



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Variabilidad espacial y temporal de variables físico-químicas en la Laguna de Rocha

Maya Lourdes Lambert García

Programa de Posgrado en Mecánica de los Fluidos Aplicada
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Marzo de 2022



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Variabilidad espacial y temporal de variables físico-químicas en la Laguna de Rocha

Maya Lourdes Lambert García

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Mecánica de los Fluidos Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Mecánica de los Fluidos Aplicada.

Director:

Dr. Ing. Sebastián Solari

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2022

Lambert García, Maya Lourdes

Variabilidad espacial y temporal de variables físico-químicas en la Laguna de Rocha / Maya Lourdes Lambert García. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2022.

XX, 154 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Sebastián Solari

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Mecánica de los Fluidos Aplicada, 2022.

Referencias bibliográficas: p. 121 – 128.

1. Laguna costera, 2. Modelación hidrodinámica, 3. Salinidad y temperatura, 4. Apertura artificial, 5. Cambio climático. I. Solari, Sebastián, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Mecánica de los Fluidos Aplicada. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Daniel Conde

Dr. Ing. Francisco Pedocchi

Dr. Ing. Pablo Santoro

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2022

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi tutor y director de tesis Sebastián Solari por guiarme y dedicar el tiempo necesario para el desarrollo de este trabajo con la mejor disposición, paciencia y confianza en mi trabajo. A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la beca recibida desde 2018 hasta 2020 y a la Comisión Académica de Posgrado (CAP) por la beca de finalización otorgada en 2019. Agradezco a mis compañeros y ex compañeros del IMFIA, particularmente a Manuel Teixeira por realizar un excelente trabajo de maestría y traspaso de información que permitió continuar con el mio y a Matías Gonzalez por acompañarme a innumerables campañas a la Laguna de Rocha y solucionar los problemas que siempre están a la orden del día en estas salidas. Agradezco al equipo de proyecto de Facultad de Ciencias, y del CURE de Rocha por su compromiso con el proyecto, poniendo siempre a disposición materiales, equipos y conocimiento, y por constante su interés en mis mediciones y resultados. Finalmente, agradezco a Damián y a mi familia quienes me acompañaron a lo largo de todo este proceso.

RESUMEN

Las lagunas costeras de apertura y cierre intermitente (ICOLL) son un tipo particular de estuario que se caracteriza por su conexión intermitente con el mar. Esta conexión se da a través de uno o varios canales que se abren en la barra de arena que separa ambos cuerpos de agua.

La Laguna de Rocha forma parte de un sistema de lagunas salobres ubicadas en la costa atlántica de Uruguay, que son clasificadas como ICOLLs. La conexión entre la laguna y el océano se da a través de un único canal, el cual en general, se abre de forma artificial, para evitar la inundación de las comunidades pesqueras que viven en sus márgenes y mejorar las condiciones de pesca. Desde 2019, dichas aperturas artificiales son reguladas mediante un protocolo (Conde et al. 2019). La Laguna posee una elevada productividad biológica y biodiversidad, así como un importante número de servicios ecosistémicos. En 2015, pasó a formar parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas y en 2016 fue declarada sitio RAMSAR. La barra de la Laguna de Rocha y su conexión con el océano juegan un rol clave en el funcionamiento de la laguna, por lo que es deseable conocer el efecto que ésta puede tener a largo plazo en la calidad del agua dentro de la misma.

En este trabajo se desarrolló un modelo numérico bidimensional multiescala de la Laguna de Rocha que permite representar la hidrodinámica dentro de la laguna así como la formación, evolución y cierre del canal de conexión sin incurrir en las complejidades y altos costos computacionales de un modelo morfodinámico convencional. El modelo, implementado en TELEMAC-2D, se compone de un modelo hidrodinámico bidimensional de la laguna y la zona costera adyacente acoplado a un modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal de conexión, el cual fue modelado como subrutina. Con el objetivo de modelar la calidad de aguas se incluyó la modelación de salinidad y temperatura dentro de la laguna. El modelo fue utilizado para comparar el comportamiento de la laguna a largo plazo bajo diferentes escenarios de políticas de apertura. Los resultados obtenidos permiten concluir que el escenario de nivel de apertura influye no solo en el número de aperturas anuales sino también en la distribución anual y campos de las diferentes variables estudiadas.

Por una parte, este trabajo deja en evidencia la necesidad de continuar con mediciones continuas en la laguna y campañas de medición durante las aperturas de la misma para validar el modelo. Por otra parte, los resultados obtenidos permiten afirmar que el modelo hidro-morfodinámico simplificado puede ser implementado en matlab, incorporando los datos de caudal como condición de borde del modelo 2D sin perjuicio de los resultados. Una posible línea de trabajo que se plantea es la implementación del modelo para el estudio del efecto del cambio climático en la laguna mediante la definición de escenarios futuros.

Este modelo constituye un precedente en el desarrollo de una herramienta numérica de bajo costo computacional que permite simular el comportamiento hidrodinámico y de la salinidad y temperatura dentro de la laguna de cierre y apertura intermitente.

Palabras claves:

Laguna costera, Modelación hidrodinámica, Salinidad y temperatura, Apertura artificial, Cambio climático.

ABSTRACT

Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons (ICOLLs) are a particularly dynamic form of estuaries characterized by periodic entrance closure to the ocean (McSweeney et al. 2017). The connection occurs when the sand barrier between the lagoon and the ocean breaches, naturally or artificially. This is the case of the Rocha Lagoon, located in the Atlantic Coast of Uruguay. The lagoon is connected to the ocean through a single channel that opens and closes practically every year. In 2019, a protocol was developed in order to regulate artificial openings of the lagoon (Conde et al. 2019). Later, Teixeira and Solari (2020) analyzed how the possible opening protocols affect water levels in the lagoon and exchanges with the ocean in the mid to long term. However, no studies have dealt with the effect of opening protocols on the spatial distribution and temporal behavior of salinity and temperature inside the lagoon.

Evidence suggests that the ecological conditions and water quality of the lagoons are affected by the physical, chemical and biological exchanges that depend on the connection with the ocean, having direct implications for species inhabiting the lagoon, species connectivity and fishing capacity (Mahanty et al., 2016). In the last decade, the Rocha Lagoon was declared a protected area due to its high biodiversity and productivity (e.g.: Ramsar site, MaB Biosphere Reserve, National System of Protected Areas - SNAP).

In this work, a two-dimensional, multi scalar numerical model was developed to simulate the lagoon hydrodynamic, salinity and temperature variation; it is composed by a depth integrated numerical model that was coupled with a simplified, physical-based model for the hydro- and morpho-dynamic of the inlet. The model was implemented in TELEMAC-2D, incorporating the simulation of the formation, evolution and close of the inlet channel as a subroutine.

The model was used to compare the long-term behavior of the lagoon under different opening policy scenarios. The spatial distribution of salinity and water temperature was analyzed by means and standard deviation fields, and time series were compared with measured data in two stations. The results revealed that the opening level has significant importance not only in manage-

ment of floods, but also in physical variables as salinity and temperature, that affects the functioning of the entire ecosystem. The results obtained allow us to conclude that the opening level scenario influences not only the number of annual openings but also the annual distribution and fields of several of the different variables studied.

This work highlights the need to continue with continuous measurements in the lagoon and measurement campaigns during lagoon openings to validate the model. A possible line of work is the implementation of the model to study the effect of climate change on the lagoon by defining future scenarios. This model constitutes a precedent in the development of a low computational cost numerical tool to simulate the hydrodynamic, salinity and temperature behavior within the lagoon during intermittent closure and opening.

Keywords:

Coastal Lagoon, Hydrodynamics, Salinity and Temperature, Artificial breaching, Climate change.

Lista de figuras

1.1	Balance de agua para laguna abierta (arriba) y cerrada (abajo). A partir de figura tomada de Gordon (1990)	3
1.2	Esquema de mecanismos de apertura y cierre de la laguna. De Ranasinghe et al. (1999)	5
1.3	Diagrama conceptual del proceso de apertura y cierre natural de una ICOLL. De Conde et al. (2019)	6
1.4	Efectos directos de factores de cambio climático proyectados en procesos y propiedades físicas de lagunas costeras. De Anthony et al. (2009)	15
1.5	Efecto del aumento del nivel medio del mar en berma de arena. De Haines et al. (2006)	16
1.6	Ubicación de lagunas costeras en la costa uruguaya, en rojo se destaca la Laguna de Rocha. De Meerhoff et al. (2013)	18
1.7	Ciclo anual de niveles en la laguna (rojo) y el océano (azul). De Conde et al. (2019)	18
1.8	Barra de la Laguna de Rocha en enero 2021, tomada de Google Earth. En la zona de la desembocadura se observan bancos de arena sumergidos compuestos por varios lóbulos.	19
1.9	Protocolo de apertura de la Laguna de Rocha, tomado de Conde et al. (2019)	20
2.1	Esquema del modelo bidimensional utilizado.	25

2.2	Componentes del proceso de intercambio de calor con la atmósfera. Q_{sc} es la radiación para cielo despejado, Q_s es la radiación solar, Q_{sr} es la radiación solar reflejada por la superficie, Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_a es la radiación atmosférica, Q_{ar} es la radiación atmosférica reflejada por la superficie, Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga), Q_{br} es la radiación reflectada por la superficie (onda larga), Q_{ev} es el flujo de calor debido a la evaporación (calor latente) y Q_{co} es el flujo de calor convectivo (calor sensible).	28
2.3	Grilla de cálculo utilizada en el modelo numérico.	30
2.4	Esquema del modelo implementado. Se indica la batimetría y condiciones de borde impuestas, donde Q es el caudal, SL el nivel de mar, T la temperatura y S la salinidad.	31
2.5	Esquema del modelo utilizado para representar el canal de conexión. Tomada de Hinwood y McLean (2015)	33
2.6	Diagrama de flujo del cálculo del estado del canal para un paso genérico aplicado a la laguna, la dirección del flujo mostrada en las imágenes es ilustrativa y depende de la relación entre el nivel del océano y la laguna	35
2.7	Nomenclatura de las zonas de la laguna.	39
2.8	Ubicación de los puntos que en los que se muestra el ciclo medio anual y la función de distribución de probabilidad.	40
3.1	Subcuencas de aporte a la Laguna, pluviómetros utilizados y ubicación de los datos del reanálisis ERA5.	44
3.2	Ciclo medio anual de precipitación para cada una de las cuencas y de ERA5.	45
3.3	Ciclo medio anual de la desviación estándar de la precipitación para cada una de las cuencas y de ERA5.	46
3.4	Evaporación media mensual medida en Tanque A y corregida en Rocha para el período 1985-1999 y del reanálisis ERA5.	47
3.5	Ubicación de las lecturas de nivel y oleaje	48
3.6	Gráfico de cuantiles de velocidad medidos en la boya y corregidos para 10 m de altura y en la estación de INUMET en Rocha y ajuste potencial en azul.	50

3.7	Rosas de viento para los datos medidos en la boya (izquierda), medidos en Rocha (centro) y del reanálisis ERA5 (derecha) para diciembre 2015 (arriba) y todo el período de medición de INUMET (abajo centro), y del reanálisis (abajo derecha).	51
3.8	Puntos en los que se midió temperatura y salinidad dentro de la laguna.	52
3.9	Comparación de medidas realizadas con la boya, con un CTD y con un multiparámetro entre marzo y mayo de 2016.	53
3.10	Curva de temperatura estimada del agua en los arroyos interpolada a partir de los datos medidos.	56
3.11	Gráfico de cuantiles de la temperatura del aire medida en Rocha y en la boya y del reanálisis y en la boya.	58
3.12	Nubosidad medida por INUMET (rojo) y proveniente del reanálisis ERA5 (azul).	59
3.13	Apertura de la Laguna. En rojo se muestran los períodos en los que la Laguna se encuentra abierta. En azul los períodos en los que la Laguna se encuentra cerrada y en negro los momentos en los que no se puede inferir si la misma estaba abierta o cerrada.	61
3.14	Batimetría final de la Laguna de Rocha y la zona costera modelada	63
4.1	Resultados del modelo hidro-morfodinámico con parámetros calibrados y datos de nivel medidos en verde.	68
4.2	Sensibilidad de la temperatura a los distintos parámetros de calibración del modelo de intercambio de calor con la atmósfera.	69
4.3	Temperatura medida y modelada en la estación HOBO del 20 junio al 20 de julio de 2020.	70
4.4	Temperatura y profundidad en la estación HOBO para el período Junio 1991 - Octubre 1991 y nivel de apertura 2.2 m	71
4.5	Resultados de campo de valores medios de salinidad para el escenario 1.6 m. Se indican los valores medios de datos medidos en las estaciones norte y sur.	74
4.6	Media y desviación estándar de salinidad en la laguna en 1991, escenario 1.6 m para distintos coeficientes de difusión.	77
4.7	Salinidad en la distintas estaciones para los diferentes coeficientes de difusión considerados.	78

4.8	Salinidad media (izquierda) y desviación estándar (derecha) en la laguna sin efecto (arriba) y con efecto (abajo) de la pluma de descarga para un escenario de 1.6 m.	79
4.9	Salinidad en la laguna tres horas después de que comienza a ingresar agua de mar en la primera apertura de 1991 para los escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	81
4.10	Mayor efecto en la salinidad dentro de la laguna para los distintos escenarios: 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	81
4.11	Salinidad el 17 de junio de 1991 dentro de la laguna para los distintos escenarios: 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	82
4.12	Nivel en la laguna y en el océano para los distintos escenarios de apertura; escenario 1.4 m en rojo, escenario 1.6 m en azul y escenario 2.2 m en magenta. Con líneas punteadas se identifican las aperturas ocurridas en cada escenario y se indica el tiempo entre la apertura y el comienzo del ingreso de agua a través del canal.	82
4.13	Comparación de la disminución del nivel en la laguna después de una apertura con las mismas condiciones forzantes para los tres escenarios estudiado	83
4.14	Ciclo medio de área (arriba izquierda), ancho (centro izquierda) y velocidad (abajo izquierda) en el canal y franja del ancho de una desviación estándar. A la derecha se presentan las curvas de probabilidad acumulada de área (arriba), ancho (medio) y velocidad (abajo). Para los tres escenarios de apertura estudiados: 1.4 m (rojo), 1.6 m (verde) y 2.2 m (azul).	88
4.15	Ciclo medio anual con franja del ancho de la desviación estándar (arriba) y función de probabilidad acumulada (abajo) para el nivel de agua modelado en la estación <i>HOB0</i>	89
4.16	Modo asociado al primer componente principal de velocidades, para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	91

