



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**MODELO HIDRODINÁMICO DEL SISTEMA
LAGUNAR HUAVE, OAXACA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

MARÍA FERNANDA GONZÁLEZ AMADOR



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. CECILA E. ENRÍQUEZ ORTIZ
Santiago de Querétaro, Qro. Agosto del 2020**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Al pueblo Mero Ikoot

Datos del alumno	María Fernanda González Amador Tel. (772) 113 18 43 mfgamador@ciencias.unam.mx Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación-Juriquilla Licenciatura en Ciencias de la Tierra 415079084
-------------------------	---

Datos del jurado

Presidente	Dr. Saúl Iván Hernández Hernández UMDI-Juriquilla, Facultad de Ciencias, UNAM
Secretario	Dra. Cecilia Elizabeth Enríquez Ortiz ENES-Mérida, UNAM
Vocal	Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza UMDI-Juriquilla, Facultad de Ciencias, UNAM
Suplente	Dra. Dara Salcedo González UMDI-Juriquilla, Facultad de Ciencias, UNAM
Suplente	M. en C. Elizabeth Fuentes Romero UMDI-Juriquilla, Facultad de Ciencias, UNAM

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de ser universitaria y brindarme las herramientas para contribuir en la construcción de una sociedad mejor y más justa.

A la Dr. Cecilia Enríquez, por el conocimiento, paciencia, herramientas y apoyo, brindados en todo momento. Ceci, elegirte como directora de tesis ha sido de mis mayores aciertos.

A mi comité sinodal: la Dra. Dara Salcedo, el Dr. Saúl Hernández, la M. en C. Elizabeth Fuentes y el Dr. Enrique Cantoral, por la revisión del trabajo y su aportación para mejorar el documento.

Al Dr. Manuel Miranda, por ser mi tutor, amigo y consejero, y al Mtro. Eduardo Pacheco, por compartirme el gusto y su conocimiento en la programación.

A mis catedráticos, por cambiar mi forma de ver el mundo a través de sus enseñanzas; en especial a mis profesoras, por inspirarme en el camino a ser una mujer de ciencia.

A las Unidades Multidisciplinarias de Docencia e Investigación campus Juriquilla, por ser mi segunda casa durante estos años, y campus Sisal, por hacerme sentir bienvenida.

Al Centro Mexicano de Energía Oceánica, en particular al equipo de Gradiente Salino, por contribuir enormemente a mi desarrollo académico y personal.

A la Universidad Nacional de Colombia y a la Universidad del Norte, en especial a los investigadores el Dr. Andrés Osorio y el Dr. Oscar Álvarez, por su hospitalidad, orientación y conocimiento durante mi estancia de investigación.

A la SEP y a las diferentes becas otorgadas durante este proceso, que contribuyeron a mi desarrollo profesional y facilitaron con su apoyo llegar a este momento.

Al pueblo de México, por ser quienes sostenemos la educación pública y su razón de ser. El camino por retribuir lo mucho que me han dado, recién comienza.

Agradecimientos personales

A mamá y papá, por alentarme, apoyarme y creer en mí en cada paso. Por todo su amor esfuerzo y enseñanzas, este logro es más suyo que mío.

A mí hermana, por ser mi compañera y alegría cada día.

A mi familia, que en la distancia me cuidan y en sus oraciones me llevan.

A mis amigos de Querétaro, Cd. de México, Yucatán, Medellín, Barranquilla e Hidalgo, por compartir conmigo maravillosos recuerdos y grandes aprendizajes. Hicieron de estos años la mayor fiesta.

A Jhon, por ser una luz y un abrazo.

A la vida, por traerme hasta este alegre momento.

Motivación

Este texto lo escribo de mi para mí, al inicio de este proceso para encontrar en él, el porqué de este trabajo y los objetivos personales que aspira a cumplir a su término, esperando me dé ánimos en esos días difíciles que seguro aparecerán en el camino.

Las metas deben estar en dirección de los placeres y a la altura de las necesidades. En mi caso ambas se reducen a lo mismo: entender la naturaleza.

Me apasiona sentir que en la naturaleza cada elemento tiene su propio ritmo y, sin embargo, siempre está conectada; creo que es en ese baile de interacciones donde se esconde la verdadera poesía y considero a la ciencia mi forma de leerla.

Al mismo tiempo, veo al conocimiento de los sistemas naturales como la única vía para que el manejo que se les dé contribuya a la mejora del mismo, así como de la vida de las personas que en ellos habitan.

Mi mayor deseo para esta tesis es que al leerla, se logre entender cómo la interacción de diferentes fuerzas influye en el movimiento de agua del Sistema Huave, y de qué forma sería afectada esta laguna si estos elementos cambian; esperando que al compartir los resultados de este trabajo se puedan tomar decisiones más conscientes que no afecten su calidad como socioecosistema.

Resumen

El Sistema Lagunar Huave (SLH) forma parte del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, México y su conexión con el Golfo de Tehuantepec en el Océano Pacífico, a través de la Boca de San Francisco, se encuentra cerrada desde 2016. Se localiza en una región dominada por la influencia de los vientos Tehuanos, que varían estacionalmente y en mayores escalas temporales a partir de fenómenos a macro escala como El niño, Oscilación del sur (ENSO por sus siglas en inglés). Este sistema lagunar tiene gran riqueza biológica y cultural, por lo que fue decretado como sitio prioritario para su conservación. En la actualidad posee un alto grado de deterioro ambiental y, en consecuencia, vulnerabilidad social. Pese a su importancia, no existen estudios de su hidrodinámica, imprescindibles para regenerar su calidad hídrica a partir de planes de manejo sostenibles. El presente trabajo presenta el primer estudio hidrodinámico del SLH, realizado a partir de la implementación, validación con mediciones *in situ* y análisis de experimentos numéricos utilizando el software DELFT 3D. Con esa herramienta se modelaron hidrodinamicamente las condiciones actuales y se diseñaron diferentes escenarios para determinar la importancia relativa de los forzadores, la variación estacional (temporada de lluvia, secas, Nortes y viento del sur), la conexión con el océano y efecto del ENSO. Adicionalmente se investigaron con el modelo numérico los tiempos de residencia espacialmente variables tanto en la condición actual del sistema como en condiciones de reconexión con el mar. Las mediciones en campo indican que es un sistema altamente salino, por su carácter cerrado, y que su morfología genera condiciones hidrodinámicas diversas. Los resultados de modelación y las mediciones mostraron que, en las condiciones actuales, la lluvia incrementa considerablemente el nivel de agua y las velocidades en el sistema, mientras que vientos moderados afectan principalmente los patrones de circulación; sin embargo, en temporadas de vientos intensos, estos son el principal forzador, independientemente de las descargas. La dirección de los vientos también es un factor determinante, ya que con viento del sur se genera inundación costera. Respecto al ENSO, años Niño y Niña incrementaran las corrientes residuales (con distintos patrones), por el incremento de eventos de Norte y precipitación, respectivamente. Por último, pero de mayor importancia, se destaca la necesidad de una reconexión del SLH con el mar para la salud del sistema, que permita el flujo y reflujo de las mareas. Lo cual tendría beneficio en la recirculación del sitio, al

disminuir los tiempos de residencia y permitir nuevamente el flujo de larvas y organismos, logrando la sostenibilidad de las pesquerías locales.

Palabras clave: laguna costera, hidrodinámica, modelación numérica, vientos Tehuanos, ENSO, conexión con el mar, tiempo de residencia.

Índice

1. Introducción.....	20
2. Antecedentes.....	24
3. Marco teórico.....	32
3.1. Importancia y vulnerabilidad de las lagunas costeras.....	32
3.2. Funcionamiento hidrodinámico de lagunas costeras	33
3.2.1. Forzadores.....	33
3.2.1.1. Marea.....	33
3.2.1.2. Viento	34
3.2.1.3. Ríos	35
3.2.2. Circulación estuarina	35
3.3. Efecto Niño-Oscilación del Sur (ENSO)	38
3.4. Modelación numérica	41
3.4.1. Modelo hidrodinámico Delft-3D	42
3.4.2. Ecuaciones de Navier-Stokes	43
3.4.3. Métodos numéricos	45
3.4.3.1. Diferencias Finitas	45
3.4.4. Discretización del dominio.....	46
3.4.5. Número de Courant Lewy Friedrichs.....	47
3.5. Tiempos de residencia.....	47
4. Sitio de estudio	50
4.1. Pacífico Mexicano Sur.....	50
4.2. Istmo de Tehuantepec.....	52
4.3. Sistema Lagunar Huave	53
5. Metodología.....	56
5.1. Recopilación y análisis de datos	56
5.1.1. Observaciones <i>in situ</i>	56

5.1.2. Índices climáticos: ENSO	59
5.1.3. Forzadores.....	61
5.1.3.1. Atmosféricos: Viento	61
5.1.3.2. Continentales: Descargas de ríos.....	62
5.1.3.3. Oceánicos: Marea y corrientes	63
5.2. Modelación numérica	66
5.2.1. Instalación e implementación.....	66
5.2.2. Condiciones hidrodinámicas.....	69
5.2.3. Pruebas de sensibilidad.....	70
5.2.4. Validación	72
5.2.5. Experimentos numéricos	75
5.3. Valoración de tiempos de residencia.....	78
6. Resultados y discusión.....	79
6.1. Recopilación y análisis de datos	79
6.1.1. Observaciones <i>in situ</i>	79
6.1.2. Índices climáticos: ENSO.....	82
6.2. Forzadores de la hidrodinámica en el SLH	84
6.2.1. Atmosféricos: Viento.....	84
6.2.2. Continentales: Descargas de ríos	86
6.2.3. Oceánicos: Marea y corrientes.....	89
6.3. Modelación numérica	92
6.3.1. Pruebas de sensibilidad.....	93
6.3.2. Experimentos numéricos	95
6.3.2.1. Validación.....	95
6.3.2.2. Experimentos Control	98
6.3.2.3. Efecto de los forzantes de la hidrodinámica	102
6.3.2.3.1. Temporada de lluvias y secas.....	103
6.3.2.3.2. Viento norte y sur	106

6.3.2.3.3. Efecto del ENSO	107
6.3.2.3.4 Conexión con el mar.....	110
6.4. Valoración de tiempos de residencia.....	114
7. Conclusiones	121
8. Bibliografía	127

Índice de figuras

- Fig 01. Comunidades del SLH, 26
- Fig 02. Mujer ikooc, 26
- Fig 03. Pesca con papalote., 27
- Fig 04. Bordado ikooc con elementos lagunares., 27
- Fig 05. Danza en el *mtiagnatangnio*, 28
- Fig 06. Celebración a la virgen de la Candelaria, 28
- Fig 07. Dragado manual de la Boca de San Francisco por pescadores (Manzo, 2019)., 29
- Fig 08. Parques eólicos cercanos al SLH, 30
- Fig 09. Manifestaciones del APIIDTT, 30
- Fig 10. Estuario positivo, 37
- Fig 11. Estuario negativo, 37
- Fig 12. Estuario de baja afluencia, 37
- Fig 13. Cuña salina, 38
- Fig 14. Débilmente estratificado, 38
- Fig 15. Fuertemente estratificado, 38
- Fig 16. Mezcla vertical, 38
- Fig 17. ENSO: Condiciones Normales (Keith Meldahl, 2011)., 40
- Fig 18. ENSO: Condiciones Niño (Keith Meldahl, 2011)., 41
- Fig 19. ENSO: Condiciones Niña (Keith Meldahl, 2011)., 41
- Fig 20. $x-h$, diferencia regresiva, $x+h$ diferencia adelantada, 46
- Fig 21. Mallado a) cartesiano, b) curvilíneo, c) no estructurado (Hodges, 2009)., 46
- Fig 22. Diagrama esquemático para el análisis de descarga (Choi & Lee, 2004)., 48

- Fig 23. Dinámica de corrientes en el Istmo de Tehuantepec a través del año (Ortega & Trigueros, 2000), 51
- Fig 24. Mecanismo de formación: Vientos Tehuanos (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003)(Romero, Zavala & Gallegos, 2003)., 53
- Fig 25. Sistema Lagunar Huave (López-Yllescas, 2014)(López-Yllescas, 2014)., 54
- Fig 26. Ubicación de los CTD anclados en el Sistema Lagunar Huave: Mar Tileme (rojo), Laguna Superior (verde), Estero Ostates (amarillo), Boca de Santa Teresa (azul)., 57
- Fig 27. Embarcaderos y áreas de navegación en el Sistema Lagunar Huave., 58
- Fig 28. Dominio de puntos del modelo NARR (NOAA, 2006) utilizados para la descarga de datos de viento del Istmo de Tehuantepec., 62
- Fig 29. Aportes de agua continental que descargan en el SLH: Ríos Ixtepec (azul), Chicapa (verde), Niltepec (morado) y Estero Otates (negro)., 63
- Fig 30. Batimetría completa utilizada para la implementación del modelo SLH a partir de (López-Yllescas, 2014) y ETOPO1., 68
- Fig 31. Batimetría lagunar utilizada para la implementación del modelo SLH a partir de percepción remota, datos proporcionados por (López-Yllescas, 2014) que fueron interpolados a la malla del dominio implementado en este estudio, 68
- Fig 32. Implementación del modelo, se muestra el dominio, la batimetría utilizada, las celdas secas, las fronteras abiertas en la sección marina y los puntos de observación en las localidades de instalación de CTDs durante los muestreos de campo., 69
- Fig 33. Malla completa del modelo SLH, 71
- Fig 34. Malla en la sección de la laguna del SLH., 72
- Fig 35. Ubicación de los CTD anclados en el Sistema Lagunar Huave: Mar Tileme (rojo), Laguna Superior (verde), Estero Ostates (amarillo), Boca de Santa Teresa (azul)., 80
- Fig 36. Mediciones de CTDs en las diferentes localidades del SLH (ver Fig 35.) durante la campaña de campo (octubre, 2018)., 80
- Fig 37. Datos meteorológicos medidos en la localidad de San Dionisio durante la campaña de campo., 81
- Fig 38. Recopilación histórica de los índices climáticos MEI y SOI de las fases ENSO (Rojo-Niña, Negro-Normal, Azul-Niño) (NOAA, Physical Sciences Laboratory, 2018). *También se señalan los periodos de las fases ENSO más cercanas a la campaña de campo.*, 84

- Fig 39. Series de tiempo: Velocidad de viento durante la campaña de campo (NOAA, 2006)., 84
- Fig 41. Promedios históricos de las descargas máximas de octubre (de 1947 a 2014 en los ríos del SLH (CONAGUA, 2019)., 86
- Fig 42. Variabilidad anual en las diferentes etapas ENSO (Niña-rojo, Niño-azul y Normal-negro) del gasto instantáneo medio de los ríos del SLH: Ostuta, Chicapa, Ixtepec y Niltepec (CONAGUA, 2019)., 87
- Fig 43. Serie de tiempo anual del nivel del mar en años con diferente fase ENSO seleccionados para este trabajo. Los datos son del modelo HYCOM (HYCOM, 2018)., 89
- Fig 44. Localización de fronteras abiertas en el modelo del SLH:., 90
- Fig 45. Variación estacional de la velocidad de corrientes en las fronteras oeste y este, en los años seleccionados con diferente fase, 91
- Fig 46. Serie de tiempo de la energía cinética total en toda la malla computacional. Pruebas de sensibilidad tamaño de malla y paso de tiempo., 94
- Fig 47. Energía cinética total en el tiempo de los resultados de los experimentos de pruebas de sensibilidad al paso de tiempo (malla 1)., 95
- Fig 48. Variación de los niveles de agua observados (línea) y modelados (punteados) en las diferentes localidades del SLH., 96
- Fig 49. Patrón de corrientes promedio durante un ciclo de marea estable[m/s] de Octubre del 2018. correspondiente a la validación del modelo. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento modelo NARR, ríos: valores max. de octubre para años Normales antes de lluvia y valores max. de octubre para años Niña durante y después de lluvia., 98
- Fig 50. Corrientes promedio durante un ciclo de marea estable [m/s] del experimento C01. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de validación., 99
- Fig 51. Corrientes promedio durante un ciclo de marea estable [m/s] del experimento C02. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: ríos de validación, 100
- Fig 52. Corrientes residuales [m/s] del experimento C03. Boca: abierta, ENSO: Normal, Forzadores: ríos y viento de validación, 101
- Fig 53. Nivel del agua obtenido en el experimento de validación con boca abierta (C03) en las diferentes localidades del SLH, 102
- Fig 54. Corrientes residuales [m/s] del experimento E12 (Secas). Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de enero (45km/h, 0°)., 105

- Fig 55. Corrientes residuales [m/s] del experimento E13 (lluvia). Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de septiembre (30km/h, 0°), descarga de ríos normal en lluvia., 105
- Fig 56. Localización de los bancos de arena dentro del SLH (cuadro rojo)., 106
- Fig 57. Diferencia en la magnitud de las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E16-E14 (Niña-Niño). Forzadores: descargas máximas de lluvia de años Niña y Niño., 108
- Fig 58. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E02-E01 (Niño-Normal). Forzadores: Viento Norte, 110
- Fig 59. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E01/E09 (Norte). ENSO: Normal, Forzadores: viento norte., 112
- Fig 60. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E02/E10 (Norte extremo). ENSO: Niño, Forzadores: viento norte extremo., 113
- Fig 61. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E08/E16 (Descargas Niña). ENSO: Niña, Forzadores: descarga max ríos., 114
- Fig 62. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E04/E12 (Secas). ENSO: Normal, Forzadores: viento del periodo de secas., 114
- Fig 63. Mapa de concentraciones del trazador, con la boca abierta, durante el tiempo de residencia promedio del SLH con boca abierta., 116
- Fig 64. Mapa de concentraciones del trazador, con la boca cerrada, durante el tiempo de residencia promedio del SLH con boca abierta., 117
- Fig 65. Comparación del cambio de las concentraciones del trazador en el tiempo, para el SLH con boca abierta y cerrada., 118
- Fig 66. Mapa de tiempos de residencia del SLH con boca abierta., 119

Índice de tablas

Tabla 01. Actividades anuales de las comunidades Ikooc, a partir de *García, 2017*, 26.

Tabla 02. Localidades de instalación de CTDs dentro del SLH, 57.

Tabla 03. Descripción y fuentes de los índices MEI y SOI, 60.

Tabla 04. Principales armónicos de marea reportados de Salina Cruz (Sanay González, Monreal Gómez, & Salas de León, 2006), 63.

Tabla 05. Información de los datos de corrientes marinas y variaciones del nivel del mar descargados del modelo global HYCOM (NOAA, 2006), 64.

Tabla 06. Características de los sets elegidos para el análisis de corrientes, 65.

Tabla 07. Pruebas de sensibilidad para determinar el paso de tiempo y tamaño de malla: 332.603 m x 334.589 m (malla 1) y 104.407 m x 125.287 m (malla 2), 71.

Tabla 08. Datos asignados a los experimentos de pruebas de sensibilidad del modelo, 72-73.

Tabla 09. Descargas continentales usadas durante la validación del modelo del SLH, obtenidas con base en los datos de: (CONAGUA, 2008) y (CONAGUA, 2019), 75.

Tabla 10. Características de los experimentos control a partir de la validación del modelo, la serie de tiempo para el viento, así como los valores de descargas de ríos usados, se presenta, en la sección de Resultados: Forzadores, 76.

Tabla 11. Experimentos numéricos efectuados para evaluar diferentes condiciones hidrodinámicas del SLH. Los valores de descarga de ríos para cada condición ENSO, se presentan en la sección de Resultados: Forzadores. La condición de Norte, se presenta para un año ENSO norma, mientras que el Norte extremo representa a la fase Niño, 77.

Tabla 12. Máximos y promedios históricos registrados de los gastos de los diferentes ríos en el SLH (CONAGUA, 2019), 88.

Tabla 13. Variabilidad de los vientos la temporada de máximas descargas (septiembre) en los distintos escenarios de ENSO (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003), 103.

Tabla 14. Diferencias de las velocidades residuales máximas [m/s] en los experimentos de lluvias y secas, 104.

Tabla 15. Diferencias en las corrientes residuales máximas [m/s] generadas por las descargas continentales máximas en la época de lluvia, entre las fases ENSO, 109.

Tabla 16. Comparación de velocidades residuales máximas entre experimentos con boca cerrada y abierta, 111.

Índice de ecuaciones

Ec. 01. Navier-Stokes, 43.

Ec. 02. Navier-Stokes componentes en x, 43.

Ec. 03. Navier-Stokes componentes en y, 43.

Ec. 04. Aceleraciones del flujo en la ecuación de Navier-Stokes, 44.

Ec. 05. Fuerza de Coriolis, 44.

Ec. 06. Gradientes de presión por unidad de masa, 44.

Ec. 07. Fuerza de fricción en x, 44.

Ec. 08. Fuerza de fricción en y, 44.

Ec. 09. Diferencia progresiva, adelantada o posterior, 46.

Ec. 10. Diferencia regresiva, atrasada o anterior, 46.

Ec. 11. Diferencia central, 46.

Ec. 12. Número de Courant Lewy Friedrichs, 47.

Ec. 13. Ecuación de dispersión a partir del decrecimiento por mareas en los límites abiertos, 48.

Ec. 14. Constante en la ecuación de dispersión, 48.

Ec. 15. Tiempo de residencia, 49.

Ec. 16. Tiempo de residencia para un sistema con un límite abierto, 49.

Ec. 17. Relación entre masas en el tiempo de residencia, 49.

Ec. 18. Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe, 70.

1. Introducción

El Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, al sur de México, es de las regiones con mayor riqueza biológica y cultural del país, el Sistema Lagunar Huave (SLH) es su límite costero con el Golfo de Tehuantepec (GT) y también el sistema lagunar de mayor extensión dentro del Pacífico mexicano; asimismo hasta hace pocos años tenía la mayor producción de camarón blanco del país (Chavez, Sevilla, & Hidalgo, 1977). Sin embargo, desde 2016 su comunicación con el mar, la boca de San Francisco, se encuentra cerrada por un evento de viento extremo. Esto tiene repercusiones biológicas, económicas y sociales ya que, al no haber comunicación marina, se interrumpe el flujo de organismos en estado larval a la laguna y el agua de la laguna incrementa su tiempo de residencia, lo que fomenta la acumulación de iones diversos y de contaminantes. Como resultado, se ha generado un decremento en la calidad del agua y una disminución en las poblaciones salobres. Entre ellas se encuentra el camarón blanco que ha sufrido una reducción drástica, al ser la especie más pescada en una zona donde la pesca es la principal actividad económica (CONABIO, CONANP, The Nature Conservancy, & ProNatura, 2007). Por ello sus habitantes, en su mayoría indígenas, Ikoots y Zapotecos (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013), están teniendo dificultades (Manzo, 2019).

Dado que en las lagunas costeras los flujos de agua regulan el transporte de contaminantes, organismos y sedimentos (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000), entender la hidrodinámica del SLH es clave para su conservación y manejo sostenible. Sin embargo, de este sitio hay escaso conocimiento respecto a su hidrodinámica (López-Yllescas, 2014). Una posible razón de esta falta de información es la dificultad que el sitio representa para la obtención de mediciones pues la orografía de la región restringe el acceso y genera fuertes vientos dirección norte, que se aceleran al pasar por el paso de Chivera en el Istmo. Estos vientos, son conocidos como Tehuanos (Chavez, Sevilla, & Hidalgo, 1977) y son particularmente intensos, hasta 200 km/h, durante el paso de frentes fríos o Nortés, variando en función de la estación y de fenómenos de macro escala como el Fenómeno de El Niño, también llamado Oscilación del Sur (ENSO) (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003). Los vientos hacen difícil navegar en las pequeñas embarcaciones necesarias para la colecta de datos. Además, las complejas relaciones sociales entre las comunidades dificultan el libre tránsito entre

diferentes regiones (Aragón, 2017). Por todo lo anterior, una opción viable para ahondar en el estudio hidrodinámico de este sistema es a través de modelación numérica, validada contra observaciones de campo.

El presente trabajo tiene como objetivo general: caracterizar la hidrodinámica del SLH y determinar el efecto de (1) los diferentes procesos forzantes (viento, descargas continentales y marea), (2) fases de ENSO y (3) conexión con el mar; a partir de experimentos hidrodinámicos con un modelo numérico validado. Para ello, los objetivos particulares de esta investigación son: (a) determinar la variación espacio-temporal de los cambios del nivel del agua medidos *in situ*, (b) implementar un modelo del SLH mediante el modelo numérico DELFT3D, (c) determinar la importancia relativa de los forzantes en las distintas estaciones y fases del ENSO, (d) identificar patrones espaciales en los tiempos de residencia variando las condiciones hidrodinámicas, (e) generar propuestas de manejo basadas en los resultados obtenidos durante la modelación.

Para ello se implementó un modelo numérico del Sistema Lagunar Huave, y fue validado con observaciones *in situ*, obtenidas a partir del análisis de datos colectados en la campaña de campo realizada durante octubre 2018 (año normal ENSO), donde se midió continuamente, por 96 horas, la temperatura, salinidad y variaciones del nivel del mar, en sensores instalados en distintas localidades dentro del SLH. Estos datos, además proporcionaron información espacial de las variables medidas. Posteriormente para completar las condiciones del sistema, se recopilaron datos históricos de los diferentes forzadores (viento, descargas continentales, marea y corrientes), su análisis permite delimitar las características de cada forzador de acuerdo a las diferentes condiciones de ENSO al momento de su ocurrencia. Con el modelo numérico se corrieron escenarios diseñados para entender la contribución de los distintos forzamientos en la circulación y los efectos de otros mecanismos como el ENSO y la conexión con el Golfo de Tehuantepec. El análisis logra relacionar la influencia de los forzadores en las propiedades hidrodinámicas del sistema lagunar, como la velocidad de flujo, el nivel del agua y los tiempos de residencia.

Este es uno de los primeros estudios de la hidrodinámica del SLH, y proporciona información con fundamentos científicos que podrá servir de base y complemento en la toma de decisiones integrales para su manejo sostenible.

La presente tesis desarrolla esta investigación de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción: Presenta de manera breve la historia y caracterización del Sistema Lagunar Huave, a su vez describe las problemáticas del sitio y la importancia de conocer sus flujos de agua para un manejo sostenible, planteando a la modelación numérica como una alternativa para incrementar el escaso conocimiento hidrodinámico del sitio de estudio.

Capítulo 2. Antecedentes: Describe las peculiaridades físicas, biológicas y sociales del sistema Huave, así como la investigación relevante al tema de esta investigación existente hasta el momento. También se incluyen las problemáticas ambientales actuales, en su mayoría relacionadas con el cierre de la Boca de San Francisco desde 2016.

Capítulo 3. Marco Teórico: Explica el funcionamiento cada una de las fuerzas responsables en la hidrodinámica de lagunas costeras y desarrolla los conceptos teóricos físicos y matemáticos utilizados durante la modelación en el software Delft3D.

Capítulo 4. Sitio de Estudio: Describe geográfica, ambiental, atmosférica e hidrológicamente el Sistema Lagunar Huave, y las regiones de las que forma parte: Pacífico Mexicano Sur e Istmo de Tehuantepec.

Capítulo 5. Metodología: Describe la campaña de campo, la colecta de datos históricos, el procesamiento y análisis de todos los datos observacionales, la implementación del modelo hidrodinámico, el diseño de experimentos numéricos y el método usado en el cálculo de tiempos de residencia.

Capítulo 6. Resultados y discusiones: Presenta las observaciones de las variables medidas en campo y los comportamientos de los forzadores recopilados. Después se presentan los resultados numéricos, comenzando con el resultado de la validación y continuando con los patrones de corrientes bajo cada uno de los escenarios, mostrando

para cada caso el mapa espacial de los tiempos de residencia en el sistema y discutiendo las implicaciones ambientales y dinámicas de cada uno, en función de los diferentes forzantes.

Finalmente, en el *Capítulo 7. Conclusiones*: Resalta los aspectos más sobresalientes de esta investigación y presenta recomendaciones puntuales que pudieran mejorar la calidad del ecosistema lagunar Huave.

2. Antecedentes

México es un país megadiverso, es decir que alberga del 10 al 12% especies biológicas del planeta, de las cuales el 10% se encuentra en el Istmo de Tehuantepec, donde se localiza el SLH, traduciéndose esto en el 1% de la biodiversidad global. Debido a que el Istmo de Tehuantepec es una frontera entre América del Norte y América del Sur, garantiza flujos de especies, individuos y genes, sin embargo, paradójicamente es también la zona que sufre uno de los procesos más dramáticos de devastación ecológica del país (García Souza, 2017).

El SLH en conjunto suma un área que supera las 100 mil ha, superficie que representa más del 60% de la extensión de lagunas litorales de Oaxaca, al igual que la mayor extensión como sistema lagunar dentro del Pacífico Mexicano (Chavez, 1997). Su ambiente, donde confluyen agua dulce y marina, alberga una alta producción primaria como manglares, pastos marinos y macroalgas que garantizan la oxigenación, alimentación, refugio y crecimiento de las especies. Su vegetación evita la erosión del suelo, filtra nutrientes y brinda oxígeno, mejorando la calidad del agua (Ramirez, 1993).

Esta riqueza biótica se debe en gran parte a la variabilidad de los factores abióticos, por ejemplo, el manglar dominante *Rhizophora mangle*, requiere condiciones hidrológicas que son el resultado de fluctuaciones de mareas, de aportes de agua dulce al sistema y del clima (Ramirez, 1993); el ciclo de crecimiento de la comunidad fitoplanctónica de la zona varía principalmente por la salinidad y la temperatura más que por el aporte de nutrimentos de sistemas aledaños (Mendoza, 1999). Las comunidades de ictofauna que no presentan variaciones estacionales, tienen una relación inversa con la salinidad, como la entrada masiva de camarón blanco durante la época de lluvias (condiciones hiposalinas) (Chavez A. E. , 1979). De igual manera es importante señalar que esta región es uno de los corredores de aves migratorias más transitados en el mundo, consecuencia de sus corrientes de viento provenientes de Canadá y Estados Unidos durante la temporada invernal (García Souza, 2017). Su gran riqueza biológica, alto grado de endemismo, diversidad de hábitat, sistemas vegetales y recursos, hacen que desde 1998 estas lagunas sean una “Región Marina Prioritaria” declarada por SEMARNAT (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013).

A su alta biodiversidad, se suma el efecto de los vientos del norte, característicos de la región, que en ciertas zonas lagunares pueden alcanzar hasta 200 km/h, como es el caso de la Barra Santa Teresa, donde se concentran los vientos con mayor velocidad en el Istmo de Tehuantepec y del país (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003); estos propician la circulación de nutrientes, al favorecer el intercambio de agua superficial y profunda, generando la proliferación de comunidades fitoplanctónicas y el aumento de concentración de especies marinas (García Souza, 2017). Estos vientos, conocidos como “Tehuano”, se originan a manera de chorro cuando atraviesan por el paso de Chivera, alcanzando su máximo (200 km/h) en inviernos de años tipo “Niño”, de acuerdo con el Índice de El Niño- Oscilación Sur, ENOS (ENSO por sus siglas en Ingles) (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003).

Sus intensas interacciones entre atmosfera y océano (Ocampo Torres, 2011; Barton, 1993; Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003) y relieve (Hong, 2018) hacen que este sitio sea de interés nacional e internacional, y en consecuencia se encuentran bien descritas en la literatura y se describen a detalle en el sitio de estudio.

El SLH se ha constituido no sólo como un referente geográfico, sino también de identidad étnica (García Souza, 2017). Las lagunas, los manglares y los pantanos constituyen los marcadores naturales de un área relativamente aislada, donde según la Encuesta Intercensal del año 2015 a nivel regional, el 95.66% de la población se considera huave (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013). Este término surge de los zapotecas para referirse a la "gente que se pudre en la humedad", pero ellos se nombran a sí mismos en su lengua, "Mero ikooc" que significa literalmente "verdaderos nosotros", y en español como Mareños. Sus cuatro principales comunidades son: Santa María del Mar, San Francisco del Mar, San Dionisio del Mar y San Mateo del Mar (García Souza, 2017) y habitan las localidades señaladas en la Figura 1.



Fig 01. Comunidades del SLH



Fig 02. Mujer ikooc

Diferentes estudios de la región coinciden en caracterizar a los Mareños como el único pueblo indígena mesoamericano que encuentra en la pesca su principal actividad productiva (García Souza, 2017). Ya que en estas lagunas se tienen identificadas 14 especies de uso pesquero y con potencial acuícola, aunque menos del 20% son aprovechadas para cultivo y producción, debido a que el 90% de la actividad pesquera está orientada hacia la explotación del camarón en su fase juvenil y preadulta, sobresaliendo por su abundancia el camarón blanco, el cual representa hasta el 95% de las capturas ribereñas, mientras que la proporción restante corresponde al camarón café y azul (García Souza, 2017). De esta forma el ciclo de vida de estas especies regula la dinámica de las comunidades aledañas a través del año (García Souza, 2017) y estos ciclos giran en torno a la variabilidad ambiental de la región (Tabla 1).

Tabla 2. Actividades anuales de las comunidades Ikooc, a partir de *García, 2017*.

