuícola presentes en la laguna La Carbonera, relacionando su distribución con los distintos ambientes hidrodinámicos y halinos. Se encontró que la laguna la Carbonera tiene una compleja hidrodinámica y ésta propicia diferencias en la distribución de la comunidad de peces marinos, estuarinos y dulceacuícolas. La variación en las condiciones salinas en lagunas costeras o estuarios tiene un papel decisivo en las características estructurales y funcionales de la biota acuática de estos sistemas y es en primera instancia consecuencia de la hidrodinámica del sistema. La relación que la salinidad guarda con la distribución de organismos no es tan simple, ya que depende de la capacidad osmorregulatoria de cada especie (que cambia para organismos de agua dulce, salada y salobre debido a la particular relación química de iones que se presenta en cada ambiente) (Telesh y Khlebovich, 2010). No solamente la salinidad cambia la distribución de las especies de peces (Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2004), también la presencia de vegetación sumergida también juega un papel importante, ya que en estos ambientes existe mayor abundancia y riqueza de especies. Debido a que la

complejidad estructural y productividad las zonas con vegetación proveen protección y refugio contra depredadores, además de que ofrecer una mayor disponibilidad y diversidad de alimento para diversas especies (Beck *et al.*, 2001; Arceo-Carranza y Vega-Cendejas, 2009; Castillo-Rivera *et al.*, 2011). Otros factores que afectan la distribución de organismos son la disponibilidad de alimento, el oxígeno disuelto, la temperatura y la turbidez, éste último está asociado a la entrada de larvas del componente marino en algunos estuarios, debido a que provee protección contra depredadores (Barletta *et al.*, 2005).

Se encontraron algunas diferencias en el intervalo de tolerancia a la salinidad de algunas especies, por ejemplo *G. yucatanana*, especie dulceacuícola, se reportó en salinidades de hasta 45 ppt. Algunas especies de Poeciliidae tienen la capacidad de tolerar desde ambientes marinos hasta dulceacuícolas, mientras que otras son estrictas de agua dulce o, cuando más, salobres. El género *Gambusia* (Teleostei: Poeciliidae) es el más abundante y frecuente en la ictiofauna de la península de Yucatán, *G. yucatanana*, es la especie más eurihalina del género y existen incluso poblaciones marinas (Pérez-León y Schmitter-Soto, 2007). Dicha especie es además reportada como residente y endémica de sistemas lagunares en Yucatán (Semarnat, 2002; Vega-Cendejas, 2004).

La especie marina estenohalina *P. albiguta* ha sido reportada únicamente para zonas costeras con salinidades marinas (Vega-Cendejas, 2004), sin embargo en el presente estudio se reportó en más de una ocasión en agua dulce (<5 ppt), esta especie se encuentra ampliamente distribuida en el Golfo de México, se distribuye en aguas poco profundas dentro de estuarios y ambientes costeros cercanos a la plataforma, se localiza en una amplia variedad de hábitats, que incluyen camas de pastos marinos, zonas de fondo plano y rígido y de piedra caliza, prefieren fondos duros y arenosos. Los juveniles entran a los estuarios y lagunas y habitan camas de pastos de alta o baja salinidad y los adultos se distribuyen en zonas marinas, principalmente debido a cambios ontogénicos en la preferencia de alimentación (crustáceos y anfipodos pequeños como juvenil y peces como adulto (Munroe, 2015).

La especie *A. rhomboidalis* considerada marina estenohalina en el presente estudio también ha sido considerada como marina eurihalina (Vega-Cendejas, 2004), las salinidades en las que se encontró van desde <5 hasta 45 ppt. Su presencia en agua salobre en lagunas costeras y estuarios es debida a sus hábitos alimenticios que cambian con el ciclo de vida

del pez, de 2-8 mm su dieta se basa en nauplios y copépodos (y se distribuye en zonas planctónicas, claro ejemplo de zonas de manglar), de 8-80 mm se alimenta de anfípodos y decápodos y es común encontrarlo distribuido en aguas someras, de 80-160 mm se alimenta de algas y fauna asociada a la vegetación y es común encontrarlo en camas de pastos y >160 mm se alimenta de moluscos y se distribuye en canales de marea (Arancibia-Yañez *et al.*, 1986; Russell *et al.*, 2014)