4.17	Modo asociado al segundo componente principal de velocidades para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	92
4.18	Modo asociado al tercer componente principal de velocidades para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	93
4.19	Circulación dentro de la laguna para caudales altos	97
4.20	Circulación dentro de la laguna para caudales bajos	98
4.21	Circulación dentro de la laguna con la barra cerrada	99
4.22	Campos medios de temperatura y desviación estándar en la laguna para los tres escenarios de apertura	101
4.23	Ciclo medio anual de temperatura y su desviación estándar en las estaciones Boya (abajo) y HOBO (arriba) para los tres escenarios de apertura estudiados	102
4.24	Campos medios de salinidad y desviación estándar en la laguna para los tres escenarios de apertura	104
4.25	Ciclo medio anual y función de distribución de probabilidad en varios puntos de la laguna para todos los escenarios estudiados.	106
4.26	Modo asociado al primer componente principal de salinidad, para los tres escenarios de apertura estudiados; 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	107
4.27	Modo asociado al segundo componente principal de salinidad, para los tres escenarios de apertura estudiados; 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).	108
4.28	Series de salinidad correspondientes a los modos asociados al primer y segundo componente principal, con nivel de la laguna y el océano (arriba) y cota de fondo del canal (abajo).	110
4.29	Media y desviación estándar de la salinidad en el océano para los tres escenarios estudiados	111
4.30	Modo asociado al primer (izquierda) y segunda (derecha) componente principal para los tres escenarios estudiados	112
1.1	Sensor HOBO MX-2001.	131
1.2	Ubicación del sensor en la laguna	132
1.3	Colocación del sensor	133
1.4	Referenciado del nivel	134

1.5	Niveles medido en la laguna en el período diciembre 2019 - noviembre 2020 y lluvias registradas en el pluviómetro de Rocha .	135
1.6	Evolución del ancho total del canal, de la margen este respecto al centro del canal y del nivel durante una apertura artificial. . .	136
1.7	Evolución del canal en planta.	137
1.8	Canal de conexión entre la laguna y el océano 20 horas después de la apertura.	138
3.1	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de L	146
3.2	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de n	147
3.3	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de m	148
3.4	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de α	149
3.5	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de n_{C_0}	150
3.6	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de k	151
3.7	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de Δ_{berm}	152
3.8	Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de TOL	153

Lista de tablas

2.1	Escenarios extremos y calmos considerados.	23
3.1	Parámetros morfológicos de las subcuencas de aporte a la Laguna de Rocha	47
3.2	Número de datos registrados en cada estación. Se indica que porcentaje se tomó con la laguna abierta y en cada estación del año.	54
3.3	Estadísticos de los datos de salinidad medidos dentro de la laguna en las diferentes estaciones	55
3.4	Estadísticos de los datos de temperatura medidos dentro de la laguna en las diferentes estaciones	57
3.5	Resumen de datos disponibles en la Laguna de Rocha, zona costera y datos atmosféricos, parte I	64
3.6	Resumen de datos disponibles en la Laguna de Rocha, zona costera y datos atmosféricos, parte II	65
4.1	Valor recomendado de los parámetros, rango típico, rango de valores estudiado y valor utilizado, con un * se indican los parámetros calibrados.	68
4.2	Media y desviación estándar de datos registrados y modelados de temperatura en las diferentes estaciones	72
4.3	Error medio cuadrático para distintas combinaciones de e_{air} y a comparando con datos medidos de enero a marzo 2016.	73
4.4	Media y desviación estándar de datos de salinidad registrados y modelados en las diferentes estaciones en PSU	74
4.5	Número de aperturas por año en los escenarios estudiados por elevación del nivel en la laguna	84

4.6	Caudal intercambiado entre la laguna y el océano para los distintos escenarios de apertura	85
4.7	Valor medio (μ), desviación estándar (σ) y máximo para ancho (B), profundidad (h) y área (A) del canal considerando solo los momentos en que el canal está abierto para los tres escenarios estudiados	87
4.8	Correlación entre componentes principales y los forzantes para los tres primeros componentes para cada escenario. U es la componente del viento según x , V la componente del viento según y , Q_{in} el caudal que ingresa a través de los arroyos, P la precipitación, η_O el nivel en el océano frente al canal de conexión, η_L el nivel en la laguna frente al canal de conexión, Q_{ch} el caudal que circula a través del canal, V_{ch} la velocidad en el canal y Zf_{ch} la cota de fondo del canal. Con - se indica la correlación no es estadísticamente significativa.	94
4.9	Correlación entre los resultados del análisis de componentes principales para salinidad y los forzantes para los tres primeros componentes. U es el componente de la velocidad según x , V el componente de la velocidad según y , Q_{in} el caudal que ingresa a través de los arroyos, P la precipitación, T_{air} la temperatura del aire, $Nubo$ la nubosidad, Rad la radiación solar, η_O el nivel en el océano frente al canal de conexión, η_L el nivel en la laguna frente al canal de conexión, Q_{ch} el caudal que circula a través del canal, V_{ch} la velocidad en el canal y Zf_{ch} la cota de fondo del canal. Con - se indica cuando no hay correlación.	110

Tabla de contenidos

Lista de figuras	x
Lista de tablas	xvi
Tabla de contenidos	xvii
1 Introducción	1
1.1 Lagunas costeras de apertura y cierre intermitente	2
1.1.1 Morfología de la desembocadura	4
1.2 Modelos de calidad de aguas	8
1.2.1 Modelos numéricos para solución de la hidrodinámica y transporte de temperatura y salinidad	9
1.2.2 Modelación numérica de lagunas costeras	11
1.3 Efectos del cambio climático en lagunas costeras	13
1.4 Laguna de Rocha	17
1.5 Objetivos	21
2 Metodología general de modelación y análisis de resultados	22
2.1 Modelación numérica	24
2.1.1 Modelo bidimensional multiescala	25
2.1.2 Modelo hidro-morfodinámico simplificado	31
2.1.3 Estrategia de calibración y validación	35
2.1.4 Comparación de resultados medidos y modelados	37
2.2 Metodología de análisis de resultados	38
2.2.1 Análisis de componentes principales	40
3 Datos disponibles	43
3.1 Precipitación, evaporación y caudales	44
3.2 Niveles y oleaje	48

3.3	Viento	49
3.4	Salinidad	51
3.5	Temperatura del agua	55
3.6	Variables atmosféricas	57
3.7	Datos de aperturas	59
3.8	Topografía y batimetría	61
3.9	Resumen de datos	63
4	Resultados	66
4.1	Calibración y validación	66
4.1.1	Modelo hidro-morfodinámico simplificado	66
4.1.2	Modelo de intercambio de calor con la atmósfera	69
4.1.3	Comparación de los resultados de temperatura con datos medidos	70
4.1.4	Comparación de los resultados de salinidad con datos medidos	73
4.2	Análisis de escenarios de aperturas	83
4.2.1	Canal de conexión	84
4.2.2	Nivel en la laguna	88
4.2.3	Patrones de circulación	89
4.2.4	Temperatura	100
4.2.5	Salinidad	102
5	Discusión	114
6	Conclusiones generales y futuras líneas de trabajo	118
	Bibliografía	121
	Anexos	129
	Anexo 1 Campañas de medición	130
1.1	Colocación del sensor de nivel y temperatura	130
1.1.1	Instrumento	130
1.1.2	Colocación y seteo del sensor	131
1.1.3	Datos registrados	134
1.2	Mediciones en el canal de conexión	135
	Anexo 2 Pseudocódigo del modelo implementado	139

Anexo 3	Sensibilidad de los resultados a los parámetros del modelo	
hidro-morfodinámico simplificado		144
3.1	Análisis de sensibilidad	144
3.1.1	Sensibilidad a la longitud del canal	145
3.1.2	Sensibilidad al número de manning	146
3.1.3	Sensibilidad a la pérdida de carga localizada	147
3.1.4	Sensibilidad a la relación entre el ancho y la profundidad del canal	148
3.1.5	Sensibilidad al coeficiente de transporte de sedimentos	149
3.1.6	Sensibilidad a la tasa de transporte de sedimentos	150
3.1.7	Sensibilidad a la tasa de crecimiento de la berma	151
3.1.8	Sensibilidad a la tolerancia para el cierre del canal	152
3.2	Selección de parámetros para calibrar	153
3.3	Discusión	154

Capítulo 1

Introducción

La presente tesis se enmarca en el proyecto ANII “Estudio integrado del funcionamiento hidrodinámico y ecológico de una laguna costera: insumos para el manejo de la calidad de agua y reclutamiento de especies costeras”. El objetivo general de dicho proyecto es “analizar el funcionamiento del ecosistema Laguna de Rocha mediante la modelación de sus principales características hidrodinámicas, el transporte de larvas de especies acuáticas y el balance de los nutrientes, como contribución al conocimiento del complejo funcionamiento de estos ecosistemas y como insumos para realizar recomendaciones de manejo, actuales y en escenarios futuros basados en el mejor conocimiento científico posible”.

Este trabajo de maestría se centró en el desarrollo e implementación de un modelo hidrodinámico 2D multiescala de la Laguna de Rocha, que contempla tanto los casos en los que la barra de arena que separa la laguna del océano se encuentra cerrada como los que está abierta, y simula la apertura, evolución y cierre del canal de conexión. Una de sus aplicaciones principales fue el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la temperatura y salinidad dentro de la laguna, así como la determinación de sus patrones de circulación típicos.

A continuación, se presentan las características más relevantes de las lagunas costeras de cierre y apertura intermitente; se resume el estado del arte de modelos numéricos aplicados a lagunas costeras, en particular con modelación de temperatura y salinidad; se introduce brevemente el concepto de cambio climático y sus potenciales efectos sobre lagunas costeras; se presenta la Laguna de Rocha, mencionando tanto sus características más relevantes como los principales estudios que se han llevado a cabo en la misma; y finalmente se

exponen los objetivos generales y específicos que se esperan alcanzar en esta tesis.

1.1. Lagunas costeras de apertura y cierre intermitente

Las lagunas costeras de apertura y cierre intermitente (ICOLL por sus siglas en inglés) son un tipo particular de estuario; se encuentran separadas del mar por una barra de arena en la que se abre un canal, ya sea natural o artificialmente, dependiendo del régimen de lluvias local (Knoppers, 1994). Generalmente las ICOLLs se encuentran en regiones micromareales de oleaje dominante, concentrándose en latitudes medias entre 6.22° a 46.26° N y 7.46° a 54.38° S (McSweeney et al. 2017). En zonas de oleaje dominante, la señal de marea es despreciable frente al oleaje, el transporte de sedimentos litoral y transversal favorece la formación y crecimiento de una berma de arena supramareal que separa el océano de la laguna y provoca el cierre del canal (Haines et al. 2006; Baldock et al. 2008; McSweeney et al. 2017). Si además la amplitud de la marea es pequeña (región micromareal), se puede producir la ruptura de la barra debido a las grandes descargas de los tributarios (Kraus et al. 2008). El cierre del canal ocurre cuando la berma de arena se estabiliza atravesando la entrada del mismo durante los períodos de bajas descargas fluviales (McSweeney et al. 2017).

Las ICOLLs constituyen aproximadamente el 3% de los estuarios en el mundo y el 15% de los estuarios micromareales (McSweeney et al. 2017). Este tipo de lagunas suelen presentar cuencas de aporte menores que las permanentemente abiertas y en general cuentan con menor energía fluvial para mantener abierto el canal en relación a la cantidad de sedimento entregado por el oleaje (Cooper, 2001; McSweeney et al. 2017).

La conexión entre la laguna y el océano condiciona todo el funcionamiento de la misma; cuando la conexión al mar se encuentra cerrada, las ICOLLs se comportan como una laguna desconectada, siendo el viento y las descargas fluviales los forzantes principales, mientras que cuando se encuentra abierta, su comportamiento depende también de la diferencia de niveles entre la laguna y el océano, la geometría del canal de conexión y el clima de olas, lo que puede limitar o facilitar el intercambio de agua, sedimentos y otras sustancias

(McSweeney et al. 2017), condicionando las propiedades físicas, químicas y biológicas de la laguna. En la figura 1.1 se presenta el esquema de funcionamiento de una laguna de apertura y cierre intermitente durante períodos de barra abierta y barra cerrada.

Por otra parte, la estructura espacio temporal de los patrones de circulación por viento e intercambios de agua asociados pueden tener una gran influencia en las interacciones bio-hidrodinámicas para lagunas de aguas someras (Boutron et al. 2015).

Las ICOLLs son de importancia global, ya que son sistemas únicos, típicamente caracterizados por flujo horizontal bidireccional, mezcla permanente de la columna de agua, y cambios abruptos en el tiempo de residencia y profundidad. Son sistemas altamente productivos y representan importantes pesquerías comerciales y recreacionales (Yáñez-Arancibia et al. 1994). Recientemente, debido al aumento de la población mundial y actividades turísticas, y cambios en usos del suelo, las lagunas costeras se han visto afectadas por eutrofización, polución, desbalances hidrológicos y modificación de los ambientes, resultando en importantes degradaciones de su ecosistema (Rodríguez-Gallego et al. 2017; Shalby et al. 2020). Es usual que en las cuencas de dichas lagunas se asienten ciudades y poblados pesqueros donde se realizan actividades productivas de distinta índole (Amaral, 2020); esto lleva a que muchas veces se recurra a una apertura artificial de las lagunas, para evitar que las comunidades, poblados y/o ciudades se vean afectados.

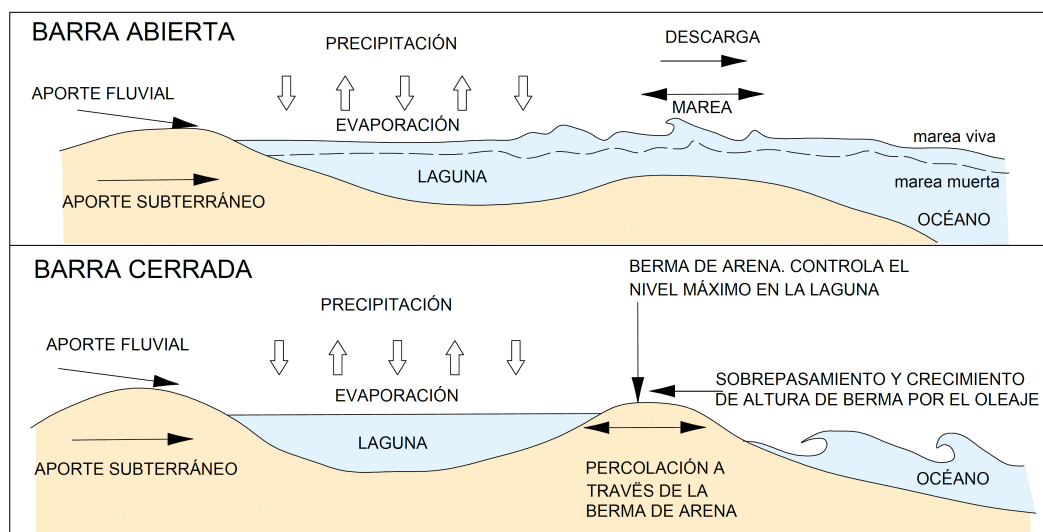


Figura 1.1: Balance de agua para laguna abierta (arriba) y cerrada (abajo). A partir de figura tomada de Gordon (1990)

1.1.1. Morfología de la desembocadura

La morfología de la desembocadura y el proceso de apertura, evolución y cierre del canal de conexión están definidos principalmente por tres agentes: la descarga de los arroyos a la laguna, la marea y el clima de olas (Ranasinghe et al. 1999;McSweeney et al. 2017).