Febrero-Mayo	Junio-Septiembre	Octubre-Enero
Sequía	Lluvia	Nortes
Disminución de pesca	Incremento de pesca	Máximo de pesca
Entrada de camarón estado larvario	Crecimiento y desarrollo del camarón	Tamaño máximo de camarón
Periodo ceremonial	Periodo productivo	

La fragilidad del ecosistema lagunar ha generado una progresiva especialización en el aprovechamiento de los productos marinos a través de la pesca y la recolección de moluscos (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013). Ejemplo de esto es la adaptación del papalote como una herramienta pesquera (Fig 3) apoyada en los fuertes vientos para alcanzar desde tierra los recursos de mar “vivo” (abierto); así como el uso del caracol azul, para la tinción de hilos usados en el tejido tradicional, el cual se registra como el único bordado de México caracterizado por elementos lagunares (Fig 4). Dentro de esta cultura lagunar, el agua constituye un eje fundamental, por lo que es centro de reflexión no solo en actividades económicas, sino también ceremoniales; la principal se mantiene vigente en San Dionisio del Mar, con las peticiones anuales de lluvia, denominadas *mtiagnatangnio*, apelativo que reúne los términos “cerro” (*mtiag*), “pedir” (*natang*) y “agua” (*ieo*) (Fig 5) (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013).



Fig 03. Pesca con papalote.



Fig 04. Bordado ikooc con elementos lagunares.

La devoción de estas ceremonias ha incrementado (Fig 5 y 6) al atravesar el SLH una serie de problemáticas ambientales tanto de origen natural como antropogénico, y muchas veces agudizado como consecuencia del cambio climático. Entre ellas destacan: largas temporadas de sequía (disminución de precipitación y aumento de temperatura), una continua amenaza de ciclones, el descenso sustancial del nivel freático,

azolvamiento del sistema lagunar y zonas de eutrofización (López-Yllescas, 2014; Ramirez, 1993; Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013).



Fig 05. Danza en el *mtiagnatangnio* Fig 06. Celebración a la virgen de la Candelaria

La mayoría de los problemas ambientales han incrementado desde 2016, cuando la Boca de San Francisco se cerró con sedimentos depositados a partir de un evento de viento extremo, impidiendo el intercambio entre la Laguna y el mar (Manzo, 2019)

Entre las presiones antropogénicas, destacan la presencia de contaminantes, provenientes del continente, principalmente hidrocarburos y sus derivados, provenientes de derrames accidentales; así como los plaguicidas y fertilizantes de uso agropecuario asociados al cultivo de la caña de azúcar (Chavez, Sevilla, & Hidalgo, 1977). Esto es debido a que esta es una zona árida y poco apta para la agricultura, por lo que son pocos los productos posibles de cultivar (García Souza, 2017). Además, hay una afectación debida a los desechos generados por las ciudades y los ingenios azucareros. La problemática es tal que desde 2010, se reportan índices significativos de contaminantes tóxicos en el camarón blanco, por lo que actualmente su consumo supone un riesgo para la salud humana (García Souza, 2017).

Otro evento relevante en la hidrología del lugar, fue la construcción de la presa Benito Juárez para el abastecimiento de la Petroquímica de Salina Cruz sobre el río Tehuantepec en 1961 (Ortiz & Garcia, 1990), modificando con ella el flujo de agua dulce, la salinidad y contribuyendo a la formación de barras y bancos arenosos que posiblemente contribuyeron al cierre natural de la Boca de San Francisco (García Souza, 2017). El cierre de la boca del sistema ha afectado directa y fuertemente las pesquerías

y por ello los habitantes de las comunidades se han dado a la tarea de la organizarse en jornadas de dragado para su reapertura (Fig 07).



Fig 07. Dragado manual de la Boca de San Francisco por pescadores (Manzo, 2019).

Además de las presiones hídricas directas, está el constante interés extractivo de sus recursos naturales, principalmente el viento para la generación de energía. En la actualidad se tienen instalados 17 corredores eólicos (Fig 8), administrados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE); existen también empresas cerveceras, tiendas departamentales, compañías mineras y consorcios cementeros. De los anteriores, sólo el 0.2% de las ganancias se destina al pago de la tierra y el viento, esto representa \$1,000 mensuales por hectárea (García Souza, 2017). De estos proyectos se reporta una constante ambigüedad sobre sus consecuencias ambientales, las cuales se sabe incluyen afectación de los mantos freáticos, degradación de los suelos, pérdida de biodiversidad, generación de ruido y contaminación del agua por el derrame de aceites lubricantes. Por ello, desde 2004 se registran serios enfrentamientos de grupos de oposición, de modo que en la actualidad la cultura Huave también se caracteriza por la resistencia al impacto e influencia de intromisiones externas (Espinoza-Tenorio, 2011).

La preocupación de las comunidades Huaves respecto a la condición actual del SLH, se manifiesta en el contexto político, como la creación de la Unión de Comunidades Indígenas de la Zona Norte del Istmo y la Asamblea de Pueblos Indígenas del Istmo en Defensa de la Tierra y el Territorio (APIIDTT) (Fig 9), para evitar la entrada de nuevos proyectos eólicos (García Souza, 2017).



Fig 08. Parques eólicos cercanos al SLH Fig 09. Manifestaciones del APIIDTT

Existen también dinámicas sociales como el incremento de migración por parte de pescadores, la destacada organización comunitaria para las jornadas de dragado para la reapertura de la Boca de San Francisco -mencionadas arriba- y posteriormente la petición de maquinaria por parte de las 15 cooperativas pesqueras al gobierno actual – de la cual aún no se tiene respuesta- pues el dragado manual no ha sido suficiente (Manzo, 2019).

El marco histórico del SLH, manifiesta complejidad en sus elementos, como las problemáticas que posee. Las cuales a manera de resumen son: la relación de su riqueza y dinámica ecológica a las diferencias fisicoquímicas entre las diferentes lagunas (Arroyo, 1981; Baez, 1987; Chavez, 1979), los Huaves como comunidades pesqueras con alto grado de vulnerabilidad (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013), y la urgencia por frenar la degradación social y ambiental del sitio (Villagómez, Amoroz, & Gómez, 2013; López., 2009; Manzo, 2019).

Por ello se vuelve indispensable crear alternativas para el manejo sostenible de la zona, teniendo presente elementos cruciales para la cultura Huave como la pesca, que depende de la calidad del agua, que a su vez está en función de las condiciones hidrodinámicas.

La hidrodinámica local en lagunas costeras interviene no solo en la calidad del agua, sino también en los procesos de transporte y la distribución de masas de agua; por lo que su conocimiento es necesario para el correcto manejo y gestión del sistema (Hodges, 2009); sin embargo, existen grandes huecos de conocimiento en cuanto a la variabilidad

espacial y temporal del sistema (López-Yllescas, 2014; Mendoza, 1999; Ramirez, 1993). Esto puede ser debido a la dificultad que el sitio representa para la obtención de mediciones, ya sea por su orografía accidentada y dinámicas sociales complejas que restringen el acceso, o sus fuertes vientos que afectan a las pequeñas embarcaciones (Aragón, 2017).

Particularmente en sitios con estas dificultades, una opción es la de realizar estudios de la hidrodinámica a través de modelos numéricos validados con observaciones. Estas herramientas ayudan a evaluar el detalle espacial y temporal de los procesos físicos y biogeoquímicos (Camacho, 2017). La modelación numérica basada en la dinámica de fluidos es información que, bien aplicada, puede resultar indispensable para orientar la toma de decisiones (Hodges, 2009); puede dar información adecuada para la preservación de la calidad del socioecosistema, y ante potenciales amenazas o problemas actuales, mientras que contribuye al desarrollo de futuras investigaciones (Camacho, 2017; Hodges, 2009; Fernandes, 2001).

3. Marco teórico

En este capítulo se proporciona información de base en aspectos que son relevantes para la adecuada lectura de esta tesis. En particular, se presentan cuatro secciones: La primera parte define y describe a las lagunas costeras, su situación actual y hace énfasis en su hidrodinámica y las fuerzas que la controlan. La segunda sección define y explica lo que se conoce como “Fenómeno de El Niño” y su relevancia en el contexto de esta tesis. La tercera explica qué son y cómo funcionan los modelos numéricos, y cómo estos son herramientas relevantes para el estudio de sistemas naturales como el de esta tesis. Finalmente se aborda brevemente el tema de “tiempos de residencia” dada su relevancia en el aspecto ambiental de un sistema lagunar costero.

3.1. Importancia y vulnerabilidad de las lagunas costeras

Las lagunas costeras son geofomas comunes a lo largo de los bordes continentales, bordean más del 13%, o 32,000 km de las costas continentales del mundo (Fernandes, 2001). Son formadas como resultado del aumento del nivel del mar durante el Holoceno o Pleistoceno y la construcción de barreras de costa por procesos marinos (Björn, 1994). Phleger (1969) en Fernandes (2001) las definió como aguas marinas continentales poco profundas, generalmente orientadas paralelamente a la costa, separadas del océano por una barrera y conectadas por una o más entradas restringidas. Las lagunas se caracterizan por una serie de procesos abióticos y bióticos dentro de sus diferentes componentes ambientales: aire, tierra, agua continental, estuarina u oceánica (Espino, 2013). La salinidad puede variar de dulce (5-7 ups), marina. (30-40 ups) e hipersalina (70-75 ups), incluso dentro de la misma laguna, dependiendo del balance hídrico (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000).

Su importancia radica en múltiples aspectos, los cuales se describen a continuación. Al atrapar sedimentos inorgánicos y materia orgánica de diferentes fuentes, las lagunas costeras son consideradas como excelentes sumideros o filtros (Espino, 2013). Debido a su disponibilidad de insumos, su poca profundidad que propicia la rápida movilización de nutrientes, la velocidad y volumen de intercambios de agua, que tienen con el mar

(afectando directamente a la producción de peces a través del reclutamiento) a menudo exhiben altas tasas de producción primaria y secundaria (Lara Lara & Díaz, 2008). Los sistemas lagunares son considerados más productivos que otros ecosistemas en términos de rendimiento pesquero, suelen ser usadas como áreas de esparcimiento y viveros para especies migratorias, dando condiciones ideales para la acuicultura (Kjerfve, 1994) y recreación.

Tanto su capacidad de retención como las altas presiones antrópicas de su alrededor, pueden dar como resultado un recambio deficiente y grandes cargas de contaminantes, degradando la calidad del agua y disminuyendo su productividad (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000). Es notoria y global la identificación de perturbaciones en lagunas costeras, como: la eutrofización, contaminación, erosión, sobrepesca, cambios en la sedimentación; además durante eventos extremos los patrones de circulación son difíciles de predecir, especialmente en lagunas grandes e intensamente utilizadas (Kjerfve, 1994). La mayoría de las veces, diferentes actividades ocurren simultáneamente en una laguna, enmascarando efectos perjudiciales e introduciendo sinergias aún por comprender.

3.2. Funcionamiento hidrodinámico de lagunas costeras

3.2.1. Forzadores

La circulación dentro de una laguna costera se origina por forzamientos locales o remotos. El forzamiento local está dominado por el viento y las descargas continentales, que generan corrientes, mientras que las variaciones de marea provocan un forzamiento remoto. El flujo medido dentro de la laguna en un lugar y tiempo dado puede ser una mezcla compleja de diferentes forzamientos (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000). A continuación, se describen algunos efectos de estos forzadores:

3.2.1.1. Marea

Los cambios en el nivel del mar están conformados por una combinación de (1) procesos astronómicos, los cuales se caracterizan por ser periódicos, regulares y predecibles, (2) procesos meteorológicos, como el viento, lluvia, sistemas de presión atmosférica, etc. La suma de ambos efectos, astronómicos y meteorológicos, determinan las disminuciones y elevaciones de agua en cualquier localidad (Fernandes, 2001).

El efecto astronómico ocurre por la atracción gravitacional entre la Tierra y los otros cuerpos en el sistema solar, principalmente la Luna y el Sol; esta es directamente proporcional a la masa de los cuerpos e inversamente a la distancia que los separa al cuadrado. El impacto de las fuerzas gravitatorias combinadas genera en los fluidos terrestres una deformación elástica. En los océanos esto se traduce en una elevación en la cresta de una onda en las porciones del globo que están frente a la Luna y opuestas a esta, cuya amplitud se modifica a lo largo del año.

El movimiento de las mareas varía a partir de factores como: (1) la declinación de la Tierra, la cual modifica las amplitudes y superposición de los efectos de las mareas del Sol y la Luna, modulando bimensualmente y anualmente estos cambios; (2) la forma y la depresión de las cuencas oceánicas, resultando en el flujo de las mareas oceánicas; (3) la cercanía con los continentes, ya que el cambio de medio refracta la onda (Bigg, 2003).

El impacto de la marea en los océanos puede ser sustancial, particularmente las aguas costeras, debido a que son justo los cambios en el nivel del mar, los que generan los gradientes de presión, que es muchas veces la fuerza principal que domina en su hidrodinámica. Sin embargo, es importante mencionar que la(s) entrada(s) del océano a veces pueden bloquearse (al cerrarse la comunicación en la barra de arena) o encontrarse restringida, por lo que las lagunas costeras pueden o no estar sujetas a mareas (Sánchez, 1972).

3.2.1.2. Viento

En lagunas con intercambios suficientemente restringidos, debido a la marea, la circulación local impulsada por el viento dominará todas las demás formas de circulación

(Fernandes, 2001). Una característica importante es que los patrones de viento tienen una estacionalidad. Es común que la fuerza del viento incremente durante los meses de otoño, invierno y primavera, debido a los gradientes térmicos. El forzamiento local por la tensión del viento que actúa en aguas confinadas produce un transporte a favor del viento directo promedio, independientemente de su dirección. La respuesta inicial será una configuración de los niveles de agua a lo largo de la costa a favor del viento, una disminución a lo largo de la costa en contra del viento, y por lo tanto una pendiente dirigida hacia el viento en la superficie libre de la laguna (Fernandes, 2001).

3.2.1.3. Ríos

El ingreso de agua dulce por descargas continentales tiene dos efectos principales en la hidrodinámica: (1) aporta agua al sistema lagunar, contribuyendo al incremento del nivel del agua y el llenado de la cuenca, principalmente durante la época de lluvia y períodos de fuertes inundaciones, (2) al entrar a la cuenca se generan corrientes advectivas (Kjerfve, 1994), siendo la advección un término en las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen la hidrodinámica de los cuerpos de agua y serán desarrolladas más adelante.

En lagunas costeras dominadas por descargas continentales, un flujo residual hacia el mar es la característica dominante, por lo tanto, en condiciones de fuerte esorrentía fluvial, incluso los eventos de viento no pueden revertir el flujo saliente, que en algunos sistemas podría temporalmente evitar la entrada de agua salada (Fernandes, 2001).

3.2.2. Circulación estuarina

Es importante mencionar que, si bien en la actualidad el SLH no es considerado un estuario por la pérdida de conexión con el mar, la información que se presenta a continuación sirve como referencia para conocer las condiciones previas al cierre de su conexión con el mar: la Boca de San Francisco. Según la definición de Cameron y Pritchard (1963), un estuario es un cuerpo de agua costero y semicerrado, con libre

comunicación con el océano dentro del cual el agua de mar se diluye con agua dulce derivada de la tierra. Al tener confluencia de diferentes forzadores y masas de agua, se generan procesos de estratificación y circulación particulares de estos sistemas; por lo que existen diferentes formas de clasificarlos (Valle Levnison, 2010), a continuación, se nombran las principales,

Balance de agua: Se define a partir de la dirección del gradiente de salinidad entre el agua continental, estuarina y oceánica.

- ≈ Estuario positivo: Debido a las diferencias de densidades, el agua continental, al ser menos densa, ingresa al sistema superficialmente; mientras que la fuerza de la marea, en promedio, empuja al agua marina hacia dentro de la laguna por la parte profunda de la columna de agua. De manera que el agua salina entra debajo del agua dulce y el agua dulce sale del sistema de manera superficial. Esta circulación es conocida como estuarina o gravitacional (Fig 10).

- ≈ Estuarios inversos: Se dan en regiones áridas, cuando la evaporación excede a la precipitación; lo que hace que dentro del estuario se desarrolle una mayor concentración de sales. Por lo que se tiene una entrada superficial de agua marina y una salida de fondo de agua de mayor salinidad que la marina. (Fig 11).

- ≈ Estuarios de baja afluencia: Al igual que los estuarios inversos, los de baja afluencia también poseen altas tasas de evaporación, pero únicamente de manera estacional, debido a la influencia de la descarga de ríos; por lo que es normal que, en temporada de secas, se encuentra una zona de máxima salinidad. Tener zonas intermedias con una mayor densidad, genera un efecto de barrera y en consecuencia las masas de agua adyacentes no tienen intercambio entre ellas. Estos sistemas al no promover la mezcla entre masas de aguas llegan a tener una mala calidad hídrica (Fig 12).

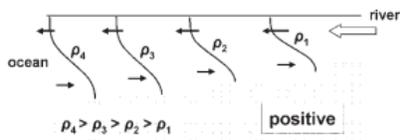


Fig 10. Estuario positivo

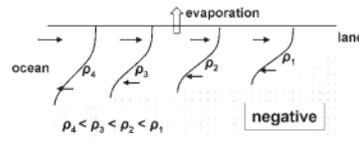


Fig 11. Estuario negativo

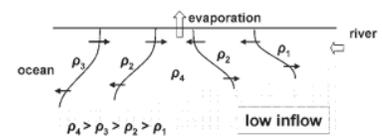


Fig 12. Estuario de baja afluencia

* ρ : densidad, flechas negras: dirección del flujo de agua, flechas blancas: forzadores (Valle Levnison, 2010).

Por su estratificación salina: A partir de la competencia entre las fuerzas de flotabilidad por la descarga del río y la fuerza del mezclado a partir de la marea, los estuarios pueden clasificarse como (Valle Levnison, 2010):

- ≈ Cuña de sal: Cuando la fuerza del río es mucho mayor que la marea, se genera una intromisión del agua en forma de cuña con una haloclina aguda, esto se incrementa durante la marea de inundación y pierde fuerza en el periodo de secas (Fig 13).
- ≈ Fuertemente estratificado: Se genera a partir de un flujo de moderado a grande por parte del río y de débil a moderado por la marea. Dando una estratificación fuerte en todo el ciclo mareal, con una picnoclina bien desarrollada con un componente vertical débil, por lo que hay poca mezcla (gradientes débiles horizontales) (Fig 14).
- ≈ Débilmente estratificado: Mareas fuertes y descargas débiles a moderadas. Con una picnoclina débil, se tiene un intercambio promedio mayor; con una salinidad media dada por la mezcla (Fig 15).
- ≈ Estuarios mezclados verticalmente: Un componente mareal alto y una descarga de río débil la cual provoca perfiles verticales uniformes y flujos unidireccionales en profundidad. Generando condiciones homogéneas en la vertical, aunque haya un gradiente de salinidad horizontal (Fig 16).

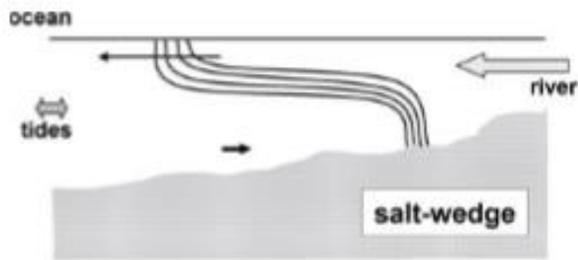


Fig 13. Cuña salina

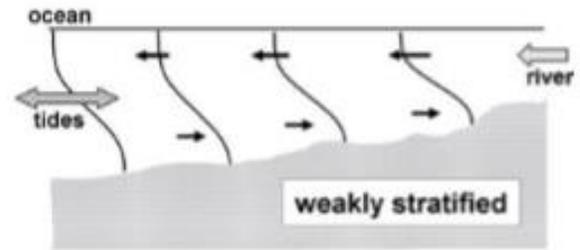


Fig 14. Débilmente estratificado

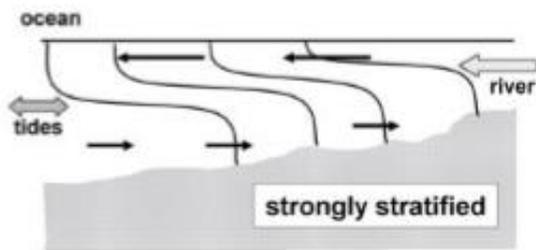


Fig 15. Fuertemente estratificado

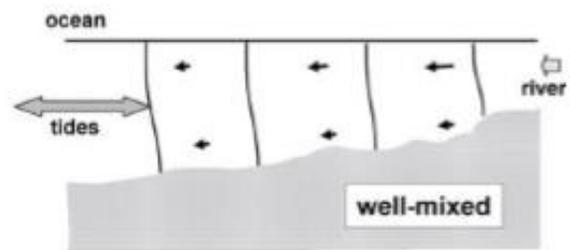


Fig 16. Mezcla vertical

3.3. Efecto Niño-Oscilación del Sur (ENSO)

El ENSO ha sido nombrado como el Niño por su relación temporal con la navidad (*niño Dios*), en el periodo invernal y como Oscilación del Sur por la oscilación de temperaturas en el Pacífico Sur. Este es un fenómeno a macroescala de acoplamiento océano-atmósfera, necesario para explicar la física de la variabilidad en la cuenca del Pacífico. Dicho efecto está determinado por el periodo de condiciones climáticas anómalas, así como por los cambios de temperatura en la superficie del Océano Pacífico Tropical, con una variabilidad interanual aproximada de 2 a 7 años (Michael, Seo, Shang, & Scott, 2011).

El ENSO se encuentra caracterizado a partir de índices: Índice ENSO Multivariado (MEI) y Índice de Oscilación del Sur (SOI) (los cuales se describen en la sección 5.1.2.

Índices climáticos). Estos se obtienen a partir de mediciones disponibles, con énfasis en patrones espaciales y temporales. Las variables que intervienen son: presión a nivel del mar, temperatura de la superficie del mar, altura del nivel del mar, viento en la superficie y temperatura subsuperficial del océano. Esto permite separar las condiciones oceanográficas y atmosféricas del Pacífico en tres fases, las cuales se describen a continuación (Dijkstra , 2006):

≈ Normal: Periodo que describe la circulación promedio en el Pacífico Tropical, caracterizado por ciclos estacionales e interanuales; particularmente en los sitios cercanos a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) donde el aire por sus altas temperaturas se eleva regresando a la troposfera (que descenderá con menor temperatura en latitudes más altas) en la franja ascendente de la circulación de Hadley (que es una celda de circulación meridional). Estos intercambios en el sureste son débiles en abril y mayores durante octubre, sin embargo, la dirección media anual hacia el oeste de estos vientos, conocidos como Alisios, empuja y apila el agua hacia Australia y hacia el continente asiático, por lo que el nivel del mar en esta zona es 50 cm más alto; los gradientes de presión horizontal causados por el nivel del mar son compensados por gradientes de densidad, haciendo que la termoclina se incline alcanzando aproximadamente los 200 m de profundidad en la piscina cálida y elevándose hasta los 50 m en la lengua fría oriental. Esto último brinda a las costas latinoamericanas agua rica en nutrientes y favorece a la pesca. La piscina cálida, a su vez genera una región de fuerte convección y precipitación desde la atmosfera baja que sube a la tropopausa, y se genera una celda de convección zonal donde las direcciones del viento en la atmósfera alta se dirigen hacia el este, en sentido opuestas a las del nivel del mar, por lo que en la parte oriental el aire desciende con menor temperatura. A esta celda zonal sobre el Pacífico se le conoce como circulación de Walker.

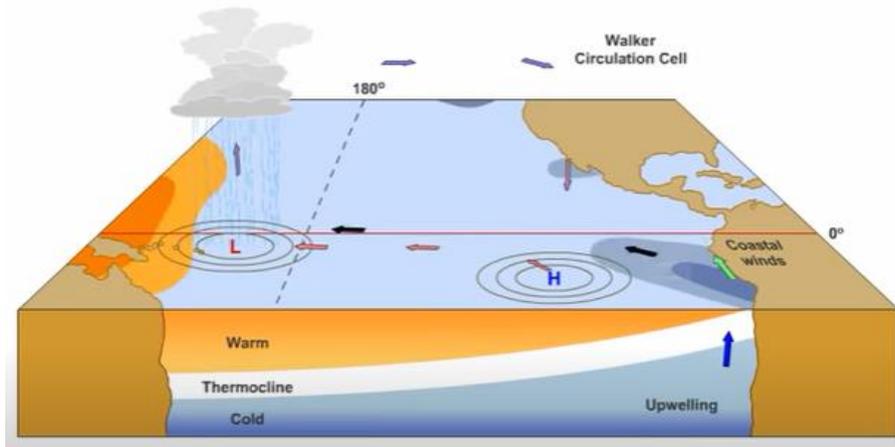


Fig 17. ENSO: Condiciones Normales o circulación de Walker (Keith Meldahl, 2011).
 H: presión alta, L: presión baja.

≈ Niño: Ocurre cuando no hay un gradiente de presión atmosférica lo suficientemente grande para darle a los vientos alisios la fuerza necesaria para apilar a la Piscina Cálida, generando el regreso de la masa de agua caliente al oriente. Cuando esto ocurre, en el occidente se presenta una alta presión, deja de haber lluvia, trayendo consigo periodos de sequía y como consecuencia, incendios principalmente en Australia. Por otro lado, la baja presión que se desarrolla cercana a Sur América genera fuertes lluvias, y termoclina se hunde, mantiene una profundidad constante en el pacífico oriental y occidental, lo que a su vez disminuye la pesca en las costas de América (principalmente en Perú y Ecuador).

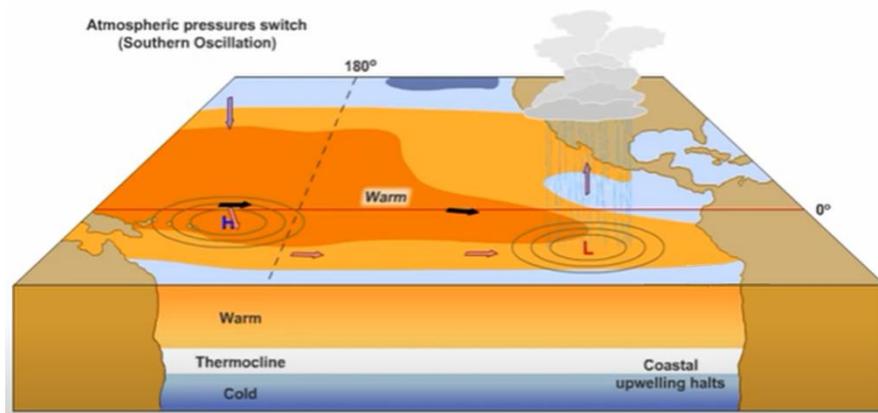


Fig 18. ENSO: Condiciones Niño (Keith Meldahl, 2011). H: presión alta, L: presión baja.

≈ Niña: Esta etapa se desarrolla con el mismo mecanismo de formación de los años Normales, pero en mayor amplitud, teniendo efectos contrarios al Niño. Entre sus características, destacan: vientos más intensos hacia el oeste en la región ecuatorial, disminuyendo la convección en el Pacífico lo que provoca vientos de chorro más débiles; periodos de inundación en Australia y Asia; un levantamiento mayor de la termoclina en América generando una disminución mayor en la temperatura superficial del agua.

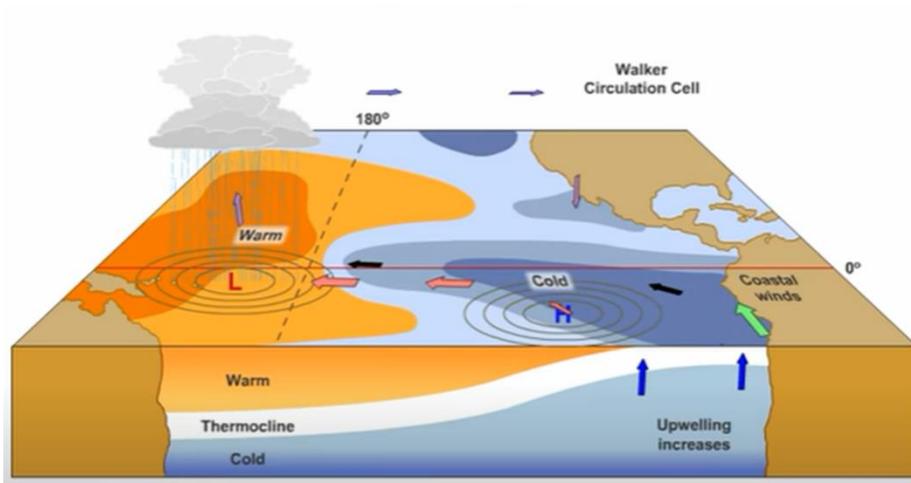


Fig 19. ENSO: Condiciones Niña (Keith Meldahl, 2011). H: presión alta, L: presión baja.

3.4. Modelación numérica

La modelación numérica de la hidrodinámica de un sitio proporciona información sobre los cambios *espacio-temporales* de los procesos físicos. Los modelos tienen como base ecuaciones que describen la física del movimiento y la conservación y a partir de ellas se calcula la velocidad, densidad y campos escalares en evolución. Para ello se considera la mecánica de un fluido Newtoniano incompresible, lo que reduce cualquier cambio de ímpetu al resultado de las fuerzas aplicadas, y el flujo neto que entra o sale a un volumen

control (Hodges, 2009). Las aproximaciones consideradas en las ecuaciones, la forma y tamaño de la malla, así como el método numérico, afectan cómo el modelo refleja el mundo físico. Seleccionar el modelo apropiado requiere de entender cómo la construcción de este interviene en su solución (Deltares, 2019). Para este estudio se seleccionó el modelo Delft-3D.

3.4.1. Modelo hidrodinámico Delft-3D

Delft3D es el sistema integrado de modelado de flujo y transporte de Deltares para el medio ambiente acuático. En particular el análisis de las **ecuaciones de Navier Stokes** para un fluido incompresible para aguas poco profundas, considerando la aproximación de Boussinesq ($D\rho/Dt \approx 0$). Para dar solución el **método numérico** utiliza **diferencias finitas**. Para la **discretización del dominio** en la dirección horizontal, Delft3D-FLOW admite tanto coordenadas cartesianas como esféricas y en ese dominio se resuelven las ecuaciones en pasos de tiempo, dt , que es cuidadosamente determinado para que el modelo sea estable y correcto. Cada uno de estos aspectos se describen brevemente más adelante en esta sección.

En concreto, la implementación del modelo numérico en un dominio particular para estudios hidrodinámicos requiere de construir la malla numérica georreferenciada al sitio de estudio, implementar la batimetría del sitio como frontera de fondo, determinar el paso de tiempo del modelo en función de la resolución de la malla y la profundidad del sitio, condición que se cumple cuando el paso de tiempo cumple con el criterio de **Courant Lewy Friedrichs**, el cuál puede ser estimado dentro en Delft3D-FLOW (Deltares, 2019) (descrito posteriormente); lo que permite alimentar las fronteras abiertas laterales y la superficie libre con los datos de los forzantes que se utilizarán para el estudio.

3.4.2. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las Ecuaciones de Navier Stokes son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, con condiciones iniciales y de frontera que idealmente en la modelación deberán estar establecidas a partir de observaciones de la realidad. Algunas de las condiciones de frontera en sistemas naturales son: por la superficie: campos eólicos que varían espacialmente, intercambios térmicos y de masa con la atmósfera, laterales: entradas / salidas de ríos, intercambios de aguas subterráneas, escorrentía de captación local y precipitación, corrientes y variaciones de nivel. Mientras que por condiciones iniciales se consideran los valores de los diferentes parámetros que tiene el sistema en el tiempo cero de la modelación, para ello es necesario tener datos adecuados para la inicialización, los cuales deben corresponder al inicio del proceso (Hodges, 2009).

Para cada una de las dimensiones: “x”, “y” y “z”, las ecuaciones de Navier-Stokes calculan las aceleraciones en función de las fuerzas por unidad de masa. Su forma general (Ec. 1) tiene como términos, los componentes advectivos y las fuerzas que corresponden a: 1) gradiente de presión, 2) Coriolis, 3) gravedad y 4) fuerzas no lineales como la fricción (Brown, Colling, Park, & Phillips, 2004).

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \bullet \nabla p - 2\Omega \times V + g + F \quad (1)$$

En la horizontal, estas ecuaciones son (Ec. 2) para x y (Ec. 3) para y:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (3)$$

Cuyos componentes corresponden a:

- a. La aceleración total del flujo que se compone de los términos locales y advectivos de la aceleración:

$$\bar{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{D(u, v, w)}{Dt} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

b. El siguiente término representa a la aceleración o Fuerza de Coriolis

$$fV = -2\Omega \times V \quad (5)$$

Donde, Ω es la velocidad de rotación diaria, la cual corresponde a 2π radianes por día y cuyo valor numérico corresponde a $7.272 \times 10^{-5} m/s$.

Estas dos aceleraciones del lado izquierdo de las ecuaciones 2 y 3 están en balance con las fuerzas del lado derecho:

c. Gradientes de presión por unidad de masa

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial P_a}{\partial y} - \rho g \frac{\partial \eta}{\partial y} - g \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \right] \quad (6)$$

El cual tiene tres componentes que consideran 1. Barométrico, el efecto de la presión atmosférica (P_a); 2. Barotrópico, el cambio de altura en la columna de agua (η); y 3. Baroclínico, los gradientes de densidad por diferencias de salinidad y temperatura de las masas de agua a lo largo de la columna.

d. Fuerzas de fricción (componentes no lineales) en superficie, fondo o interna:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (8)$$

(Ec. 7) eje x, (Ec. 8) eje y

Los modelos numéricos utilizan diferentes métodos de parametrización de la fricción y presentan distintas opciones para aproximar la turbulencia y viscosidad, por lo que A representa el parámetro para cada dirección.