Las altas salinidades, reportadas para otros sistemas costeros de la península de Yucatán, provocan disminución en la riqueza y abundancia de las especies de peces por diferentes causas, entre las que destacan la supervivencia en el sistema debido a los escasos grupos tróficos que existen y la disminución en las interacciones competitivas. La eliminación de potenciales competidores y predadores en condiciones de alta salinidad hace viable el acceso a más recursos y espacios, compensado por el costo energético que causa el estrés fisiológico (Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2004). Algunas especies como *M. colei*, *S. barracuda* y *A. rhomboidalis*, han sido reportadas en salinidades superiores a las del presente estudio (24-89, 35-41, 35-54 ppt respectivamente), además (aunque es del) de ser del componente marino estenohalino, la tolerancia a mayor salinidad brinda ventajas de recursos, además de que ampliaría su distribución a buena parte de la zona oriental de la laguna la Carbonera (Vega-Cendejas y Hernández de Santillana, 2004).

En el presente estudio también se reportaron especies cuya importancia es ecológica, al ser una fuente de energía potencial que es transferida a través de la predación hacia niveles tróficos superiores, y en otras biológica, por su contribución a la biodiversidad íctica. Dentro de éstas, se encuentran especies endémicas (*G. yucatanana*) y sujetas a protección (*P. velifera*). *P. velifera*, *H. bimaculata*, *G. yucatanana* y *M. colei* se mencionan como especies residentes de sistemas lagunares en Yucatán (Semarnat, 2002; Vega-Cendejas, 2004). Otras especies como *L. synagris* y *T. falcatius* son especies de importancia comercial (Gallardo-Torres *et al.* 2012).

La distribución espacio-temporal de peces adultos y juveniles está fuertemente influenciada por los cambios en los factores ambientales (como temperatura y salinidad). En lagunas costeras y estuarios tropicales la distribución de los peces está asociada al régimen de las mareas, por lo que la dinámica en la estructura de la comunidad de peces está altamente relacionada con dicha variación (Sandoval-Huerta *et al.*, 2014).

El manejo de sistemas lagunares y estuarinos es crítico para la protección de las especies, debido a que están sujetas a la gran variabilidad en los parámetros físicos que los dominan, el conocimiento del régimen hidrológico (hidrodinámica y balance de agua) y los gradientes salinos consecuencia del movimiento del agua, son procesos que requieren comprenderse para establecer relaciones con los organismos que tienen diferentes historias de vida. Cada especie tiene requerimientos ecológicos distintos en su ciclo de vida (hábitat crítico) (Telesh y Khlebovich, 2010) y más allá de sólo comprender los procesos ecológicos tales como la hidrodinámica, es necesario un enfoque multidisciplinario para poder determinar la importancia biológica de las lagunas costeras debida a su gran diversidad y riqueza de especies de peces.

7. CONCLUSIONES

El comportamiento de las variables atmosféricas muestra que:

- Los eventos de precipitación en la zona de estudio son de escala pequeña y de volumen considerable durante las temporadas de Nortes y lluvias, aunque también puede presentarse precipitación a inicio y fin de la temporada de secas.
- La mayor temperatura del aire (39 °C en el año de mediciones) se presenta durante la temporada de secas, la menor (13 °C) durante temporada de Nortes. La variación diaria de este parámetro es de alrededor desde 5 °C hasta 10 °C.
- La dirección predominante del viento en la zona de estudio es del sector NE con moderada intensidad (hasta 16 km/h), aunque durante el año de datos analizados, se registraron numerosos eventos de viento del NO. Estos últimos son de mayor intensidad (hasta 25 km/h).

En cuanto a los datos hidrográficos existen cuatro zonas con características particulares de salinidad:

- Zona de salinidad marina: Boca de la laguna con variaciones alrededor de 35 ups.

- Zona de mezcla o estuarina: ubicada al oeste de la laguna con salinidades desde 5 hasta 35 ups.
- Zona hiperhalina: localizada al este de laguna con valores de salinidad de 35 hasta 100 ups.
- Zona con predominancia de agua dulce: al sureste del sistema y llamada “ojo de agua” tuvo valores promedio de salinidad de <5 ups.