Los principales elementos que definen la morfología son: la barra (o berma) de arena que separa la laguna del océano, los bancos de arena del océano y la laguna y el canal de conexión. La figura 1.2 muestra un esquema en planta de los mecanismos de apertura y cierre de la laguna por procesos de transporte litoral (izquierda) y transversal (derecha); en el caso de aportes fluviales altos se abre un canal perpendicular a la costa, una vez que el caudal de descarga de la laguna al océano disminuye, por efecto del transporte litoral, el canal cambia de dirección hasta que finalmente se cierra. Por otra parte, cuando el transporte de sedimentos es transversal, si el aporte fluvial es elevado se da un transporte de sedimentos offshore, y la formación de una barra paralela a la costa, la cual vuelve a migrar hacia la costa cuando el flujo es débil, hasta que el canal finalmente se cierra. Este segundo mecanismo solo es viable en zonas micromareales (Ranasinghe et al. 1999).

Los bancos de arena del océano son cuerpos de arena que se encuentran del lado del océano próximos a la desembocadura. Su forma está condicionada por la relación entre la energía de la marea y el oleaje, típicamente presentan forma triangular o semicircular (Dean y Dalrymple, 2004). Los bancos de arena de la laguna son aquellos que se encuentran dentro de la misma, su forma está relacionada principalmente con el rango de marea; en costas de influencia mixta de oleaje y marea tienden a presentar un único banco de gran tamaño, mientras que en costas de oleaje dominante es usual que presenten varios lóbulos (FitzGerald, 1983).

La configuración en planta del canal de conexión está fuertemente condicionada por el transporte de sedimentos litoral, pudiendo ser desde rectos y perpendiculares a la costa hasta curvilíneas y paralelos a la misma (van de Kreeke y Brower, 2017). En el caso de las ICOLLs el canal evoluciona hasta su cierre, pudiendo presentar cambios en su forma durante el proceso.



Figura 1.2: Esquema de mecanismos de apertura y cierre de la laguna. De Rana-singhe et al. (1999)

El proceso de apertura y cierre de una ICOLL se puede separar en varias etapas; llenado de la laguna, formación del canal y apertura de la barra, descarga de agua de la laguna, ingreso de agua de mar, cierre del canal y crecimiento de la berma. La figura 1.3 muestra un esquema del proceso mencionado, donde cada una de las etapas que serán descritas a continuación. Inicialmente, se considera la berma cerrada a un nivel mayor a los niveles de agua en la laguna y el océano (diagrama 1a).

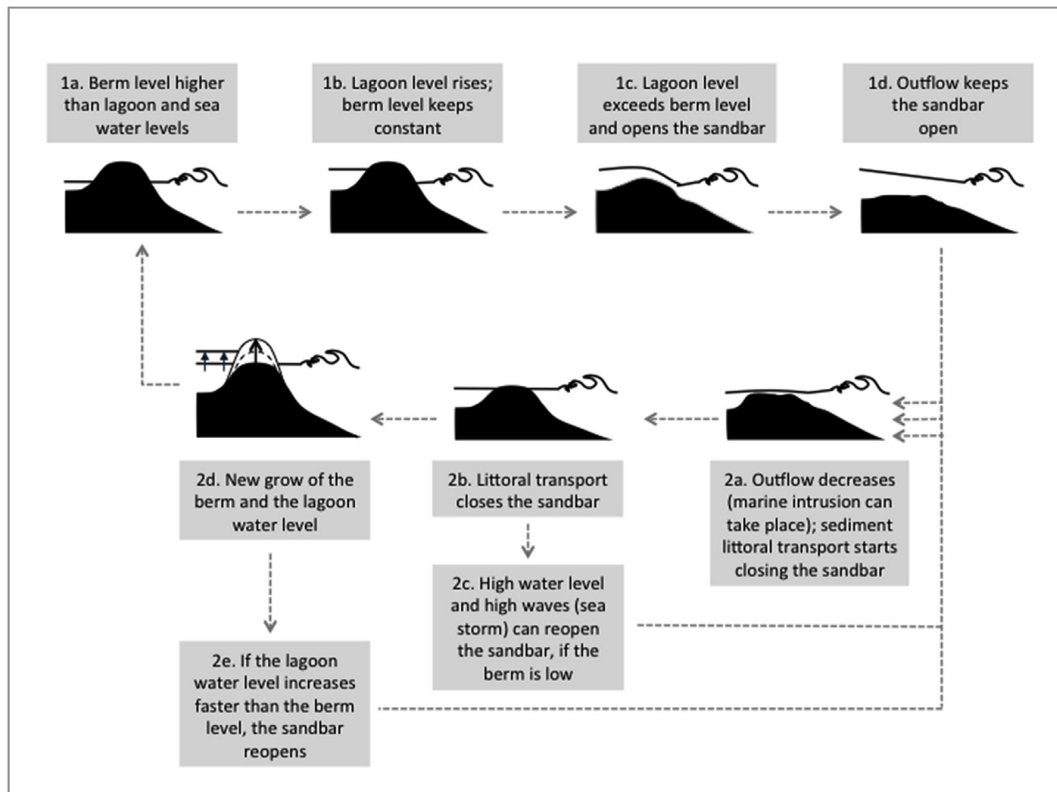


Figura 1.3: Diagrama conceptual del proceso de apertura y cierre natural de una ICOLL. De Conde et al. (2019)

Con la barra cerrada, se da un aumento en el nivel de la laguna debido al caudal de aporte de los arroyos (diagrama 1b de la figura 1.3). Generalmente, no se cuenta con mediciones de estos caudales, por lo que deben ser estimados. Para ello, es usual implementar modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía. Estos modelos representan el comportamiento de la cuenca de aporte, donde se identifican los procesos principales con la mayor precisión posible, lo que permite simplificar el sistema (Geetha et al. 2007). Existen varios modelos en la literatura para la simulación hidrológica, algunos enfocados en eventos extremos y otros en regímenes medios; en este caso, son de mayor interés los mencionados en el segundo grupo. Un modelo bastante utilizado y que ha sido aplicado con éxito en Uruguay (Narbondo et al. 2020) es el GR4J; un modelo de paso diario de cuatro parámetros, basado en la humedad del suelo (Perrin et al. 2003). En este modelo se obtiene la precipitación efectiva a partir de la precipitación en la cuenca, la evaporación y el agua almacenada en el suelo (supuesto como un reservorio), teniendo en cuenta que la capacidad de almacenamiento del mismo se ve limitada al agua disponible. Los caudales

se calculan multiplicando la precipitación efectiva por un hidrograma unitario definido en base a los parámetros de la cuenca.

El nivel en la laguna continua aumentando debido al ingreso de caudales hasta que, eventualmente, supera la cota de la berma, dando lugar a la circulación de agua y formación de un canal que conecta la laguna y el océano (diagrama 1c de la figura 1.3). En este proceso se identifican tres etapas: (1) iniciación del canal, (2) etapa de vertedero, y (3) flujo subcrítico. La laguna desborda comenzando a formar un canal preferencial; inicialmente, la tasa de erosión en el mismo es pequeña; a medida que avanza esta etapa aumenta el caudal y las velocidades, generando un mayor transporte de sedimentos y formación de formas de fondo. Parte de los sedimentos transportados se depositan en la zona de swash, lo que, conjuntamente con el colapso de los taludes, y la acción de la marea y el oleaje puede resultar en una interrupción del proceso de apertura. La transición entre la primera y la segunda etapa se da cuando el flujo pasa de subcrítico a supercrítico. Se forma un vertedero en la sección del canal próxima al océano, una serie de resaltos hidráulicos y una zona de rompiente aguas abajo del mismo. El flujo aguas abajo del vertedero da lugar a la formación de anti-dunas en el fondo del canal, las cuales migran hacia aguas arriba, moviendo también la localización del vertedero. La tercera etapa comienza cuando el vertedero llega hasta la laguna. El flujo se vuelve subcrítico, la erosión continúa hasta que se iguala la carga entre la laguna y el océano.

Cuando se iguala la carga, el flujo disminuye, dando lugar a intrusión marina y el sedimento transportado por el oleaje comienza a cerrar la barra (diagrama 2a en figura 1.3). En zonas donde domina el transporte litoral, la concentración de sedimento en suspensión en la desembocadura del canal, que está disponible para entrar al canal, se puede relacionar con el transporte de sedimento litoral a partir del caudal de transporte litoral, la tasa media de transporte de sedimentos y un valor representativo de la concentración de sedimentos en la zona de la desembocadura. La barra se cierra debido la acumulación de sedimentos en la zona de descarga al mar, pero se puede volver a abrir con un nivel de mar alto y oleaje fuerte mientras es baja (diagrama 2b-2c en figura 1.3).

Una vez que la barra está cerrada la berma comienza a crecer verticalmente y se reinicia el proceso (diagrama 2d en figura 1.3). El crecimiento vertical de la barra de arena afecta el momento y frecuencia de ocurrencia de las aperturas. Una vez que el canal se cierra comienza a darse el crecimiento de la

berma; la velocidad del flujo del ascenso de la ola decrece a medida que la ola sube la pendiente de la playa, resultando en la deposición de sedimentos, los que aumentan la altura de la berma. La tasa de percolación depende de la pendiente de la playa y la permeabilidad de los sedimentos. Varios estudios siguen la línea de relacionar la altura de la berma con la altura de ola (Takeda y Sunamura, 1982; Okazaki y Sunamura, 1994) y más recientemente con el runup (Hanslow et al. 2000). Recientemente Booysen y Theron (2020) investigaron el crecimiento de la berma de arena en 20 estuarios de apertura y cierre intermitente en zonas micromareales de oleaje dominante en la costa de Sudáfrica, y desarrollaron un método de estimación de la evolución y altura máxima alcanzada. El crecimiento de la berma se estimó a partir del percentil 98 % de la elevación por una constante de proporcionalidad que depende de cada estuario, el runup, y de la elevación de cresta de la berma, que se obtiene a partir del diámetro medio de los sedimentos y de un parámetro de escala mediante una relación empírica.

1.2. Modelos de calidad de aguas

La hidrodinámica estudia el movimiento del agua y las fuerzas que actúan sobre ella; este movimiento impulsa el transporte de sedimentos, tóxicos y nutrientes y es crítico en la circulación y dispersión de contaminantes (Ji, 2009). Los procesos hidrodinámicos que se dan en un cuerpo de agua suelen ser complejos y dependen de una gran variedad de mecanismos forzantes, destacándose en las lagunas costeras la marea, el viento, los aportes fluviales (Vaz et al. 2005), la configuración de la conexión con el océano, orientación de la laguna, y batimetría (Ferrarin y Umgiesser, 2005; Umgiesser et al. 2004). Los movimientos de agua a diferentes escalas afectan significativamente la distribución de temperatura, salinidad, nutrientes, oxígeno disuelto, sedimentos, contaminantes y algas (Ji, 2009).

La temperatura del agua y salinidad se encuentran entre las variables clave que afectan los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los cuerpos de agua, por lo que su simulación es esencial en el modelado de calidad de aguas (Wu, 2008). La temperatura influye en la tasa de crecimiento de las plantas fotosintéticas, el metabolismo de organismos acuáticos y la sensibilidad de los mismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades (Wu, 2008). El perfil vertical de temperatura afecta la estratificación, lo cual es crítico para la

mezcla vertical; la concentración de oxígeno disuelto, los procesos bioquímicos y fisiológicos, y la supervivencia de las especie, entre otros (Ji, 2009). La salinidad afecta los procesos bio-químicos y es determinante para la distribución y supervivencia de algunas especies.

Con el fin de comprender la complejidad y dinamismo de los procesos hidrodinámicos que caracterizan el funcionamiento de las lagunas costeras se suelen implementar distintos modelos, ya sea numéricos, los cuales se basan en ecuaciones que describen los procesos, o empíricos, que se basan en mediciones experimentales. El modelo a utilizar depende tanto del objetivo que se desee alcanzar como de los datos disponibles en el sitio de estudio, y en ocasiones los modelos pueden ser complementarios. En el presente trabajo se implementó un modelo numérico.

1.2.1. Modelos numéricos para solución de la hidrodinámica y transporte de temperatura y salinidad

La hidrodinámica de los cuerpos de agua es representada mediante modelos matemáticos, los cuales se pueden resolver de forma analítica o numérica; un modelo analítico tiene una solución exacta de las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del agua, pero solo están disponibles para un número limitado de condiciones. La mayoría de los problemas de flujo a superficie libre son excesivamente complicados y no pueden ser resueltos con esta metodología, haciendo necesaria la aplicación de técnicas numéricas para alcanzar resultados (Ji, 2009).

Un modelo numérico es una versión discreta de las ecuaciones matemáticas que describen los procesos que ocurren en el cuerpo de agua. Los modelos simulan el comportamiento del cuerpo de agua en respuesta a condiciones forzantes específicas, pudiendo ser utilizados para predecir la respuesta del sistema (Ji, 2009). La calidad de los resultados obtenidos depende de varios factores, tales como: la adecuación de los modelos conceptuales utilizados; la correcta descripción matemática de los fenómenos hidrodinámicos, morfodinámicos y de transporte que ocurren en el sistema; la generación de grillas de cálculo adecuadas; la exactitud y consistencia de las aproximaciones numéricas; la estabilidad numérica y eficiencia computacional de los métodos de resolución; y la adecuada programación e implementación del código computacional. Asimismo, más

allá de asegurar que se cumplan los factores anteriores, los modelos computacionales deben ser calibrados y validados con información real medida en campo (Wu, 2008).

Los modelos hidrodinámicos se basan en dos leyes fundamentales, la conservación de la masa y la conservación de la cantidad de movimiento (Ji, 2009), las cuales pueden ser representadas por un sistema de ecuaciones diferenciales. La ley de conservación de la masa se expresa comúnmente como un balance de masa, también llamado ecuación de continuidad. Esta ley establece que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo que, dado un volumen de control, la acumulación de masa va a ser igual a la masa entrante menos la masa saliente más las fuentes menos los sumideros (Ji, 2009). Por otra parte, la ley de conservación de la cantidad de movimiento se puede derivar de la segunda ley de Newton, que establece que la suma de las fuerzas externas es igual a la masa por la aceleración del objeto. La simulación requiere de la representación del dominio de estudio por un número finito de elementos que constituyen la grilla computacional donde se resuelve el sistema de ecuaciones imponiendo condiciones de borde e iniciales (Wu, 2008).

Por otra parte, la temperatura y la salinidad son modeladas mediante la ecuación de transporte, con una serie de términos fuente/sumidero que parametrizan los procesos específicos de cada variable, como ser el intercambio de calor con la atmósfera y el fondo, el calor generado por las reacciones químicas y biológicas, entre otros (Wu, 2008).