3.4.3. Métodos numéricos

El objetivo principal del análisis numérico es encontrar soluciones aproximadas a problemas complejos utilizando sólo las operaciones más simples de la aritmética. Para esto se requiere de una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas que producen la aproximación al problema matemático. Para llegar de la situación dada a la respuesta final, se llevan a cabo la siguiente serie de pasos: i) Modelado, ii) Elección del método numérico y los parámetros (estimación preliminar del error), iii) Programación, iv) Realización de cálculos, v) Interpretación de los resultados. Es importante considerar en el uso de cualquier método numérico que estos pueden formularse como algoritmos, los cuales son un procedimiento paso a paso que establece un método numérico en una forma comprensible para las personas. Para que un algoritmo sea útil este debe ser estable; es decir, cambios pequeños en los datos iniciales sólo deben causar cambios pequeños en los resultados finales, exactamente esto es lo que se pierde cuando el paso de tiempo es largo en una malla fina. También se debe tener en cuenta que las aproximaciones no son exactas, sino que incluyen errores. Tal error puede resultar de una combinación de los siguientes efectos: errores de redondeo, errores experimentales o errores de truncamiento o recorte. Los errores deben abordarse de manera individual para cada método (Hodges, 2009). Como se mencionó arriba, el modelo DELFT-3D utiliza el método de diferencias finitas, que se describe a continuación.

3.4.3.1. Diferencias Finitas

El método de diferencias finitas consta en discretizar el dominio en pequeños cuadros y reescribir las derivadas por medio de aproximaciones finitas con respecto al valor de la incógnitas en cada cuadro de la subdivisión y a partir de la ecuación diferencial se reduce

el problema a la solución de un sistema de ecuaciones, en general lineal (García Espinosa , 2008).

Las diferencias finitas se llevan a cabo a través de pasos y estos se restan entre sí, los hay de tres tipos (García Espinosa , 2008):

≈ Diferencia progresiva, adelantada o posterior:

$$\Delta_h[f](x) = f(x + h) - f(x) \quad (9)$$

≈ Diferencia regresiva, atrasada o anterior:

$$\nabla_h[f](x) = f(x) - f(x - h) \quad (10)$$

≈ Diferencia central

$$\delta_h[f](x) = f\left(x + \frac{1}{2}h\right) - f\left(x - \frac{1}{2}h\right) \quad (11)$$

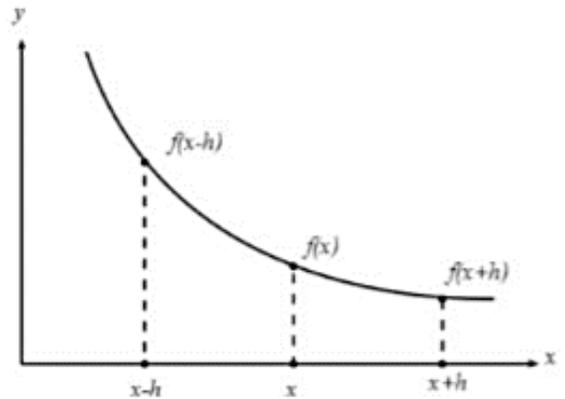


Fig 20. $x-h$, diferencia regresiva;
 $x+h$, diferencia adelantada.

3.4.4. Discretización del dominio

La discretización del espacio físico se realiza mediante la creación de una malla numérica. El tamaño y características de esta malla determina la escala de lo que el modelo puede o no representar. Los tipos de mallado que existen son: cartesiano, curvilíneo y no estructurado (Fig. 21). Se dice que el mallado converge cuando después de refinar la malla se dejan de apreciar cambios significativos en los resultados (Hodges, 2009).

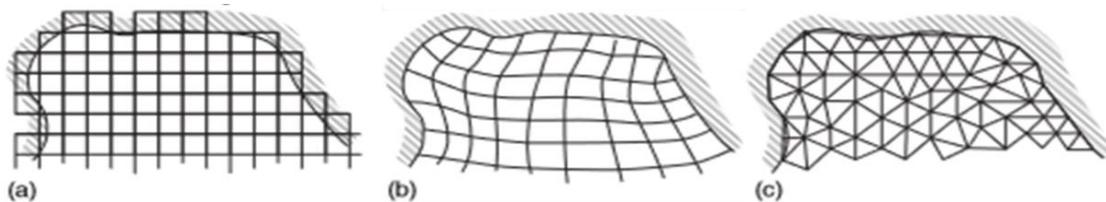


Fig 21. Mallado a) cartesiano, b) curvilíneo, c) no estructurado (Hodges, 2009).

3.4.5. Número de Courant Lewy Friedrichs

El Número de Courant Lewy Friedrichs (CLF), delimita al paso de tiempo del modelo para que el tiempo que tome al fluido pasar de una celda a otra sea menor que el paso de tiempo. La velocidad de propagación depende de la profundidad de cada localidad, que es variable en el dominio de modelado. El número de CLF se determina para brindar la estabilidad del modelo suficiente como para resolver con precisión la escala de tiempo de los procesos costeros (Deltares, 2019). Numéricamente este valor se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{u\Delta t}{\Delta x} < C_a \quad (12)$$

Donde

$u =$ *velocidad (fluido o ola)*

$\Delta t =$ *paso de tiempo*

$\Delta x =$ *espaciado de la malla (en la misma dirección que u)*

3.5. Tiempos de residencia

Es el tiempo necesario para que todo el volumen de un cuerpo de agua específico sea eliminado a través de sus límites abiertos. A menudo el interés de esta propiedad, se enfoca en la eliminación de una sustancia disuelta dentro del cuerpo de agua; por lo que también se puede definir como el tiempo en que un volumen control deja un dominio temporal definido. Considerándose una escala temporal de transporte, ya sea de agua, partículas o sustancias disueltas, lo cual resulta de suma importancia en la calidad del agua.

Los métodos numéricos y la modelación permiten el uso de trazadores a un límite determinado, algunos de los sugeridos son: e^{-1} , 50% y 10% (Choi & Lee, 2004).

Para sistemas semi-cerrados, con un límite abierto e influencia de marea (Fig. 22), se considera la ecuación de dispersión a partir del decrecimiento por mareas en los límites abiertos (Ec. 13).

$$M = M_0 e^{-kt} \quad (13)$$

$$\text{Con: } k = \frac{Q_e}{V} \quad (14)$$

Donde,

M = masa del trazador

M_0 = masa inicial del trazador

t = tiempo

Q_e = descarga

V = volumen

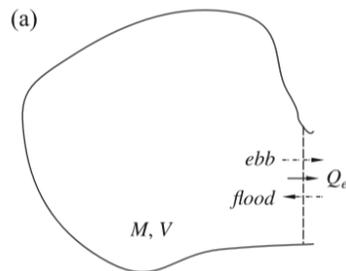


Fig 22. Diagrama esquemático para el análisis de descarga de un cuerpo de agua semicerrado (Choi & Lee, 2004).

Q_e = flujo, ebb=salidas, flood= entradas.¹

Por otro lado, el tiempo de residencia (T_r) de una partícula o trazador en un cuerpo de agua, viene dado por la siguiente ecuación:

$$T_r = -\frac{1}{M_0} \int_0^\infty t dM \quad (15)$$

Al usar la relación de la ecuación 10, en la 12, obtenemos que el tiempo de residencia es :

$$T_r = k^{-1} = \frac{V}{Q_e} \quad (16)$$

Al sustituir t por T_r , en la ecuación 10 y obtener la relación entre las masas, el tiempo de residencia se alcanza cuando:

$$\frac{M}{M_0} = e^{-1} \quad (17)$$

4. Sitio de estudio

El Sistema Lagunar Huave, se localiza en el estado de Oaxaca, dentro de la región conocida como Istmo de Tehuantepec, en la costa del Pacífico Sur mexicano. La descripción de sus características ambientales a diferentes escalas espaciales se describe en este capítulo.

4.1. Pacífico Mexicano Sur

El Pacífico mexicano (PM) representa el 68% de las costas mexicanas y posee varios tipos de ecosistemas, desde lagunas costeras hasta laderas continentales y zonas abisales con respiraderos hidrotermales y nódulos de manganeso; caracterizándolo sus zonas de surgencia y su alta productividad biológica. Por otra parte, sus características hidrodinámicas dependen de: a) procesos a macroescala como: en eventos atmosféricos globales cálidos y fríos, fenómeno del ENSO, cambio climático y el localmente conocido: Mar de Fondo, el cual ocurre de mayo a junio en consecuencia de la llegada de olas extremas desde el océano Antártico; b) procesos regionales, como la Piscina Cálida del Pacífico Oriental, el efecto de la dinámica eólica de los Vientos Tehuanos y la confluencia del Domo de Costa Rica. La variabilidad interanual y estacional de estos últimos procesos vuelven necesaria la regionalización del PM para su estudio (Enríquez, Papiol, & Chiappa, 2017).

En la sección sur del Pacífico Mexicano, que comprende al área de estudio de este trabajo, posee una marea mixta predominantemente semidiurna cuya amplitud esta entre los 50-120 cm. La temperatura del agua varía entre 22 a 30 ° C y la salinidad entre 15 y 35 ups (Chiappa, Enríquez, Mariño, Reyes, & Papiol, 2019). Sus principales corrientes (Fig 23) son la Corriente Norecuatorial, la cual lleva agua fría y una alta salinidad, y la Corriente Costera de Costa Rica, caracterizada por su estabilidad productiva (Ritter Ortíz & Guzmán Ruíz, 2000). Es también, una zona que presenta la surgencia estacional del Golfo de Tehuantepec, durante invierno, siendo de tipo eólica consecuencia del desplazamiento de agua superficial por el arrastre eólico y su posterior reemplazo con agua subsuperficial de menor temperatura. Esto hace que llegue a haber

una disminución de hasta 10° C, siendo relevante para la productividad de la zona (Ortega & Trigueros, 2000). Por otra parte, durante verano y otoño se tiene la presencia de la masa de agua Superficial Tropical, compuesta por una salinidad relativamente baja (<34.6 g/kg) y una temperatura alta (>25° C) (Portela Rodríguez, 2016). También es importante mencionar que la región está sujeta a la ocurrencia de fenómenos naturales extremos, entre los que se encuentran fuertes vientos del norte, tormentas tropicales y huracanes (CONABIO, CONANP, The Nature Conservancy, & ProNatura, 2007).

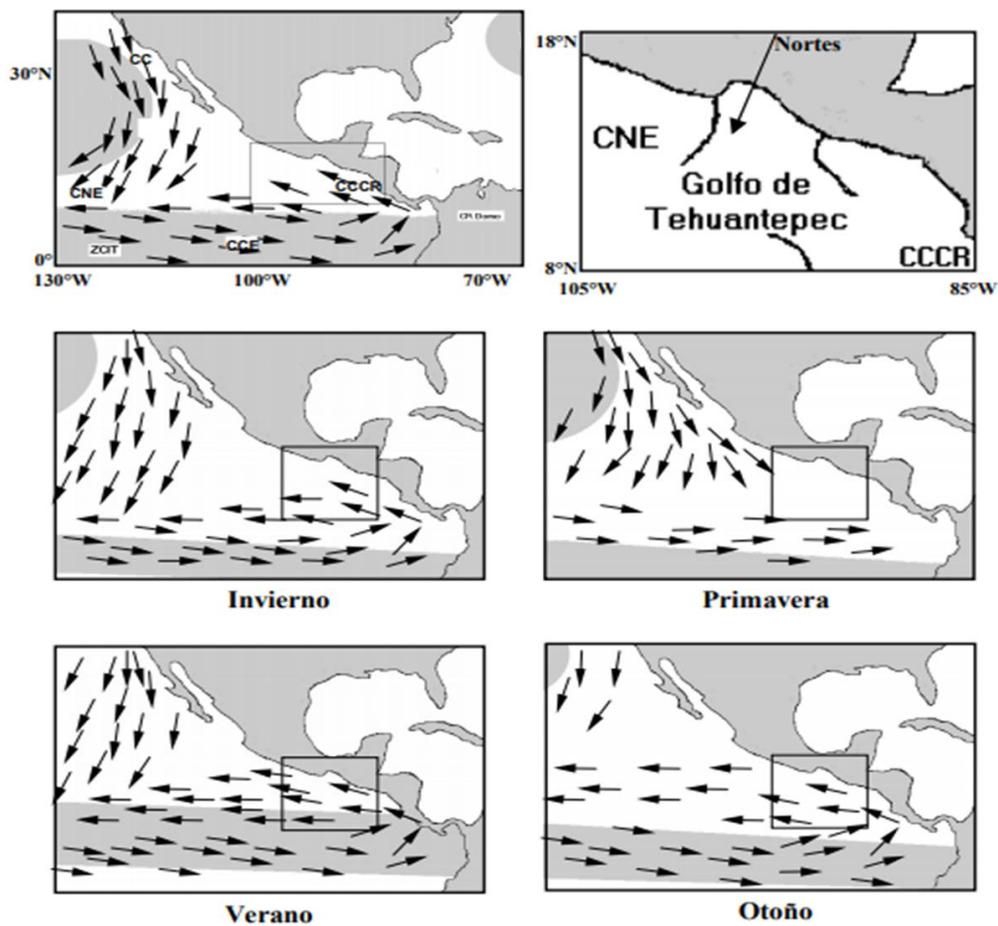


Fig 23. Dinámica de corrientes en el Istmo de Tehuantepec a través del año. CC: Corriente de California, CNE: Corriente Norecuatorial, CCCR: Corriente Costera de Costa Rica, ZCIT: Zona de Convergencia Inter Tropical, CCE: Corriente Costera Ecuatoriana (Ortega & Trigueros, 2000)

4.2. Istmo de Tehuantepec

En el Istmo de Tehuantepec confluyen la región Neoártica y Neotropical del país, lo que hace que se conformen distintos biotopos (llanuras, montañas, lagunas costeras, etc.). También es una zona extremadamente dinámica debido a su inestabilidad tectónica, alta sismicidad (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000) e interacción océano-atmósfera particulares (Ortiz & García, 1990). Esto debido a que el centro del Istmo es donde la Sierra Madre del Sur disminuye su altura media de manera abrupta (en un espacio de 40 km cambia de 2000 m a 250 m). Los cambios de relieve dan origen al Paso de Chivera, un valle que sirve como canal donde los vientos, en forma de chorro, generados por el gradiente de presión del Golfo de México (alta presión) al Golfo de Tehuantepec (baja presión), atraviesan el país (Chavez, Sevilla, & Hidalgo, 1977; Díaz H., 1980; Gluyas M., 1982; López-Yllescas, 2014) (Fig 23). Por lo que, en esta región, los vientos son el resultado de la combinación de condiciones meteorológicas a gran escala, como los eventos de Nortes y características topográficas locales. Generando uno de los tres chorros de vientos latinoamericanos, conocidos como Tehuanos (Barton, 1993).

Aunque los Tehuanos son producidos por un gradiente de presión, no son vientos geostroficados porque su dirección está limitada por la topografía. Sin embargo, una vez que los vientos salen del corredor de la montaña, ya no están influenciados por esta y siguen predominantemente una trayectoria inercial, girando anticiclónicamente hacia el oeste después de abandonar la costa. (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003). Estos también se caracterizan por su intensidad, intermitencia y estacionalidad, siendo máximos en la temporada de Nortes (de noviembre a abril), excediendo los 20 m/s (72 km/h), con ráfagas de hasta 30 m/s (108 km/h), siendo las más altas del país. De igual modo, son afectados por fenómenos a macro escala como el ENSO, incrementando en años Niño, en frecuencia e intensidad de hasta 55 m/s (200 km/h) y disminuyendo su frecuencia en fase Niña (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003).

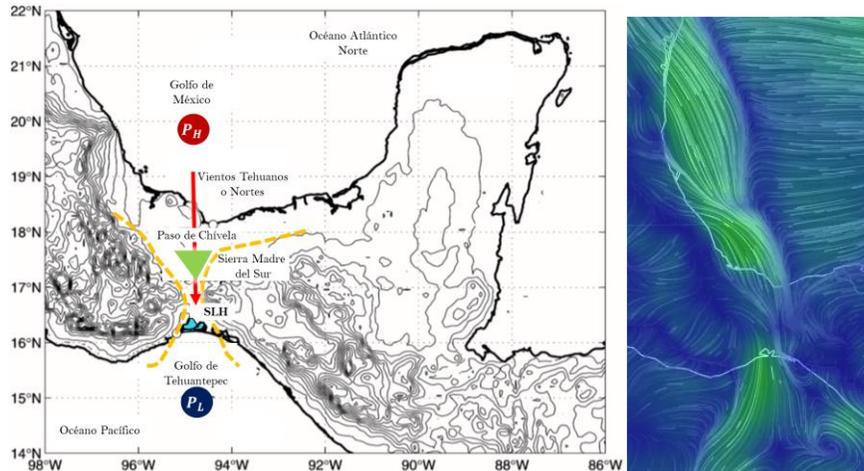


Fig 24. Mecanismo de formación: Vientos Tehuanos: a) Componentes, b) Evento de Norte (Romero, Zavala, & Gallegos, 2003)

La dinámica eólica del Istmo, es determinante en las características del Golfo de Tehuantepec. El Golfo de Tehuantepec recibe este nombre debido a que, a diferencia del resto del Pacífico mexicano, tiene una dinámica muy particular en la que los vientos Tehuanos generan una capa de mezcla que abarca estratos más profundos y activando procesos de fertilización que a su vez promueven una mayor concentración de zooplancton. La intensidad de los vientos genera un desplazamiento de la masa de agua superficial disminuyendo el nivel del agua cerca de la costa, lo cual produce un levantamiento de la termoclina. El incremento de profundidad en la capa de mezcla, así como el surgimiento de aguas frías y ricas en nutrientes durante el verano debido a las corrientes marinas, ocasionan anomalías en la temperatura de la superficie del mar y clorofila. lo que caracteriza al Golfo de Tehuantepec por su alta producción en biomasa (Chiappa, Enríquez, Mariño, Reyes, & Papiol, 2019).

4.3. Sistema Lagunar Huave

El SLH, en las costas de Oaxaca, constituye el sistema ecológico más extenso del litoral del Pacífico de México, situado frente al Golfo de Tehuantepec es una región de gran productividad (Chávez, 1979). El sistema lagunar se muestra en la Figura 25 y está compuesto por cuatro lagunas interconectadas y un estero: la Laguna Superior (1),

limitada al sur por un tómbolo que la separa de una más pequeña llamada Mar Tileme (3); al norte y oeste se encuentra una planicie aluvial y el estero conocido como Ostates (5); al oriente se conecta mediante la Boca de Santa Teresa (2) con la Laguna Inferior (4), la cual desemboca en el Océano Pacífico, específicamente en el Golfo de Tehuantepec (6) mediante la Boca de San Francisco (Fig 25) (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000).

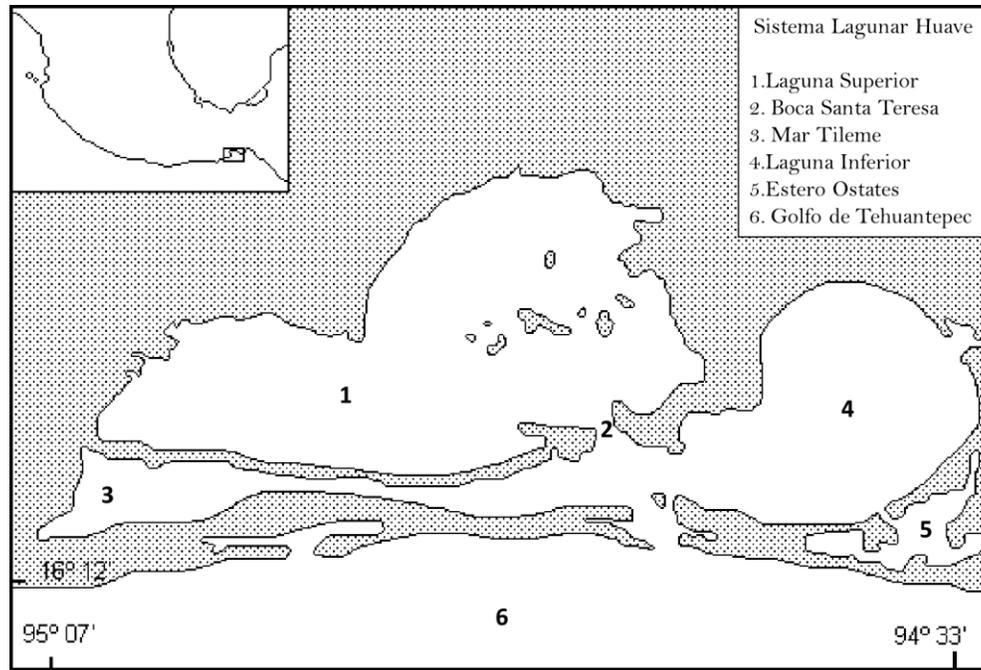


Fig 25. Sistema Lagunar Huave (López-Yllescas, 2014)

El tipo de clima de la zona es caliente subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media del mes más frío es superior a los 18°C y la temperatura media anual es de 24.2°C. La precipitación media anual es de 901.5 mm, con una evaporación potencial media anual de 2417 mm (CONAGUA, 2007). Este sistema tiene 350 km² de superficie y drenan principalmente en la zona occidental, cinco ríos: Chicapa, Ixtepec o los Perros, Niltepec, Ostuta y el Marqués; los cuales en su mayoría forman parte del Río Tehuantepec y tienen su máximo aporte en verano dependiendo de la fase ENSO (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000). En consecuencia, los aportes continentales, condiciones climáticas, la salinidad del sistema lagunar alcanza concentraciones hipersalinas durante varios meses del año que supera las 60 ups (p.e. máximo de 61.4

ups registrado en mayo, con descensos en la época lluviosa (de julio a octubre) según lo reportado por (Chavez, Sevilla, & Hidalgo, 1977)).

Dentro del SLH se encuentra una docena de islas. Donde el conjunto principal tiene una orientación E-W a partir del centro de la laguna. La barrera principal de la laguna tiene 40 km de longitud y un ancho de 4.5 km. Las profundidades máximas están alrededor de las islas centrales y van de 6 a 8 m, formando la mayor cuenca de la laguna (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000). Sin embargo, estas profundidades han tenido cambios por el azolvamiento del SLH, consecuencia de los cambios en los aportes sedimentarios por ríos e intercambio de materiales con el mar. Debido a factores diversos como: la disminución de descargas continentales, consecuencia los periodos de sequía; la disminución del cauce del Río Tehuantepec, principal afluente de los ríos de la zona y que desde 2016 la Boca de San Francisco se encuentra cerrada (López-Yllescas, 2014).

Resulta evidente que el SLH tiene distintas variables ambientales, que funcionan como forzantes del sistema, cuyo análisis tiene grandes huecos en la bibliografía del sistema lagunar. En este estudio, se realizó el análisis de los datos forzantes para poder ser utilizado en el estudio de modelación, pero que por sí mismo es un resultado y aporte al entendimiento del sistema. Por ello, características particulares de los forzantes analizados se presentarán con detalle en la sección “Resultados: Recopilación y análisis de forzadores” de la presente tesis. En particular se describirán la variabilidad de los vientos, ríos y corrientes, a través del año y durante las distintas fases del ENSO.

5. Metodología

En la siguiente sección se explica el proceso que se llevó a cabo, en la parte experimental las etapas a seguir fueron: (i) Recopilación y análisis de datos, (ii) Modelación numérica, (iii) Valoración de tiempos de residencia.

5.1. Recopilación y análisis de datos

El proceso de obtención de datos para este proyecto incluye: (a) la medición de observaciones *in situ* en el SLH, que fueron analizados para el lapso de tiempo de la campaña de campo (octubre del 2018) y para la validación del modelo numérico hidrodinámico; (b) la clasificación de periodos de tiempo en función del fenómeno ENSO a partir de los índices MEI y SOI obtenidos bibliográficamente y (c) la recopilación de datos históricos de los diferentes forzadores, que se obtuvieron de fuentes gubernamentales, bibliografía y bases de datos. Estos datos fueron analizados como series de tiempo y a partir del análisis se usaron para diseñar los experimentos numéricos que se corrieron para esta investigación.

5.1.1. Observaciones *in situ*

Del 5 al 15 de octubre de 2018, se realizó una campaña de campo en el Sistema Lagunar Huave en el marco del proyecto Centro Mexicano de Innovación de Energía Océano (CEMIE-Océano), con participación de la UNAM, Unidad Sisal y de la Universidad del Mar (UMAR), Campus Puerto Ángel. Durante la campaña de campo se registraron datos de temperatura y conductividad de la columna de agua, variaciones del nivel del agua, medidos mediante un CTD Divers marca Schlumberger, y los parámetros atmosféricos de temperatura, radiación, presión y precipitación, mediante un BaroDiver de Schlumberger, dentro del Sistema Lagunar Huave (SLH) (Reyes, Reyes, & Aragón, 2018). La campaña tuvo lugar al final de la temporada de lluvia y previo a la temporada invernal, que es caracterizada por los episodios de viento intenso del norte, conocidos como “vientos Tehuanos” (A. Trasviña, 1995). Las condiciones atmosféricas durante la campaña fueron: una baja presión, viento del sureste de magnitud moderada y cielo de cubierto a semicubierto de acuerdo con la estación meteorológica de San Dionisio del Mar durante la campaña de campo.

Se instalaron cuatro CTD (medidor de Conductividad Temperatura y Densidad), que tienen sensores de temperatura, salinidad y nivel de agua en distintos sitios del sistema lagunar en las localidades que se indican en la Figura 26 y en la Tabla 2. Cada CTD se instaló fijo en el fondo de cada sitio, el cual varió en función de su profundidad, cerca de 72 horas, registrando datos a cada 10 minutos. El 7 de octubre, se anclaron los CTDs en la parte norte de la Laguna Superior y en la parte central de la Boca Santa Teresa y el 8 de octubre en la desembocadura del Estero Otates y en el extremo occidental del Mar Tileme. Los anclajes fueron retirados entre los días 11 y 12 de octubre logrando así, series de tiempo de 4 días de mediciones de cada instrumento.

Tabla 2. Localidades de instalación de CTDs dentro del SLH

Sitio	Latitud (N)	Longitud (O)
Mar Tileme	16.244985°	-95.073947°
Laguna Superior	16.365881°	-94.851742°
Estero Ostates	16.268997°	-94.631873°
Boca de Santa Teresa	16.277084°	-94.810449°



Fig 26. Ubicación de los CTD anclados y la estación meteorológica en el Sistema Lagunar Huave: Mar Tileme (rojo), Laguna Superior (verde), Estero Ostates (amarillo), Boca de Santa Teresa (azul), San Dionisio del Mar (sol).

A la par de los CTD Divers, se instaló un BaroDiver en las cercanías de la laguna (en San Dionisio del Mar) para la colecta de datos de presión y temperatura atmosférica, los cuales se usaron también para corregir los datos de nivel de agua de estos instrumentos. Además, el día 9 de octubre, se instaló en el techo de una casa de la comunidad San Dionisio del Mar, una estación meteorológica para la colecta de datos atmosféricos logrando obtener durante 3 días, datos de dirección y magnitud del viento, temperatura y humedad del aire, precipitación, presión y radiación solar (Reyes, Reyes, & Aragón, 2018).

La navegación para el anclaje de los CTD Drivers en la Laguna Superior (Fig. 27) tuvo como punto de partida el embarcadero de San Dionisio del Mar y se realizó con el apoyo de la cooperativa pesquera “Playa Roble”. La navegación en la Laguna Inferior partió del embarcadero de Huamuchil y fue apoyado por la cooperativa pesquera “Playeros de Huamuchil”.



Fig 27. Embarcaderos y áreas de navegación en el Sistema Lagunar Huave.

Los datos obtenidos en la campaña de campo se descargaron de los equipos, se convirtieron a datos ASCII, se limpiaron con procesamientos estandarizados y se graficaron en series de tiempo.

Para obtener los datos de variaciones del nivel del mar, a la presión registrada por los CTD's se le restó la presión atmosférica, medida por el barómetro del BaroDiver, de

modo que la diferencia indica la presión ejercida únicamente por la columna de agua en cada sitio.

El promedio de la diferencia de presiones para cada sitio, se le resta a toda la serie para tener una referencia de un nivel del mar promedio (únicamente para ese período de tiempo) al cual referir los cambios en el nivel del agua de cada sitio.

En cada sitio de muestreo se analizó también la variación de la temperatura y salinidad, esta última se obtuvo mediante la formulación de TEOS-10 (Thermodynamic Equation of Seawater 2010) que reemplazó a la formulación de EOS-80 de acuerdo a la Comisión Oceanográfica Intergubernamental en Junio del 2009 (IOC, SCOR and IAPSO, 2010) a partir de los datos de conductividad y temperatura obtenidos por los CTDs.

5.1.2. Índices climáticos: ENSO

Para determinar la influencia de la oscilación del fenómeno del Niño (ENSO) en el SLH se recopilaron datos históricos de los indicadores climáticos: Índice ENSO Multivariado e Índice de Oscilación del Sur (Tabla 3).

Se graficaron series de tiempo con los índices, y se determinaron y agruparon los períodos de tiempo en las fases ENSO: Niño, Niña y Normal. Posteriormente, se eligieron intervalos de tiempo Niño y Niña con más cercanía temporal a la campaña de campo (octubre 2018). Este proceso se realizó con el software Matlab, para lo cual cada serie temporal de ambos índices tuvo un tratamiento de promedio corrido de 20 datos (los datos tienen una frecuencia de 1 mes), usando la función *smooth* en Matlab.

Tabla 3. Descripción y fuentes de los índices MEI y SOI.

Indicador	Consideraciones del índice	Parámetro	Periodo	Frecuencia	Fuente
Índice ENSO Multivariado (MEI)	Presión del nivel del mar (P), componentes zonales (U) y meridionales (V) del viento en la superficie, temperatura de la superficie del mar (S), temperatura del aire en la superficie (A) y fracción de nubes del cielo (DO). Observaciones recopiladas y publicadas por ICOADS. (NOAA, Southern Oscillation Index (SOI), 2018)	Niño MEI>1	1950-2018	Mensual	(NOAA, Southern Oscillation Index (SOI), 2018)
		Niña MEI<-1			
Índice de Oscilación del Sur (SOI) <i>estándar</i>	Diferencia de presión normalizada entre Tahití y Darwin. Variación de SOI, CRU que se basa en el método	Niño SOI<-1	1940-2018	Mensual	(NOAA, Southern Oscillation Index (SOI), 2018)
		Niña SOI>1			

	<p>dado por Ropelewski y Jones (1987). (NOAA, Southern Oscillation Index (SOI), 2018)</p>				
--	---	--	--	--	--

5.1.3. Forzadores

Se recopilaron datos de los principales forzadores del sistema para alimentar el modelo numérico que se implementó del SLH: (1) Los datos para la validación del modelo corresponden al periodo de la campaña de mediciones de campo (octubre 2018); los datos faltantes para ese período fueron sustituidos con los datos promedio de octubres de años en la misma condición ENSO que las fechas de medición (año normal); (2) Para los experimentos numéricos se recopilaron datos que incluyen condiciones normales y eventos extremos, como altas tasas de precipitación (incrementando la descarga de ríos) o eventos extraordinarios de nortes. Los experimentos numéricos también incluyen simulaciones en las que se abre nuevamente la Boca de San Francisco, manteniendo así la conexión con el mar; dichos experimentos se describen con detalle en la sección de *Metodología: Experimentos numéricos*. A continuación, se describen las diferentes fuentes y tratamiento de datos realizados para cada forzador:

5.1.3.1. Atmosféricos: Viento

Para la validación se obtuvieron datos de viento del: Wind reanalysis from the North American Regional model (NARR) (NOAA, 2006), correspondientes a los días de la campaña de campo con intervalos de tiempo cada 3 horas. Se descargaron los datos correspondientes al Istmo de Tehuantepec (Fig 28). En la modelación se usó un promedio de los puntos que se encontraban dentro del SLH, de modo que se alimenta una serie de tiempo del viento espacialmente uniforme en el dominio del modelo. Para su análisis, utilizando el software Matlab, se graficaron series de tiempo de cada una de las variables: se crearon series de la magnitud total, y de sus componentes en el eje x (U) y

y (V); además de graficar los vectores con su correspondiente magnitud y dirección usando la función *quiver*.

Respecto a los experimentos numéricos, se consideró un viento con velocidad de 100 km/h, para eventos de Norte normal y de 150 km/h, para eventos de norte extremos (ENSO: Niño) (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003); así como una dirección de 0°, los cuales fueron constantes durante 75 horas.