La zona marina, estuarina e hiperhalina están sujetas a cambios importantes en sus características halinas debido al flujo y reflujo de la marea y a las temporadas (secas, lluvias y nortes), la zona con menor variación debido al aporte permanente de agua dulce es el “ojo de agua”. Se registraron varios eventos de corta duración de intrusión de agua de mayor salinidad en el sitio del “ojo de agua”.

Los valores registrados por lo sensores muestran para la temperatura del agua que:

- La mayor temperatura se presentó al Sureste y Noreste de la laguna (37 °C).
- La temperatura del agua muestra disminución notable (5 °C) con respecto al resto del año durante la época de Nortes, menor que las variaciones diarias que pueden ser hasta 10 °C.
- La variabilidad en la Boca, en las zonas orientales (Noreste y Sureste) y en el sitio del petén al oeste es muy uniforme (es decir que los cambios térmicos ocurren al mismo tiempo en todo el sistema, excepto en el “ojo de agua”).
- En el “ojo de agua” se observaron las menores variaciones debido a que el agua que descarga en ese sitio proviene del acuífero y tiene un escaso intercambio de calor con la atmósfera.

En cuanto al nivel del agua se observó que:

- En los sitios Noreste y Sureste se presenta una ligera atenuación de la señal de marea con respecto a la Boca de la laguna.
- El “ojo de agua” y la Boca de la laguna oscilan en fase.

- El punto oeste de la laguna, debido a que recibe la influencia de la descarga del ojo de agua y la entrada de agua por la Boca de laguna, muestra un comportamiento totalmente distinto a los otros puntos en cuanto a las variaciones del nivel.

Con base en análisis espectral realizado a las variables atmosféricas e hidrográficas se encontró que:

- El nivel del mar registrado en Sisal, al igual que el nivel de agua en la Boca, Noreste, Sureste y Petén, tienen picos principales en las frecuencias diurna y semidiurna, con un tercer pico importante pero de menor energía en las frecuencias tridiurnas.
- El espectro de energía de los datos del “ojo de agua” no muestra un pico dominante en las frecuencias diurnas ni semidiurnas

De acuerdo a los distintos escenarios para la caracterización de la hidrodinámica de la Laguna la Carbonera se encontró que:

- La corriente que ingresa durante marea llenante se separa en tres ramas: en dirección oeste, al sur del sistema y derivada de ésta una al este (zona centro).
- Se aprecian zonas de giros ciclónicos en la corriente que llega al sur del sistema y giros anticiclónicos en la que permanece en la parte central.
- Forzando el modelo numérico únicamente con marea, las mayores magnitudes se presentan en mareas vivas para la zona de la Boca y de descarga del “ojo de agua”.

Sumando a la marea el esfuerzo de los vientos dominantes en la región en el modelo numérico se encontró que:

- Bajo la influencia de viento del sector NE, al igual que en los escenarios de Brisas, la circulación al interior del sistema es de baja magnitud (0.02 a 0.04 m/s) en la mayor parte del dominio y poco mayor (0.08 a 0.2 m/s) en algunas zonas en la Boca de la laguna y la zona de descarga.

- Cuando se presentan eventos de viento del Norte se promueve la circulación del sistema, con corrientes de mayor magnitud (0.02 a 0.2) en casi todo el dominio. Se observan zonas de intensa recirculación al oeste y sur del sistema donde se reportan las mayores magnitudes (0.12 a 0.2 m/s).

Al forzar el modelo únicamente con viento se observó lo siguiente:

- Con viento del sector NE se promueve el flujo de salida hacia el mar en la zona occidental de la laguna con magnitudes de 0.02 m/s hasta 0.05 m/s. Generándose giros ciclónicos (0.02 m/s) en zona centro y sur del sistema y poca circulación en zona este (0.005 m/s).
- Con brisas marinas la circulación por la mañana es en dirección al mar en la zona este, se presentan magnitudes de 0.02 a 0.05 m/s en la zona occidental y bajas magnitudes (0.005 m/s) en la zona oriental, además de giros en la zona centro y sur de la laguna. Al invertirse el viento, la circulación es en dirección al continente en la zona este, se presentan magnitudes de 0.02 a 0.05 m/s en la sección occidental y de 0.01 m/s para la zona este, en la zona centro y sur de la laguna se generan giros.
- Bajo el efecto del viento del Norte todo el interior del sistema muestra mayores magnitudes en las corrientes (0.05 a 0.15 m/s), con los mayores valores para las zonas de giros (sur y centro y oeste).