La resolución del sistema de ecuaciones diferenciales requiere de condiciones de borde y de condiciones iniciales. Las condiciones de borde y los forzantes externos son los que fuerzan el modelo durante las simulaciones. Los océanos, aguas costeras y estuarios están conectados y forman parte de un único sistema por lo que para poder simular una región se le imponen bordes artificiales. Éstos pueden ser sólidos (no permiten el paso del flujo) o líquidos (permiten el paso del flujo). Idealmente, estas condiciones, deben representar de forma precisa las respuestas en el límite del dominio del modelo, ya sea que se originen en procesos dentro o fuera del mismo. En la práctica, sin embargo, especificarlas es un problema en sí mismo (Ji, 2009). Las condiciones iniciales especifican el estado del cuerpo de agua al inicio de la simulación (Ji, 2009). Es razonable creer que en algún momento del futuro las variables no dependerán de las condiciones iniciales impuestas si la simulación es lo suficientemente larga. Sin embargo, si el tiempo de la simulación no sea suficiente para independizarse de

las condiciones iniciales el modelo no es confiable a menos que las condiciones iniciales definidas representen adecuadamente el estado del cuerpo de agua al comienzo (tiempo cero) de la simulación (Ji, 2009).

1.2.2. Modelación numérica de lagunas costeras

En la actualidad existen diversos trabajos sobre modelación de la calidad de agua, temperatura y salinidad en diversas lagunas costeras a nivel mundial. Los estudios existentes de modelación numérica de la hidrodinámica de lagunas costeras fueron realizados mayormente en lagunas permanentemente conectadas al mar con canales de sección fija. Si bien estas lagunas no presentan el mismo comportamiento que las de apertura y cierre intermitente, la hidrodinámica de estas últimas puede modelarse de forma similar si se incluye la simulación de la apertura y cierre del canal de conexión entre la laguna y el océano. A continuación se discuten las referencias más relevantes de modelación hidrodinámica de lagos y lagunas costeros y sus conclusiones.

Boutron et al. (2015) estudiaron la estructura espacio temporal de los patrones de circulación forzados por el viento y su importancia en la hidrodinámica de lagunas poco profundas a través de la implementación del modelo TELEMAC-2D, en el sistema de lagunas Vacares, ubicado en el delta del Ródano, en Francia. Los autores simularon dos condiciones de viento estacionario y un evento no estacionario. Los resultados muestran la influencia de la geometría de la laguna de Vacares en la circulación y las diferencias entre las distintas sub-lagunas del sistema. Los patrones de viento generados en las simulaciones estacionarias están condicionados por la profundidad en la laguna de Vacares, siendo las velocidades en la misma dirección que el viento en las zonas más someras y en la dirección opuesta en las más profundas.

Ria de Aveiro es una laguna de casi 90 km² y una profundidad media de 1 m aproximadamente, ubicada en la zona centro de Portugal. Ésta es una de las lagunas costeras más estudiadas mediante modelación numérica (Vaz et al. 2005; Dias y Lopes, 2006, Tomas et al. 2014). Vaz et al. (2005) analizaron los patrones de salinidad en uno de los cuatro canales principales de la laguna, que alcanza una profundidad de 24 m. Posteriormente Dias y Lopes (2006) implementaron un modelo hidrodinámico y de transporte de calor y salinidad. En los resultados los autores observaron que la distribución espacial y temporal de la temperatura del agua y salinidad es fuertemente dependiente

de la relación entre el ciclo de marea y el caudal de los ríos. Cuando el caudal fluvial es débil, la intrusión de la marea es el mecanismo forzante principal, generando frentes salinos y térmicos que migran con el ciclo de marea. Mientras que, si ocurre un aumento del caudal, la influencia del agua dulce se extiende casi hasta la boca de la laguna y se establece estratificación vertical en el canal. El gradiente horizontal que se genera marca el borde entre dos regiones: un estuario marino, en la zona cercana al mar, y un estuario fluvial, en la zona más cercana a las descargas (Vaz et al. 2005).

Ferrarin y Umgiesser (2005) desarrollaron y aplicaron un modelo hidrodinámico para la Laguna de Las Cabras, ubicada en Cerdeña, Italia, que reproduce la hidrodinámica, salinidad y temperatura dentro de la laguna. Esta laguna tiene un área de 22 km² y una profundidad media de 1.6 m. Está conectada con el golfo de Oristano mediante cuatro pequeños canales, y un canal de mayores dimensiones con una compuerta que permite regular el nivel dentro de la laguna. Las simulaciones hidrodinámicas se llevaron a cabo con diferentes condiciones de forzantes y estados de la compuerta (abierta o cerrada). Los resultados muestran que el viento es el forzante principal en la circulación de agua en la laguna, mientras que la marea controla la descarga a través de los canales y modula el patrón de circulación generado por el viento, tendiendo a crear corrientes circulares en la zona más ancha de la laguna. Cuando la compuerta está cerrada las velocidades más altas se producen en la costa y las más bajas en el centro, si se encuentra abierta, la marea tiene una fuerte influencia y asegura una mejor mezcla.

La Laguna de los Patos, ubicada en el sur de Brasil mide 10.360 km² de superficie, y el área de su cuenca de aporte es 201.626 km². La profundidad media de la laguna es de 5 m. Fernandes et al. (2000) implementaron una modelación numérica en TELEMAC-2D, verificando que este modelo (2D) puede ser adecuado a partir de mediciones a distintas profundidades en distintos sitios. Posteriormente, Martins et al. (2007) aplican el modelo SIMSYS2D con enfoque en el transporte de larvas. En ambas investigaciones, los autores encontraron que el intercambio de salinidad con el océano y las entradas de agua dulce están principalmente controladas por corrientes inducidas por el viento y por la precipitación en la cuenca de aporte, así como las condiciones previas en las que se encuentra la laguna.

Varios autores observaron que las lagunas de aguas poco profundas presentan una respuesta importante al viento debido a la relación área sobre

profundidad; en estos casos las corrientes son rápidamente amortiguadas por la fricción de fondo (Smith, 1994; Mahanty et al. 2016).

Referido a ICOLLs, McSweeney, 2019 presentó una predicción empírica para apertura y cierre y su duración, basada en datos históricos. Una de los resultados más relevantes es que se encontró que la condición de la barra se puede predecir con el balance relativo entre la energía del oleaje y de la descarga fluvial.

1.3. Efectos del cambio climático en lagunas costeras

El sistema climático se ha visto afectado por las actividades humanas, y en particular por las emisiones de gases del efecto invernadero. Desde mediados del siglo pasado se han notado cambios sin precedentes a escala humana en el sistema climático; la atmósfera y océano se calentaron, disminuyó la cantidad de hielo y nieve, y hubo un aumento del nivel de mar (Masson-Delmotte et al. 2021).

Los efectos del cambio climático usualmente son estudiados bajo diferentes escenarios probables de emisiones de gases y para distintos horizontes temporales. Los más utilizados y aceptados mundialmente son las trayectorias de concentración representativas (RCP por su sigla en inglés). Dentro de estas se definen 4 escenarios: el RCP2.6 que implica una severa mitigación de las emisiones para sea probable que el aumento de la temperatura media global no supere los 2°C respecto a la temperatura pre-industrial; el RCP8.5 representa el escenario si las emisiones continúan como lo usual; y los RCP4.5 y RCP6 que son escenarios intermedios de emisiones (Masson-Delmotte et al. 2021).

Los cambios proyectados para el sistema climático presentan una gran variedad de efectos en los sistemas naturales y antropogénicos. En la modelación numérica de lagunas costeras, es fundamental incluir el aumento del nivel medio del mar. Otros cambios que es usual considerar son: la modificación en el régimen hidrológico (Xu et al. 2012; De Pascalis et al. 2012; Vargas et al. 2017), la modificación en el clima de olas (Hong y Shen, 2012), los cambios en la temperatura del aire y océano (Brito et al. 2012; De Pascalis et al. 2012; Shalby et al. 2020), la variación en la salinidad del océano (Xu et al. 2012; De Pascalis et al. 2012; Shalby et al. 2020) y los cambios en los regímenes de viento (Xu et

al. 2012). A su vez, los cambios en los fenómenos atmosféricos como El Niño Oscilación Sur (ENSO), el Dipolo del Océano Índico (IOD) o la Oscilación del Atlántico Norte (TNA), y la sincronización de los mismos, pueden tener un efecto importante en las consecuencias del cambio climático (Martín-Gómez y Barreiro, 2017). La respuesta a los efectos del cambio climático depende de las características particulares de cada laguna costera (Brito et al. 2012), las cuales pueden actuar como “sistemas vigía” del cambio climático, permitiendo una alerta temprana de los efectos regionales del cambio climático (Brito et al. 2012).

En la figura 1.4 se muestran los principales efectos del cambio climático y los cambios que podrían provocar en los procesos y propiedades físicas de las lagunas. Los principales procesos morfodinámicos existentes en lagunas de apertura y cierre intermitente que se podrían ver afectados por los cambios en los factores climáticos son la dinámica de formación y migración de la barra de arena y la tasa de descarga de arena a través de los arroyos.

Processes and physical properties	Climate change factor			
	Sea level	Air and open ocean temperatures	Precipitation	Storms
Processes				
Barrier-lagoon migration	Erosion and shoreward migration of barrier islands ^{1,2,3}			Rapid sediment redistribution ^{4,5,6}
Flushing rate	Increased flushing due to barrier breaching ^{7,8}		Variability in freshwater input increases variability in flushing ^{9,10}	Increased flushing due to barrier breaching ^{6,11,12}
Sedimentation			Sediment flux inversely related to precipitation ^{15,17,18}	Increased sediment transport ^{4,15}
Physical properties				
Lagoon water temperature		Temperature increase amplified in shallow systems ^{13,14}		
Salinity	Change in salinity through inundation ^{7,15,16}		Salinity inversely related to freshwater input ^{11,17,18}	Higher salinity due to increased breaching and wash-over events ^{6,18,19}
Nutrients			Higher nutrient input through overall increased terrestrial runoff ^{19,20,21}	
Light penetration			Increased suspended solids during freshwater runoff events ^{18,22}	
Oxygen		Decreased oxygen solubility with increased temperature ^{23,24}	Lower dissolved oxygen with increased stratification ^{18,20}	

1: Brunn 1962, 2: Titus 1990, 3: Pilkey and Cooper 2004, 4: Boothroyd et al. 1985, 5: Fenster and Dolan 1993, 6: Morton and Sallenger 2003, 7: Bird 1993, 8: Oliveira et al. 2006, 9: Paerl et al. 2006, 10: Trenberth et al. 2007, 11: Kjerfve and Magill 1989, 12: Fritz et al. 2007, 13: Harley et al. 2006, 14: Nixon et al. 2004, 15: Scavia et al. 2002, 16: Intergovernmental Panel on Climate Change 2007, 17: Michener et al. 1997, 18: Najjar et al. 2000, 19: Chabreck and Palmisano 1973, 20: Justic et al. 1996, 21: Rogers and McCarty 2000, 22: Steward et al. 2006, 23: Pilson 1998, 24: Bopp et al. 2002.

Figura 1.4: Efectos directos de factores de cambio climático proyectados en procesos y propiedades físicas de lagunas costeras. De Anthony et al. (2009)

En lo que refiere a la barra de arena, se espera que debido al aumento en el nivel medio del mar se de un incremento en la altura de la misma y una migración hacia la tierra (ver figura 1.5), modificando el nivel máximo potencial que puede alcanzar la laguna (Haines et al. 2006).

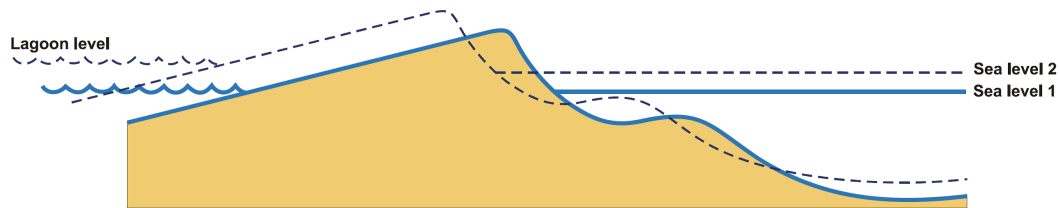


Figura 1.5: Efecto del aumento del nivel medio del mar en berma de arena. De Haines et al. (2006)

A su vez, un cambio en la frecuencia e intensidad de las tormentas generaría cambios en los regímenes de apertura y cierre así como el tiempo que la barra permanece abierta (Haines et al. 2006), tanto debido al cambio en los volúmenes de agua y sedimento que ingresan a la laguna como del transporte de sedimentos en el océano. Según Haines et al. (2006) un aumento en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos conllevaría a un aumento en el tiempo que permanecen abiertas las lagunas que se encuentran abiertas la mayor parte del tiempo. Mientras que para las lagunas que están cerradas la mayor parte del tiempo, se espera una reducción de las aperturas naturales y por lo tanto que se mantenga cerrada más tiempo.

La evaluación del efecto del cambio climático sobre las propiedades físicas de las lagunas costeras es posible abordarla mediante el uso de modelos numéricos, en los que se simulan distintos escenarios futuros (Brito et al. 2012, Vargas et al. 2017, Shalby et al. 2020). Respecto a los cambios esperables en salinidad, debido al aumento en el nivel medio del mar se espera un aumento en la salinidad de las lagunas y en la longitud de la intrusión salina cuando esta se encuentran abiertas (Hong y Shen, 2012; Carrasco et al. 2016; Shalby et al. 2020). A su vez, la progresión hacia la tierra del agua salobre puede causar la salinización del suelo fértil. En su estudio, Shalby et al. (2020) llegan a que los cambios mayores en la salinidad se atribuyen al aumento del nivel de mar, siendo menor el efecto del cambio en el régimen de precipitaciones. Los cambios en la temperatura del agua podrían restringir la capacidad de las lagunas para preservar las especies que actualmente habitan en ellas. En particular, Shalby et al. (2020) encontraron que para el lago Burullus, el aumento de la temperatura media anual del agua es directamente proporcional al aumento de la temperatura media anual del aire, por lo que se espera un aumento en la misma.

Por otro lado el efecto de los cambios en el ciclo hidrológico no es tan claro,

ya que la salinidad depende fuertemente del estado de la barra. Por ejemplo, en el caso del lago Burullus, el cual se encuentra conectado de forma permanente al mar, tanto el cambio en las condiciones meteorológicas como el aumento del nivel de mar incrementan la salinidad en el lago (Shalby et al. 2020). En Ria de Aveiro, que presenta una carrera de marea de casi 3 m, Vargas et al. (2017) encontraron que en los meses de mayor precipitación se da una expansión de las zonas de alta salinidad en la dirección aguas arriba y un aumento hacia el interior de la laguna para escenarios futuros, mientras que en condiciones secas no se observaron diferencias significantes ya que la mayoría de la laguna se presenta una salinidad similar a la del mar.