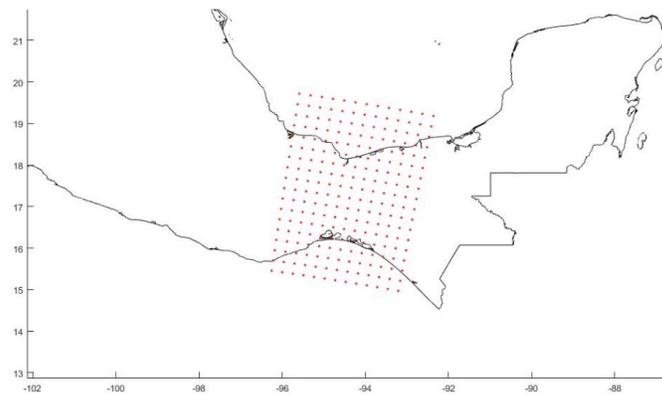


Fig 28. Dominio de puntos del modelo NARR (NOAA, 2006) utilizados para la descarga de datos de viento del Istmo de Tehuantepec.

5.1.3.2. Continentales: Descargas de ríos

Para conocer los ríos existentes en la zona se realizó una revisión bibliográfica, así como un análisis detallado explorando los mapas del Sistema de Información Geográfica Google Earth para delimitar tanto la cuenca como los cauces que desembocaban en el SLH; a partir de esto se sabe que los ríos que proveen un posible forzamiento a la laguna son: Ixtepec, Chicapa, Niltepec y Ostuta. Usando la aplicación en línea de la Base de Datos de Bandas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), fue posible obtener los datos históricos de gastos medio diario promedio (m^3/s), así como los gastos máximos de manera mensual para los cuatro ríos. Para el río Ostuta, que no descarga directamente en el SLH, sino de manera indirecta a través del Estero Ostates, se obtuvieron datos a través de revisión bibliográfica pues los valores del río subestiman

el cauce real (CONAGUA, 2008) . Una vez obtenidos los datos, se realizó para cada río un análisis del gasto a través de los diferentes meses del año, para los años Niño, Niña y Normales, seleccionados en función de su índice MEI (NOAA, 2006).



Fig 29. Aportes de agua continental que descargan en el SLH: Ríos Ixtepec (azul), Chicapa (verde), Niltepec (morado) y Estero Otates (negro).

5.1.3.3. Oceánicos: Marea y corrientes

A pesar de que en el presente hay nula conexión entre el SLH y el mar, los experimentos numéricos consideran como forzante oceánico a la marea en la frontera marina abierta. La marea se introduce en el modelo utilizando los armónicos de marea reportados bibliográficamente para Salina Cruz (Sanay González, Monreal Gómez, & Salas de León, 2006) (Tabla 4).

Tabla 4. Principales armónicos de marea reportados de Salina Cruz (Sanay González, Monreal Gómez, & Salas de León, 2006)

Armónico	Fase [deg]	Amplitud [m]	Correcciones
M2	240	0.5	-
S2	340	0.1	-
K1	100	0.1	-

Para comprender el efecto del ENSO en la dinámica oceánica del Golfo de Tehuantepec, se evaluaron los cambios en el nivel del mar (*surf_el=Water Surface Elevation*) y las corrientes superficiales (U y V) en las diferentes fases. Estos datos se obtuvieron a partir de la base de reanálisis global, Hycom (GOFS 3.1: 41-layer HYCOM + NCODA Global 1/12° Reanalysis). De la cual se tomó el subset con datos espaciales encontrados entre las coordenadas: 16.1644 (N), 15.9779 (S), -95.212441 (W) y -94.395105 (E). Los paquetes de datos elegidos para cada periodo se especifican en la tabla 5. Sin embargo, ambos comparten las siguientes características: (a) Resolución de 0.08 ° entre 40 ° S y 40 ° N, (b) Institución: Naval Research Laboratory: Ocean Dynamics and Prediction Branch, Frecuencia temporal: 3 hrs.

Tabla 5. Información de los datos de corrientes marinas y variaciones del nivel del mar descargados del modelo global HYCOM (NOAA, 2006).

Título	Rango de datos	Secuencia de experimento
Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1 output on the GLBv0.08 grid	1994-01-01 al 2015-12-31	53.X
Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1 output on the GLBy0.08 & GLBv0.08 grids	Julio del 2014 al presente	56.3 -> 57.2 -> 92.8 -> 57.7 -> 92.9 -> 93.0

Los sets de datos se eligieron a partir de su rango temporal, buscando cubrir los intervalos de tiempo más cercanos a la campaña de campo de las condiciones ENSO: Niño y Niña, periodos de tiempo previamente determinados a partir de su índice MEI y

SOI; y usando los datos del año 2018 como referencia de años normales. Los sets de datos elegidos se describen en la Tabla 6.

Respecto a la resolución espacial, se eligió descargar los datos de los puntos más cercanos a las fronteras este y oeste, respectivamente, de la malla creada para la implementación del modelo, la cual se describe más adelante en la sección de implementación. Debido a que el nivel de mar no mostraba cambios considerables entre los datos de las frontera este y oeste, se obtuvo un promedio entre dichos puntos; mientras que los datos de corrientes sí presentaron diferencias, por lo que se analizaron de manera independiente cada frontera.

Una vez obtenidos los datos se analizaron series de tiempo anuales de junio a junio, debido a que en este rango es cuando se presentan los cambios más significativos en el índice MEI entre un año y otro. Debido a que este análisis se realizó en 2019, y el modelo de HYCOM no presentaba datos más allá de 2018, para el caso del año 2018, el cual representa las condiciones de campo y la etapa ENSO normal, únicamente se cambió el orden entre una mitad del año y la siguiente, logrando así comparar de igual modo las series de tiempo de junio a junio.

A estas series de tiempo se les aplicó también un filtro de promedio corrido de 50 datos en el caso de los cambios en el nivel del mar. Las corrientes marinas se graficaron como vectores utilizando la función *quiver* en Matlab para observar el cambio de dirección a través del tiempo.

Tabla 6. Características de los grupos elegidos para el análisis de corrientes

Condición	Año	Rango de tiempo		Set de datos
		Inicio	Final	
Niña	2010	2010-06-01 T00:00:00Z	2011-01-01 T09:00:00Z	<i>/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_53.X/data/2010</i>

	2011	2011-01-01 T12:00:00Z	2011-05-31 T12:00:00Z	<i>/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_53.X/data/2011</i>
Niño	2015	2015-06-01 T00:00:00Z	2015-12-31 T12:00:00Z	<i>/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_53.X/data/2015</i>
	2016	2016-01-01 T00:00:00Z	2016-05-31 T00:00:00Z	<i>/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_56.3</i>
Muestreo	2018	2018-01-01 T12:00:00Z	2018-12-31 T00:00:00Z	<i>/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_93.0</i>

5.2. Modelación numérica

La modelación se realizó en las siguientes etapas: (1) Instalación del software e implementación del modelo numérico del SLH, (2) Generación de condiciones hidrodinámicas, (3) Pruebas de sensibilidad, (4) Validación, (5) Experimentos numéricos. Cada una se describe a continuación:

5.2.1. Instalación e implementación

La modelación se llevó a cabo con el modelo hidrodinámico Delft3D. Para la instalación del software, primero fue necesario el registro en DELTARES, el sitio desarrollador, y posteriormente se requirieron los programas Tortoise para la descarga, Fortran para la compilación y Visual BASIC para la visualización del código. Posteriormente se realizó la instalación del modelo, siguiendo las instrucciones descritas en la página web oficial de Deltares (<https://oss.deltares.nl/>).

Para ubicar espacialmente el dominio que se iba a generar, se creó el archivo de datos con las coordenadas geográficas de la línea de costa digitalizada con Google Earth y

convertida a un archivo “.txt” de tres columnas separadas por tabuladores correspondientes a las coordenadas UTM: longitud (x) y latitud (y), así como una columna correspondiente a una altura constante a nivel del mar ($z=0$), la extensión del archivo se modificó a “.ldb” (land boundary).

Se construyeron dos² mallas numéricas cuadradas creadas en el módulo Delft-RGFGRID en coordenadas cartesianas, con dimensiones 332.603 x 334.589 m (malla 1) y 104.407 x 125.287 m (malla 2).

Se generó la batimetría interpolada triangularmente con el módulo Delft3D-QUIKIN a partir de profundidades correspondientes a una porción del Istmo de Tehuantepec obtenidos de la base de datos ETOPO1 (Fig. 30) para la sección marina del dominio del modelo. Para la laguna se utilizó una batimetría realizada mediante percepción remota de acuerdo con López-Yllescas, 2014 (Fig. 31).

Por último, se establecieron en la malla las celdas y barreras secas (dry points y thin dams), que son los sitios de la malla donde no se considera el flujo de agua dentro del dominio. En el caso del SLH, estos puntos corresponden a la barra de arena que separa a la Laguna Superior del Mar Tileme (Fig. 32) y puntos de observación los cuales corresponden a los CTDs colocados durante la campaña de campo.

² Para realizar los experimentos hidrodinámicos solo se requiere una malla, sin embargo, se tomó una malla grande como base y la segunda malla es la refinación de la primera; esto para realizar pruebas de sensibilidad y determinar el dx y dy adecuados para la modelación. Posteriormente se seleccionó la malla más eficiente.

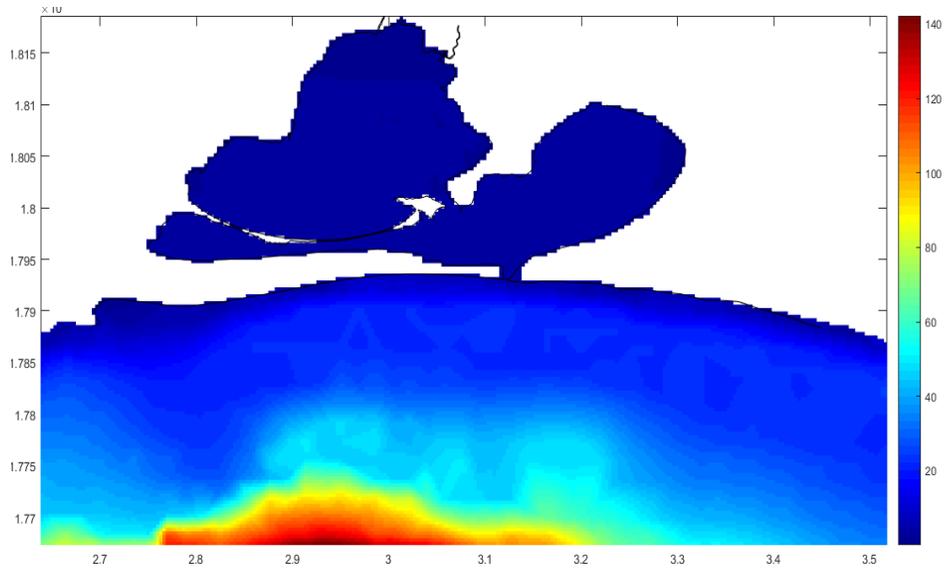


Fig 30. Batimetría completa utilizada para la implementación del modelo SLH a partir de López-Yllescas (2014) y ETOPO1.

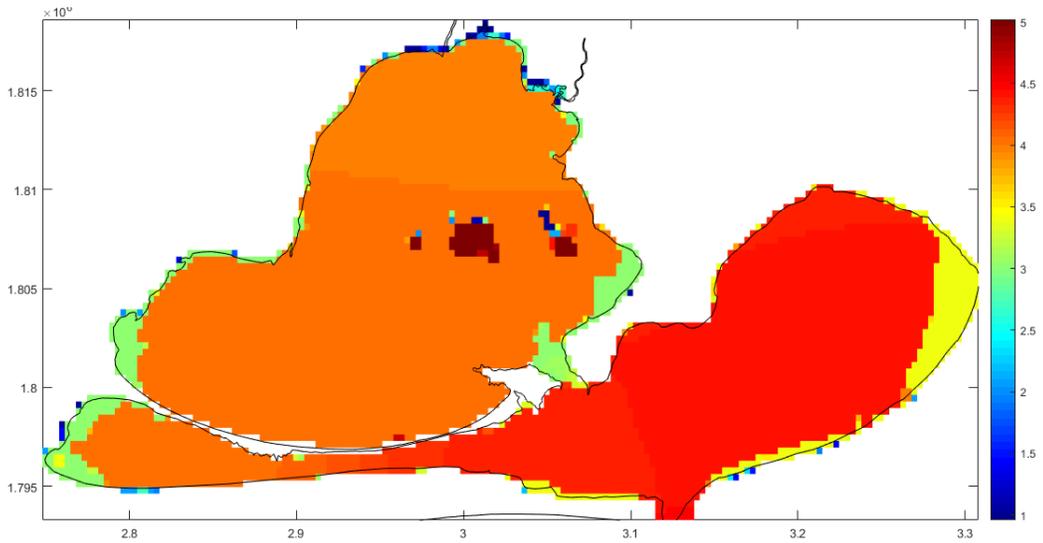


Fig 31. Batimetría lagunar utilizada para la implementación del modelo SLH a partir de percepción remota, datos proporcionados por López-Yllescas (2014).



Fig 32. Implementación del modelo, se muestra el dominio, la batimetría utilizada, las celdas secas, las fronteras abiertas en la sección marina y los puntos de observación en las localidades de instalación de CTDs durante los muestreos de campo.

5.2.2. Condiciones hidrodinámicas

Para establecer las condiciones hidrodinámicas del modelo, se utiliza el submenú Flow input, dentro del módulo hidrodinámico Flow del programa Delft3D. En ese módulo se dan las especificaciones de duración de las corridas, pasos de tiempo, se cargan la malla y batimetría generadas, se indican las condiciones iniciales y se alimentan los distintos forzantes, todos del SLH. Con estas especificaciones, el programa resuelve las ecuaciones hidrodinámicas correspondientes y resuelve para cada paso de tiempo los resultados de la hidrodinámica en todo el dominio de la malla generada, que pueden exportarse a diferentes tiempos (cada hora en este caso) y con mayor resolución temporal (cada 10 minutos) para los puntos de observación que se determine, en este caso las coordenadas se establecieron en los sitios donde se ubicaron previamente los CTDs.

Las condiciones de evaluación fueron cambiadas para (1) las pruebas de sensibilidad del modelo para determinar la resolución espacio-temporal (tamaño de malla y paso de tiempo) con mayor resolución y menor tiempo de cómputo para resolver el modelo; (2) la validación del modelo, cuyo objetivo es igualar, lo más posible, las condiciones del modelo

con la realidad vistas en campo. Posteriormente se evaluó la similitud de los resultados de la modelación con las mediciones de los CTDs; (3) experimentos numéricos, donde se eligen condiciones que representen diferentes escenarios posibles del SLH, como lluvias, secas, nortes, nortes extremos tipo Niño, etc., en este caso la información seleccionada para el modelo se basa en el análisis previo de forzadores realizado en la sección inicial de esta tesis.

5.2.3. Pruebas de sensibilidad

Cuando los intervalos espacio temporales no se asignan adecuadamente, los resultados de un modelo numérico pueden generar datos erróneos por lo que siempre se recomienda realizar pruebas de sensibilidad que nos aseguren la calidad de los resultados (Enríquez, 2005). Para determinar los parámetros (Δx , Δy : dimensiones de la malla y Δt : paso de tiempo) con los que el modelo resuelve las ecuaciones de manera óptima, se partió de las diferentes mallas creadas y a partir de estas se propusieron pasos de tiempo, tomando como base el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), calculado en el software Delft3D y definido por:

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad (18)$$

Posteriormente se calculó, para las diferentes corridas de las pruebas de sensibilidad (Tabla 7), la energía cinética del sistema en el tiempo como una manera de verificar si había cambios significativos entre una condición y otra. Posteriormente se eligieron los Δx , Δy y Δt que mantenían la mejor estabilidad en el menor tiempo computacional. Estas simulaciones se realizaron con la boca abierta, incluyendo los armónicos de marea y el viento de la campaña de campo del modelo NARR, debido a que es un dominio con zonas de comunicación estrechas (Boca de Santa Teresa y San Francisco), por lo que es necesario incrementar los forzadores para percibir los cambios buscados.

Tabla 7. Pruebas de sensibilidad para determinar el paso de tiempo y tamaño de malla: 332.603 x 334.589 m (malla 1) y 104.407 x 125.287 m (malla 2).

Corrida	dx	Dy	Dt
1	332.603 m	334.589 m	1 min
2	332.603 m	334.589 m	2 min
3	332.603 m	334.589 m	3 min
4	332.603 m	334.589 m	4 min
5	332.603 m	334.589 m	5 min
6	104.407 m	125.287 m	1 min

A partir de los resultados de las pruebas, donde no se observó un cambio significativo de energía cinética entre las mallas, pero si con el paso del tiempo, se seleccionó la malla (Fig. 33 Y Fig. 34) de mayor dimensión (1) y el paso de tiempo más pequeño (1 min).

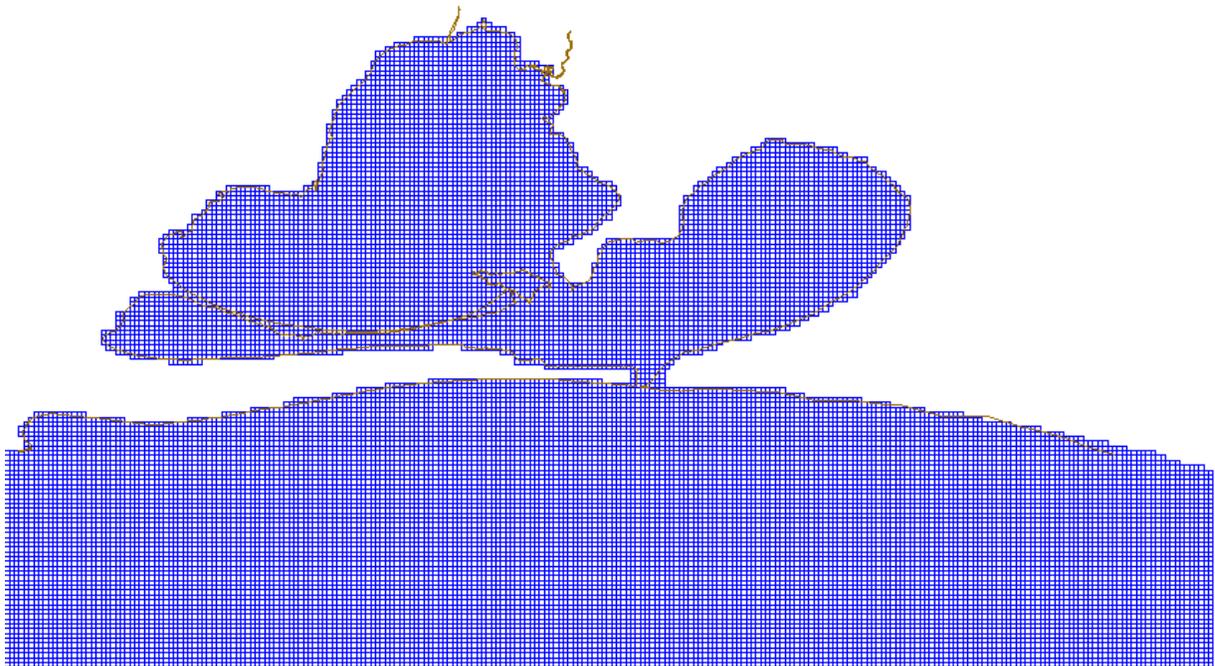


Fig 33. Malla completa del modelo SLH

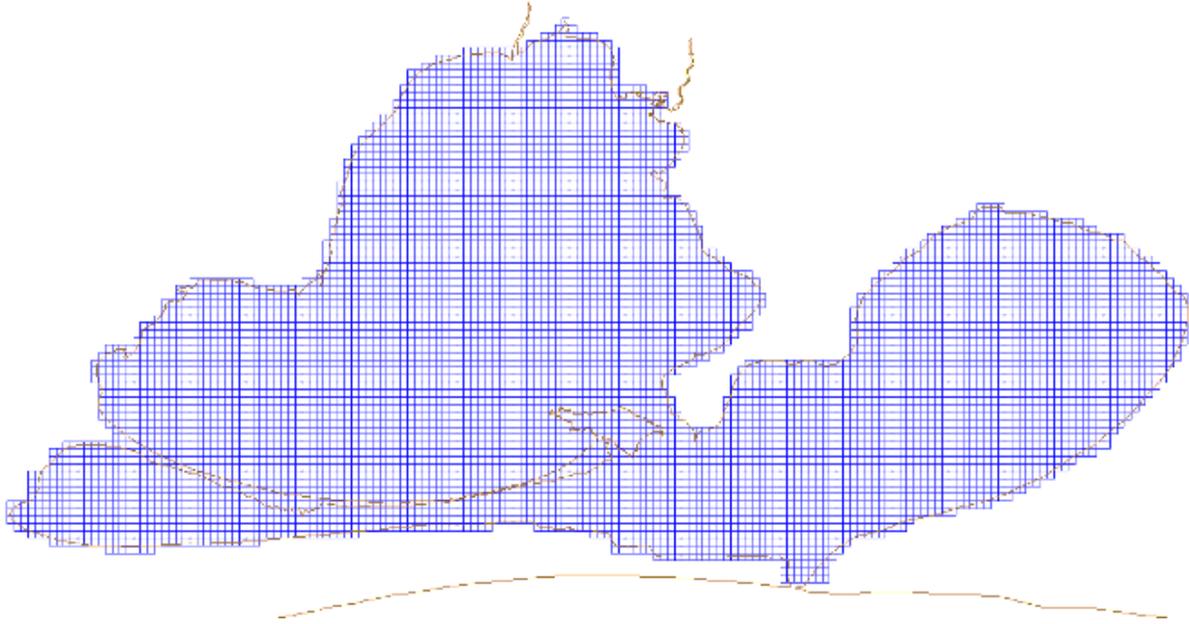


Fig 34. Malla en la sección de la laguna del SLH.

5.2.4. Validación

Se establecieron las condiciones hidrodinámicas del periodo en campo con la materia prima (malla, batimetría y línea de costa) previamente descrita.

Los forzadores de ese periodo de tiempo fueron seleccionados en función del mejor acercamiento a las mediciones *in situ*, en este caso el Sistema Laguna se forzó con datos de viento, descarga continental, y se mantuvieron las celdas secas en la sección de la Boca de San Francisco, dado que su conexión con el mar es nula, al estar la boca cerrada en la actualidad. El tiempo de simulación fue establecido a partir de la campaña de campo. Las especificaciones de estos parámetros se describen a detalle en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos asignados a los experimentos de pruebas de sensibilidad del modelo.

Dominio	Malla 1: descrita en la sección: instalación e implementación.
---------	--

	<p>Batimetría: descrita en la sección Instalación e Implementación.</p> <p>Latitud: 16 °</p> <p>Orientación: 0 °</p>
Tiempo de simulación	<p>Inicio: 08-10-2018 00:00:00 Final: 13-10-2018 00:00:00</p> <p>*Este tiempo corresponde a las fechas de la salida a campo</p> <p>Paso de tiempo: 1 min</p>
Procesos	Viento, Descargas continentales
Condiciones iniciales	Nivel del agua: -0.1m
Fronteras	<p>Este: Neumann [-], inicio=0 y final=0.</p> <p>*Frontera libre para que el modelo pueda estabilizarse solo.</p> <p>Oeste: Corrientes [m/s], inicio=0 y final=0.</p> <p>*Frontera con principal entrada de corrientes en dirección este</p> <p>Sur: Nivel de agua [m], Frontera influida principalmente por mareas. Armónicos de Salina Cruz.</p>
Parámetros físicos	<p>Velocidad de viento [m/s] y Dirección de viento [deg]</p> <p>*Se seleccionó una serie de tiempo para los días de campo a partir del modelo NARR.</p>

Operaciones	<p>Descargas continentales: Niltepec, Ixtepec, Chicapa, Estero Ostates</p> <p>*Los valores se modificaron haciéndolos oscilar entre los Octubres de ENSO: Normal y Niña, para asemejar al periodo de lluvia durante la campaña de campo. Debido a que no se encontraron mediciones reales para esos días en específico.</p>
Puntos de Observación para Monitoreo intensivo	<p>Mar Tileme, Estero Ostates, Laguna Superior y Boca de Santa Teresa</p> <p>*Mismos puntos donde se realizaron las mediciones puntuales del CTD en campo.</p>

Los puntos de observación que se implementaron en el modelo coinciden con las localidades en las que se instalaron los instrumentos CTD durante las mediciones en campo para su posterior comparación.

Para comparar las diferentes pruebas y determinar si el modelo es válido, se exportaron los datos del modelo de nivel del agua con QUICKPLOT y se graficaron las series de tiempo en Matlab sobreponiendo las mediciones en campo. A los datos se les calculó el coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (E), definido por:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13)$$

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

Los forzadores que dieron el mayor acercamiento a las mediciones *in situ* entre 12 pruebas de validación diferentes (variando la descarga y comportamiento de los ríos en

función del periodo de precipitación en campo) fueron: 1. Viento: Modelo NARR durante las fechas de campo; 2. Oceánicos: fronteras descritas en la tabla 4; 3. Ríos: Previo al periodo de lluvia se utilizó el promedio histórico de las descargas de octubre de años normales para cada río y después de que inicia la precipitación se consideraron las descargas de Octubre para los años Niña (mayores descargas) y terminado el periodo de lluvia el modelo regresa a las lluvias de Octubres Normales, cuyos valores se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Descargas continentales usadas durante la validación del modelo del SLH, obtenidas con base en los datos de: (CONAGUA, 2008) y (CONAGUA, 2019).

Descargas continentales	Descargas promedio mensuales [m^3/s]	
	Octubres: ENSO Niño	Octubres: ENSO Niña
Estero Ostates	119	504
Chicapa	54.42	158.5189
Ixtepec	22.22	95.923
Niltepec	11.25	31.4

5.2.5. Experimentos numéricos

Posterior a la validación se diseñaron experimentos control a partir de la validación para conocer el efecto de cada uno de los forzadores en condiciones normales, los cuales se describen en la tabla 10.

Tabla 10. Características de los experimentos control a partir de la validación del modelo, la serie de tiempo para el viento, así como los valores de descargas de ríos usados, se presenta, en la sección de Resultados: Forzadores.

Control	Boca		Viento	Ríos
	Abierta	Cerrada		
01		x	X	
02		x		x
03	X		X	x

Además de los experimentos control, se diseñaron una serie de experimentos con el objetivo entender los diferentes cambios por los que atraviesa el SLH, como lo son: los eventos de viento norte y sur, el periodo de secas y lluvias, y el efecto de la conexión con el mar.

Es importante señalar que algunos de estos forzadores tienen variación respecto a la fase ENSO que se esté atravesando, por lo que la temporada de lluvias se evaluó con las descargas máximas de cada río promediadas a partir de los datos históricos para cada una de las fases ENSO. De igual modo se consideró dos tipos de Nortes, aquellos en condiciones Normales y los eventos de viento extremo característicos de los años Niño. Las características de estos experimentos se describen en la Tabla 11.

Tabla 11. Experimentos numéricos efectuados para evaluar diferentes condiciones hidrodinámicas del SLH. Los valores de descarga de ríos para cada condición ENSO, se presentan en la sección de Resultados: Forzadores. La condición de Norte, se presenta para un año ENSO norma, mientras que el Norte extremo representa a la fase Niño.

Exp	Boca		Viento					Ríos	ENSO		
	Abierta	Cerrada	Norte 100km/h Dir= 0°	Norte extremo 150km/h Dir=0°	Sur 40km/h Dir=180°	Secas 45km/h Dir=0°	Lluvia 30km/h Dir=0°		Niño	Normal	Niña
01	x		X							x	
02	x			x					x		
03	x				x					x	
04	x					x				x	
05	x						x	x		x	
06	x							x	x		
07	x							x		x	
08	x							x			x
09		x	X							x	
10		x		x					x		
11		x			x					x	
12		x				x				x	
13		x					x	x		x	
14		x						x	x		
15		x						x		x	
16		x						x			x

Para el procesamiento posterior de los datos de la modelación, una vez teniendo los resultados de las modelaciones, se exportaron los datos de los archivos “.trih” y “.trim” en el submenú QUICKPLOT, que son los datos de los puntos de observación con alta resolución temporal y los datos de toda la malla numérica con menor resolución

temporal respectivamente. Los datos fueron posteriormente analizados en Matlab donde se analizó la velocidad de las corrientes.

Se generaron mapas de velocidades y de las corrientes residuales a lo largo de un ciclo de marea, que son el resultado neto de corrientes después de que entra y sale la marea. Para contrastar algunos experimentos se realizó la diferencia entre las corrientes residuales, para una mejor visualización de los cambios de circulación entre un forzador y otro.

5.3. Valoración de tiempos de residencia

Con base en la tesis de Robles Camacho (2017), se agregó una descarga de un componente conservativo en todo el dominio en el momento inicial. Esta sustancia conservativa se asignó con una concentración de $\rho = 1kg/m^3$, y fue liberada simultáneamente al inicio de la modelación. A partir de ese momento, el modelo simuló la entrada y salida de la marea para calcular el tiempo que tardaría de manera natural en renovarse el agua del sistema. Este tipo de aproximación del tiempo de residencia permitió obtener valores diferenciados en las distintas secciones del sistema lagunar, de acuerdo con su facilidad para recambiar el agua. Los resultados se analizaron con una subrutina en Matlab donde se calculó el tiempo de reducción de la masa del trazador en un factor de e^{-1} (Choi & Lee, 2004).

6. Resultados y discusión

En este capítulo se describen y discuten los resultados obtenidos de las etapas de: (I) Recopilación y análisis de datos, (II) Modelación numérica, (III) Valoración de tiempos de residencia.

6.1. Recopilación y análisis de datos

Este apartado presenta (a) las observaciones de las variables medidas en campo, (b) la clasificación de periodos de tiempo en función del fenómeno ENSO a partir de los índices MEI y SOI y (c) los comportamientos de los forzadores recopilados.

6.1.1. Observaciones *in situ*

Las variaciones del nivel del agua *in situ*, realizadas a partir de anclajes de CTD en el SLH, (Fig 35), no tuvieron oscilaciones respecto del efecto de marea (Fig 36). Esto es característico de lagunas cuya conexión con el mar es nula o muy restringida (Brown, Colling, Park, & Phillips, 2004), como en el caso del SLH desde que la Boca de San Francisco se encuentra cerrada (López-Yllescas, 2014).

Los resultados mostraron, en todo el SLH, un incremento de agua aproximado de 20 cm entre el periodo del 09 al 11 de octubre, comenzando en la parte norte del SLH con la laguna Superior y Boca de Santa Teresa y continuando 12hrs después con el Estero Ostates y Mar Tileme (sitios que presentan el mayor incremento de nivel). Lo cual es un incremento considerable, en un periodo de tiempo corto, para una laguna sin efecto de marea lo cual indica que los forzadores que están actuando son de tipo local, y no remoto, ya sean estos el viento, la lluvia o las descargas continentales (Hodges, 2009).

La caracterización de las propiedades físicas y químicas de la laguna mostraron respecto a la salinidad, la mayor parte del SLH tiene valores entre las 30 y 40 unidades prácticas de salinidad (ups), con excepción del Mar Tileme, cuya salinidad oscila entre los 55 y 60 ups; haciendo del SLH un sitio con salinidad de tipo marina (30-40 ups), salvo la zona del mar Tileme cuyas condiciones son ligeramente hipersalinas (70-75 ups) semejante a sitios como las Coloradas en el estado de Yucatán (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000). Al mismo tiempo, se presentó una disminución general en la salinidad de todo el sistema de aproximadamente 4ups a partir del 10 de octubre.

En cuanto a la temperatura, con un promedio de 27.5°C , los mayores cambios en el mar Tileme se suscitaron a partir del 8 de octubre por la noche, cuando se registró una disminución térmica de 1°C en un intervalo de tiempo aproximado de un día; con el mismo comportamiento, pero en menor grado se observan las localidades de la Laguna Superior y la Boca de Santa Teresa, mientras que el Estero Ostates presenta variaciones casi nulas. Tanto la salinidad como la temperatura, coinciden con lo reportado por López-Serrano (2007), donde se estableció una diferencia entre secas y lluvias (mayo y septiembre-octubre) de 30.9°C a 27.0°C , y de 44.3 ups a 30.5 ups para el SLH.



Fig 35. Ubicación de los CTD anclados en el Sistema Lagunar Huave: Mar Tileme (rojo), Laguna Superior (verde), Estero Ostates (amarillo), Boca de Santa Teresa (azul).