Es importante mencionar que estos escenarios de viento y sin mareas nos permiten apreciar el aporte del efecto de la fricción del viento y las diferencias entre ellos, ya que las corrientes instantáneas que ocurren debido a las mareas enmascaran los aportes del viento en la circulación.

Durante los diferentes escenarios en los experimentos numéricos se encontró que el patrón neto de corrientes es de flujo al interior del sistema.

Derivado de las conclusiones anteriores y de manera general se observan tres ramas de flujo de ingreso al sistema con características particulares:

- Zona occidental del sistema dominada por el intercambio de las masas de agua marina proveniente de la Boca y de agua dulce proveniente de la zona de descarga del Ojo con intensos intercambios de agua en la zona del Petén.
- Zona centro y sur del sistema dominadas por el intercambio de agua marina, generación de zonas de recirculación donde se presentan las mayores magnitudes de las corrientes bajo los distintos forzamientos del modelo.
- Zona este del sistema dominada por la presencia de agua marina, con poco intercambio y corrientes de baja magnitud.

De acuerdo a los forzamientos con los que se caracterizó la hidrodinámica se encontró que:

- La marea es uno de los principales forzantes de la hidrodinámica en este sitio de estudio sumando a ésta la presencia permanente de una descarga de agua dulce desde el Ojo de agua.
- El viento del sector Norte provoca la generación de corrientes de mayor magnitud en el interior del sistema (zona occidental, centro, sur y este).

La hidrodinámica de la laguna impulsada por la fuerza de la marea, el viento, la descarga permanente presente en el Ojo de agua además de los notables gradientes formados entre pleamar y bajamar en un ciclo de marea hacen notar que:

Sin forzamiento de viento y modificando la descarga del Ojo de agua ($1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$)

- La excursión máxima de la marea alcanza distancias mayores al interior del sistema lagunar que en mareas muertas.
- La descarga del Ojo de agua alcanza distancias más amplias en la zona estuarina durante marea muerta con descarga de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ pero distancias poco menores para una descarga de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. En ambos casos, durante mareas muertas el flujo del Ojo de agua alcanza mayores distancias en la zona estuarina que en mareas vivas.
- La zona de hiperhalinidad al este del sistema ocupa un área es mayor durante

mareas muertas que durante mareas vivas para ambas descargas.

- El patrón de salinidad en la zona oriental de la laguna es poco dependiente del volumen de descarga de agua dulce en el Ojo de agua, dicha zona tiene mayor influencia del intercambio de agua a través de la Boca lagunar.

Al añadir el forzamiento por viento los gradientes salinos en la laguna muestran que:

- Durante un viento del Norte el agua marina alcanza una mayor excursión durante pleamar (llenante) para la zona oriente y sur del sistema debido a que el agua salobre es advectada por la acción del viento y la marea hacia estas zonas.
- Durante pleamar la zona occidental presenta salinidades más cercanas a las marinas (20-35) y el agua dulce que descarga el Ojo de agua no alcanza tanta distancia al interior del sistema.
- Con forzamiento de viento del sector NE y con brisas marinas el patrón de salinidad es similar, esto es, la zona occidental tiene mayor penetración de agua de la descarga del Ojo y la salinidad es menor (5-15).
- En la zona sur del sistema el agua marina no alcanza a diluir el agua hiperhalina y se presentan valores de 40 unidades.

La hidrodinámica de la laguna la Carbonera genera patrones salinos que tienen grandes cambios a lo largo de un ciclo de marea y más aún bajo la presencia de viento del Norte, que tiene un mayor efecto en la hidrodinámica que los vientos del sector NE y brisas marinas. Dichos cambios en el gradiente salino pueden modificar la distribución de las especies estenohalinas en el sitio de estudio.