1.4. Laguna de Rocha

La laguna de Rocha es una laguna costera de aguas poco profundas (profundidad media 0.6 m), ubicada en la costa atlántica de Uruguay, con una superficie de aproximadamente 72 km², y cuenca de aporte de 1080 km². Por su conexión intermitente con el océano estas lagunas puede ser clasificada como ICOLL, comunicándose con el océano a través de un único canal, localizado en una barra de arena, que se abre natural o artificialmente (Conde et al. 2002). Esta laguna forma parte de una serie de lagunas salobres que también presentan la característica de ser de apertura y cierre intermitente (ver figura 1.6).

La Laguna de Rocha presta una gran variedad de servicios ecosistémicos, entre los que se destacan la de deposición y cría de peces y crustáceos, las pesquerías artesanales, la extracción de juncos, el control hidrológico, la importancia paisajística para su explotación turística, la conservación de biodiversidad, la generación y mantenimiento de suelos, el control de especies invasoras, y la atenuación del impacto del cambio climático (Saona, 2003; Aubriot et al. 2005; Rodríguez-Gallego et al. 2012; Rodríguez-Gallego et al. 2017). En 2015, la laguna fue declarada Reserva de Biosfera por MaB-UNESCO por su gran valor ecosistémico e importancia ecológica, y desde 2016 integra el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP).

La laguna se encuentra en una estrecha zona micromareal, con marea semidiurna (amplitud del constituyente de marea M2 de 12 cm; Santoro et al. 2011), afectada por marea meteorológica moderada. La figura 1.7, tomada de Conde et al. (2019), muestra el ciclo medio anual de niveles dentro y fuera de

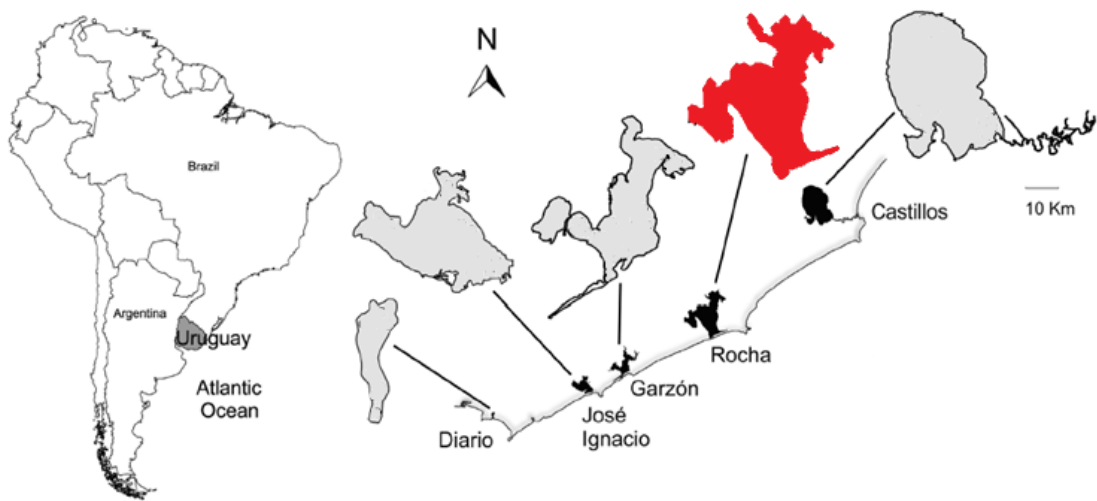


Figura 1.6: Ubicación de lagunas costeras en la costa uruguaya, en rojo se destaca la Laguna de Rocha. De Meerhoff et al. (2013)

la laguna y su distribución de probabilidad empírica . En el océano el nivel presenta una leve variación anual, con máximos en abril y mínimos en octubre, mientras que el ciclo anual de niveles dentro de la laguna es más marcado, con mayores valores en los meses fríos (julio a setiembre) y menores en los meses cálidos (diciembre a marzo).

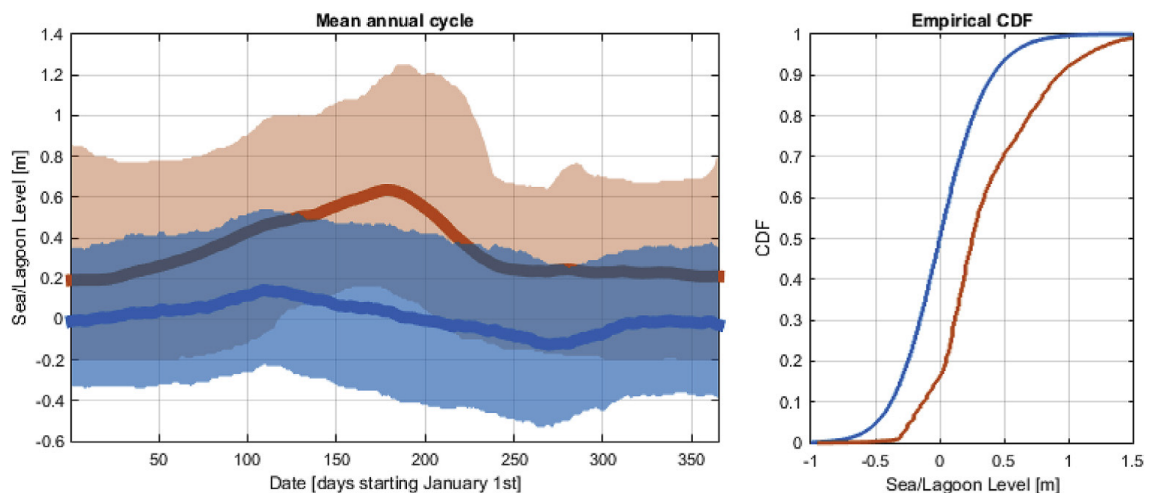


Figura 1.7: Ciclo anual de niveles en la laguna (rojo) y el océano (azul). De Conde et al. (2019)

La desembocadura de la laguna presenta un banco de arena compuesto por varios lóbulos. Dependiendo del nivel de agua estos bancos pueden estar sumergidos o no. En cuanto ocurre la apertura, el canal de conexión presenta

una forma recta y perpendicular al mar y la laguna, con un largo aproximado de 300 m y un ancho puede superar los 100 m a menos de 36 horas de abierta la laguna, y alcanza un máximo de entre 150 m y 200 m. La laguna puede permanecer conectada al mar desde unas pocas horas hasta varios meses; la forma del canal de conexión evoluciona en planta volviéndose más curvilíneo y cambiando su dirección debido al transporte de sedimentos litoral, mientras que su profundidad disminuye hasta un eventual cierre. La figura 1.8 muestra una imagen de la barra de la Laguna de Rocha de Google Earth de enero 2021, donde se puede apreciar la zona donde la apertura de junio 2020.

La conexión entre la laguna y el océano permite el intercambio de agua a través del canal, modificando las condiciones de salinidad y temperatura dentro de la laguna. Los registros de temperatura muestran una variación estacional similar a la del aire, mientras que puede presentar variaciones de algunos grados entre las diferentes zonas (Rodríguez-Gallego et al. 2014). La salinidad presenta un gradiente sur-norte, que se acentúa durante los meses de invierno (Rodríguez-Graña et al. 2008).



Figura 1.8: Barra de la Laguna de Rocha en enero 2021, tomada de Google Earth. En la zona de la desembocadura se observan bancos de arena sumergidos compuestos por varios lóbulos.

La apertura de la barra de la Laguna de Rocha se suele realizar de forma artificial para evitar la inundación de las comunidades pesqueras que habitan en

las márgenes de la laguna y mejorar las condiciones para la pesca, en los casos que no se da la apertura natural. Conde et al. (2019) presentan un protocolo de apertura de la barra, que consiste en un árbol de decisiones que permiten una ejecución adecuada de la apertura artificial logrando que la misma sea exitosa (e.g.: la barra no se cierra a las pocas horas de abierta). La figura 1.9 muestra un esquema del protocolo de apertura: cuando el nivel comienza a aumentar se controla el mismo en una regla ubicada frente a la comunidad pesquera. Una vez que sobrepasa los 1.57 m respecto al Plano de Referencia Hidrométrico (PRH); si el nivel se mantiene entre 1.57 m PRH y 1.9 m PRH, y con la previsión de lluvias se espera que se sobrepase este nivel, si no se da apertura natural, se autoriza la apertura artificial; si el nivel sobrepasa los 1.9 m PRH se autoriza la apertura artificial. En la práctica se ha visto que si el nivel de mar es bajo y el viento tiene dirección Norte, la apertura tiene mayor probabilidad de ser exitosa, lo que implica que la barra se mantiene abierta por más tiempo y descarga importantes volúmenes de agua.

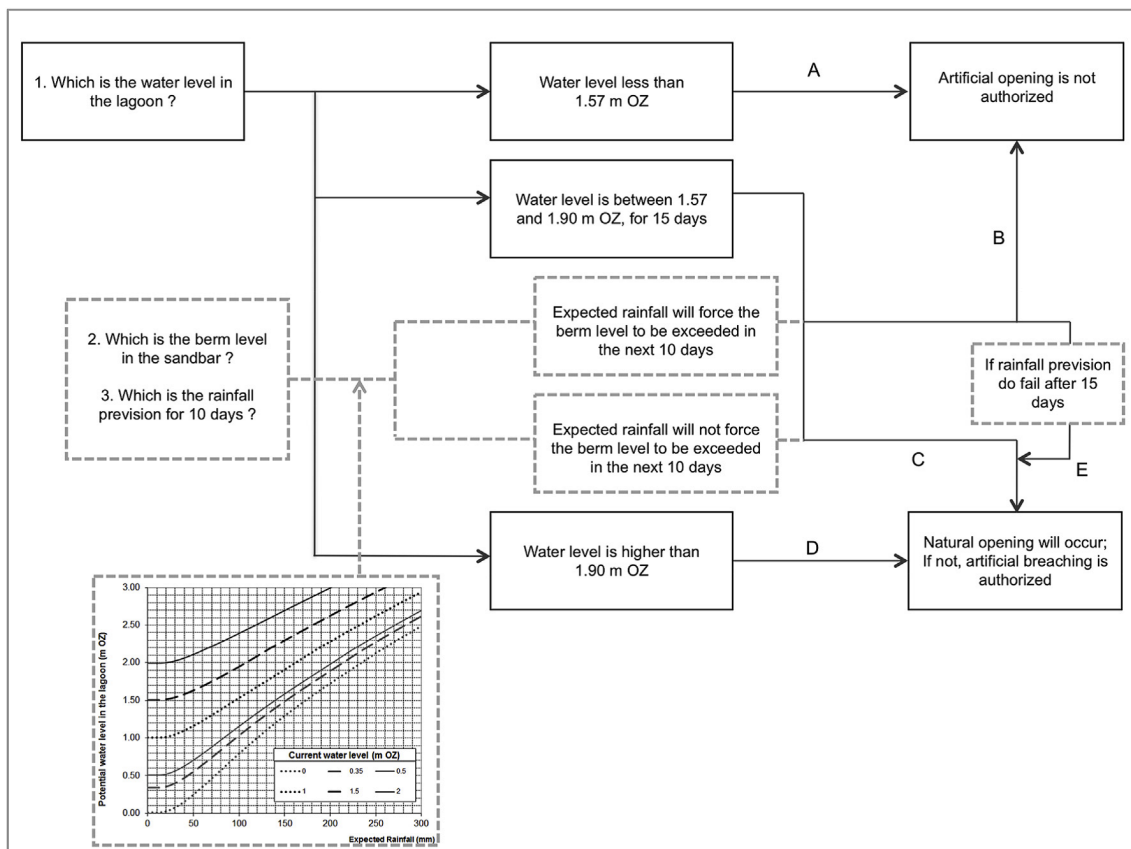


Figura 1.9: Protocolo de apertura de la Laguna de Rocha, tomado de Conde et al. (2019)

Como parte del proyecto ANII en el cual se enmarca esta tesis, Teixeira (2019) realizó su tesis de maestría en Mecánica de Fluidos Aplicada “Modelos morfodinámicos aplicados a la gestión de las lagunas litorales. El caso de la Laguna de Rocha”. En dicho trabajo se cuantificaron los aportes fluviales a la Laguna de Rocha con el modelo hidrológico GR4J (Perrin et al. 2003), el cual se calibró para la barra cerrada. Posteriormente se estudió el procesos de apertura de la barra y se concluyó que el modelo de código abierto Delft3D-Flow no logra reproducir correctamente todos los aspectos del proceso, por lo que para el análisis de la evolución temporal de la desembocadura se utilizó un modelo hidro-morfodinámico simplificado, sugiriendo continuar con esta línea.

Por otra parte, en el marco de este mismo proyecto, se implementó el modelo hidrodinámico Delft3D-Flow para representar la hidrodinámica de la laguna en condiciones de barra abierta y cerrada, donde se utiliza una geometría fija para el canal de conexión.

Por una parte los modelos existentes no permiten realizar simulaciones a largo plazo de la hidrodinámica de la laguna y por otra se tiene escaso conocimiento del efecto de la apertura en la evolución ecosistémica de la laguna. Teniendo en cuenta estas falencias se definen los objetivos de esta tesis.

1.5. Objetivos

Los objetivos de esta tesis son:

1. El desarrollo de un modelo numérico bidimensional de la laguna que incluya los procesos de apertura y cierre de la barra, tal que permita la realización de simulaciones a largo plazo así como de la temperatura y salinidad en la misma, y
2. la aplicación de este modelo para evaluar los efectos que tendrían distintas políticas de apertura artificial sobre la circulación, la salinidad y la temperatura dentro de la laguna.

Capítulo 2

Metodología general de modelación y análisis de resultados

En este capítulo se describe la metodología general del trabajo: escenarios estudiados, descripción del modelo implementado, estrategia de calibración y validación, comparación de resultados con datos medidos y metodología de análisis de resultados.

Los resultados fueron alcanzados mediante la implementación de un modelo bidimensional multiescala, el cual consiste en el acople de un modelo hidrodinámico 2D de la laguna y el océano con un modelo hidromorfodinámico simplificado del canal de conexión.

Con el objetivo de evaluar el efecto del nivel de apertura artificial en los resultados se definieron tres escenarios de apertura de barra de arena de la laguna, denominados a partir del nivel al que se impone la misma; escenario 1.4 m, escenario 1.6 m y escenario 2.2 m. El nivel de 1.4 m corresponde al más bajo registrado, el nivel de 1.6 m corresponde al nivel establecido en el protocolo de apertura de la laguna Conde et al. (2019) y el nivel 2.2 m corresponde al más alto registrado.

Para cada escenario de apertura se analizó el comportamiento de la geometría del canal y las características del flujo a través del mismo. Dentro de la laguna se caracterizó la salinidad, temperatura, nivel y patrones de circulación, y en el océano se estudió el comportamiento de la salinidad en la pluma de descarga. La sección 2.2 se especifica el análisis que se aplicó a cada variable.