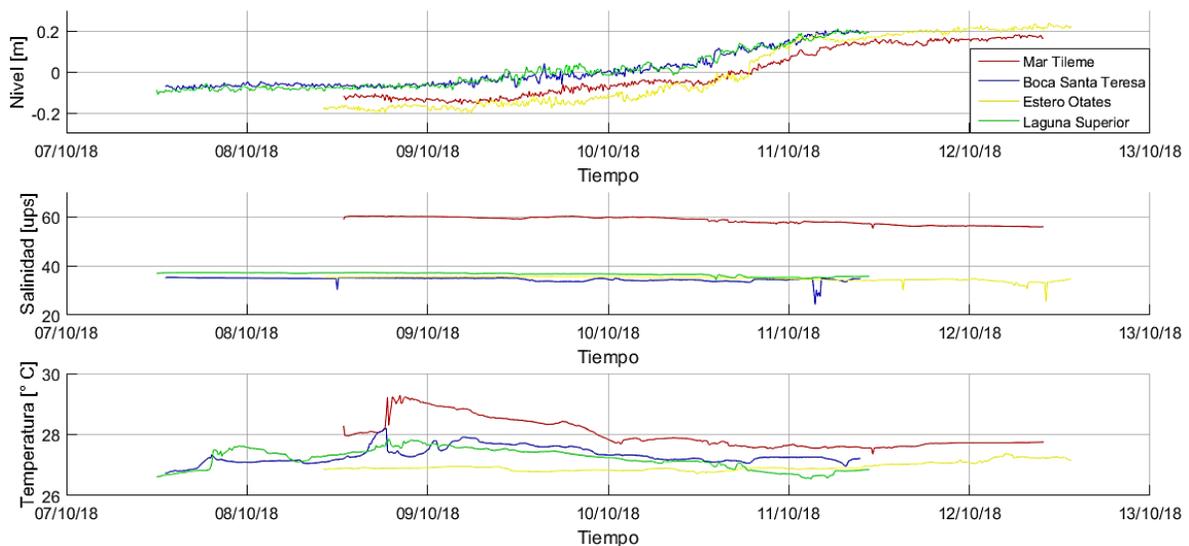


Fig 36. Mediciones de CTDs en las diferentes localidades del SLH (ver Fig 35.) durante la campaña de campo (octubre, 2018).

Las variables meteorológicas durante la campaña de campo (Fig 37.) mostraron oscilaciones diurnas en la temperatura del aire y la radiación solar, aumentando con el día y disminuyendo durante la noche. Se observa también una disminución en los valores de ambas variables a partir del día 9 y hasta el 11, que se reflejan en la pérdida del incremento térmico diurno, manteniéndose a una temperatura relativamente constante inferior a los 25° C; esto se relaciona directamente con la nubosidad asociada (antes y después) al periodo de lluvia, el cual tuvo como máximo 220 mm durante el día 10 de octubre.

Los cambios más drásticos de temperatura ocurrieron en el Mar Tileme, hecho que se relaciona con ser la zona de mayor confinamiento y menor flujo con otras partes de la laguna, además posee la mayor relación de perímetro/área lo que lo hace tener una mayor zona de contacto con la costa, la cual tiene un calor específico mayor al agua por lo que sus cambios térmicos son más variables en función de la temperatura atmosférica, haciendo que el Mar Tileme por conducción tenga variaciones térmicas mayores en comparación al resto del sistema lagunar (Bigg, 2003). Por otro lado, en el Estero Ostates el continuo flujo de agua proveniente de un subsistema externo como lo es el río Ostuta (principal descarga continental al Estero) genera una temperatura más constante y menor respecto al resto del SLH, como se muestra en la figura 36.

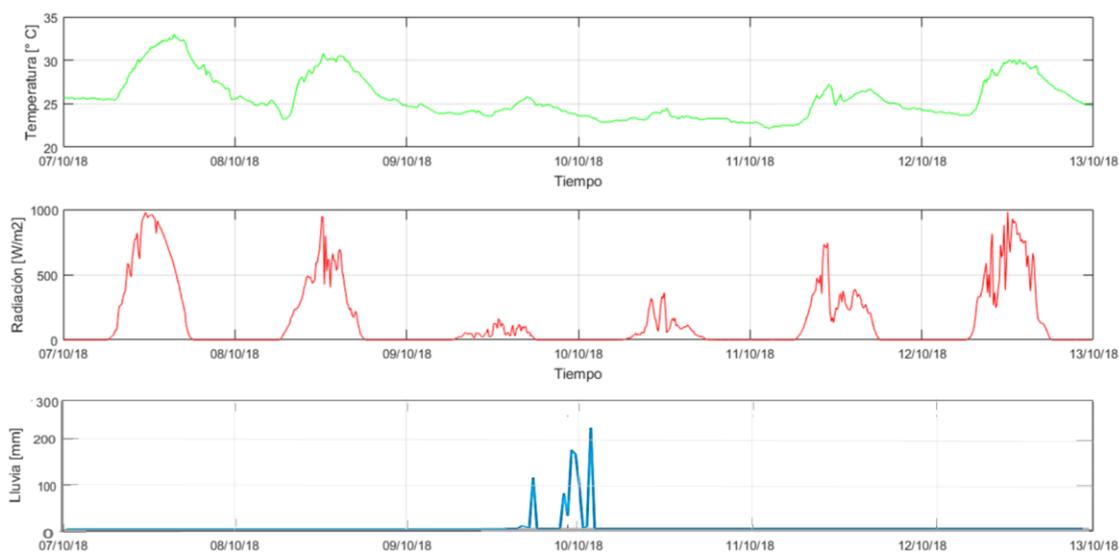


Fig 37. Datos meteorológicos medidos en la localidad de San Dionisio durante la campaña de campo.

Por otro lado, los cambios en el nivel del agua y salinidad se relacionan de manera directa con los eventos de lluvia durante ese período de tiempo, pues al ingresar agua dulce esto disminuye la concentración de sales, mientras incrementa el volumen de agua en el sistema lagunar (Arroyo H., 1981). En particular el nivel del agua muestra la tendencia de incremento, no sólo durante el periodo de lluvia sino también posterior a este. Esto es consecuencia tanto de la entrada de agua atmosférica, como de las descargas continentales, las cuales incrementan su cauce y tardan días en restaurarlo, debido a los aportes que tienen por diferentes tributarios que drenan la cuenca hidrológica (CONAGUA, 2008).

Por último, es importante señalar que las salinidades presentadas en todo el sitio de estudio son considerablemente altas pues poseen una salinidad marina sin embargo, el sistema posee una limitada o nula conexión con el mar (Brown, Colling, Park, & Phillips, 2004). Esto puede ser consecuencia del proceso de evaporación incrementado por la dinámica eólica, debido al arrastre de agua en la capa superior consecuencia de la fricción eólica, (Kjerfve, 1994) principalmente en la temporada de secas, la cual coincide temporalmente con la época de nortes (López-Yllescas, 2014); además de que dicha salinidad puede incrementarse con el aporte de sedimentos transportados por el viento (Fernandes, 2001).

6.1.2. Índices climáticos: ENSO

Para la determinación de las fases ENSO, se tomó el criterio de $MEI < -1$ y $SOI > 1$ para Niña y $MEI > 1$ y $SOI < -1$ para Niño. Todos los valores intermedios corresponden a la fase Normal (NOAA, 2006).

Los valores de ambos índices para un período de casi 70 años (desde 1950 al presente) se presentan en la Fig 38. Durante estos años, se puede observar que no existe una periodicidad muy establecida entre los eventos y que no siempre fluctúan alternando los fenómenos de Niño – Normal – Niña. En contraste, parece haber períodos en los que la oscilación es entre Normal y Niño, como ocurre durante los 80s y los 90s, mientras que en los 50s y los 70s parecieran dominar las oscilaciones entre Normal y Niña.

Los meses con mayores efectos de ENSO fueron, para Niño: marzo de 1983 con MEI=3.008 y febrero del mismo año con SOI=-3.4619; mientras que la fase Niña, fue mayor en el mes de junio de los años 1955, con MEI=-2.2471 y 1950, con SOI=3.06.

Dado que, como se ha mencionado anteriormente, este fenómeno tiene incidencia en distintos forzantes, como la lluvia, el viento y las descargas de río (Dijkstra , 2006), el resultado de esta recopilación de información se utilizó para seleccionar las fechas de recopilación de datos que permitieran considerar la variabilidad de esos forzantes en el sitio de estudio durante la modelación numérica.

Si bien el comportamiento de los índices MEI y SOI no es exactamente igual, sí es muy parecido debido a que caracterizan el mismo fenómeno desde diferentes enfoques (NOAA, 2018), por lo que, para la modelación, tomando en cuenta a ambos índices (Fig 38), se seleccionaron un año de cada caso para comprobar y caracterizar los cambios del ENSO en los forzadores descritos en la literatura. Las fechas seleccionadas para representar a cada uno de los tipos de ENSO son los períodos más recientes, períodos cuya duración sea cercana o mayor a un año teniendo características de Niño, Niña o Normal de forma consistente. Los años que se eligieron no corresponden a un año de calendario desde enero a diciembre, pero constituyen un año completo cuyas temporalidades son:

- Niña: periodo junio 2010 a junio 2011
- Niño: junio 2015-junio 2016
- Normal: el año del trabajo de campo, acomodado de junio a junio (2018), para ello se recortó la segunda mitad del año y se acomodó al inicio de la serie de tiempo.

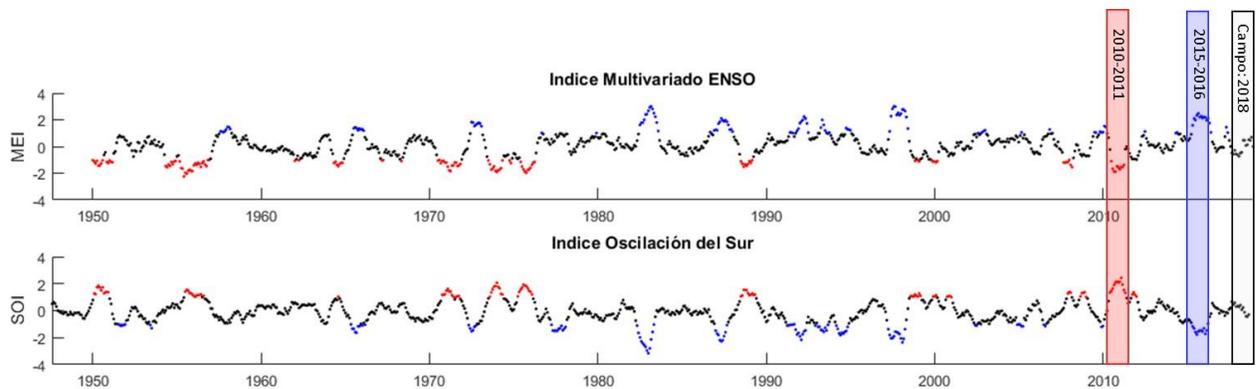


Fig 38. Recopilación histórica de los índices climáticos MEI y SOI de las fases ENSO (Rojo-Niña, Negro-Normal, Azul-Niño) (NOAA, Physical Sciences Laboratory, 2018). También se señalan los periodos de las fases ENSO más cercanas a la campaña de campo.

6.2. Forzadores de la hidrodinámica en el SLH

6.2.1. Atmosféricos: Viento

Los vientos en la zona de estudio durante la campaña de campo (Fig 39), tienen dirección predominante desde el noroeste (hacia el sureste). Estas direcciones son esperadas (Barton, 1993), ya que la campaña de mediciones fue en octubre, cuando recién comienza la temporada de nortes. Las velocidades del viento tuvieron una variación entre 0.3 y 6.57 m/s, cuyo máximo se alcanzó el 09 de octubre, un día antes del periodo de lluvia, y hubo una disminución del viento una vez comenzada la misma.

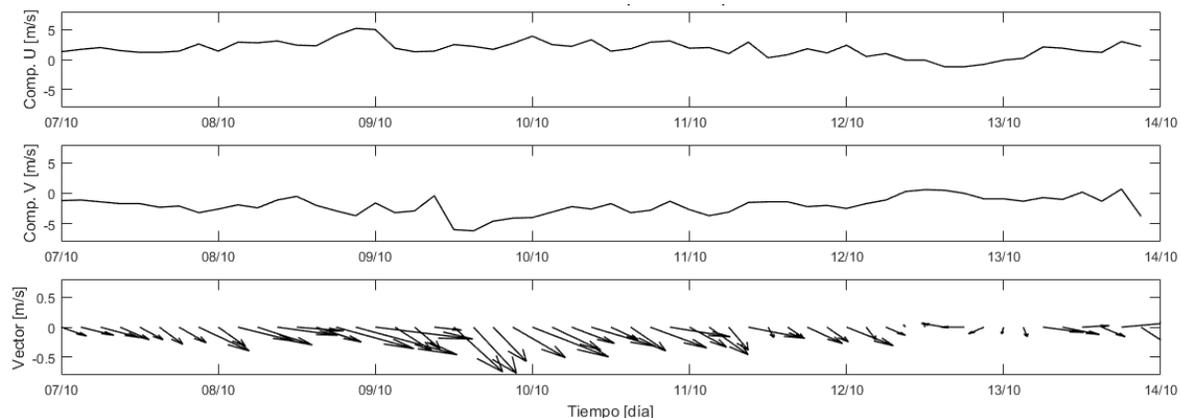


Fig 39. Series de tiempo: Velocidad de viento durante la campaña de campo (NOAA, 2006).

El análisis de viento anual, y el efecto del ENSO se tomó de Romero Centeno (2003). Cuya principal aportación a la presente tesis, es que señala que existen tres casos para los vientos del norte en el Istmo de Tehuantepec a partir de la diferencia de presión atmosférica (la cual es proporcional a la intensidad de los mismos): periodos cuando son altamente probables, muy improbables y periodos de transición. Además, los vientos tienen una fuerte señal estacional, con máximos en invierno y mínimos en verano, con un máximo relativo en julio que coincide con el mínimo de verano del ciclo anual de precipitación en la parte sur de México.

Lo anterior sugiere que existe una relación entre la frecuencia de los vientos del norte en verano y la precipitación en el sur de México. Además, ese trabajo sustenta las investigaciones previas de Schultz (1998), quienes descubrieron que la cantidad de frentes fríos en invierno incrementa en años Niño y disminuye en años tipo Niña (Fig 40).

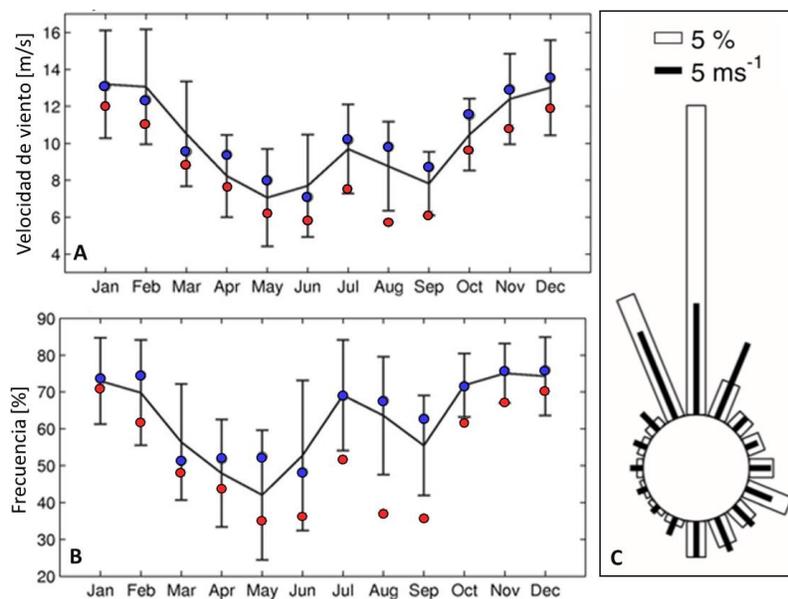


Fig 40. Análisis de viento del Istmo de Tehuantepec (localidad: la Venta) y su efecto debido al ENSO. A) Velocidad de viento, B) Frecuencia en los eventos de norte para ese mes. *Línea-Normal, Rojo-Niña, Azul-Niño, barras sobre la línea-variación de datos.* C) Dirección del viento a través del año. *líneas negras-promedio, barra blanca-variación de datos.*

Diagrama obtenido de Romero Centeno, 2003.

6.2.2. Continentales: Descargas de ríos

Debido a la falta de mediciones *in situ* de las descargas continentales, se analizó el comportamiento histórico en el mes de octubre (CONAGUA, 2019) para las diferentes fases ENSO. Los resultados del análisis muestran que todos los ríos tienen la mayor descarga promedio en la fase Niña y la menor en la fase Niño (Fig 41.). Más aún, la diferencia en las descargas entre fases es proporcional al tamaño de la descarga, siendo el río Ostuta el de mayor tamaño, seguido del Chicapa, Ixtepec y finalmente Niltepec. Al considerar la suma de descargas en la zona norte (Chicapa e Ixtepec) y la de la zona sur (Ostuta y Niltepec), se destaca una mayor entrada de agua continental en la parte sur, específicamente en el sureste del SLH (como se muestra en el mapa de la Fig. 41).

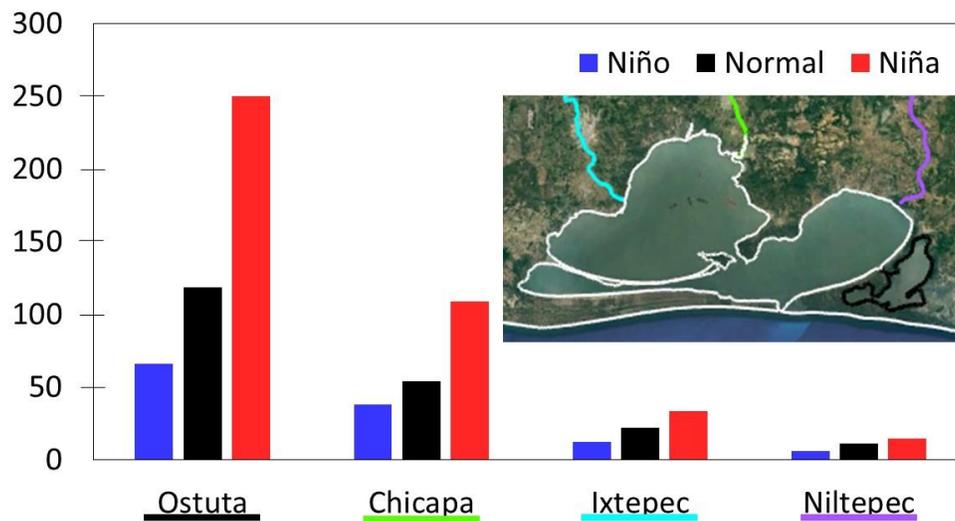


Fig 41. Promedios históricos de las descargas máximas de octubre (de 1947 a 2014 en los ríos del SLH (CONAGUA, 2019).

Respecto a la variabilidad anual de las descargas continentales y el efecto ENSO (Fig 42.) Se encontró que los valores mínimos hasta nulos ocurren de diciembre a mayo, mientras que de junio a noviembre se encuentran las mayores descargas, cuyo máximo se alcanza en septiembre; esto coincide con el ciclo anual de precipitación en la parte sur de México, que tiene valores máximos durante junio y septiembre-octubre y un mínimo relativo durante julio y agosto (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003). También se encontró que, de manera general, las menores descargas ocurren durante

los años Niño, mientras que los valores entre las fases Normal y Niña oscilan cercanos al mismo intervalo.

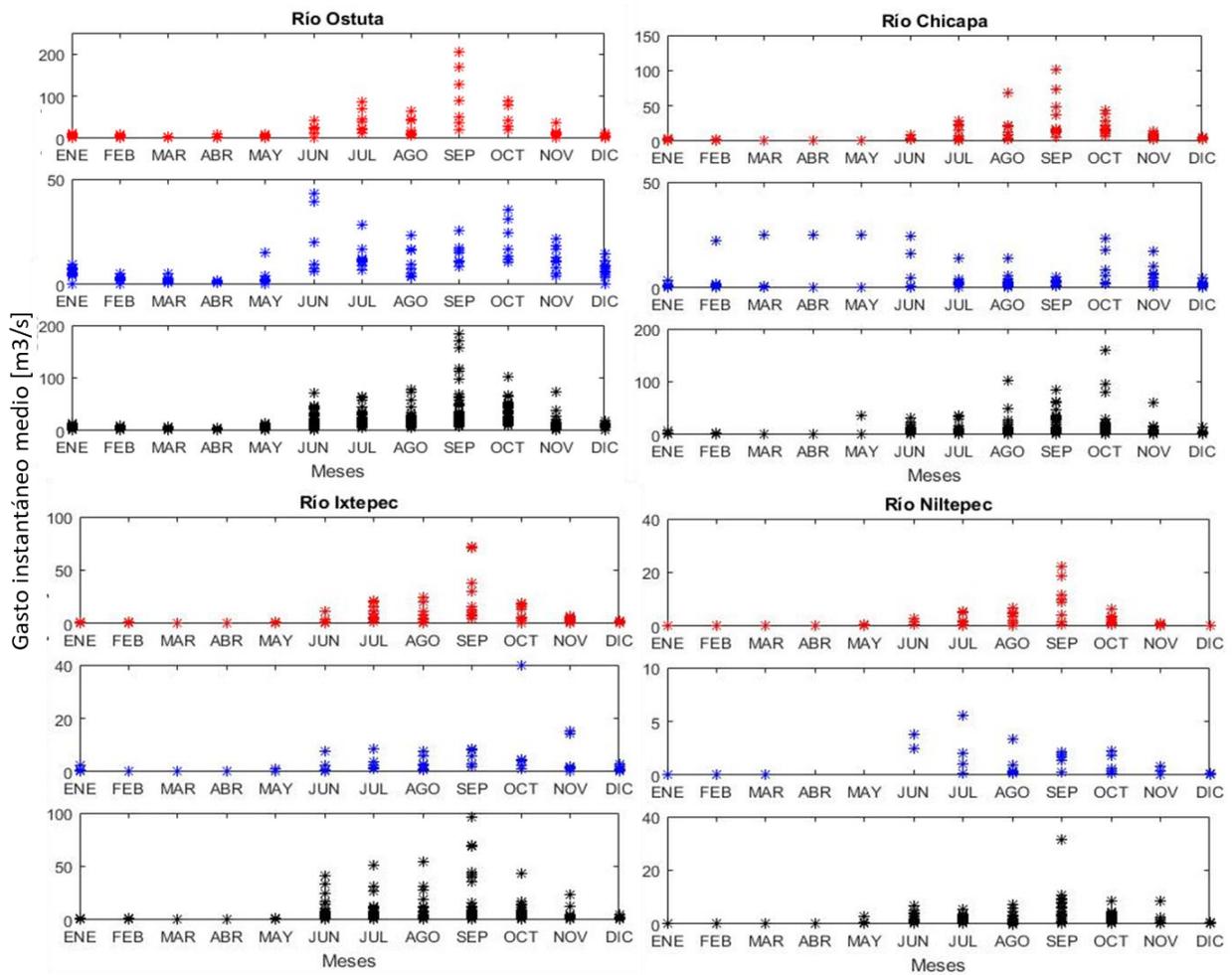


Fig 42. Variabilidad anual en las diferentes etapas ENSO (Niña-rojo, Niño-azul y Normal-negro) del gasto instantáneo medio de los ríos del SLH: Ostuta, Chicapa, Ixtepec y Niltepec (CONAGUA, 2019).

Tabla 12. Máximos y promedios históricos registrados de los gastos de los diferentes ríos en el SLH (CONAGUA, 2019).

Río	Máximo gasto registrado						Promedio histórico
	Fecha	MEI	SOI	ENSO	Gasto max [m3/s]	Gasto promedio del mes [m3/s]	Gasto promedio del mes [m3/s]
Ostuta	1980-09	0.263	-0.54	Normal	3171	170.08	51.9
Chicapa	1996-10	-0.97	0.26	Normal	2455	158.51	16.6
Ixtepec	1978-09	-0.391	0.06	Normal	1625	39.90	4.0
Niltepec	1979-09	0.759	0.11	Normal	479	31.40	1.1

Respecto a que las fases Normal y Niña oscilaron en un intervalo cercano en cada río, se asocia a que si bien la fase Niña se caracteriza por modificar los patrones de precipitación, aumentándolos en el Istmo de Tehuantepec (Magaña, Vázquez, & Pérez , 2003), la cantidad de datos registrados para la fase Normal supera notablemente a la fase Niña, debido a su mayor periodicidad. Misma razón por la cual los valores máximos históricos de gastos registrados (Tabla 12) en su mayoría se encuentran en años Normales, mostrándonos que estos no se encuentran relacionados a la fase al ENSO, sino que se asocian directamente a la estacionalidad, pues en su mayoría los máximos fueron obtenidos durante septiembre (Figura 42). De igual modo, es importante señalar la diferencia entre los valores máximos de un mes y su valor promedio, ya que esos últimos llegan a ser mucho menores, pero hay cambios significativos que pueden tener estas descargas dentro del mismo mes. Así mismo, los valores promedio históricos utilizados en el estudio de modelación de este trabajo son considerablemente pequeños, debido a que corresponden al periodo de secas donde la mayoría de los cauces son cercanos a cero.

6.2.3. Oceánicos: Marea y corrientes

Esta sección describe los datos obtenidos del modelo de reanálisis HYCOM de un período de un año en cada uno de los tres casos: Niña, Niño y Normal.

Las variaciones del nivel del mar en los años seleccionados (Fig 43.) muestran tres momentos diferentes: (1) un incremento general de mayo a septiembre, (2) de septiembre a enero un comportamiento diferenciado según la fase ENSO, manteniendo el nivel del agua en Niño, en menor grado Normal y disminuyéndose en la fase Niña, y (3) un momento de bajo nivel y menor amplitud en las oscilaciones en los tres casos de enero a abril. De los tres casos, el año Niño tiene el nivel más alto prácticamente todo el año, seguido por el año normal y el año Niña tiene el menor nivel. Para los años seleccionados los niveles se invierten de marzo a junio, con un mayor nivel en Niña y menor en Niño.

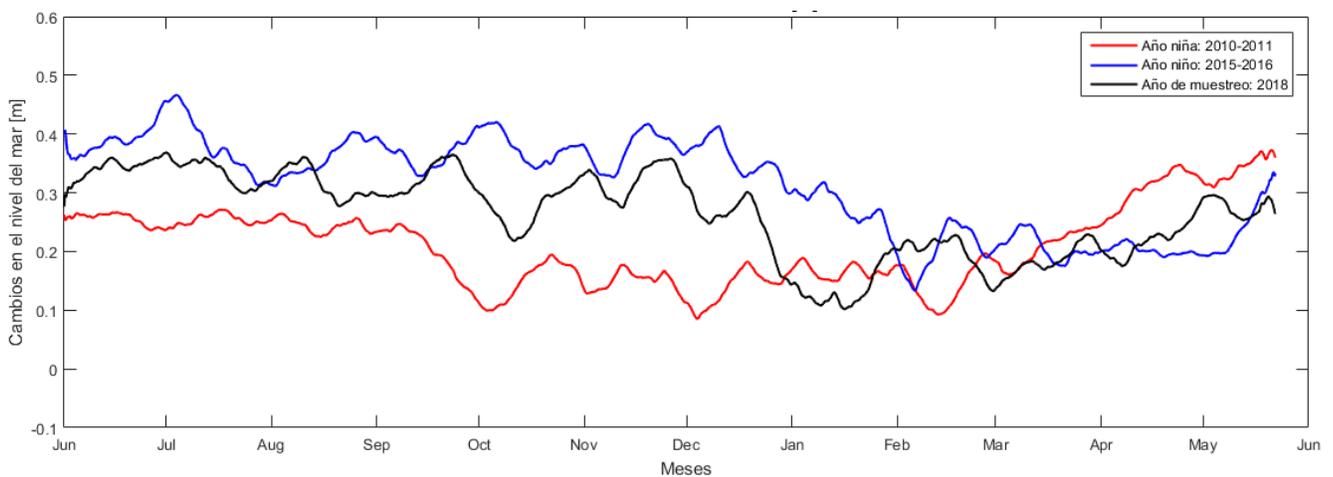


Fig 43. Serie de tiempo anual del nivel del mar en años con diferente fase ENSO seleccionados para este trabajo. Los datos son del modelo HYCOM (HYCOM, 2018).

Respecto al comportamiento de las corrientes marinas, se analizaron los cambios de velocidad y dirección de las corrientes en las fronteras este y oeste del dominio que se generó para este estudio de modelación (Fig 44.).

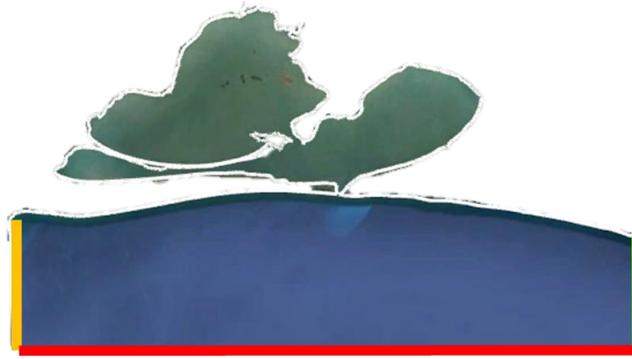


Fig 44. Localización de fronteras abiertas en el modelo del SLH:
amarillo-oeste, rojo-sur y verde-este.

La Fig 45. muestra las series de tiempo de las corrientes en ambas fronteras durante los años Niña, Niño y Normal seleccionados. De manera general se observó en la frontera oeste mayor magnitud en las velocidades de la corriente.

La principal diferencia entre los años seleccionados es la duración del período de corrientes predominantes del norte hacia el sur en la frontera Oeste, que en el año normal fue muy corta ocurriendo casi únicamente en Enero y parte de Diciembre; durante el año Niña las corrientes hacia el sur fueron muy intensas y ocurrieron desde septiembre hasta Marzo; y durante el año Niño fueron de menor intensidad y en el período de Junio a Diciembre, con algunos eventos menores y de corta duración en Enero y Febrero. Las corrientes en la frontera Este son muy distintas a las de la frontera Oeste durante los años Niña y Niño, pero bastante similares durante el año Normal. También se observa una dirección dominante hacia el norte (es decir a la costa) en el periodo de marzo a junio, mientras que de octubre a marzo por el contrario el movimiento se da desde el norte, es decir hacia el sur.

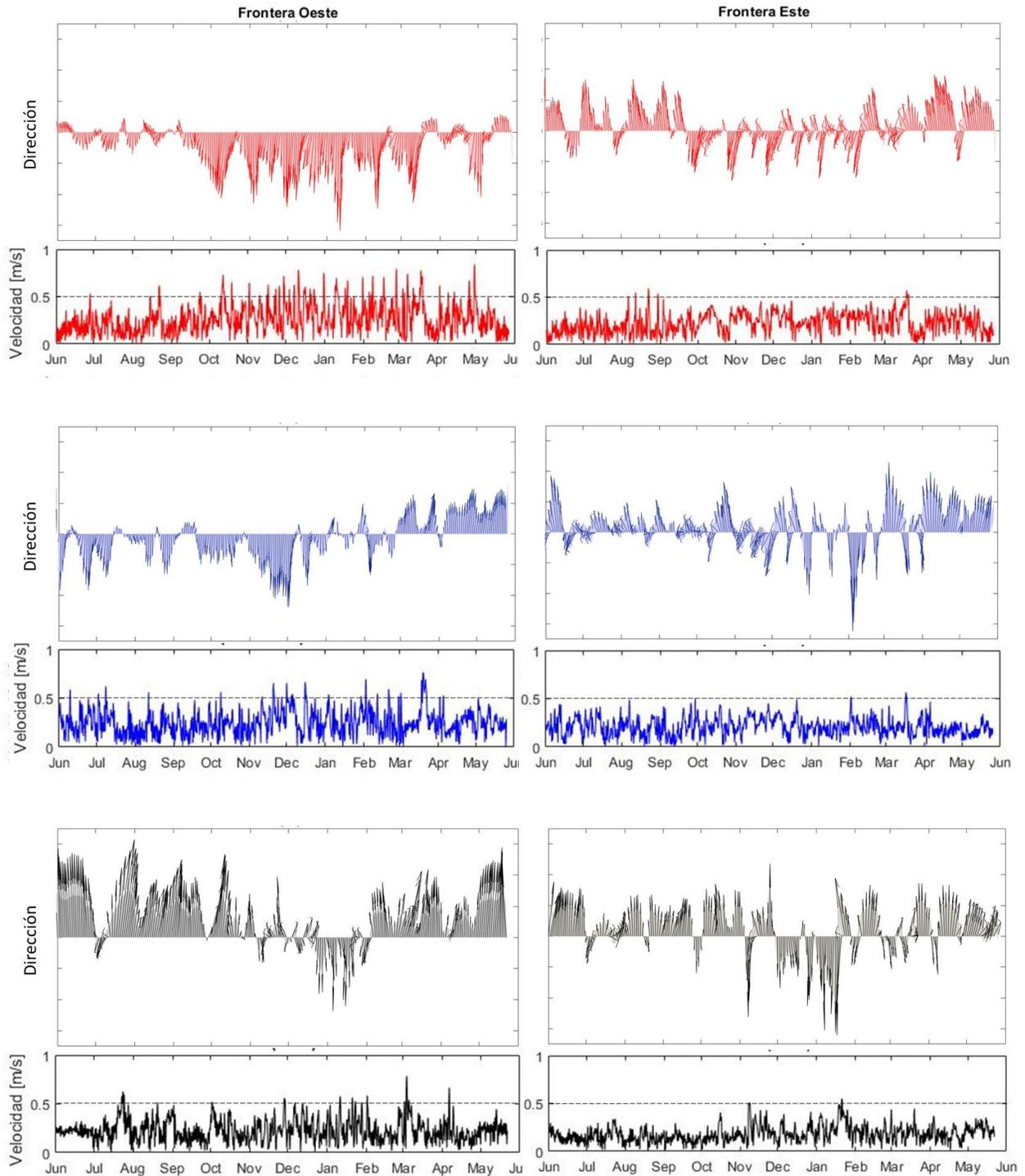


Fig 45. Variación estacional de la velocidad de corrientes en las fronteras oeste y este, en los años seleccionados con diferente fase ENSO: 2010/2011 Niña (rojo), 2015/2016 Niño (azul), 2018 Normal (negro). Los datos fueron recopilados del modelo HYCOM (HYCOM, 2018).