Por lo que de acuerdo a la hidrodinámica y a los patrones salinos en dicho sistema lagunar la distribución de peces en la laguna la Carbonera de acuerdo a tolerancia salina indica que:

- Las especies marinas tienen patrones más consistentes de distribución en zonas

donde se presenta agua de característica marina, es decir, son mejores indicadoras de su condición estenohalina.

- Con base en la hidrodinámica de la laguna existe una ampliación de espacios de distribución por tolerancia salina para las especies *P. albigutta*, *G. yucatanana*, *P. velífera*, *M. colei*, *S. barracuda* y *A. rhomboidalis* a la zona sur y oriental del sistema.

8. BIBLIOGRAFÍA

Arceo-Carranza D. y Vega-Cendejas. 2009. Spatial and temporal characterization of fish assemblages in a tropical coastal system influenced by freshwater inputs: northwestern Yucatan peninsula. *Revista de Biología Tropical*. 75 (1-2):141-157.

Badillo-Alemán M., Bonilla-Gómez J.L., Tzeek-Tuz J., Gallardo-Torres A. y Chiappa-Carrara, X. 2014. Length–weight relationships and growth parameters of two endemic fish species (*Floridichthys polyommus* Hubbs, 1936 and *Fundulus persimilis* Miller, 1955) from the Yucatan Peninsula, Mexico. *J. Appl. Ichthyol.* ISSN 0175–8659.1-3.

Barbier E., Constanza R. y Twilley R. 1994. *Lineamientos para la evaluación de humedales tropicales. Proyecto Conservación para el Desarrollo Sostenible en América Central*. Turrialba, Costa Rica. 63p.

Barletta M., Barletta-Bergan A. y Saint-Paul U Hubold G. 2005. The role of salinity in structuring the fish assemblages in a tropical estuary. *Journal of Fish Biology*. 66:45-72.

Bauer-Gottwein P., Gondwe B., Charvet G., Marín L., Rebolledo-Vieyra M. & Merediz-Alonso G. 2010. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*. 19: 507-52.

Beck M., Heck K., Able K., Childers D., Eggleston D., Gillanders B., Halpern B., Hays C., Hoshino K., Minello T., Orth R., Sheridan P., Weinstein M. y J. Kenneth W. 2001. The Identification, Conservation, and Management of Estuarine and Marine Nurseries for Fish

and Invertebrates. *BioScience*. 1(51):633-641.

Blaber S. 1997. *Fish and fisheries of tropical estuaries*. Chapman & Hall. London. Primera edición. 367p.

Bonilla-Gómez J.L., Badillo-Alemán M., Gallardo-Torres A. y Chiappa-Carrara X. 2012. Temporal variation, growth and natural mortality of two species of mojarra (Perciformes: Gerreidae) from a tropical coastal lagoon: La Carbonera, Yucatan, Mexico. *Rev. Mar. Cost.* ISSN 1659-455X. 5: 57-67.

Bonilla-Gómez J.L., Badillo M., López K., Gallardo A., Galindo C., Arceo D. y Chiappa-Carrara X. 2013. Environmental influences on the abundance of dominant fishes in a very shallow tropical coastal lagoon in Northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *J. Marine Sci. Res. Dev.* 3:118.

Brown E., Colling A., Park D., Philips J., Rothery D. & Wringht J. 1999. *Waves, tides and shallow-water processes*. The Open University. Butterworth-Heinemann. Second Edition. United Kingdom. 226p.

Brown E., Colling A., Park D., Philips J., Rothery D. & Wringht J. 2001. *Ocean circulation*. The Open University. Butterworth-Heinemann. Second Edition. United Kingdom. 287p.

Camacho A. 2011. *Variación espacio-temporal en el perfil de ácidos grasos en la Bocana de la Carbonera de Sisal en la costa Noroeste de Yucatán*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 87 p.

Carbajal N. 2009. *Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.

Carpenter K.E. 2002. The living marine resources of the Western Central Atlantic. Volume 1. Introduction, molluscs, crustaceans, hagfishes, sharks, batoid fishes, and chimaeras. *FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes and American Society of Ichthyologists and Herpetologists Special Publication*. No. 5. FAO. 600p.

Casares R. 2015. *Influencia de los forzamientos remotos, mareas y viento en la hidrodinámica barotrópica de una laguna costera alargada: Celestún, Yucatán*. Tesis de doctorado. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados. IPN. Mérida. 191 p.