De forma complementaria, se definieron escenarios de condiciones extremas de viento, caudal de aporte fluvial y nivel inicial en la laguna, tanto para laguna abierta como para laguna cerrada, con el propósito de estudiar los patrones de circulación. En el caso del viento extremo se identificaron dos direcciones principales: NE (45°) y SW (240°), con una velocidad de viento de 14 m/s (correspondiente al percentil del 95 % en ambas direcciones). Los caudales extremos se definieron para los percentiles 90 % (alto) y 10 % (bajo) en cada uno de los arroyos. Tanto los vientos como los caudales se consideraron constantes en el tiempo. Se consideraron dos niveles iniciales; nivel alto, correspondiente al percentil del 90 % (1.2 m PRH); y nivel bajo, correspondiente al percentil del 10 % (0 m PRH). Bajo estas condiciones y considerando el canal de conexión entre la laguna y el océano abierto se realizan simulaciones de un mes de duración y se promedian los resultados de los campos en el tiempo. La tabla 2.1 resume los escenarios extremos simulados. El valor del caudal presentado en la tabla corresponde a la suma del caudal de los cuatro arroyos que aportan a la laguna.

Tabla 2.1: Escenarios extremos y calmos considerados.

Viento		Q_{in} (m^3/s)	$\eta_{L,0}$ (m PRH)
u (m/s)	Dir		
14	NE	13.8	1.2
14	NE	13.8	0
14	NE	0.5	1.2
14	NE	0.5	0
14	SW	13.8	1.2
14	SW	13.8	0
14	SW	0.5	1.2
14	SW	0.5	0
sin viento		13.8	1.2
sin viento		13.8	0
sin viento		0.5	1.2
sin viento		0.5	0

2.1. Modelación numérica

El modelo numérico fue implementado en TELEMAC-2D; un software de código libre y abierto que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant integradas en la vertical. Este software fue desarrollado por el Laboratoire National d’Hydraulique et Environnement (LNHE) del Research and Development Directorate of the French Electricity Board (EDF R&D) y es gestionado por un consorcio que incluye consultoras e institutos de investigación (Hervouet, 2007). El TELEMAC ha sido utilizado con anterioridad en el IMFIA para modelar el Río de la Plata tanto en 2D como en 3D (Santoro, 2017) y el Río Uruguay en su versión 2D (Junes, 2020).

Si bien el TELEMAC-2D permite resolver la hidro-morfodinámica del canal, se requiere una malla con elementos de menor tamaño en la zona del mismo. Este tipo de modelaciones puede dar lugar a una serie de complicaciones (e.g.: modelo inapropiado para todas las condiciones de flujo que se dan en el canal, estimación de la tasa de transporte), además la resolución suele presentar un elevado costo computacional. Por estos motivos se optó por programar una nueva subrutina de TELEMAC-2D que resuelve un modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal, el cual calcula el caudal que circula a través del canal, la cota de fondo y el nivel en la laguna en cada paso. En la modelación se incluyó además el transporte de temperatura y salinidad y el intercambio de calor con la atmósfera.

La figura 2.1 muestra un esquema del modelo bidimensional multiescala implementado. En los nodos correspondientes a los extremos del canal de conexión se determinaron los valores de nivel en la laguna y el océano a partir de nodos cercanos, y fueron utilizados como entradas del modelo hidro-morfodinámico simplificado. El caudal a través del canal calculado con la subrutina anteriormente mencionada se tomó como condición de borde de la grilla de la laguna y el océano.

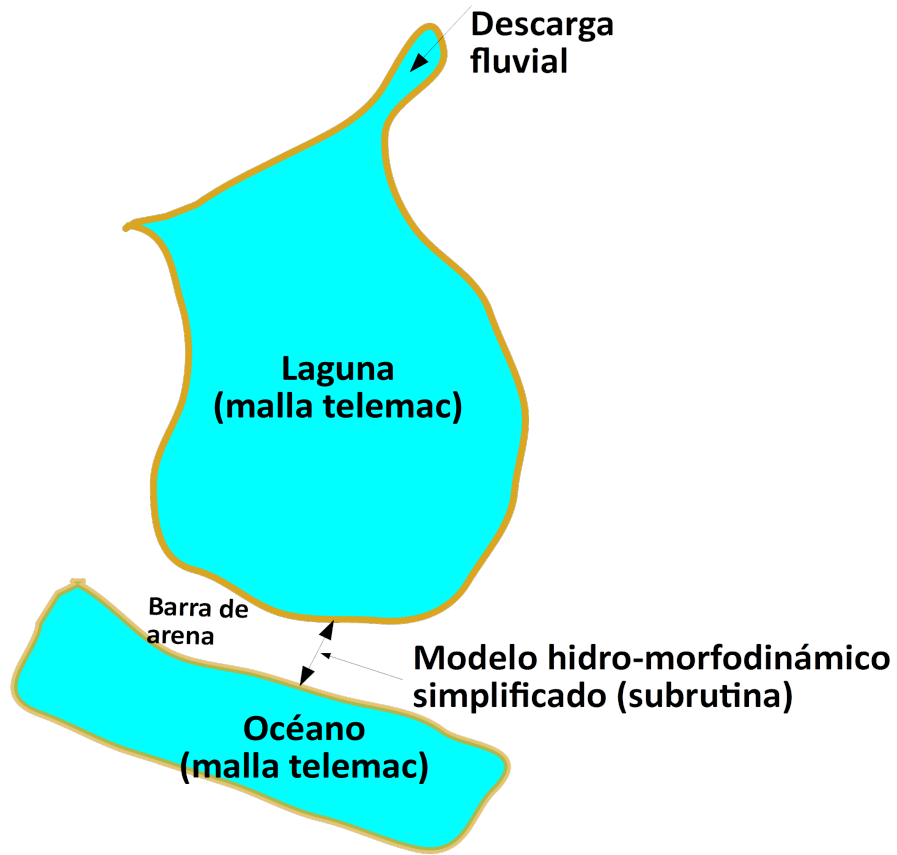


Figura 2.1: Esquema del modelo bidimensional utilizado.

2.1.1. Modelo bidimensional multiescala

El software TELEMAC-2D resuelve las ecuaciones 2.1 a 2.4 de forma simultánea, donde la ecuación 2.1 es la conservación de la masa o ecuación de continuidad, y las ecuaciones 2.2 y 2.3 representan la conservación de la cantidad de movimiento en las direcciones x e y respectivamente. La ecuación 2.4 representa la conservación de los trazadores; esta ecuación se resuelve tanto para temperatura como para salinidad.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x^s - \tau_x^b}{H\rho} + A_h \nabla^2 U \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y^s - \tau_y^b}{H\rho} + A_h \nabla^2 V \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = K_T \nabla^2 T - \frac{1}{\rho C_p H} S_T \quad (2.4)$$

Siendo η la superficie libre del agua, t el tiempo, $H = h + \eta$ siendo h la profundidad, U y V las velocidades integradas en la vertical en las direcciones x e y respectivamente, g la aceleración gravitatoria, τ^s y τ^b las tensiones rasantes de la superficie y el fondo respectivamente, A_h es la constante cinemática de velocidad turbulenta horizontal, T es el trazador que se está estudiando, K_T es el coeficiente de difusión turbulenta horizontal, ρ es la densidad del agua, C_p es el calor específico del agua a temperatura constante y S_T un término fuente. En el caso de la salinidad S_T es nulo, mientras que en el caso de la temperatura este término se calcula a partir de un modelo de intercambio de calor con la atmósfera.

Respecto al modelo de turbulencia utilizado en la implementación, se seleccionó el modelo de viscosidad constante, en el cual se asume que la viscosidad turbulenta ν_T es constante. Ésta se relaciona con el coeficiente de difusión K_T de la ecuación 2.4 a través del número de Prandtl. El coeficiente de difusión debe incluir la dispersión en el caso de los modelos 2D.

En los siguientes apartados se presentan en mayor detalle la modelación de intercambio de calor con la atmósfera así como la grilla de calculo y batimetría utilizada en la implementación.

Modelo de intercambio de calor con la atmósfera

TELEMAC-2D cuenta con varios complementos, entre ellos el WAter Qua- lity for TELEmac (WAQTEL), desarrollado por el LNHE, que se enfoca en aspectos de la calidad de agua. En este caso en particular, se acopló el modelo bidimensional con el módulo Thermic que aplica un modelo de intercambio de calor con la atmósfera para el calculo de la temperatura del agua.

El calor total estimado para un cuerpo de agua incluye el efecto de intercambio de calor con la atmósfera, con el fondo y el calor generado por reacciones químicas y biológicas, así como el ingreso de agua a distinta temperatura. El proceso dominante, en general, es el intercambio de calor con la atmósfera, si bien es importante también incluir condiciones de borde apropiadas (Ji, 2009).

El intercambio de calor entre la atmósfera y la columna de agua es transferido en su mayor parte por los procesos radiativos de onda corta y onda larga emitidos por el sol y la transferencia de calor turbulenta. Incluyendo el calor latente debido a la evaporación y el calor sensible debido a las diferencias de temperatura entre el cuerpo de agua y el aire que lo rodea (Ji, 2009).

En el modelo implementado se calcula el flujo total de calor a través de la superficie del agua S_T , que el término fuente S_T de la ecuación 2.4 aplicada a temperatura. Para ello se realiza un balance de flujo de calor en la superficie de la laguna. En la imagen 2.2 se presenta un esquema del flujo de calor en la atmósfera y a través de la superficie, mientras que la ecuación 2.5 se muestran las distintas componentes del flujo de calor a través de la superficie que se implementó en el modelo.

$$S_T = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co} \quad (2.5)$$

Donde Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga), Q_{br} es la radiación reflectada por la superficie (onda larga), Q_{ev} es el flujo de calor debido a la evaporación (calor latente) y Q_{co} es el flujo de calor convectivo (calor sensible). Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga), Q_{br} es la radiación reflectada por la superficie (onda larga), Q_{ev} es el flujo de calor debido a la evaporación (calor latente) y Q_{co} es el flujo de calor convectivo (calor sensible).

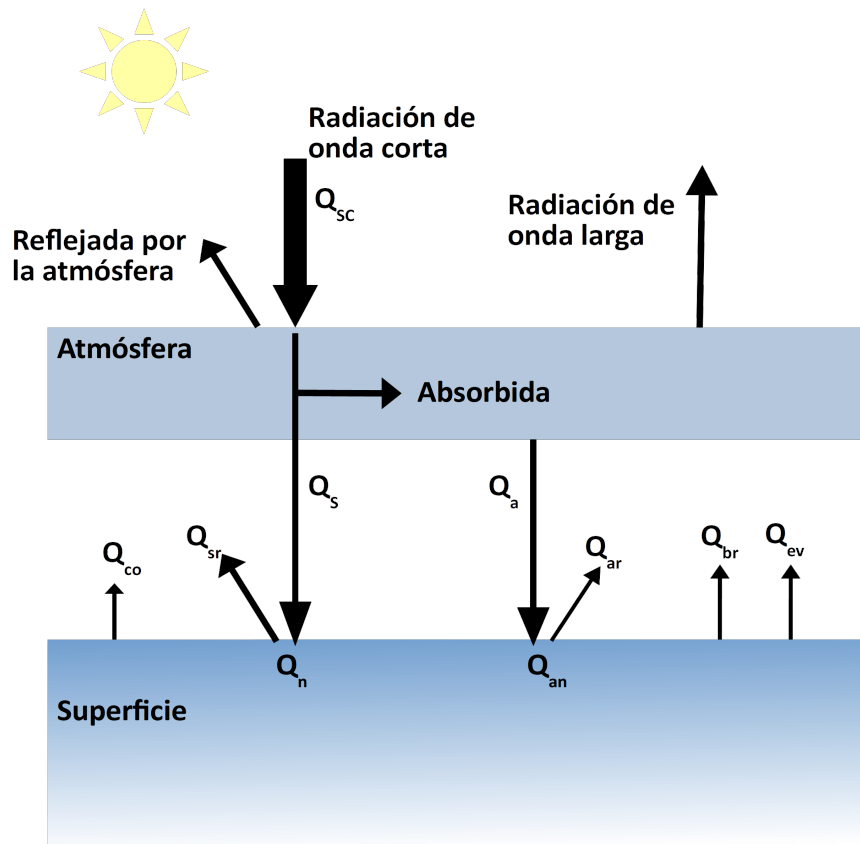


Figura 2.2: Componentes del proceso de intercambio de calor con la atmósfera. Q_{sc} es la radiación para cielo despejado, Q_s es la radiación solar, Q_{sr} es la radiación solar reflejada por la superficie, Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_a es la radiación atmosférica, Q_{ar} es la radiación atmosférica reflejada por la superficie, Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga), Q_{br} es la radiación reflejada por la superficie (onda larga), Q_{ev} es el flujo de calor debido a la evaporación (calor latente) y Q_{co} es el flujo de calor convectivo (calor sensible).

La radiación solar neta (Q_{sn}) se determinó con el método de de Brichambaut. (1963). El término de radiación atmosférica (Q_{an}) se estimó a partir de la temperatura del aire con la fórmula mostrada en 2.6. Para determinar la radiación de la superficie libre (Q_{br}) se asume que el cuerpo de agua se comporta como un cuerpo gris, la radiación generada por este cuerpo gris a través de la superficie libre es dada por la ecuación 2.7. El término de calor debido a la evaporación (Q_{ev}), referente al flujo debido a la evaporación, también llamado calor latente, se estimó utilizando la fórmula empírica de la ecuación 2.8. El flujo convectivo (Q_{co}) se estimó utilizando la fórmula empírica de la ecuación 2.9.

$$Q_{an} = e_{air} \sigma (T_{air} + 273.15)^4 \left(1 + k \left(\frac{c}{8} \right)^2 \right) \quad (2.6)$$

$$Q_{br} = e_{water} \sigma (T_{water} + 273.15)^4 \quad (2.7)$$

$$Q_{ev} = L(T_{water}) \rho_{air} f(V) (H^{sat} - H) \quad (2.8)$$

$$Q_{co} = \rho_{air} C_{p,air} f(V) (T_{water} - T_{air}) \quad (2.9)$$

$$f(V) = a + bV \quad (2.10)$$

Donde e_{air} es un coeficiente de calibración, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{air} es la temperatura del aire, k es el coeficiente que representa la naturaleza y elevación de las nubes, T_{water} es la temperatura del agua, e_{water} es un parámetro de calibración, $L(T_{water})$ es el calor latente de evaporación, H^{sat} la humedad específica del aire saturada, H la humedad específica del aire, ρ_{aire} es la densidad del aire, $C_{p,air}$ es la capacidad térmica del aire, a y b coeficientes empíricos y V la velocidad del viento.

Batimetría, grilla y condiciones de borde e iniciales

La grilla de cálculo consta de dos submallas independientes, una de ellas corresponde a la Laguna y la otra a la zona del océano adyacente (ver figura 2.3). La grilla de la laguna está compuesta por elementos regulares; triángulos isósceles de 200 m en dos de sus lados. En la grilla del océano, se mantiene la geometría de triángulos regulares de 200 m en dos de sus lados frente a la laguna, pero el tamaño de los elementos va aumentando hasta llegar a 600 m de lado en la zona más alejada.