El nivel del mar resulta de la suma de muchos procesos que actúan simultáneamente. Los dos principales son el viento, apilando el agua contra una barrera impermeable (continente) o disminuyendo el nivel al alejar el agua del sitio donde está soplando, y la presión atmosférica generando elevaciones o disminuciones del nivel del agua por efecto de barómetro inverso (Trasviña, 1995). Pero también el efecto acumulado de oleaje puede generar una elevación del nivel del mar, como ocurre con eventos de oleaje de tormentas lejanas o *swell*, llamado localmente “mar de fondo”, que se presenta en las costas del suroeste de México y eleva el nivel del mar de mayo a junio (Enríquez, Papiol, & Chiappa-C, 2017).

Como se ha mencionado, durante la temporada invernal la región se caracteriza por la presencia de los vientos Tehuanos responsables de una surgencia estacional (Ortega & Trigueros, 2000); dicha surgencia es provocada por la disminución en el nivel del mar que generan los vientos intensos empujando el agua en dirección costafuera. En periodos Niño estos vientos son mayores y en años Niña suelen no ser lo suficientemente fuertes para generar un levantamiento de las masas de agua frías (Ocampo Torres, 2011). Sin embargo, en períodos Niño, el relajamiento de los vientos Alisios genera que se interrumpa la fuerza que mantiene el desnivel entre el Pacífico occidental y oriental y, en consecuencia, la propagación de una onda Kelvin desde el oeste hacia el este generando una elevación “anormal” en la zona oriental del Pacífico (Brown, Colling, Park, & Phillips, 2004).

Adicionalmente, la cercanía con el continente, y la forma de la línea de costa tienen una influencia muy importante en las corrientes locales.

6.3. Modelación numérica

Los resultados de modelación se abordarán separando las distintas etapas: (1) Pruebas de sensibilidad, (2) Experimentos numéricos. Los resultados de cada una se describen a continuación:

6.3.1. Pruebas de sensibilidad

Para la selección del tamaño de la malla y el paso de tiempo, se tomó como base el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), y posteriormente a los resultados de las modelaciones con distintos pasos de tiempo (dt) sugeridos para las mallas construidas, se calculó la energía cinética total de la malla computacional en cada dt para evaluar la variación de la misma en el tiempo. Estas pruebas se realizaron en mallas de distinta resolución y usando diferentes dt . Para estas pruebas, el modelo parte del reposo (energía cinética total nula en todo el dominio) y es forzado con la boca abierta, armónicos de marea y el viento de la campaña de campo del modelo NARR.

La resolución requerida para los objetivos de este estudio se cumple con todas las mallas, sin embargo, al comparar las mallas 1 y 2, donde esta última es de una mayor resolución que la primera, se obtienen resultados distintos. La malla más refinada (2) genera corrientes más intensas, (Fig. 46) (incrementa su energía cinética a una mayor velocidad que la malla 1), sin embargo, al poco tiempo (2 días), estas convergen. Este resultado nos sugiere que para una malla tan fina como la 2, se requiere un paso de tiempo aún más pequeño, pero finalmente produciría un resultado similar al de la malla 1 sin un cambio significativo en la energía cinética del modelo respecto a ambos tamaños de malla. Por otro lado, la malla 1, que tiene una resolución suficiente para este trabajo, alcanza un equilibrio y converge, mostrando que el modelo es estable.

Dado que el tiempo computacional es considerablemente menor con la malla 1, y que tiene un comportamiento estable y resolución suficiente para el estudio, ésta fue seleccionada.

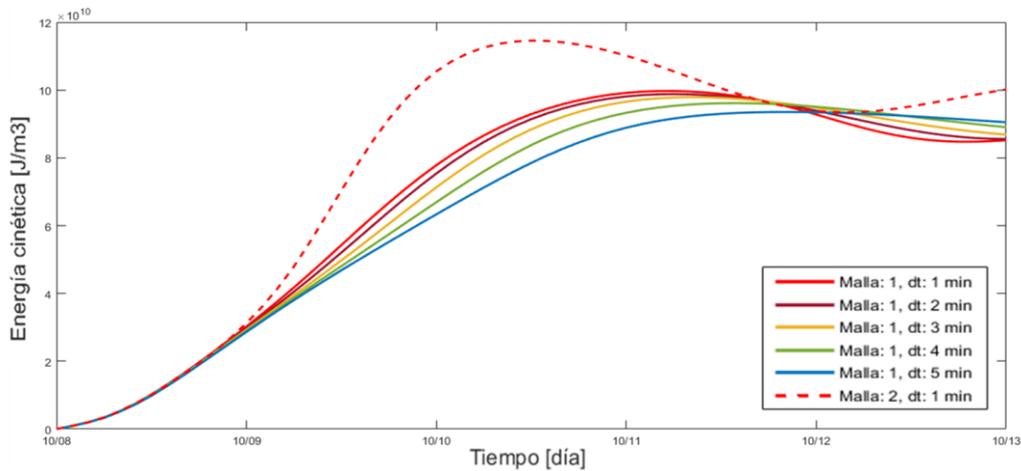


Fig 46. Serie de tiempo de la energía cinética total en toda la malla computacional. Pruebas de sensibilidad tamaño de malla y paso de tiempo.

Respecto al paso de tiempo, se realizó la comparación de los resultados generados con dt desde 1 hasta 5 min para la malla seleccionada (Fig. 46). En todos los casos el modelo con la malla 1 se comporta estable y converge de forma aproximadamente similar. Para proceder a elegir el paso de tiempo óptimo, se realizaron pruebas de modelación, para dt de 1 y 5 minutos en los que se incorporó la influencia de la marea astronómica. Esta prueba permitiría observar la respuesta del modelo a cambios súbitos en las corrientes debido a un forzamiento altamente variable. Los resultados (Fig 47.) muestran convergencia en mayor tiempo que en la prueba anterior, tomándole al modelo un mayor tiempo de corrida para alcanzar una estabilidad. Además, la corrida realizada con un menor paso de tiempo ($dt=1$ min), muestra una mayor estabilidad, menores cambios tiempos iniciales de la modelación y un crecimiento en la energía con períodos semidiurnos más claros. La diferencia en el tiempo de cómputo entre ambas modelaciones no es tan significativa como en el caso de las mallas, por lo que se seleccionó el paso de tiempo de 1 min pues al ser de menor tamaño, se garantiza una mayor precisión en los resultados (Hodges, 2009).

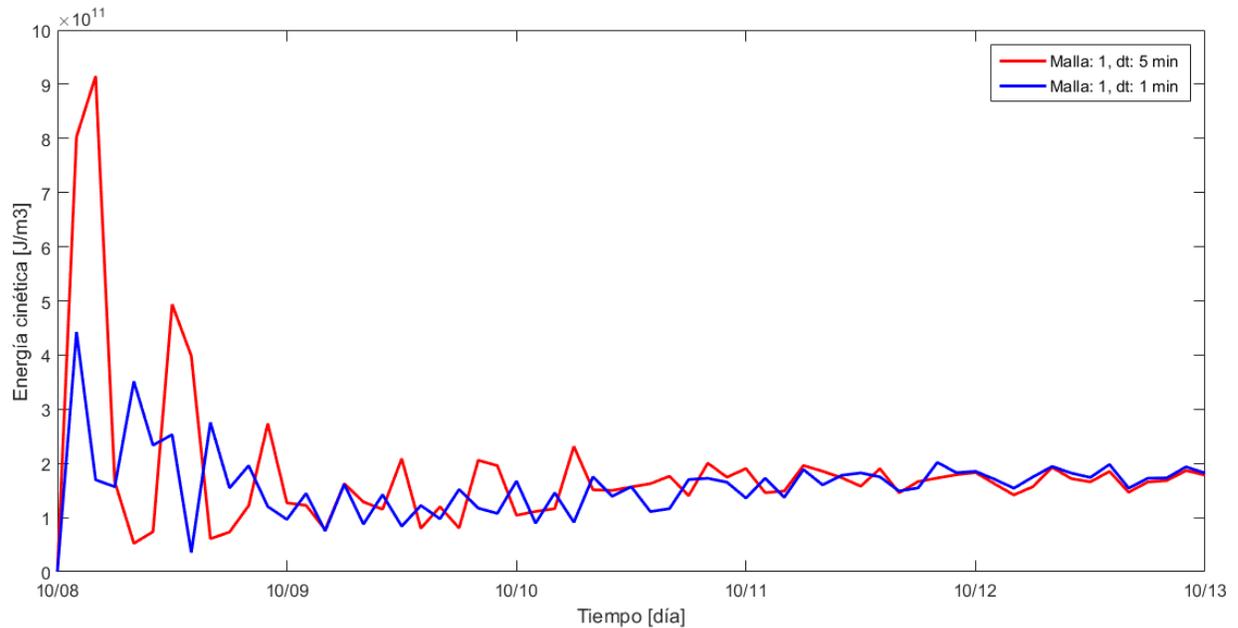


Fig 47. Energía cinética total en el tiempo de los resultados de los experimentos de pruebas de sensibilidad al paso de tiempo (malla 1).

6.3.2. Experimentos numéricos

6.3.2.1. Validación

En la Fig 48. se comparan los niveles de agua medidos *in situ* para los diferentes sitios del SLH, con los resultados obtenidos del modelo numérico en los puntos de observación que se fijaron en la malla numérica en la misma ubicación, para validar el modelo. Los resultados muestran que previo al periodo de lluvia el modelo se ajusta muy bien a la realidad. Sin embargo, posterior al evento de lluvia el modelo subestima los niveles de agua, principalmente en el Estero Ostates; debido a que este es uno de los estudios pioneros en la hidrodinámica del sistema y no se encuentran datos para comparar estos resultados, así como tampoco se reportan mediciones precisas de las descargas continentales para esas fechas, se trabajó sobre estos resultados los cuales si bien funcionan para este estudio, también demuestran las limitantes que se presentan respecto al análisis de datos e investigaciones del sistema lagunar.

Para cuantificar la comparación, se calculó el Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (E) para cada sitio, obteniendo los valores siguientes: $E_{Total} = 0.6422$, $E_{MarTileme} = 0.6704$, $E_{BocaSantaTeresa} = 0.7485$, $E_{EsteroOstates} = 0.6330$, $E_{LagunaSuperior} = 0.5169$. Si bien ninguno de estos valores es ~ 1 para los fines experimentales de esta modelación, los cuales son caracterizar los forzadores y las principales interacciones del sistema, más no modelar escenarios realistas, los valores son aceptables; lo que brinda certidumbre a los experimentos numéricos (Camacho, 2017).

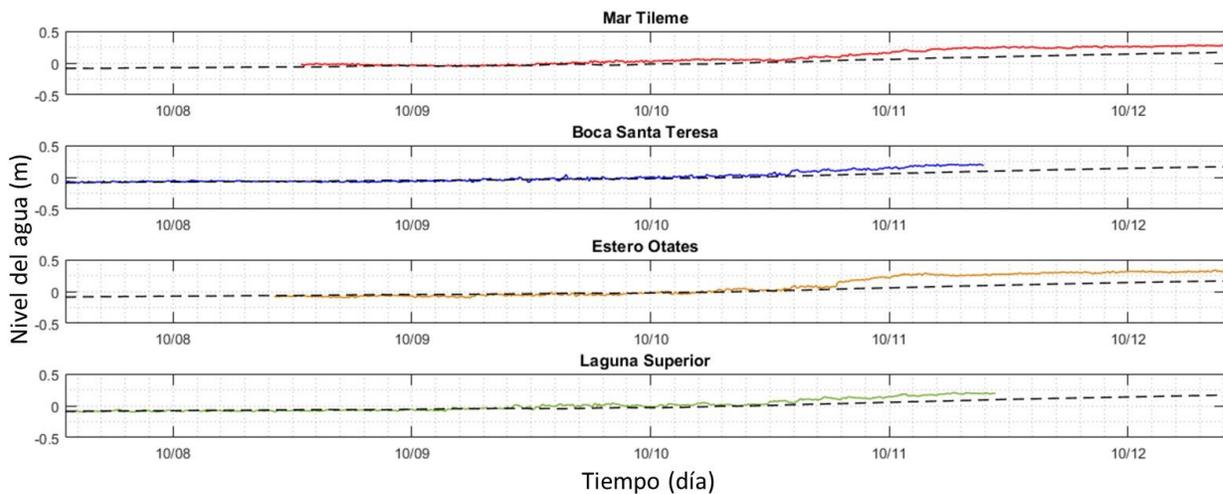


Fig 48. Variación de los niveles de agua observados (línea) y modelados (punteados) en las diferentes localidades del SLH.

Las corrientes residuales son el promedio de las corrientes durante un ciclo de marea. En el caso de estudios de modelación, esto debe calcularse durante un periodo de tiempo en el que el modelo ya se encuentre estable, esto en experimentos con conexión con el mar. Debido a que todos los experimentos se corrieron durante el mismo periodo de tiempo, se usó ese mismo intervalo de tiempo determinado para las corrientes residuales, para calcular los promedios de corrientes en los experimentos sin conexión con el mar, debido a que sus patrones de circulación una vez estables cambian poco en diferencia de aquellos que tienen influencia mareal, este proceso permite realizar la descripción de los patrones de circulación en los diferentes experimentos, así como su comparación (Camacho, 2017).

El patrón de corrientes que se obtuvo en la corrida de la validación del modelo (Fig 49.), muestra, para la mayor parte del SLH, corrientes muy débiles (cercanas a 0 m/s) y alcanzando sus máximos frente a la apertura del Estero Ostates, con una magnitud de 0.2 m/s. La circulación bajo las condiciones de esa modelación (viento realista durante ese período y descargas de río climatológicas mensuales obtenidas de datos históricos), está gobernado por las descargas continentales. Estas tienen mayor influencia en el sureste del sistema, y fluyen hacia el Mar Tileme y con un flujo principal a la Boca de Santa Teresa donde incrementan relativamente su velocidad, consecuencia de la disminución de área, dirigiéndose hacia el norte. Una vez dentro de la laguna Superior el agua se dispersa en diferentes direcciones disminuyendo su velocidad; dentro de esta zona es la fuerza de las otras dos descargas continentales la que complementa el patrón de circulación, con una circulación bien definida en las zonas cercanas a la línea de costa. Por su parte, la fuerza del viento, a menor escala genera un movimiento neto hacia el sur en todo el dominio, lo que contribuye a atenuar las velocidades al encontrarse en dirección opuesta al comportamiento de los ríos. Este es un proceso normal, el cual sucede en otras lagunas dominadas por el viento, como es el caso de la laguna Patoos en Brasil, cuya hidrodinámica fue modelada por Fernandes en 2001.

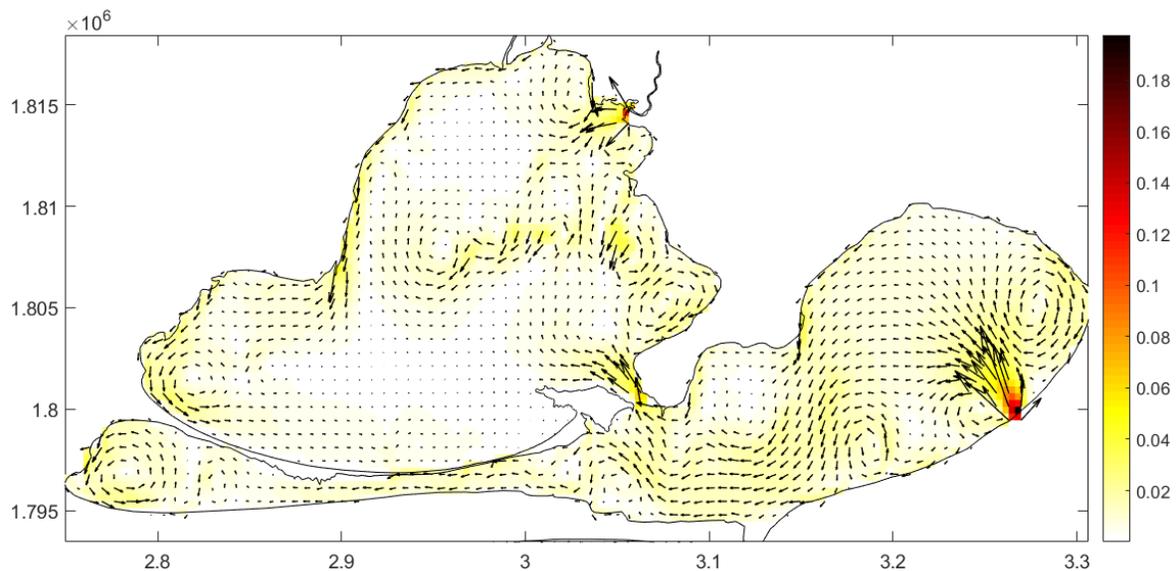


Fig 49. Corrida de Validación. Patrón de corrientes promedio durante un ciclo de marea estable[m/s] de Octubre del 2018. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento

modelo NARR, ríos: valores max. de octubre para años Normales antes de lluvia y valores max. de octubre para años Niña durante y después de lluvia.

Después de diferentes pruebas de validación (12 experimentos) a partir de la variación de las descargas promedio continentales de años Niña y Normal (para asemejar el evento de lluvia), se concluye que los valores climáticos de las descargas continentales con las que se trabajó (que eran las que se encontraron disponibles), no tienen la precisión que se requiere para hacer una modelación de un escenario real de un período particular y más aún si en ese período se presentan eventos anómalos como fue el caso de esas lluvias. En particular para el caso del Estero, es importante señalar que únicamente se cuenta con la descarga del Río Otates. Este río no desemboca de manera directa en el SLH, sino en el Estero, el cual por escorrentía tiene una descarga mayor que la del río (CONAGUA, 2008). Por esta razón, es muy probable que estos valores se encuentran subestimados, estas diferencias entre los valores obtenidos en el modelo y los CTDs se mostraron previamente en la Figura 48. Si fuera el caso, para replicar el comportamiento de las observaciones se procedería a incrementar paulatinamente los niveles de descarga de ríos hasta que el modelo se comporte de acuerdo con las observaciones, con lo que se tendría una idea del volumen de descarga. Sin embargo, al no ser el objetivo de este trabajo, se determina que, para un estudio de los efectos de los distintos forzantes en la hidrodinámica (mareas, ríos y viento), el modelo se comporta adecuadamente y se considera válido, según los criterios descritos en Hodges, 2009. No obstante, se recomienda que para estudios numéricos de escenarios realistas sería importante incluir series temporales de las descargas de río en lugar de datos climáticos.

6.3.2.2. Experimentos Control

La descripción del patrón de circulación de validación se entiende con mayor claridad al separar el efecto de los diferentes forzadores. Por lo que el experimento control 1 (Fig 50) incluye únicamente el efecto del viento en los días de campo, mientras que el experimento control 2 (Fig 51) muestra el patrón producido por las descargas

continentales para el mismo periodo de tiempo. Al comparar los mapas, resulta evidente la dominancia de las descargas continentales como forzador inicial no solo por las similitudes con los patrones de validación, sino porque estas descargas poseen las velocidades máximas; lo cual se considera efecto de las condiciones de lluvia durante la campaña de campo.

Sin embargo, también es importante señalar que entre más al interior del SLH nos encontremos el viento cobra una mayor importancia, pues la validación presenta “manchas” o patrones atenuados pero similares a los del Experimento de control 1; esto se atribuye a que es justo en el centro del SLH donde se tiene un menor efecto de las descargas por la distancia que hay a los cauces, además de que el viento tiene una mayor área de contacto con la superficie del agua, lo que le permite generar un arrastre significativo.

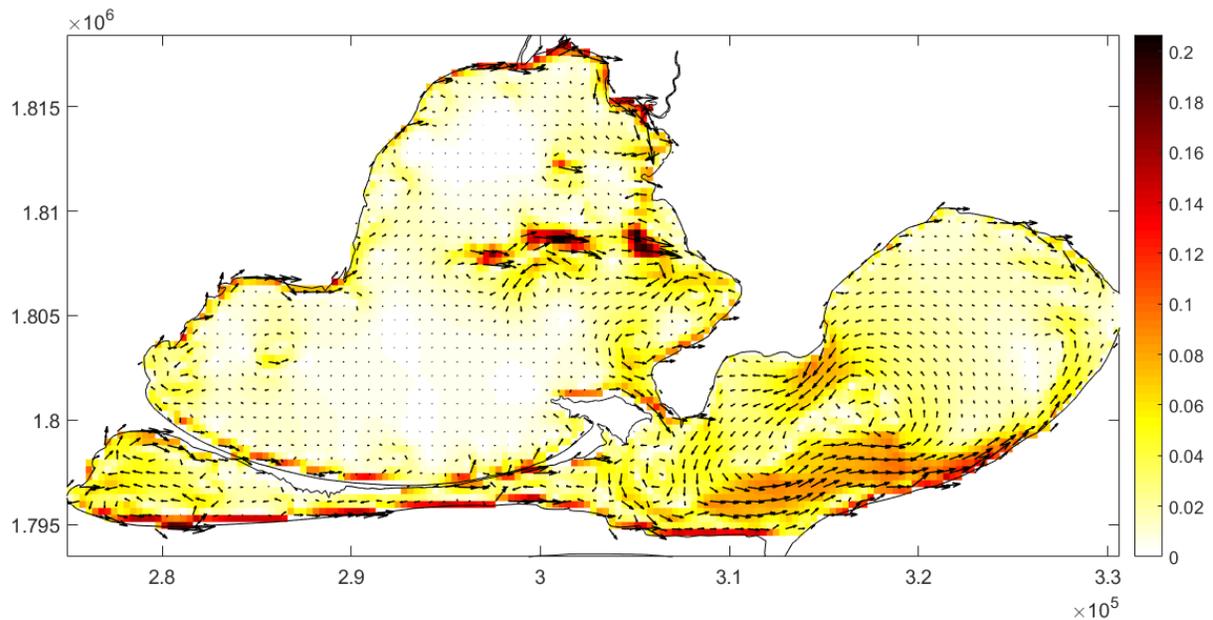


Fig 50. Corrientes promedio durante un ciclo de marea estable [m/s] del experimento C01. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de validación.

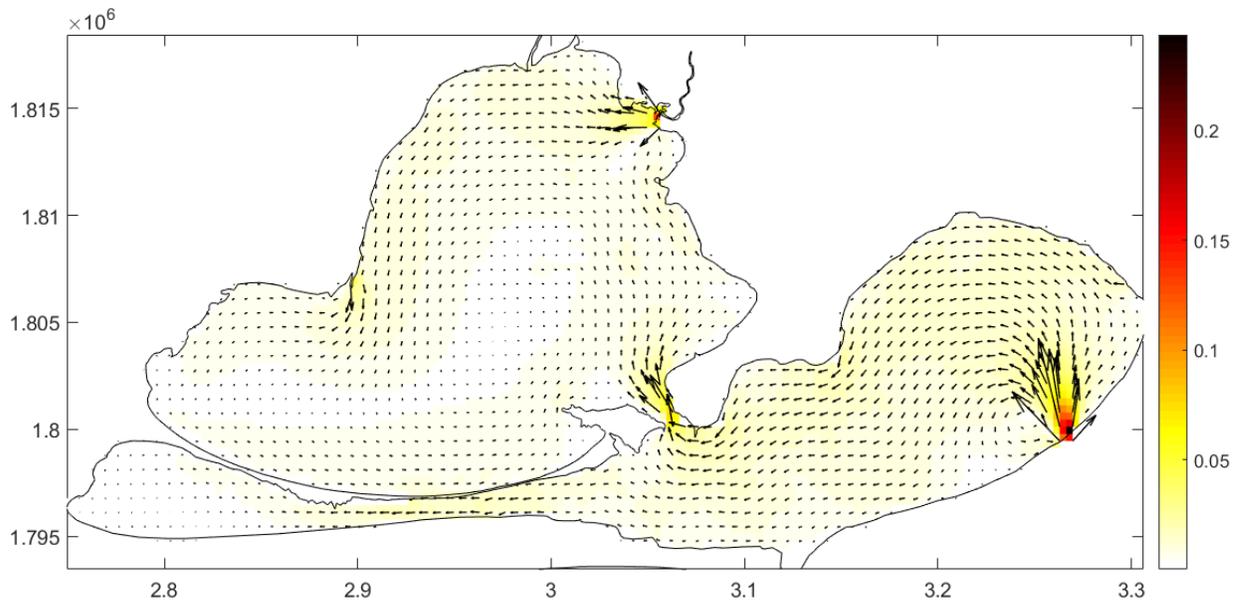


Fig 51. Corrientes promedio durante un ciclo de marea estable [m/s] del experimento C02. Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: ríos de validación

Para tener una primera aproximación del efecto que tendría la reapertura de la Boca de San Francisco para restablecer la comunicación del SLH con el mar, se realizó el exp. control 3, el cual tiene como base la validación, pero incluye la boca abierta. Los resultados de este experimento cambian completamente la dirección residual de las corrientes (la circulación neta que resulta al promediar las corrientes durante un ciclo de marea completo). En este caso, la circulación neta indica un comportamiento preferencial de la laguna Superior a la Boca de Santa Teresa y de ahí salga un flujo de agua a través de la Boca de San Francisco. Las velocidades máximas alcanzadas durante esta modelación incrementan hasta 0.3 m/s, siendo esto 1.5 mayor a las máximas alcanzadas con la boca cerrada.

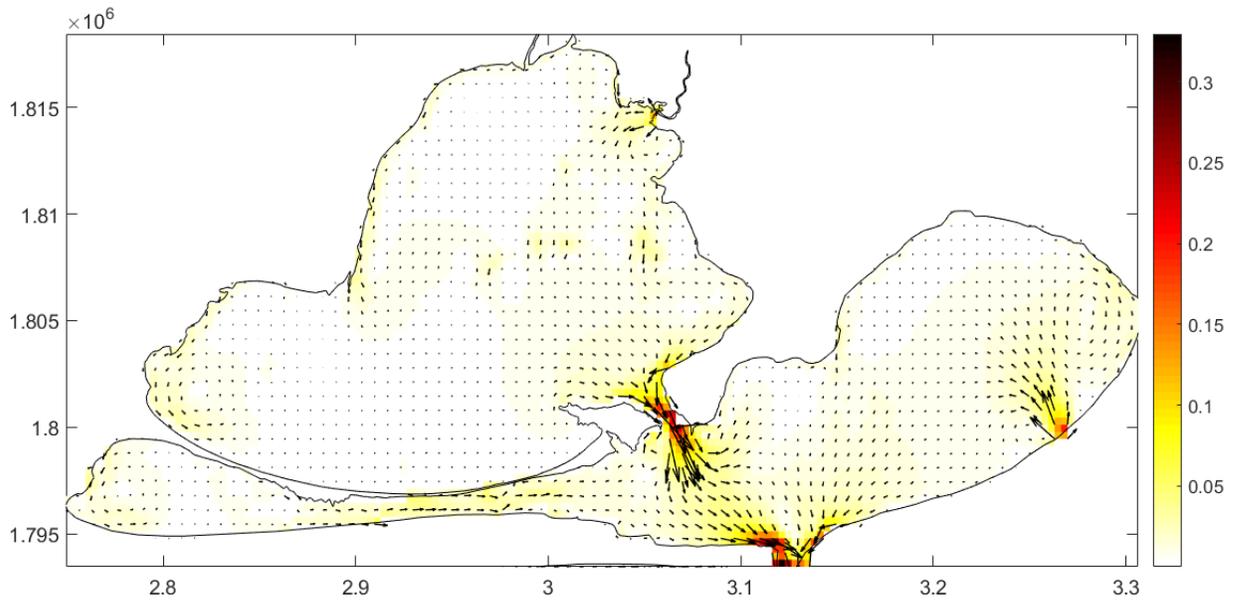


Fig 52. Corrientes residuales [m/s] del experimento C03. Boca: abierta, ENSO: Normal, Forzadores: ríos y viento de validación

Este experimento también sirvió de referencia para apreciar el desfase de la marea, a través de las diferentes localidades del SLH (Fig 53), teniendo como referencia el punto de observación correspondiente al Golfo de Tehuantepec en el mar adenaño. El desfase de marea y disminución de amplitud de la misma se ve incrementado a medida que la onda de marea se adentra en el sistema. El comportamiento del nivel del mar en la Boca de San Francisco es bastante similar al del Golfo, con una disminución de amplitud total de 20 cm y un retraso ~ 30 min. En segundo lugar, el Estero Ostates tiene un retraso de 1.5 h y 35-40 cm de atenuación en la amplitud, la cual es más significativa en los valles. En el mar Tileme el comportamiento del nivel del agua es similar al del Estero, con la diferencia de que la entrada de agua con mayor restricción a esta zona incrementa el tiempo de retraso hasta ~ 4 h. Para la Boca de Santa Teresa la disminución en la amplitud de la onda de marea es mucho mayor (amplitud de 40 cm) respecto a la del Golfo (de aproximadamente 140 cm), lo que representa una disminución de 100 cm y un desfase de ~ 5 h. Por último, la señal de marea en la Laguna Superior, es poco perceptible con una amplitud apenas de 10 cm y un retraso mayor a 6 h.

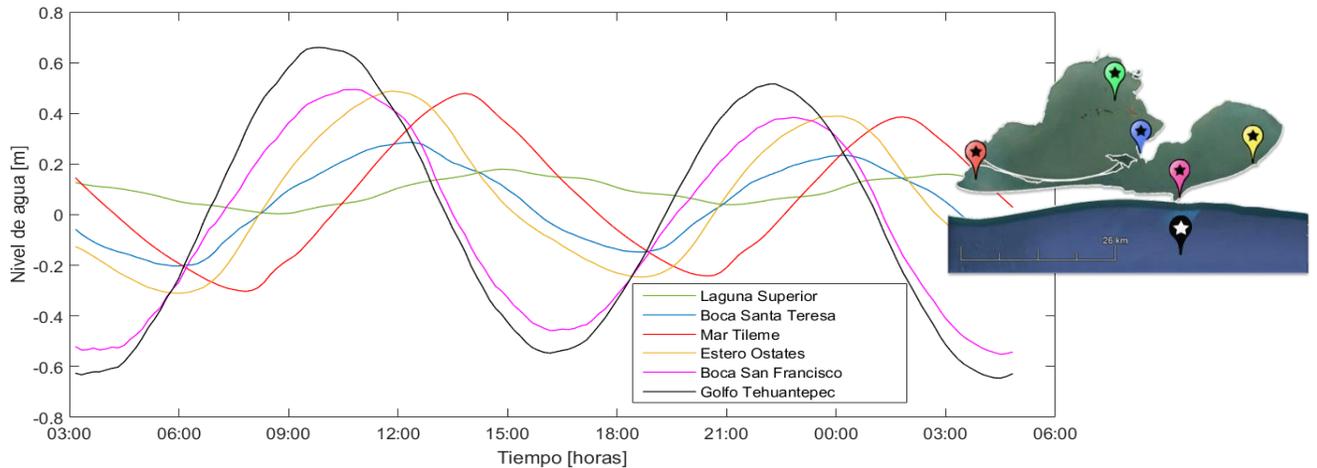


Fig 53. Nivel del agua obtenido en el experimento de validación con boca abierta (C03) en las diferentes localidades del SLH. Laguna Superior (verde), Boca de Santa Teresa (azul), Estero Ostates (amarillo), Mar Tileme (rojo), Boca de San Francisco (rosa), Golfo de Tehuantepec (negro).

6.3.2.3. Efecto de los forzantes de la hidrodinámica

Los resultados de los experimentos de los diferentes factores que modifican la hidrodinámica del SLH se presentan en esta sección a través de las velocidades residuales de todo el dominio que se calcularon en post-proceso. Estas velocidades, son el resultado neto a lo largo de un ciclo completo de marea (flujo y refluj); en el caso de haber tenido la boca cerrada, es decir, no tener un efecto mareal, se consideraron los promedios para el mismo intervalo de tiempo que los experimentos con boca abierta.

Las diferentes condiciones evaluadas que modifican la hidrodinámica del SLH fueron: (1) las temporadas de lluvias (E13) y secas (E12); (2) los eventos de viento norte (E09) y sur (E11); (3) el efecto del ENSO: nortes tipo Niño (E10), lluvias tipo Niña (E16) y Niño (E12); y (4) la conexión con el mar (E01-E08): apertura de la Boca de San Francisco. Las especificaciones de los experimentos se enlistan en la Tabla 11. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada una de ellas:

6.3.2.3.1. Temporada de lluvias y secas

Los cambios en la precipitación dentro del SLH, son muy marcados dentro del año con dos temporadas: secas, durante los meses de diciembre a mayo, coincidiendo con el incremento de los vientos del norte; y lluvias de junio a noviembre, con un máximo de descargas continentales en septiembre. En esta última el comportamiento del viento varía no solo en magnitud, sino en dirección, dentro de las etapas ENSO. La variación de los vientos del Istmo cuando no hay Nortes es demasiado alta, sin un patrón definido. Por ello, en el presente trabajo sólo se implementó un escenario de lluvias con los datos que corresponden a una condición de ENSO normal. Sin embargo, más adelante se presentará la comparación entre los cauces de las descargas respecto al ENSO, sin incluir el efecto del viento.