Castro-Aguirre J. 1999. *Ictiofauna estuarino.-lagunar y vicaria de México*. Editorial Limusa. México. Primera Edición. 705p.

Cauich A. 2010. *Modelación numérica de circulación en Puerto Progreso, Yucatán: Implicaciones para la dispersión de contaminantes*. Tesis. Universidad Autónoma de Yucatán. 120 p.

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.

Chow V. 1959. *Open channel hydraulics*. New York. McGraw-Hill. 680 p.

Contreras F. y Castañeda F. 2004. Lagunas Costeras y Estuarios del Golfo de México: hacia el establecimiento de índices ecológicos. En: Caso, M., Pisantry I, Ezcurra E. 2000. *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, Volumen 1. SEMARNAT, INE, IE, HRIGMS. México. 627p.

Contreras F. 1988. *Las lagunas costeras Mexicanas*. Segunda edición. Centro de ecodesarrollo, Secretaria de pesca, México, D.F., 263p.

De Marchis M., Ciralo G., Nasello C. y Napoli E. 2012. Wind and tide induced currents in

the Stagnone lagoon (Sicily). *Environmental Fluid Mechanics*. 12:81-100.

Deltares. 2010. Delft3D-FLOW. *Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. User Manual*. Netherlands. 662 p.

Díaz S., Aguirre A. y Cano E. 2006. E. Evaluación ecológica de las comunidades de peces en dos sistemas lagunares estuarinos del sur de Chiapas. *Hidrobiológica*. 16(2): 197-210.

Dyke P. 2001. *Coastal and shelf sea modelling*. United Kingdom. Kluwer Academic Publishers. 259 p.

Ecoutin J.C., Jean-Marc R.E., Simier M. & Albaret J. J. 2005. Spatial versus temporal patterns in fish assemblages of a tropical estuarine coastal lake: The Ebrie Lagoon (Ivory Coast). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 64: 623-635.

Enríquez C., Mariño-Tapia I., Jerónimo G. y Capurro-Filigrasso. 2013. Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*. 69: 101-109.

Enríquez C., Shapiro G., Souza A. y Zatsepin A. 2005. Hydrodynamic modelling of mesoscale eddies in the Black Sea. *Ocean Dynamics*. 55:476-489.

Farreras S. 2006. *Hidrodinámica de lagunas costeras*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México. 193 p.

Flores-Hernández D., Ramos-Miranda J., Sosa-López A. y Ayala-Pérez LA. 2012. *Variabilidad de la estructura de la comunidad de peces en un ecosistema costero tropical al sureste del golfo de México, usando los niveles tróficos*. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 353-374 p.

Froese R. & Pauly D. 2015. FishBase. World Wide Web electronic publication.

www.fishbase.org, version (02/2015).

Gallardo-Torres A., Badillo-Alemán M., Galindo-de Santiago C., Loera-Pérez J., Rioja-Nieto R. y Chiappa-Carrara X. 2012. *Listado taxonómico de los peces de la laguna boca de la Carbonera, Yucatán: un primer paso para el manejo y evaluación de los recursos costeros del norte de Yucatán*. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 270-288p.

Gallardo-Torres A., Badillo-Alemán M., Rivera-Felix V., Rubio-Molina J., Galindo-Santiago C., Loera-Pérez J., Galano-García T. y Chiappa-Carrara X. 2014. *Catálogo de peces de la costa Norte de Yucatán*. México. 2da Edición. 255 pp.

Herrera-Silveira, J. 1994. Correlaciones de parámetros hidrobiológicos de la laguna de Celestún, Yucatán. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. 21(1):43-53.

Herrera-Silverira J. 2006. Las lagunas costeras del estado de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos*. 19(2):94-108.

INEGI. 2002. Estudio hidrológico de la península de Yucatán. Primera edición, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Gobierno del Estado de Yucatán, México.

Jerónimo G., Gómez-Valdés J., Badillo M., López-Aguilar K., Galindo C., Gallardo A., Loera J., Arrollo-Pedraza L. y Chiappa-Carrara X. 2012. Variación estacional de temperatura y salinidad en la laguna la Carbonera, Yucatán, 2009-2010. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 71-88p.