La batimetría disponible se presenta en el capítulo 3, para el modelo, se modificó la batimetría en la zona de ingreso del caudal fluvial y en la zona cercana al canal de conexión del lado de la laguna para evitar la inestabilidad del modelo. Mientras que, en la zona del océano, para profundidades menores a 20 m se ajustó un perfil de equilibrio de Dean (Dean y Dalrymple, 2004) hasta la profundidad de cierre. La figura 2.4 muestra la batimetría final utilizada en el modelo.

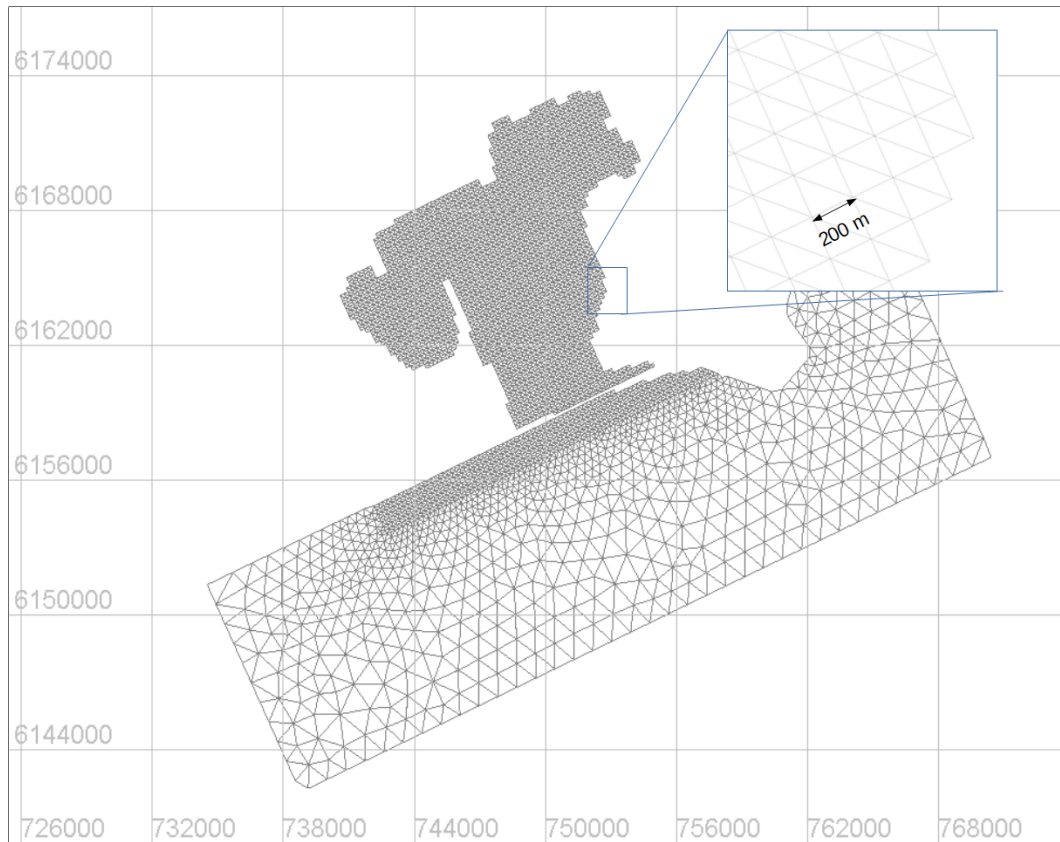


Figura 2.3: Grilla de cálculo utilizada en el modelo numérico.

En la figura 2.4 se muestra un esquema del modelo: se puede ver la laguna, la zona del océano modelada con su correspondiente batimetría y el modelo hidro-morfodinámico simplificado que une los dos cuerpos de agua. Se indican las condiciones de borde impuestas en el dominio. Fueron definidas ocho fronteras líquidas: cuatro de ellas corresponden a las entradas de los cuatro arroyos tributarios (Los Noques, Rocha, Las Conchas y La Palma, desde el oeste en sentido horario); en estas fronteras se ingresa una serie temporal de caudal, temperatura y salinidad. En la grilla del océano se tienen dos fronteras líquidas: lado este y oeste, donde se le ingresa una serie temporal (horaria) de nivel de mar, temperatura y salinidad. Las dos restantes fronteras líquidas corresponden a los extremos del canal de conexión entre la laguna y el mar, que son resueltos con el modelo hidro-morfodinámico simplificado. Este modelo no considera el oleaje como condición de frontera ni la erosión que podría darse en las márgenes de la laguna por acción del oleaje. Este sí se consideró para el transporte de sedimentos desde el océano que provoca el cierre del canal.

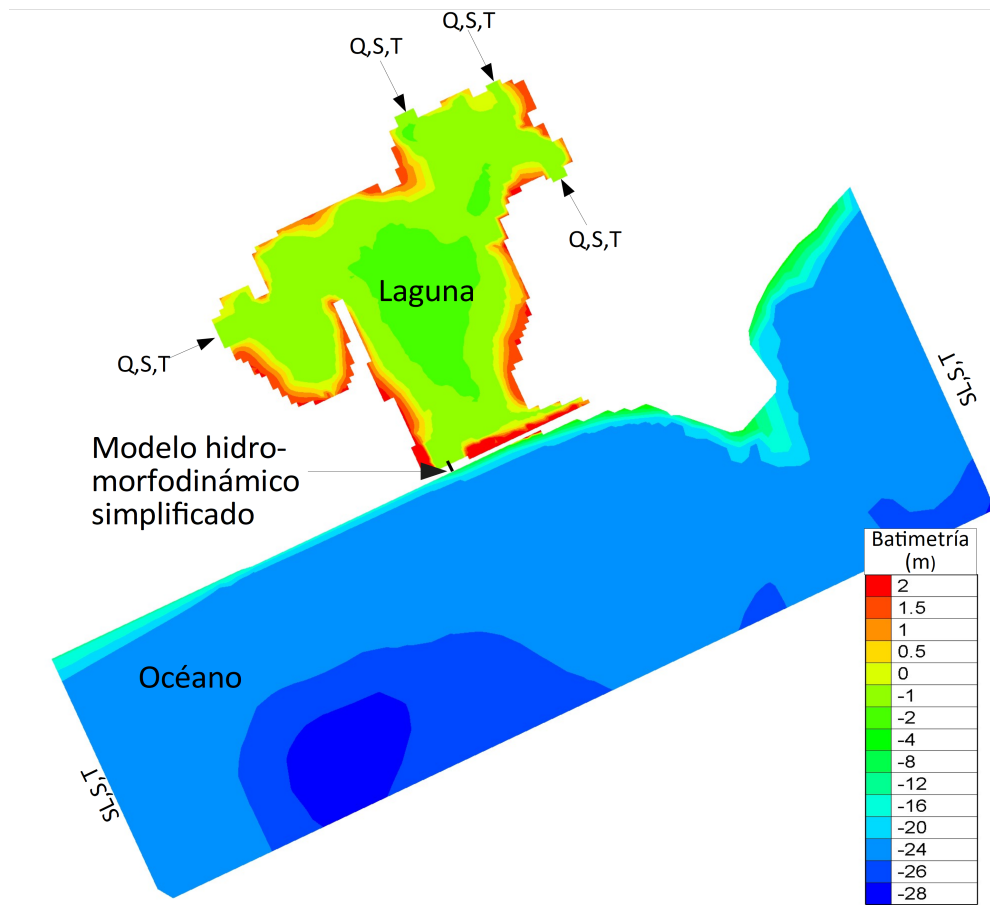


Figura 2.4: Esquema del modelo implementado. Se indica la batimetría y condiciones de borde impuestas, donde Q es el caudal, SL el nivel de mar, T la temperatura y S la salinidad.

2.1.2. Modelo hidromorfodinámico simplificado

El modelado del canal de conexión entre la laguna y el océano de las ICOLLs requiere una especial atención, ya que la hidromorfodinámica es fundamental tanto en la evolución del mismo como en la capacidad de descarga o recarga de la laguna. En el marco del mismo proyecto ANII en el que se enmarca esta tesis, Teixeira (2019) estudió el comportamiento de la desembocadura de la Laguna de Rocha y desarrolló un modelo hidromorfodinámico que reproduce el comportamiento de la misma utilizando una aproximación propia de hidráulica de canales. En este apartado se describe brevemente el modelo utilizado.

Siguiendo a van de Kreeke y Brower (2017) e Hinwood y McLean (2015), se supuso a la laguna como un reservorio, que intercambia agua con el océano a

través de un único canal, la laguna recibe además un aporte puntual de caudal de cuatro arroyos. En la figura 2.5 se muestra un esquema del modelo. Con estas suposiciones la hidrodinámica del canal de desembocadura se describe a partir de las ecuaciones 2.11 a 2.16. La ecuación 2.11 representa la conservación de cantidad de movimiento integrada en la vertical, en el ancho y a lo largo del canal. La ecuación 2.12 representa la conservación de la masa en la laguna, la ecuación 2.13 es el calculo del la superficie libre en el canal. La ecuación 2.14 refiere al balance de sedimentos en el canal, donde ΔC es la diferencia entre sedimentos entrantes y salientes de la laguna y su cálculo depende del sentido del flujo como se muestra en la ecuación 2.15 y la concentración de sedimentos C se determina mediante la aproximación de du Boys presentada en la ecuación 2.16.

$$\frac{L}{g} \frac{du}{dt} = - \left[\frac{FL}{g(h + \eta_m)} + \frac{m}{2g} \right] u |u| - (\eta_O - \eta_L) \quad (2.11)$$

$$A_L \frac{d\eta_L}{dt} = -B(\eta_m + h)u + Q_{in} \quad (2.12)$$

$$\eta_m = \frac{\eta_O + \eta_L}{2} \quad (2.13)$$

$$L \frac{dh}{dt} = (\eta_m + h)u\Delta C \quad (2.14)$$

$$\Delta C = C_O - C \text{ si el flujo es hacia el interior de la laguna} \quad (2.15)$$

$$\Delta C = C - C_L \text{ si el flujo es hacia el exterior de la laguna}$$

$$C = k \left(\left(\frac{u}{u_c} \right)^2 - 1 \right) \quad (2.16)$$

Donde L es la longitud del canal, g la aceleración gravitatoria, u la velocidad en el canal, t el tiempo, $F = f/8$, siendo f el factor de fricción, h la profundidad del canal, η_m la superficie libre del canal, calculada como se muestra en 2.13, m las pérdidas de carga localizadas, η_O la superficie libre en el océano y η_L la superficie libre en la laguna. A_L es la superficie de la laguna, B el ancho del canal, Q_{in} el caudal entrante por los cursos de agua que descargan en la laguna, ΔC la concentración neta de sedimentos, C la concentración de sedimento debido al flujo en el canal, C_O la concentración de sedimento en

el océano, C_L la concentración de sedimentos en la laguna, k un coeficiente de transporte de sedimentos empírico y u_c la velocidad crítica de inicio de movimiento determinada según Soulsby (1997).

La concentración de sedimentos en el océano C_O para cada estado de mar se determinó a partir del caudal de transporte calculado para cada estado de mar, el promedio de caudal de transporte de la serie y un valor representativo de la concentración de sedimentos en el océano. El transporte litoral fue determinado a partir de datos de oleaje local (Alonso et al. 2018), con la fórmula de transporte de sedimentos del CERC (Mil-Homens et al. 2013).

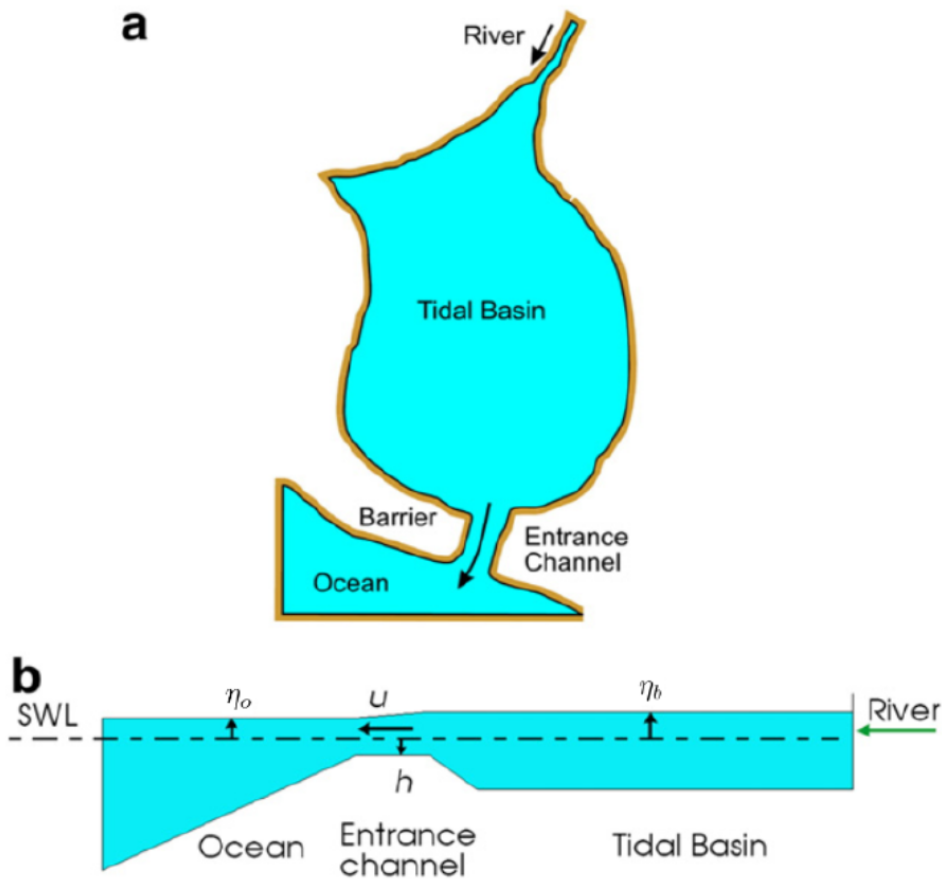


Figura 2.5: Esquema del modelo utilizado para representar el canal de conexión. Tomada de Hinwood y McLean (2015)

En el caso de flujo supercrítico a través del canal, siguiendo lo propuesto en Wu y Li (2017) se utilizó la ecuación de vertedero de cresta ancha 2.17 para modelar la hidrodinámica en lugar de aplicar la ecuación 2.11.

$$Q = 1.7B (\eta + h)^{1.5} \quad (2.17)$$

Donde Q es el caudal que circula por el canal, B es el ancho del canal, η es el nivel de la superficie libre de la laguna (flujo saliente) o el océano (flujo entrante). El ancho del canal B y su profundidad h mantienen una relación fija α , la cual es uno de los parámetros de entrada del modelo.

El modelo permite que el canal se abra de forma natural o artificial: en caso que el nivel en la laguna o el océano sea mayor a la altura de la berma de arena se dará una apertura natural, mientras que si la altura de la berma es mayor al nivel de apertura del escenario se impone la cota de fondo del canal a un nivel 0.5 m por debajo del nivel de apertura. En el anexo 1.1 se presenta un pseudocódigo del modelo implementado.