Tabla 13. Variabilidad de los vientos la temporada de máximas descargas (septiembre) en los distintos escenarios de ENSO (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003)

ENSO	Frecuencia de vientos del Norte [%]	Velocidad de viento [m/s]
Niño	70	9
Normal	60	8
Niña	40	6.5

Los patrones de circulación obtenidos a partir de los escenarios de secas (Fig 54) y lluvias (Fig 55), se muestran con la boca cerrada para percibir los cambios a partir de la estacionalidad. Los patrones generados con la boca abierta mantienen un comportamiento similar, salvo por el flujo de salida neto y las velocidades máximas encontradas en la Boca de Santa Teresa. La circulación para ambos escenarios es notablemente dominada por el viento, generando mayores velocidades en la costa y bancos de arena en la parte central de la laguna Superior. La única diferencia en la circulación, que además es muy pequeña, se encuentra en los sitios de descargas

continentales, particularmente en la zona del Estero Ostates que es la localidad en la que se registran las velocidades residuales máximas del periodo de lluvia.

Las velocidades máximas residuales (Tabla 14) señalan que mientras el SLH no cuente con conexión con el mar, se tendrá una mayor circulación en la temporada de secas. Esto sería poco probable en otros sistemas, pero para el SLH, la intensidad del viento durante el periodo invernal se convierte en el factor dominante (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003), independientemente de la precipitación. Sin embargo, una vez abierta la Boca de San Francisco, la temporada de lluvias incrementa notablemente sus velocidades, particularmente en la Boca de Santa Teresa, debido a que el flujo residual cambia de dirección dirigiéndose hacia el mar y la disminución del área en esta zona, aunado al incremento en el volumen de agua del SLH por las descargas continentales, incrementan significativamente su gasto.

Tabla 14. Diferencias de las velocidades residuales máximas [m/s] en los experimentos de lluvias y secas.

	Secas	Lluvias	Diferencias
Boca Cerrada	0.274	0.151	-0.123
Boca Abierta	0.352	0.367	0.015

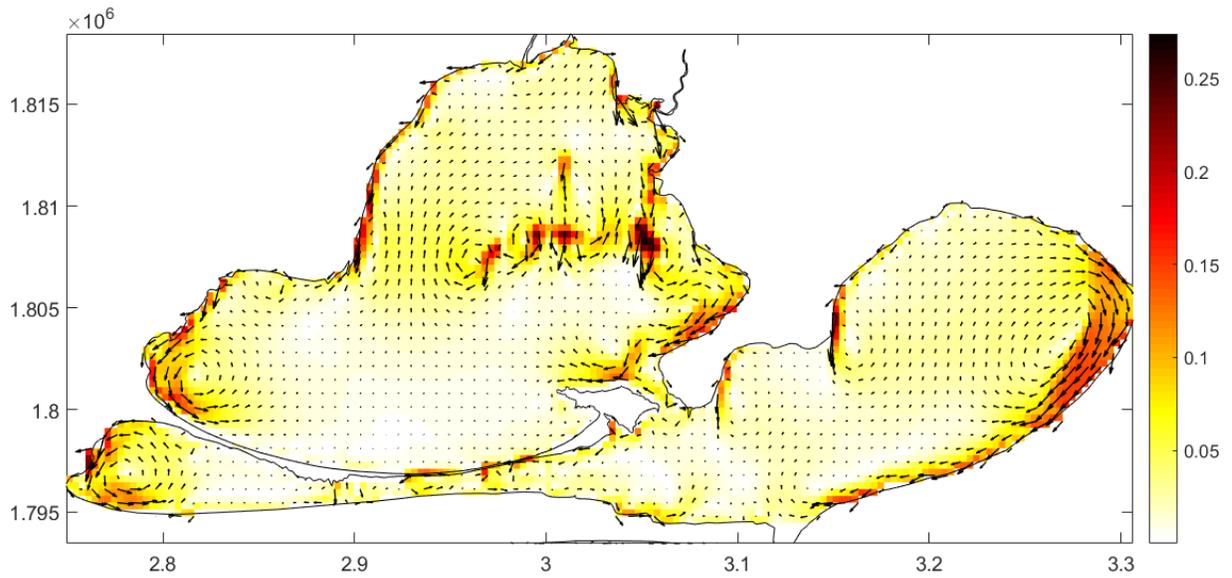


Fig 54. Corrientes residuales [m/s] del experimento E12 (Secas). Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de enero (45km/h, 0°).

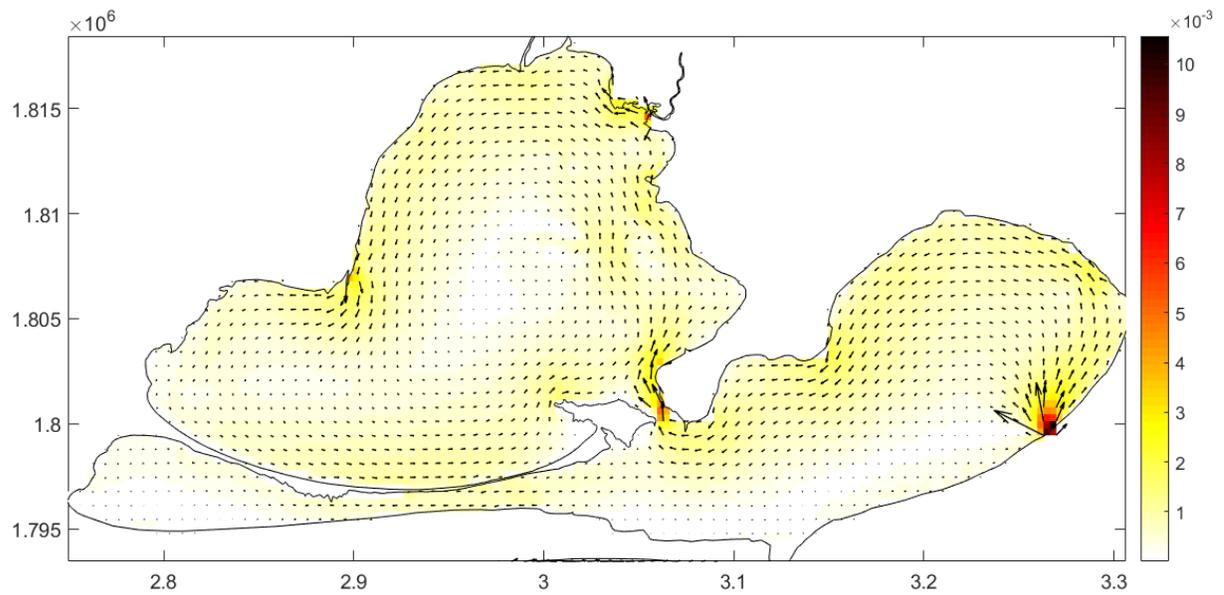


Fig 55. Corrientes residuales [m/s] del experimento E13 (lluvia). Boca: cerrada, ENSO: Normal, Forzadores: viento de septiembre (30km/h, 0°), descarga de ríos normal en lluvia.

6.3.2.3.2. Viento norte y sur

Para observar el efecto de los vientos norte y sur se corrieron experimentos que no tenían influencia de descargas continentales, ni de marea (sin conexión con el mar).

Los resultados del experimento del evento Norte muestran los mismos patrones de circulación que las modelaciones anteriores, las cuales tuvieron vientos en la misma dirección, pero en menor magnitud. Por ello, en este experimento se presentan velocidades residuales mayores, pues intensidad de del viento fue de 100 km/h, que es un valor realista para eventos del Norte en el sitio. La velocidad máxima residual del agua fue de 0.983 m/s, la cual se alcanzó en los extremos inferiores de la costa del SLH, así como en la parte superior de los bancos de arena dentro de la Laguna Superior (Fig 56).



Fig 56. Localización de los bancos de arena dentro del SLH (cuadro rojo).

El experimento de condiciones de viento Sur, generó errores numéricos en la modelación y se inestabilizó, por lo cual no se presentan mapas de circulación. Es importante mencionar que, aunque no se obtuvieron resultados numéricos para presentar mapas de este caso, la causa de la inestabilidad fue un incremento en el nivel del agua en la zona norte que creció de forma extrema superando los límites de error que el modelo permite. Esto nos lleva a sospechar que, al forzar con velocidades de viento realistas para los casos de viento del sur, un modelo como el que se diseñó para este estudio, que no incluye una zona inundable en la región continental, no es adecuado. Las drásticas elevaciones en nivel del agua en la parte norte de la laguna que alcanzaron a generarse previo a que el modelo se estabilizará en un modelo que no permite salidas de agua al

continente generaron una inestabilidad numérica. En la realidad, se generarían inundaciones en la parte norte de la laguna. Esto responde a que el forzamiento local por la tensión del viento que actúa en aguas confinadas, produciendo un transporte a favor del viento directo promedio, independientemente de su dirección. Incrementando los niveles de agua a lo largo de la costa a favor del viento y disminuyéndolos a lo largo de la costa en contra del viento (Fernandes, 2001).

La inundación en la zona continental al norte del sistema se ve incrementada cuando los vientos del sur coinciden con los máximos de descargas continentales (las cuales se localizan en esta zona). Por este motivo se reportan un mayor número de daños en las comunidades aledañas durante los períodos de viento del sur en comparación al de nortes (García Souza, 2017), incluso cuando los vientos del sur no son tan intensos.

6.3.2.3.3. Efecto del ENSO

Para describir la influencia que ejercen las diferentes fases del ENSO en la circulación del SLH, se comparan los cambios en las velocidades residuales a partir del efecto de (1) las descargas promedio en el periodo de lluvia de los años Niño, Normal y Niña; y, (2) los eventos de norte de un año Normal y un año Niño.

Casi no hay diferencias en los patrones espaciales de la circulación de los experimentos de descargas continentales entre las diferentes etapas ENSO. Sin embargo, sí hay diferencia en la intensidad de las corrientes entre los experimentos. La Fig 57. muestra las diferencias entre los resultados de los experimentos de las descargas de la fase Niña, y las de fase Niño. El resultado muestra que las corrientes generadas con el experimento de fase Niña superan en todo el dominio las generadas en la fase Niño, y la diferencia se acentúa frente a las descargas principales: Estero Ostates y Chicapa, así como en la Boca de Santa Teresa.

Para la comparación entre el año Niña contra Normal, y Normal contra Niño, el comportamiento espacial es el mismo, pero en menor magnitud. Las diferencias notorias ocurren en la zona de descarga del río Chicapa y Estero Ostates, al parecer los cambios

en el gasto de los ríos de menor cauce (Niltepec e Ixtepec) no resultan suficientes para modificar las velocidades residuales de esas zonas. El exceso de velocidades del experimento del año Niña en la Boca de Santa Teresa se asocia al incremento en los volúmenes de agua que pasan a través de la zona.

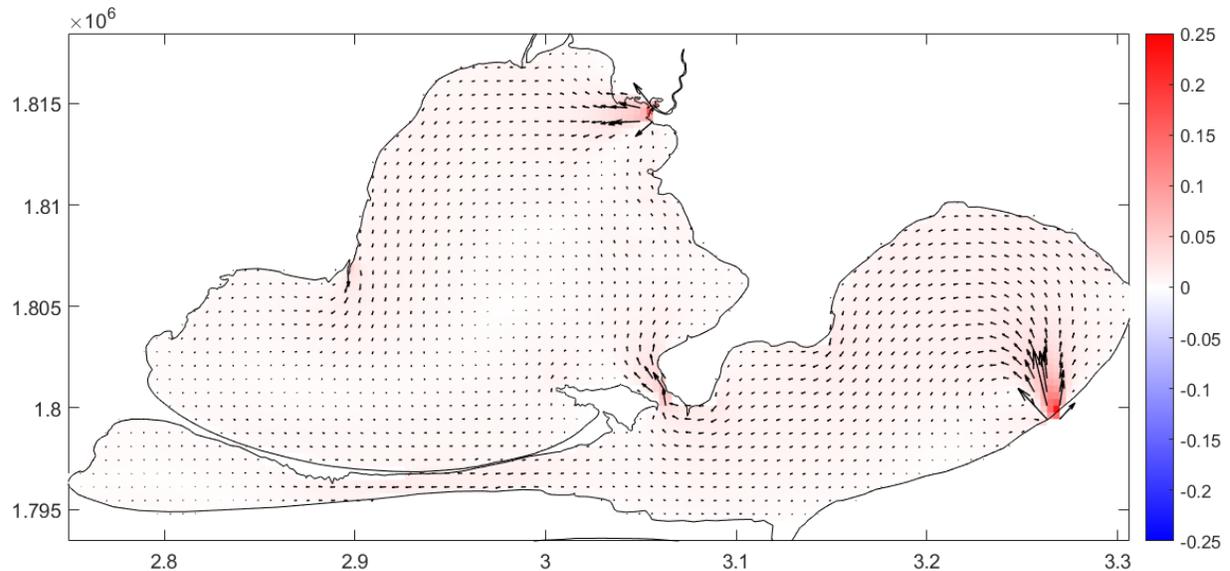


Fig 57. Diferencia en la magnitud de las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E16-E14 (Niña-Niño). Forzadores: descargas máximas de lluvia de años Niña y Niño.

En la Tabla 15, se presentan las diferencias en las corrientes residuales máximas [m/s] de los experimentos de las distintas fases ENSO. Las mayores diferencias generadas por las descargas continentales diferenciales debidas al ENSO, son entre los años Niña y Niño, lo cual es de esperarse al ser los años Niña los de mayor precipitación y los Niño de menor (Magaña, Vázquez & Pérez, 2003). Al mismo tiempo, se observaron diferencias más pronunciadas en la circulación de los años Niña, que los años Niño, respecto a la de años Normales.

Tabla 15. Diferencias en las corrientes residuales máximas [m/s] generadas por las descargas continentales máximas en la época de lluvia, entre las fases ENSO.

Etapas ENSO contrastadas		Diferencia de las corrientes residuales máximas [m/s]
$ENSO_1$	$ENSO_2$	$ENSO_2 - ENSO_1$
Niño	Normal	0.0812
Normal	Niña	0.1500
Niño	Niña	0.2311

La influencia de las distintas fases de ENSO en los eventos de Norte, también propicia diferencias, siendo más pronunciadas entre un Norte de año Normal y uno de año Niño, debido a que en este último estos eventos son más extremos.

Las diferencias más significativas de las corrientes se presentan en:

1. Sitios cercanos a la costa y a los bancos de arena de la Laguna Superior, teniendo velocidades mayores en años normales en la zona superior de la laguna y al sur de las barras (sentido contrario al viento). La zona norte, con velocidades de viento muy altas, podría tener regiones que lleguen a secarse por el arrastre eólico, de acuerdo a lo que algunas modelaciones mostraron.
2. Zonas cercanas a la costa en favor del viento como el mar Tileme y estero Ostates, donde las velocidades mayores corresponden al evento de Norte Extremo. Debido a que este tiene una mayor fuerza para mover el agua en favor de su dirección y al mismo tiempo empujarla de manera lateral hacia la costa, principalmente en aquellas que se localizan en la zona sur de la laguna.

3. Sitios de conexión como la Boca de Santa Teresa, con valores máximos durante ENSO Niño. Donde la fuerza del viento promueve corrientes de mayor intensidad y principalmente en sitios constreñidos, donde se reportan las máximas ráfagas de viento, alcanzando valores de hasta 200 Km/h (Romero Centeno, Zavala Hidalgo, & Gallegos, 2003).

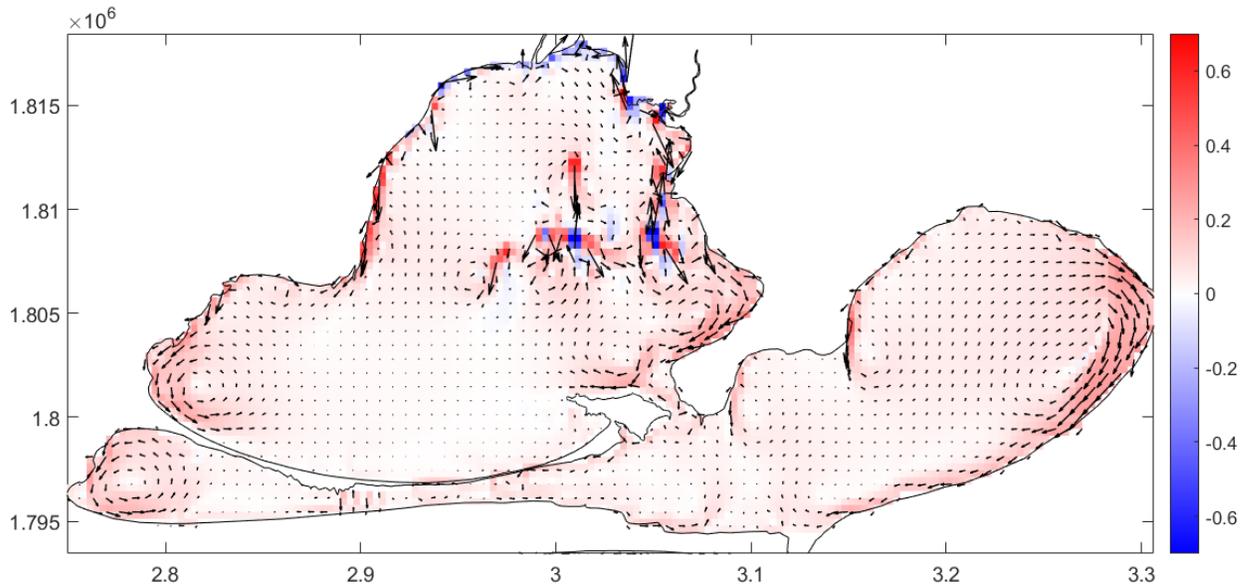


Fig 58. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E02-E01 (Niño-Normal). Forzadores: Viento Norte

De manera general, ambas etapas ENSO: Niño y Niña, incrementan la circulación del SLH en diferentes periodos del año; durante invierno en el caso de los años Niño, por su efecto en el viento del Norte y durante la temporada de lluvias en los años Niña por el incremento en la precipitación; de igual manera pero en menor medida, ambas etapas disminuyen las velocidades residuales en el SLH, en las épocas contrarias pues los años Niño también se caracterizan por una disminución en la precipitación y los Niña por tener un efecto negativo en la magnitud y frecuencia de los eventos de Norte.

6.3.2.3.4. Conexión con el mar

La conexión con el mar o su desconexión genera diferencias muy importantes tanto en las magnitudes como en los patrones espaciales y la recirculación del sistema determina enormemente su estado de salud, lo que corresponde a incrementar la calidad del agua

y con ello la resiliencia de los sistemas naturales y sociales que dependen de él (de la Lanza Espino & Cacéres Martínez, 2000).

Las velocidades máximas residuales de los diferentes experimentos a partir de su versión con boca cerrada y abierta se enlistan en la Tabla 16.

Los resultados reflejaron que, bajo cualquier condición (lluvias, secas, nortes, sures, años Niño, Niña y Normal), el agua del SLH tendría una mayor circulación a partir de la reapertura de la Boca de San Francisco, con las mayores diferencias encontradas durante la temporada de lluvias tipo Niño (donde las descargas continentales y el viento son menores) (Tabla 16).

Tabla 16. Comparación de velocidades residuales máximas entre experimentos con boca cerrada y abierta.

Ec/Ea*	Viento	Ríos	ENSO	Velocidad residual max. [m/s]		Diferencias de vel. residuales max. [m/s]
				Cerrado	Abierto	
09/01	Norte	-	Normal	0.983	0.917	0.066
10/02	Norte ext.	-	Niño	1.5445	1.8701	0.3256
11/03	Sur	-	Normal	-	-	-
12/04	Secas	-	Normal	0.274	0.352	0.078
13/05	Lluvia	Max. Normal	Normal	0.151	0.367	0.216
14/06	-	Max. Niño	Niño	0.011	0.353	0.342
15/07	-	Max. Normal	Normal	0.092	0.367	0.275
16/08	-	Max. Niña	Niña	0.242	0.437	0.195

* Experimento cerrado/Experimento abierto

Las diferencias en los patrones de circulación en relación con la reconexión con el océano varían según el escenario. Para el caso de los eventos de norte: normal (Fig 59) y extremo (Fig 60), el comportamiento es el mismo y las diferencias solo se encuentran en la magnitud de los valores. Teniendo un incremento en las velocidades en las costas y una disminución al interior de la laguna; además de generar flujos de salida al mar que antes no se encontraban. Es importante señalar que sitios aislados como el Mar Tileme mejoran notablemente su circulación bajo la condición de reapertura de la boca en estos escenarios.

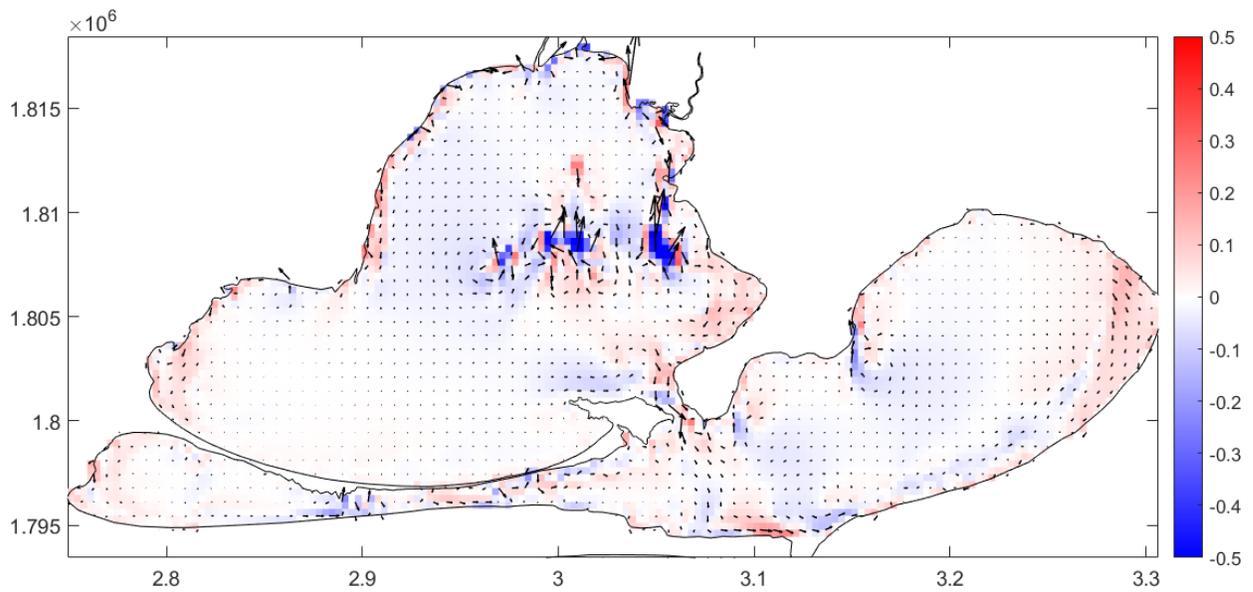


Fig 59. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E01/E09 (Norte). ENSO: Normal, Forzadores: viento norte.

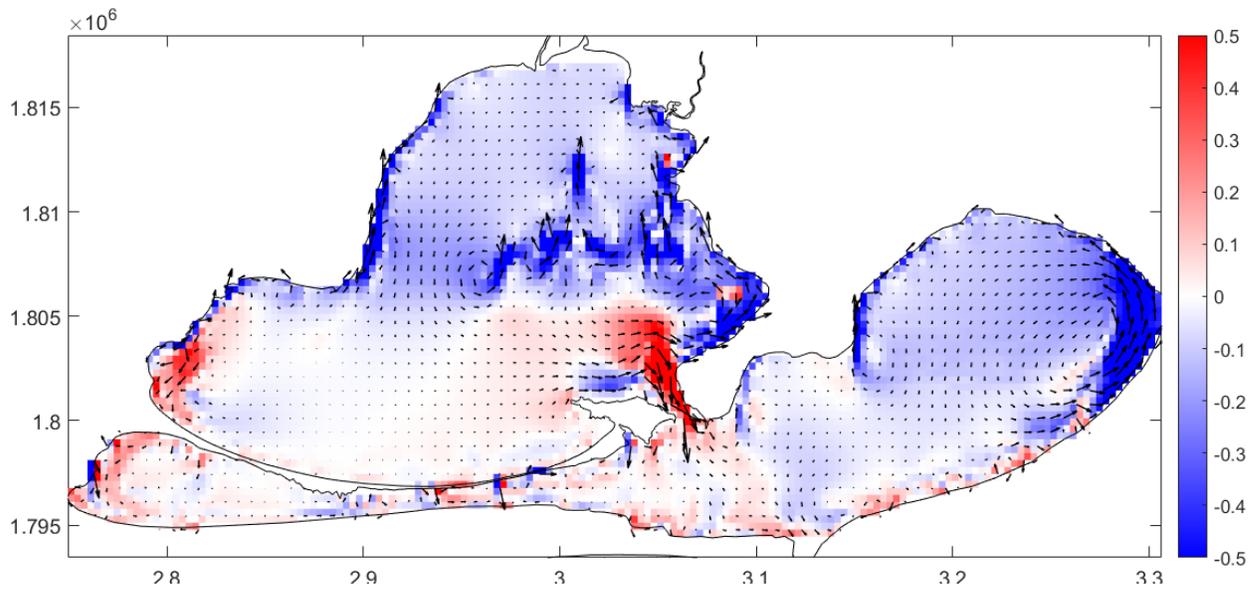


Fig 60. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E02/E10 (Norte extremo). ENSO: Niño, Forzadores: viento norte extremo.

Sobre los periodos de máxima descarga continental (Fig 61) y secas (Fig 62), el principal cambio se presenta en el incremento de velocidades en la Boca de Santa Teresa y Boca de San Francisco, originado por el flujo de salida hacia el mar que aparece al conectarse nuevamente con el mar.

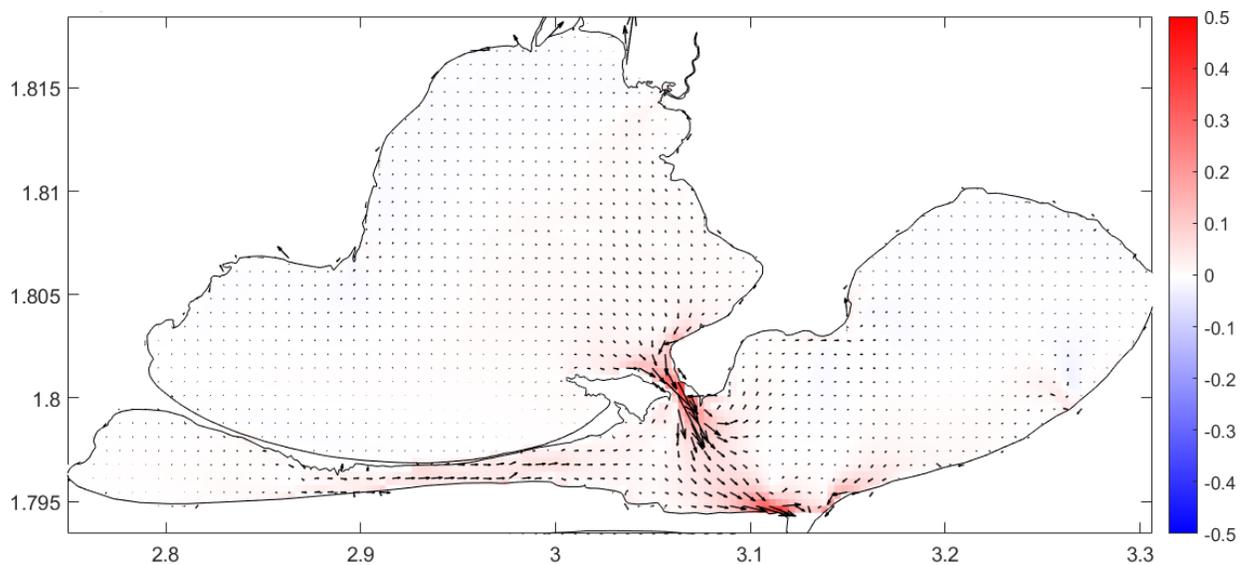


Fig 61. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E08/E16 (Descargas Niña). ENSO: Niña, Forzadores: descarga max ríos.

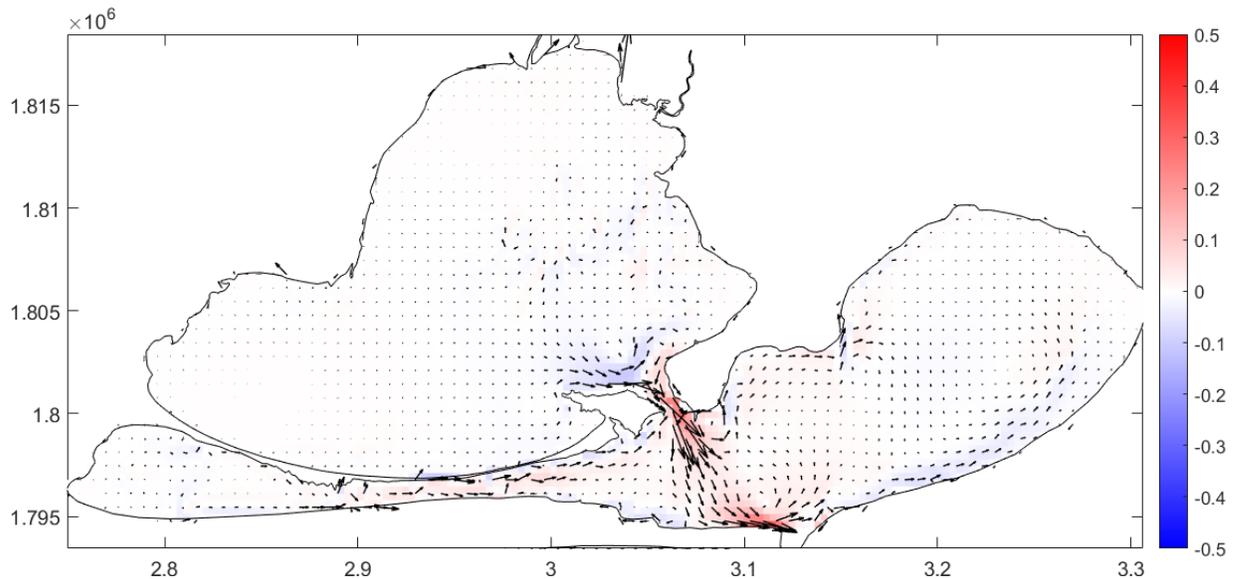


Fig 62. Diferencia en las corrientes residuales [m/s] de los experimentos E04/E12 (Secas). ENSO: Normal, Forzadores: viento del periodo de secas.

6.4. Valoración de tiempos de residencia

Debido a que la valoración de tiempos de residencia nos permite localizar espacialmente las zonas que tardarían un mayor o menor tiempo en restaurar su la calidad del agua, a partir de la disminución de concentración de contaminantes a un límite conocido; conocer este parámetro es una herramienta fundamental para el posterior manejo sostenible del sistema, lo cual resulta bastante deseable considerando su actual deterioro ambiental (Hong, 2018). Ejemplo de ello es el cálculo de tiempos de residencia espaciales para el parque acuático Xel-Ha usado para proponer la distribución de las actividades recreativas en función de su manejo sostenible, realizado por Camacho-Robles, 2018.

Para el SLH, se realizaron modelaciones con las condiciones anuales promedio, a partir del análisis de datos históricos, y con ello lograr que no intervinieran los cambios entre las diferentes épocas del SLH (lluvias, secas, estaciones, viento norte, viento sur, etc.).

El primer resultado de esta sección es la figura 63, donde se muestran las concentraciones finales de un trazador, el cual se estableció en DELFT3D a una concentración y condiciones iniciales conocidas. Estas concentraciones finales, corresponden a las alcanzadas en las diferentes zonas del SLH en el tiempo de residencia promedio del sistema. Durante una modelación con boca abierta, vientos y ríos con promedios anuales históricos y un trazador inicial en todo el dominio a una concentración de 1 kg/m^3 . Dicho tiempo de residencia promedio se alcanza al tener una concentración promedio $\approx e^{-1}$ (0.3719 kg/m^3), en un periodo de tiempo de *4 meses, 12 días y 12 horas*; tiempo el cual al ser comparado con el análisis de Xel-Há, sitio cuyo tiempo de residencia promedio es de solo 12 horas (el cual corresponde a su marea semidiurna), es considerablemente mayor, debido tanto a su falta de conexión oceánica, como a su morfología restringida entre las lagunas.

Estos patrones muestran que la limpieza dentro del SLH no se realiza de manera homogénea, teniendo zonas de poca restauración como el Mar Tileme y el extremo suroeste de la Laguna Superior, mientras que, en sitios cercanos a las descargas continentales, principalmente al Estero Ostates y al mar (en el caso de tener la boca abierta) las concentraciones disminuyen en un mayor grado respecto al resto del sistema.