Kankara, R., Mohan R. y Venkatachalapathy R. 2013. Hydrodynamic modelling of Chennai coast from a coastal zone management perspective. *Journal of Coastal Research*.

29(2):347:357.

Kjerfve B. 1986. *Comparative oceanography of coastal lagoons*. Academic Press In. 63-81p.

Kjerfve, B. 1994. Coastal Lagoon Processes. *Elsevier Oceanography Series*. Science B.V., Amsterdam, 577 p.

Lankford R. 1976. *Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification*, in: *Estuarine Processes*. Volume II, M. Wiley (editor), Academic Press, New York, N.Y., 182-215.

Lara-Lara J.R., et al. 2008. *Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales*, en *Capital natural de México*. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO. México. 109-134p.

López J. 2015. *Influencia de la brisa marina en la morfodinámica de barras en una playa micro-mareal*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California. 80 p.

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.

Ordóñez-López U. 1997. *Análisis del ictioplancton del ecosistema costero de Celestún, Yucatán*. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Mérida. CONABIO proyecto No. B020. México D. F. 90p.

Pérez-Ruzafa A., Concepción M., Pérez-Ruzafa M.I., & Pérez-Marcos M. 2013. Are coastal lagoons physically or biologically controlled ecosystems? Revisiting r vs. k strategies in coastal lagoons and estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 132:17-33.

Sánchez R. 2012. *Evaluación de la hidrodinámica y modelación numérica de la laguna La*

Carbonera, Yucatán. Tesis de Maestría. UNAM. Unidad Sisal, Yucatán, México. 125p.

Sánchez A., Chiappa-Carrara X. y Brito R. 2012. Recursos acuáticos costeros del sureste. Yucatán, México. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. Volúmen II. 654p.

Sánchez- Santillan., Lanza-Espino G. y Sánchez-Trejo R. 2012. Análisis de la climatología dinámica de la península de Yucatán, México. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 29-55p.

Semarnat (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-059-Semarnat-2001. Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*. 6 de marzo del 2002. Segunda Sección. México.

Telesh I. y Khlebovich. V. 2010. Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 61:149–155.

Tzeek-Tuz J., Bonilla-Gomez J.L., Badillo-Aleman M. & Chiappa-Carrara X. 2012. Length–weight relationship and parameters of growth for the checkered puffer *Sphoeroides testudineus* from a karstic tropical coastal lagoon: La Carbonera, Yucatan, Mexico. *J. Appl Ichthyol*. 28: 859-860.

Valle-Levinson A. y Lwiza K. 1997. Bathymetric influences on the lower Chesapeake Bay hydrography. *Journal of Marine Systems*. 12:221-236.

Van Rjin L., Walstra D., Grasmeyer B., Sutherland J., Pan S. y Sierra J. 2002. Simulation of nearshore hydrodynamics and morphodynamics on the time scale of storms and seasons using process based profile models. En Van Rajin L., Ruessink B. y Mulder J. (eds) *The behavior of a straight sandy coast on the time scale of storms and season*. Amsterdam, Coast3d-Egmond. 816-831 p.

Vidal R. 2005. *Regiones climáticas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de geografía. México. 216 p.

Vega-Cendejas M. 2004. Ictiofauna de la Reserva de la Biosfera Celestún, Yucatán: una contribución al conocimiento de su biodiversidad. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología*. 75(1): 193-206.

Vega-Cendejas M y Hernández de Santillana M. 2004. Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Ria Lagartos, Yucatan, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 60:285-299.

Vega-Cendejas M.E. y Hernández de Santillana M. 2012. *Patrón espacial de los ensamblajes de peces en la zona costera del estado de Yucatán*. En Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II. Fondo mixto – CONACYT – Gobierno del estado de Yucatán. ISBN 978-607-9060-08-4. 71-88p.

Walstra D., Van Rajín L., Blogg H. y Van Ormondt M. 2001. Evaluation of a hydrodynamics área model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. HR Wallingford TR21-EC-MAST Project no. MAS3-CT97-0086. Oxfordshire, U.K. 4 p.

Wolanski E. 1992. Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal waters. *Hydrobiologia*. 247: 141-16.