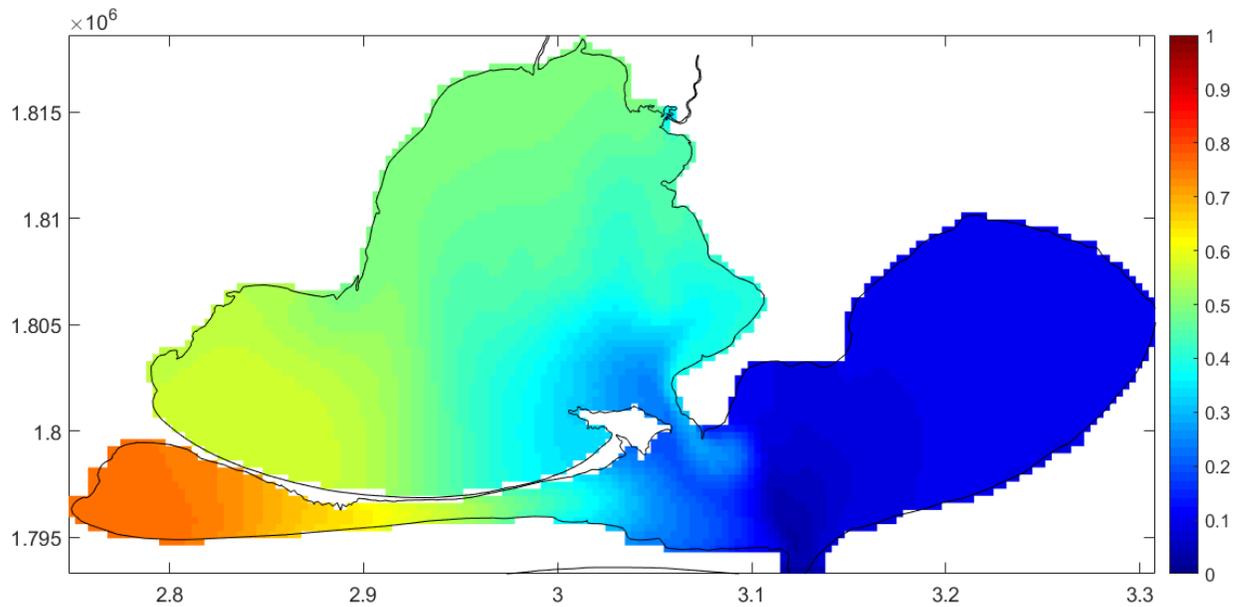


Fig 63. Mapa de concentraciones del trazador [kg/m^3], con la boca abierta, durante el tiempo de residencia promedio del SLH con boca abierta.

Por otro lado, la Figura 64, corresponde a los patrones de concentración en el mismo intervalo de tiempo en las mismas condiciones hidrodinámicas con la excepción de que en este caso no se tiene conexión con el mar (boca cerrada), ante esta situación la concentración promedio del trazador incrementa notablemente a $0.7900 \text{ kg}/\text{m}^3$, pero los patrones espaciales se mantienen.

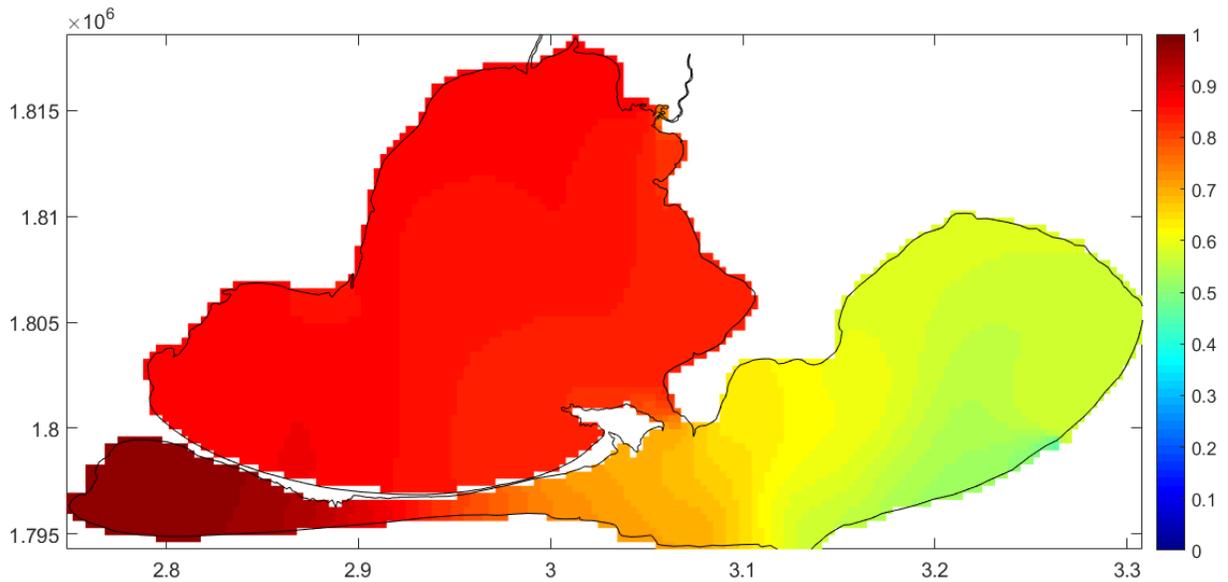


Fig 64. Mapa de concentraciones del trazador, con la boca cerrada, durante el tiempo de residencia promedio del SLH con boca abierta.

También es importante destacar que las concentraciones promedio entre ambos experimentos, guardan una razón ≈ 2 , significando que para este momento de la modelación, mantener una conexión abierta con el mar limpiaría el SLH el doble de veces más rápido que teniendo la Boca de San Francisco cerrada. Sin embargo, esta relación no es constante. Esto se determinó a partir de realizar una serie de tiempo que contrasta el cambio en las concentraciones del trazador entre ambos experimentos (Fig 65).

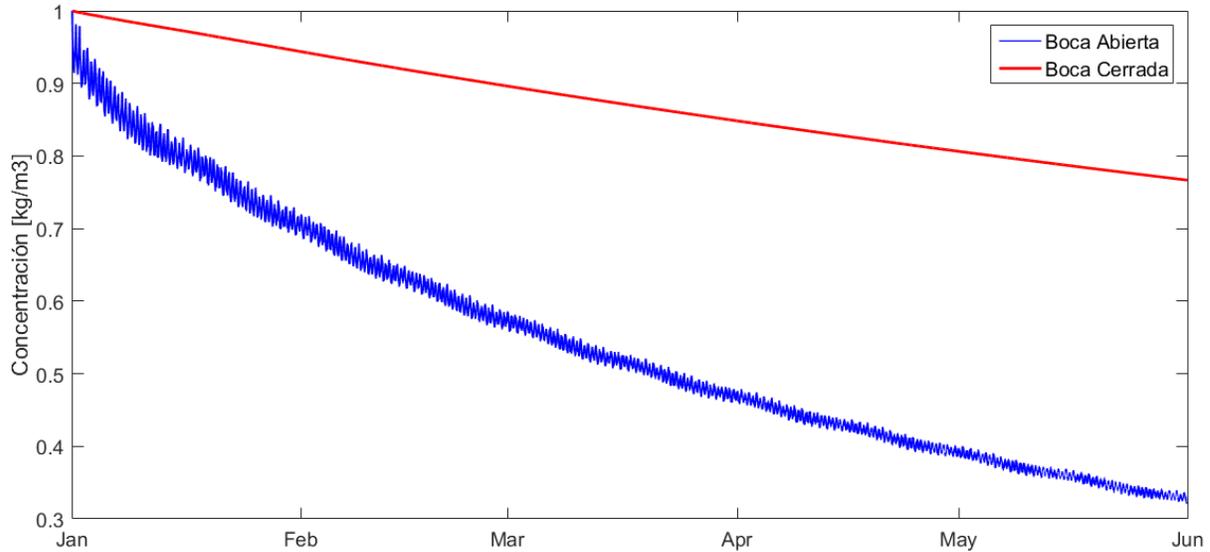


Fig 65. Comparación del cambio de las concentraciones del trazador en el tiempo, para el SLH con boca abierta y cerrada.

Sobre los cambios de concentración en el tiempo, observamos 1) pequeñas oscilaciones en el experimento con boca abierta, debido al efecto de marea, el cual modifica las concentración al ingresar agua en diferentes cantidades a los largo del ciclo; 2) un comportamiento lineal para la Boca cerrada, debido a que estas concentraciones solo se ven disminuidas a partir de un flujo de entrada constante de las descargas continentales; y 3) el comportamiento de la boca abierta, el cual por el contrario, es más de tipo exponencial pues está regulado tanto por las entradas de agua continental, como por la salida del agua lagunar hacia el mar y la entrada de agua marina relativamente estable en términos de variabilidad, lo que proporciona un efecto de enjuague (Kjerfve, 1994).

Por último, se realizó un mapa con los tiempos de residencia para las diferentes zonas del SLH (Fig 66). Estos resultados se presentan únicamente con conexión con el mar, debido al tiempo computacional involucrado, el cual de por si es largo y para el caso de la boca cerrada sería bastante superior.

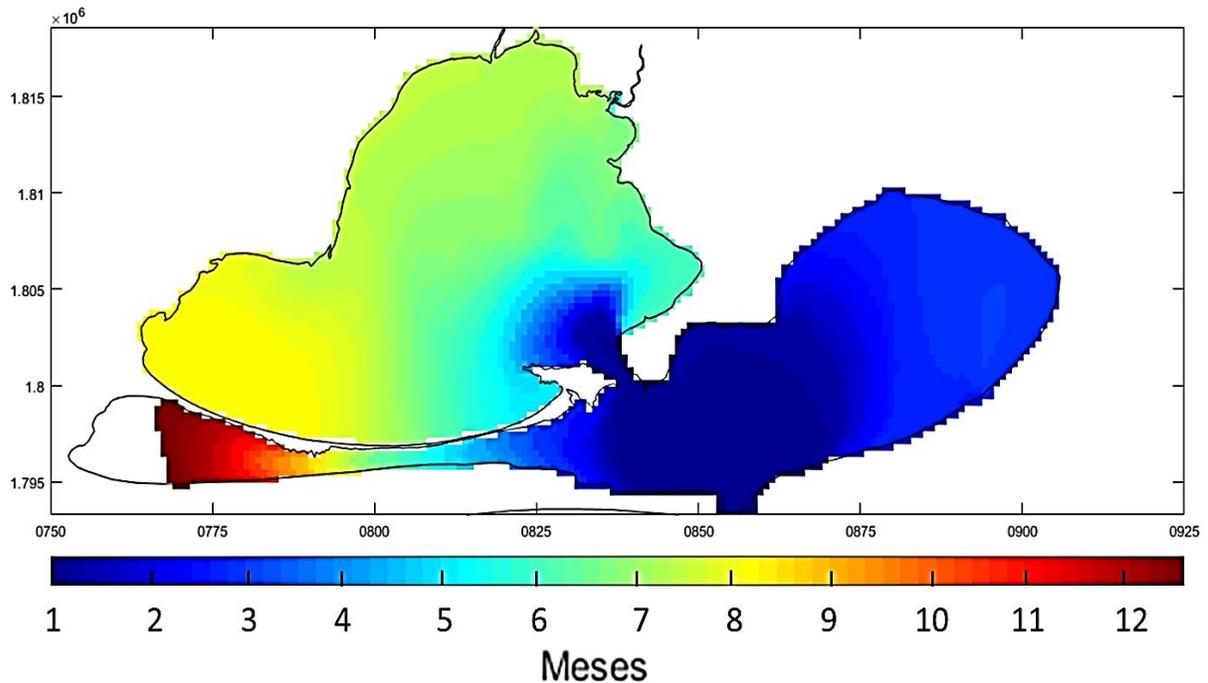


Fig 66. Mapa de tiempos de residencia del SLH con boca abierta.

El cálculo de sus tiempos de residencia nos muestra que de manera general, el SLH tiene un tiempo de recambio considerablemente largo respecto a otros sistemas lagunares, como en el caso de Xel-Há (Camacho, 2017); y de manera particular, que los principales sitios de limpieza serían (1) la boca de Santa Teresa y los sitios de trayecto hacia su desembocadura al mar, (2) la región cercana al Estero Ostates, (3) la zona norte y centro de la laguna Superior, sitios influenciados por el resto de descargas continentales, (4) la región suroeste de la laguna Superior, la cual no tiene influencia de ningún tipo de descarga, y por último (5) el mar Tileme, localidad que incluso en su región oeste posterior a un año aún no logra disminuir su concentración lo suficiente para considerar que se ha llegado al tiempo de residencia.

Esto es debido a la morfología del SLH, que posee zonas constreñidas como sus Bocas, tanto la de Santa Teresa como San Francisco, así como el sitio de conexión con el Mar Tileme, lo que actúa como filtro disminuyendo el intercambio hídrico del sistema en general.

Por último, este estudio resalta la importancia de (1) mantener una buena conexión con el océano para mantener y mejorar la calidad del agua, ante procesos como contaminación, eutrofización y sedimentación excesiva, independiente de si su origen es natural o antropogénico; (2) caracterizar los tiempos de residencia de un cuerpo acuático de manera espacialmente variable, más allá de brindar un único valor para todo el sistema. Ejemplo de ello es el SLH pues, aunque su tiempo de residencia promedio se alcanza aproximadamente en 4 meses y medio, la realidad es que sitios con circulación restringida como el caso del Mar Tileme, necesita cerca de tres veces ese periodo para alcanzar un recambio. Por ello, se sugiere que estas variaciones espaciales sean consideradas en planes de manejo que contemplen el funcionamiento y calidad hídrica del sistema.

7. Conclusiones

Las mediciones *in situ*, muestran que el SLH presenta una clara variación espacial en sus parámetros fisicoquímicos, debido a que su morfología genera zonas hidrodinámicamente diferentes; principalmente en (1) el mar Tileme, posee la mayor variación térmica y alta salinidad (60 ups), debido a su acceso restringido, su relación perímetro/área con la costa y su poca circulación; (2) el Estero Ostates, donde las temperaturas tienen menor variación y magnitud, así como menor salinidad (36 ups); atribuido al continuo flujo de agua del estero. En general el sistema lagunar es altamente salino para un sistema cerrado (sin conexión con el mar), lo que puede ser resultado de procesos naturales como un exceso de evaporación por viento y el arrastre eólico de sedimentos. Además, los cambios en el nivel del agua y salinidad, en octubre 2018, se atribuyen a los eventos de lluvia permitiendo la entrada de agua atmosférica y descargas continentales, tanto durante ese período de tiempo como en los días posteriores a este, por el tiempo que el cauce tarda en restaurarse.

Sobre la relación del ENSO con los forzadores del SLH, el efecto principal se percibe en (1) descargas continentales, con un incremento en la precipitación durante los años Niña y disminución en años Niño; (2) viento, con el incremento en los eventos de Norte en magnitud y frecuencia durante años Niño, y su disminución en la fase Niña. Reconocer estas variaciones es de importancia en el manejo sostenible del SLH, sobre para crear socioecosistemas resilientes ante su vulnerabilidad en contextos por ejemplo de cambio climático, como es el caso del SLH, al existir modelos que predicen un incremento en la frecuencia e intensidad de las etapas Niño y Niña por el incremento en las diferencias de presión y temperatura en diferentes zonas del Océano Pacífico (Dijkstra , 2006).

Al analizar los forzadores del SLH durante el período de estudio, para la validación del modelo, se determinó que los vientos fueron del noroeste y de baja intensidad. La variación anual del viento refleja que los máximos se presentan en invierno y mínimos en verano, con un máximo relativo en julio durante el mínimo de la precipitación anual del SLH. Respecto a las descargas continentales, existe una variabilidad anual relacionada con las estaciones climáticas: en temporada de secas de diciembre a mayo las descargas son mínimas o nulas; y en la temporada de lluvias, de junio a noviembre

con un máximo en septiembre, son intensas; también es importante señalar que el río Ostuta es el de mayor descarga, seguido del Chicapa, Ixtepec y finalmente Niltepec, por lo que el afluente en la conexión con el Estero Ostates (río Ostuta) es la principal entrada de agua continental al SLH. Mientras que como forzador oceánico únicamente se consideraron los harmónicos de marea de la zona.

Durante la validación, bajo las condiciones actuales de boca cerrada, con un evento de lluvia y viento característico de los inicios de la temporada de Nortes, el forzador principal son las descargas continentales. Las descargas continentales utilizadas para este estudio se aproximaron a partir de datos climáticos históricos y se encuentran subestimadas, principalmente en el caso del Estero, cuya aproximación se realizó a partir del Río Ostuta y no logran reproducir la elevación del nivel que se registró en los sensores instalados durante la campaña. Por ello, se recomienda para estudios numéricos de escenarios realistas incluir mediciones de las descargas. Por otro lado, si bien el viento mostró poca influencia en las magnitudes de las corrientes respecto a las descargas, las direcciones del patrón de circulación de la validación es una combinación de ambos forzadores. El efecto del viento se hace visible en mayor grado en el interior del SLH donde se tiene un menor efecto de descargas por la distancia de los cauces y una mayor área de contacto del viento con la superficie del agua. Al ejecutar el experimento numérico de validación, pero con la boca del SLH abierta permitiendo la comunicación con el mar, la fuerza que domina en el control de la hidrodinámica es la marea. En el interior del sistema se aprecia un desfase de marea y disminución de amplitud en la misma entre más nos alejemos del mar. Teniendo su desfase máximo en la Laguna Superior con una disminución en la amplitud de casi 80 cm respecto al Golfo y un retraso mayor a 6 h.

Respecto al ENSO, los años más cercanos a la campaña de campo Niña y Niño, fueron 2010-2011 y 2015-2016, respectivamente; mientras que el año 2018 se usó como referencia de la etapa Normal. Dentro del análisis de índices realizado no se observó una periodicidad, ni alternancia de fases entre los eventos. En contraste, parece haber períodos de tiempo donde una etapa domina sobre las otras.

El efecto del ENSO en los forzadores se refleja en:

1) el viento, donde hay una mayor frecuencia y magnitud de eventos Norte en años Niño y una disminución en años Niña.

2) las descargas continentales, consecuencia directa de la variación en la precipitación incrementando en años Niña, con disminución en Niño; a su vez estos cambios son proporcionales al tamaño de la descarga. Aunque las descargas continentales tienen un incremento en los promedios de los diferentes ríos durante la fase Niña del ENSO, los valores máximos de descarga registrados se alcanzaron en su mayoría en años Normales durante septiembre. Esto puede ser debido a que la cantidad de datos existentes es mayor en etapas normales, sin embargo, el resultado sugiere que, para descargas continentales extremas, es de mayor importancia la estacionalidad o eventos no ordinarios, como el incremento de precipitación y descargas continentales asociados a huracanes, que el efecto ENSO.

3) los forzadores oceánicos, donde los cambios en el nivel del mar a través de tres años con diferentes fases ENSO, muestran tres momentos diferentes en el año: incremento de mayo-septiembre, comportamiento diferenciado según la fase ENSO de septiembre-enero (temporada de nortes) y de enero-abril con bajas amplitudes. Las corrientes señalan, mayores diferencias entre las fronteras Este y Oeste en periodos Niño y Niña, y una mayor homogeneidad en la etapa Normal. Además de una dirección predominantemente hacia el norte en años Niño y en mayor medida hacia el sur en los años Niña. Las corrientes están influenciadas en mayor medida por el viento y por la configuración costera.

Respecto al resto de experimentos numéricos, se concluye:

a) Los patrones de circulación que se obtienen en los experimentos que comparan la temporada de lluvias y secas reflejan mayor circulación durante secas mientras no haya conexión con el mar. Esto es debido a que la temporada de secas coincide con la de Nortes, volviéndose de mayor relevancia la diferencia en las velocidades de viento que el tamaño de las descargas. Sin embargo, este

resultado se modifica al abrir la Boca de San Francisco, que genera un cambio drástico en los patrones de corrientes y una circulación residual con corrientes de salida al mar.

- b) Los experimentos que investigan el efecto de viento Norte y viento del sur en las corrientes son posiblemente los escenarios de mayor contraste. En un evento de Norte ya sea moderado o intenso, los patrones de circulación son muy parecidos: incrementando las velocidades en la costa y disminuyéndolas en el centro del sistema con una dirección predominantemente a favor del viento. Esto ocasiona que se acumule el agua hacia el sur del sistema, lo que en condiciones de reapertura con el mar mejora notablemente la recirculación, principalmente en zonas aisladas como el mar Tileme. Por otro lado, con viento sur el agua se apila en el norte del SLH, lo que en la realidad genera inundaciones en los poblados aledaños, situación que debe ser considerada y controlada en un correcto ordenamiento territorial en la zona.
- c) Las etapas del ENSO, Niño y Niña, de manera general incrementan la circulación del SLH en diferentes periodos del año: durante invierno en años Niño, por su efecto en el viento del Norte y durante la temporada de lluvias en los años Niña por el incremento en la precipitación. De igual manera, pero en menor medida, ambas etapas disminuyen las velocidades residuales del SLH, en las épocas contrarias pues los años Niño también se caracterizan por una disminución en la precipitación y los Niña por la disminución en la magnitud y frecuencia de los eventos de Norte.
- d) La conexión con el mar o su desconexión, genera diferencias muy importantes tanto en las magnitudes como en los patrones espaciales de corrientes y en la recirculación del sistema, que determina enormemente su estado de salud. Para el SLH se demuestra que, bajo cualquier condición, el agua tendría una mayor circulación a partir de la reapertura de la Boca de San Francisco. El recambio de agua sería aún mayor en las épocas y zonas de menor circulación como la temporada de lluvias en año Niño y el mar Tileme, respectivamente.

Posteriormente, la valoración de tiempos de residencia espacialmente variables nos permite localizar las zonas que tardarían un mayor o menor tiempo en recambiar su masa de agua. En los experimentos numéricos se calculó a partir de la disminución de

concentración a un límite conocido, de un trazador inicial en todo el dominio con una concentración de 1 kg/m^3 . El recambio se alcanza al tener una concentración promedio $\approx e^{-1}$ (0.3719 kg/m^3), y esto se logró en un periodo de tiempo de *4 meses, 12 días y 12 horas*. En la modelación de la condición actual, donde no existe conexión con el mar (boca cerrada), la concentración promedio del trazador alcanzada en el mismo tiempo es mucho mayor (0.7900 kg/m^3). A partir de los tiempos de residencia, también se observa que el recambio de agua dentro del SLH no se realiza de manera homogénea, teniendo zonas de poca restauración como el Mar Tileme y el extremo suroeste de la Laguna Superior, las cuales llegan a tardar tres veces más en alcanzar el límite conocido. Este resultado resalta la importancia de una buena conexión con el océano para mantener y mejorar la calidad del agua, así como la necesidad de caracterizar los tiempos de residencia espacialmente y no en promedio para un sistema, sobre todo cuando se busca desarrollar herramientas que permitan un manejo sostenible de la zona.

Finalmente, y después del desarrollo del presente estudio, se concluye que, si bien actualmente el SLH es un sitio con un deterioro ambiental y social considerablemente altos, acciones concretas como la reapertura de la Boca de San Francisco, pueden brindar mejoras importantes. Esa acción mejoraría no solo la calidad del agua, sino también la calidad de vida de las personas que de él dependen al ser la pesca no solo en centro se sus actividades económicas, sino también sociales y espirituales; además de que manteniendo sus prácticas tradicionales esta es una actividad extractiva de bajo impacto al sistema lagunar a diferencia de otras pertenecientes a propuestas de desarrollo externas a la comunidad como los generadores eólicos, refinerías o ingenios azucareros. En contraste con otros sistemas lagunares, la importancia del SLH va más allá de su riqueza natural, pues es la cuna del único pueblo indígena considerado como lagunar: el de los Ikoots. Es indispensable incluir una visión integral de manejo sostenible en sus planes de desarrollo, con acciones que contribuyan a la recuperación del sistema y que fortalezcan su resiliencia para afrontar los efectos del cambio climático (por su relación con el efecto ENSO) como 1) creación de programas de seguridad contra las inundaciones producidas por los vientos del sur, considerando el mantenimiento, prevención y zonas de potencial riesgo, corrección de constricciones en el cauce, e incluso la reubicación de zonas habitadas; 2) evitar infraestructura o prácticas que disminuyan el cauce de las descargas continentales, como presas o sobreexplotación del recurso,

debido a que disminuye el flujo hídrico y favorece procesos de sedimentación; 3) disminuir y de ser posible evitar las prácticas que incrementen los contaminantes en el sistema o en las descargas continentales que eventualmente ingresan, como la sustitución de fertilizantes y pesticidas por alternativas orgánicas o la reparación de fugas de aceites en la refinería; 4) conservar y restaurar las áreas de manglares, favoreciendo a la retención de suelo, oxigenación del agua y hábitat de las especies lagunares; y como se mencionó anteriormente, 5) la reapertura con el uso de maquinaria de la Boca de San Francisco, restaurando la conexión con el mar. De esa forma se promovería que la calidad del sistema mejore, se mantenga en el tiempo y permita la reactivación de actividades económicas que estén en armonía con el ambiente y con la cultura que ahí habita.

8. Bibliografía

- Aragón, J. (2017). Reporte de campaña de prospección en tres sistemas lagunares de Oaxaca para la selección del sitio de muestreo para la caracterización del potencial energético por Gradiente Salino. *CEMIE-Oceano*.
- Arroyo H., J. S. (1981). Caracterización de la comunidad de moluscos bentónicos en playa Vicente, Laguna Superior, Oax., México. *VII Simp. Latinoamer. Oceanog. Biol.* , 473-484.
- Baez V., B. E. (1987). Variaciones nictemerales de la diversidad de las comunidades de peces de la laguna Superior, Oaxaca. *Res. VII Cong. Nal. Oceanog.*, 157.
- Bigg, G. R. (2003). Physical interaction between the ocean and atmosphere. En G. R. Bigg, *The Oceans and Climate* (Vol. 2, págs. 60-65). Cambridge.
- Björn, K. (1994). *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 60). EUA.
- Brown, E., Colling, A., Park, D., & Phillips, J. (2004). *Ocean Circulation*. The open university. UK.
- Camacho, J. R. (2017). Descripción de la hidrodinámica del sistema estuarino Xel-Há. Información base para su preservación. En J. R. Camacho, *Tesis de licenciatura en manejo de zonas costeras* (pág. 21).
- Chavez A., E. (1979). Análisis de la comunidad de una laguna costera en la costa sur occidental de México. . *An. Centr. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM* 6 (2): , 15-44.
- Chavez A., E. A. (1977). Estudio hidrográfico de dos lagunas costeras de Oaxaca. *MANRIQUE, UE, F. A. (ed). Mem. V Cong. Nal. Oceanogr.* México.
- Chiappa, X., Enríquez, C., Mariño, I., Reyes, C., & Papiol, V. (2019). World Seas an Enviromental Evaluation. *Elsevier*.
- Choi, K., & Lee, J. (2004). Numerical determination of flushing time for stratified water bodies. *Journal of Marine Systems*. 50(3):263-281.

CONABIO, CONANP, The Nature Conservancy, & ProNatura. (2007). Ficha técnica para la evaluación de sitios prioritarios para la conservación de ambientes costeros y oceánicos de México: Sistema Lagunar del Golfo de Tehuantepec.

CONAGUA. (2008). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ostuta. Oaxaca.

CONAGUA. (2019). *Base de datos: Registro Público de Derechos del Agua*. Obtenido de <http://app.conagua.gob.mx/bandas/>

de la Lanza Espino, G., & Cacéres Martínez, C. (2000). *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. Baja California Sur: UABCS.

Deltares. (2019). DELFT-3D User Manual. DELTARES.

Diaz H., R. (1980). Distribución superficial de algunos parámetros fisico-químicos en la laguna Oriental del Istmo de Tehuantepec. *Mem. II Simp. Latinoamer. Acuicultura*, 303-374.

Dijkstra , H. (2006). The ENSO phenomenon: theory and mechanisms. *Advances in Geosciences*, 3-15.

Barton, M. L. (1993). Supersquirt: Dynamics of the Isthmus of Tehuantepec , Mexico. *OCEANOGRAPHY*, 23-30.

Enríquez, C., Papiol, V., & Chiappa C, X. (2017). Gradientes de Salinidad: una opción para la generación de energía en México. *Boletín de difusión de las actividades del CEMIE-Océano*, 16-18.

Espino, G. d. (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe . *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 33-50.

Fernandes, E. H. (2001). Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil. *Tesis de doctorado*.

García Espinosa, J. (2008). *Un método de elementos finitos para análisis hidrodinámico de estructuras navales*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.

García Souza, P. P. (2017). *Estudio: Pueblos indígenas de México en el siglo XXI. Huave*. Coordinación General de Patrimonio Cultural e Investigación- Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.

Gluyas M., G. (1982). Distribución de algunas variables fisico-químicas durante primavera, verano, otoño e invierno en laguna Inferior, Oax. . *Tesis de licenciatura. UABC*, 71.

Hodges, B. R. (2009). Hydrodynamical Modeling. *Hydrodynamics and Mixing*. USA.

Hong, M. P. (2018). Simulating and understanding the gap outflow and oceanic response over the Gulf of Tehuantepec during GOTEX. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1-19.

HYCOM. (2018). *Modelo reanálisis HYCOM*. Obtenido de <https://www.hycom.org/>

IOC, SCOR and IAPSO. (2010). The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. (I. O. Commission, Ed.) *Manuals and Guides* 56.

Keith Meldahl. (17 de diciembre de 2011). El Nino - La Nina. Recuperado el 16 de mayo de 2020, de https://www.youtube.com/watch?v=tyPq86yM_Ic&pbjreload=10

Kjerfve, B. (1994). *Coastal Lagoon Processes*. Columbia, USA: ELSEVIER .

Lara Lara, R., & Díaz, V. (2008). Los ecosistemas marinos. En *Capital Natural de México*.

López., J. A. (2009). "Mamíferos terrestres de la zona lagunar del istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México." . *Revista mexicana de biodiversidad* 80 (2), 491-505.

López-Yllescas. (2014). Batimetría del Sistema Lagunar Huave, Istmo de Tehuantepec, México, mediante Percepción Remota. *Tesis de Maestría: Instituto Politécnico Nacional*.

Magaña, V., Vázquez, J., & Pérez, J. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 313-330.

Manzo, D. (21 de 04 de 2019). Futuro incierto de 14 mil pescadores en Oaxaca por deterioro de bocabarra. *La Jornada*.

Mendoza V., L. H. (1999). Aspectos ecológicos del fitoplancton en la Laguna Superior, Oaxaca. Res. X Reunión de la Sociedad Mexicana de Planctología, A. C. y III Reunión Internacional de Planctología. Mazatlán, Sinaloa. 28 a 30.

Michael, A., Seo, H., Shang, P., & Scott, J. D. (2011). ENSO's Impact on the Gap Wind Regions of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate: American Meteorological Society*.

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

NOAA. (2006). *North American Regional Reanalysis (NARR)*. Obtenido de <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/north-american-regional-reanalysis-narr>

NOAA. (2018). *Physical Sciences Laboratory*. Obtenido de Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2): <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>

NOAA. (2018). *Southern Oscillation Index (SOI)*. Obtenido de https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/

Ocampo Torres, F. J., García Nava, H., Durazo, R., Osuna, P., Díaz Méndez, G. M., & Graber, H. C. (2011). The INTOA Experiment: A Study of Ocean-Atmosphere Interactions Under Moderate to Strong Offshore Winds and Opposing Swell Conditions in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Boundary-Layer Meteorol*, 433-451.

Ortega, S., & Trigueros, J. (2000). El Golfo de Tehuantepec como un centro de actividad biológica y su importancia en la pesquería. Reporte en *Centros de actividad biológica del Pacífico Mexicano*.

Ortiz G., S. M. (1990). Contribución al conocimiento de las condiciones hidrológicas de la laguna Superior, Oaxaca, México. *Res. VIII Cong. Nal. Oceanogr.*, 32.

Portela Rodríguez, E. (2016). Tesis de doctorado: Estacionalidad de la hidrografía y la circulación en el Pacífico. Centro de Investigación Científica y de Educación.

Romero Centeno, J. Z. (2003). Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *Journal of Climate*, 2628-2639.

Ramirez, M. D. (1993). Estructura y demografía del manglar del estero Angustura, Laguna Oriental, Oaxaca, y su relación con algunos parámetros físicos y químicos del agua y del sedimento. *XII Congr. Mex. de Botánica.* , 217.

Reyes, C., Reyes, Ó., & Aragón, J. (2018). Reporte de la campaña SH201810 variables termohalinas. CEMIE.

Ritter Ortíz, W., & Guzmán Ruíz, S. (2000). Efectos meteorológicos y oceanográficos en la productividad del Océano Pacífico del Este. *Revista de Geofísica*, 23-39.

Romero, R., Zavala, J., & Gallegos, A. (2003). Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *Journal of Climate*, 2628-2639.

Ropelewski, C. & Jones, P. (1987). An Extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV.* 115. 2161-2165.

Sanay González, R., Monreal Gómez, M., & Salas de León, D. A. (2006). Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca, México. *Ciencia y Mar, UMAR*, 3-16.

Sanchez B., L. (1972). Transporte de sedimentos a lo largo de la parte interna de una barra, en el complejo de las lagunas Superior e Inferior de Oaxaca. *Tesis profesional, UABC, Ensenada, B. C.*, 26.

Schultz, D. M., W. E. Bracken, L. F. Bosart, G. J. Hakim, M. A. Bedrick, M. J. Dickinson, and K. R. Tyle, 1997: The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 5–39; Corrigendum, 125, 662.

Trasviña, E. D. (1995). Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 20,649-20,663.

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

Villagómez, Y., Amoroz, I., & Gómez, E. (2013). Los recursos hídricos en las regiones indígenas de México. *El Colegio de Michoacán*.