Se define una tolerancia (TOL) como la profundidad a partir de la cual se considera que la conexión entre la laguna y el océano se interrumpe y el canal se cierra. En la figura 2.6 se muestra un esquema de decisiones del método de cálculo de caudales en el canal en cada paso en función de la relación entre los niveles de agua y la altura de la berma de arena. Una vez que el canal está cerrado se considera un crecimiento constante de la berma Δ_{berm} de arena hasta un máximo y_{max} . Las ecuaciones del modelo hidro-morfodinámico se resuelven aplicando el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

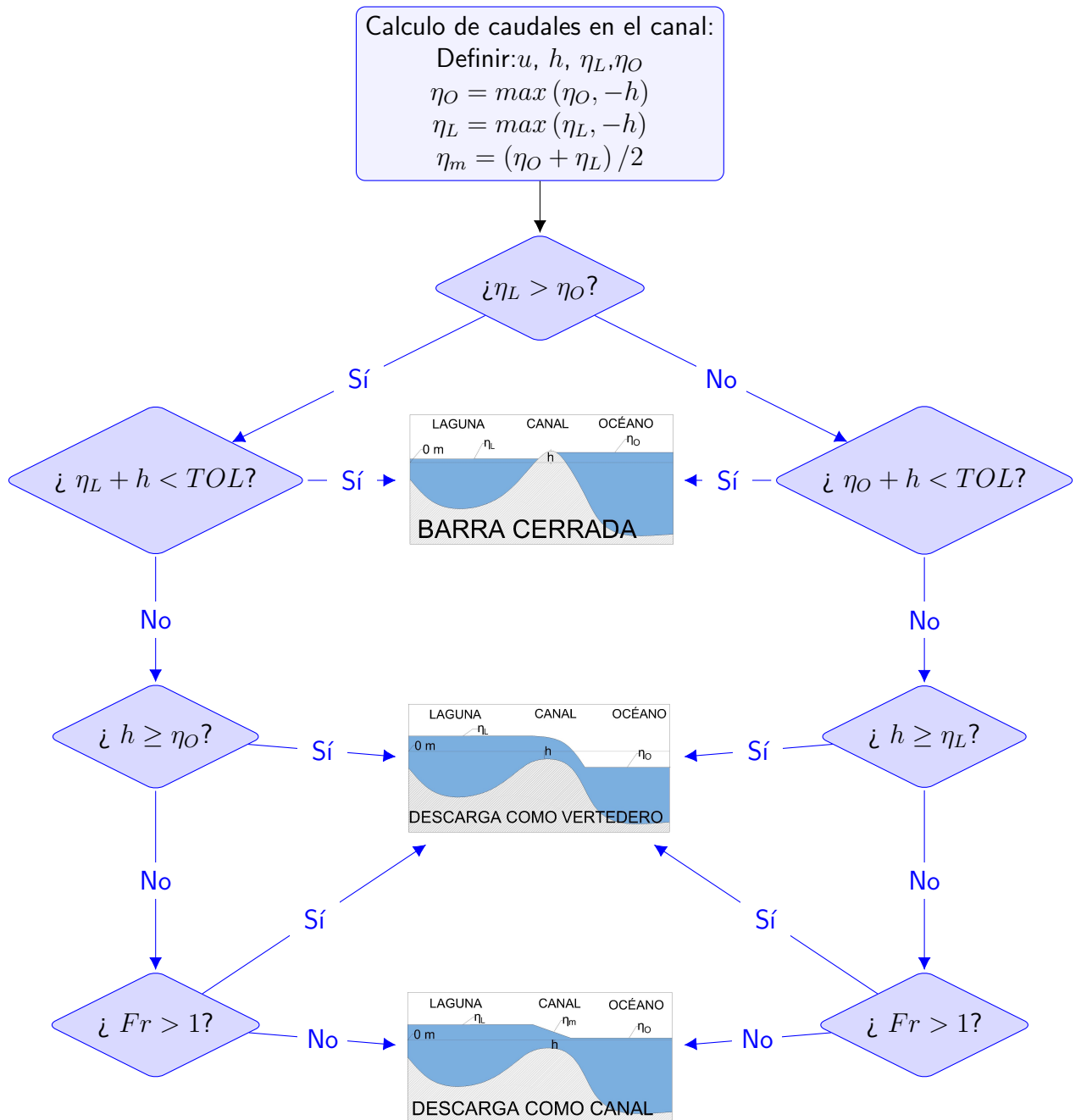


Figura 2.6: Diagrama de flujo del cálculo del estado del canal para un paso genérico aplicado a la laguna, la dirección del flujo mostrada en las imágenes es ilustrativa y depende de la relación entre el nivel del océano y la laguna

2.1.3. Estrategia de calibración y validación

La escasez de datos de nivel, temperatura y salinidad medidos de forma continua dentro de la laguna no permitió una calibración y validación ade-

cuadas por lo que se realizó una calibración cuantitativa cuando fue posible y una validación cualitativa cuando no. En el caso de la velocidades en el canal y dentro de la laguna no se tienen datos que permitan verificar los valores obtenidos con las simulaciones.

Las etapas de la presente estrategia de calibración son: (1) análisis de sensibilidad del nivel en la laguna y geometría y velocidad en el canal a los parámetros del modelo hidro-morfodinámico simplificado y calibración de los parámetros del modelo; (2) análisis de sensibilidad a los parámetros de calibración del modelo de temperatura, calibración de los parámetros y comparación de resultados; (3) validación cualitativa de salinidad, análisis de sensibilidad de la distribución espacial y series de salinidad al coeficiente de difusividad y salinidad de la pluma de descarga.

Teixeira (2019) presentó un análisis de sensibilidad del ciclo medio anual del área del canal a la concentración de sedimentos del océano (C_O), la relación entre el tirante y la profundidad del canal (α) y el número de manning (n) del modelo hidro-morfodinámico simplificado, y finalmente se adoptaron los valores $C_O = 0.002$, $\alpha = 33$ y $n = 0.016$. Como complemento, en el presente trabajo de tesis se realizó un análisis de sensibilidad del nivel en la laguna y geometría y velocidad en el canal a los parámetros del modelo para una apertura, selección de parámetros de ajuste y en una segunda etapa de calibración los parámetros seleccionados. El análisis de sensibilidad se complementó con una revisión bibliográfica para mantenerse dentro de valores razonables; los parámetros analizados fueron L , n , m , α , k , Δ_{berm} , TOL y la sensibilidad a la concentración de sedimentos en el océano fue analizada a través de un coeficiente de ajuste n_{C_O} . La calibración de los parámetros modelo del canal se realizó mediante la comparación del nivel simulado con el nivel medido dentro de la laguna de forma continua (quinceminutal) en el período junio a setiembre 2020 en la ubicación HOBO (ver figura 2.8), que incluye la apertura artificial realizada el 24 de junio de 2020.

La temperatura del agua se calibró comparando los datos modelados con los medidos en la estación HOBO desde diciembre 2019 a octubre 2020 (ver ubicación en figura 2.8). Para ello se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados de temperatura a los parámetros del modelo de intercambio de calor e_{air} (ecuación 2.6), e_{water} (ecuación 2.7), a y b (ecuación 2.10). Se procedió a calibrar el modelo variando los dos parámetros a los que los resultados de temperatura presentaron mayor sensibilidad. Una vez que se obtuvieron los

resultados se fijaron estos parámetros para los cuales el error medio cuadrático obtenido de comparar las series medidas y modeladas en el mismo punto era mínimo, con estos valores se realizó el mismo procedimiento para la segunda dupla de parámetros.

En el caso de la salinidad no fue posible realizar una calibración, sin embargo, se realizaron dos análisis de sensibilidad y se estudió la salinidad posterior a una apertura. En el primer análisis se evaluó la sensibilidad de la distribución espacial y temporal de salinidad al coeficiente de difusividad, variando el mismo dentro del rango de valores reportado en bibliografía para una simulación de un año de duración y el escenario 1.6 m. En el segundo análisis se estudió la diferencia en los valores de salinidad en la laguna considerando que la pluma de descarga no afecta la salinidad del océano (el agua que ingresa desde el océano a la laguna presenta una salinidad constante igual a la del océano abierto) para una simulación de 13 años de duración con el escenario 1.6 m. De forma complementaria, se estudió el comportamiento de la salinidad dentro de la laguna posterior a una apertura. Se compararon los campos de salinidad dentro de la laguna a las 3 horas después de que el agua comienza a ingresar, el momento de mayor concentración salina en la laguna y el momento en el que la salinidad alcanza la mayor expansión.

Las simulaciones a largo plazo fueron implementadas utilizando los datos del reanálisis ERA5 con las correcciones mencionadas en el capítulo 3, el hind-cast de niveles, y la serie de la temperatura de los arroyos también descrita en el mencionado capítulo. La duración de las corridas es de 13 años, desde 1985 a 1997, de los cuales se descartaron los tres primeros con el objetivo de lograr independencia de las condiciones iniciales.

2.1.4. Comparación de resultados medidos y modelados

La comparación de resultados modelados con simulaciones de largo plazo con los datos medidos no permite cotejar series temporales por dos motivos: (1) Los forzantes utilizados provienen de un reanálisis global y pueden presentar importantes diferencias en la precipitación, evaporación y nubosidad con los valores registrados; y (2) una diferencia en el momento de la apertura provoca cambios significativos en la serie temporal de niveles y salinidad dentro de la laguna así como en las variables relacionadas al canal de apertura. Se espera que las diferencias mencionadas no tengan un efecto en los valores estadísticos

de los datos con lo que se lleva a cabo la comparación de los mismos.

La serie temporal de temperatura simulada se comparó en 12 puntos dentro de la laguna con mediciones puntuales (ver sección 3.5). Inicialmente se graficó todo el período modelado en las estaciones con el objetivo de observar el comportamiento general de la serie y detectar si los datos se encuentran dentro del rango esperado. Se compararon la media, desviación estándar, mínima y máxima del modelo y los datos observados en las diferentes estaciones. De la misma forma la serie temporal de salinidad se comparó en 12 puntos dentro de la laguna con mediciones puntuales; se compararon la media, desviación estándar, máximo y mínimo. En el caso del canal de conexión entre la laguna y el océano se compararon los órdenes de los valores de ancho del canal, velocidad en el canal y nivel en la laguna medidos y modelados.

2.2. Metodología de análisis de resultados

Los resultados obtenidos para cada escenario se caracterizaron en varios puntos dentro de la laguna mediante ciclos medios anuales de media y la desviación estándar de las series. A su vez, los campos fueron caracterizados mediante su media y desviación estándar, y análisis de componentes principales. En todos los casos se tuvieron en cuenta únicamente los nodos en que la profundidad de la laguna es siempre mayor a cero (el nodo nunca se seca). En los siguientes párrafos se especifica el análisis aplicado para cada variable. En la figura 2.7 se presentan la nomenclatura de las zonas de la laguna mencionadas en el presente capítulo y en los resultados.

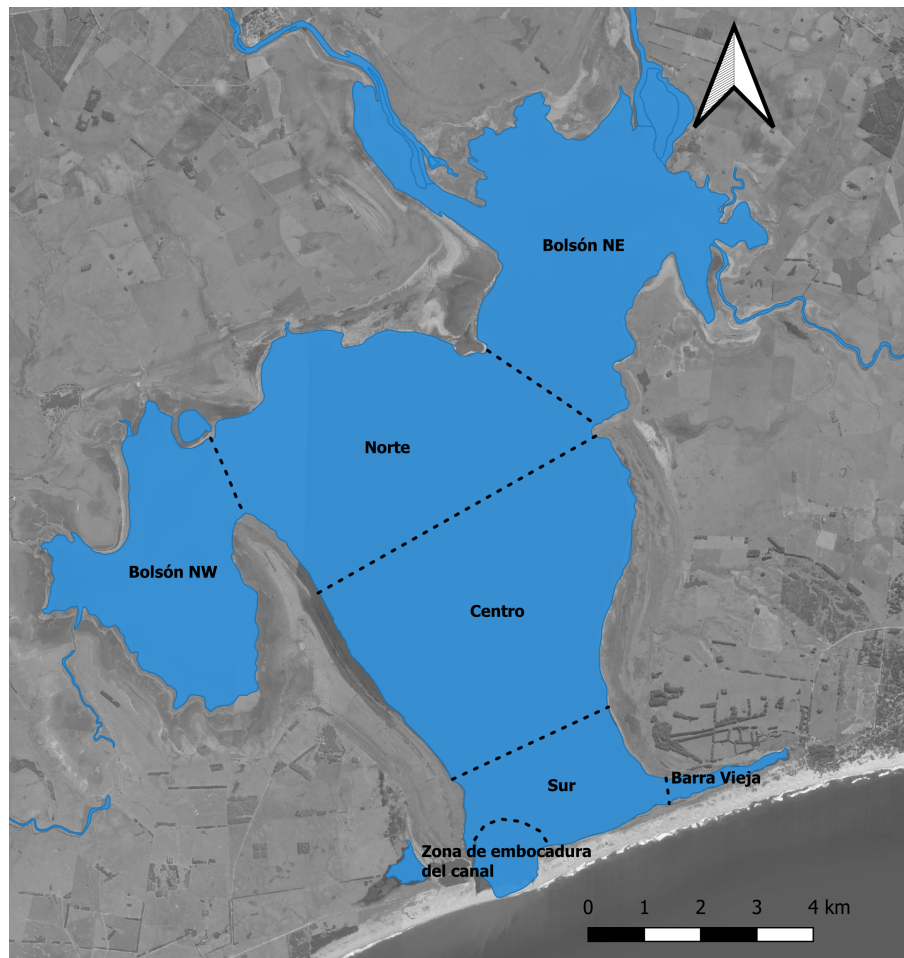


Figura 2.7: Nomenclatura de las zonas de la laguna.

La geometría del canal (ancho, área transversal y profundidad), así como la velocidad del flujo que circula por el mismo fueron estudiados mediante el ciclo medio anual de la media y desviación estándar con una ventana móvil de 1 día. Se calculó también el número de aperturas por año y flujo medio a través del canal.

La temperatura del agua se estudió mediante ciclo medio anual de media y desviación estándar con una ventana móvil de 1 día en varios puntos (ver figura 2.8), campos de valor medio y desviación estándar, y análisis de componentes principales.

La salinidad se estudió mediante ciclo medio anual de media y desviación estándar con una ventana móvil de 1 día en varios puntos de la laguna (ver figura 2.8), campos de valor medio y desviación estándar dentro de la laguna, y análisis de componentes principales, evaluando la correlación de los resultados obtenidos con los forzantes del modelo. En el mar se analizó la salinidad en la

pluma de descarga mediante componentes principales.

El nivel en la laguna se analizó mediante ciclo medio anual de media y su desviación estándar con una ventana móvil de 1 día, distribución de probabilidad empírica de la serie completa y análisis de componentes principales.

Los patrones de circulación dentro de la laguna fueron estudiados mediante análisis de componentes principales y campos resultantes de escenarios extremos.

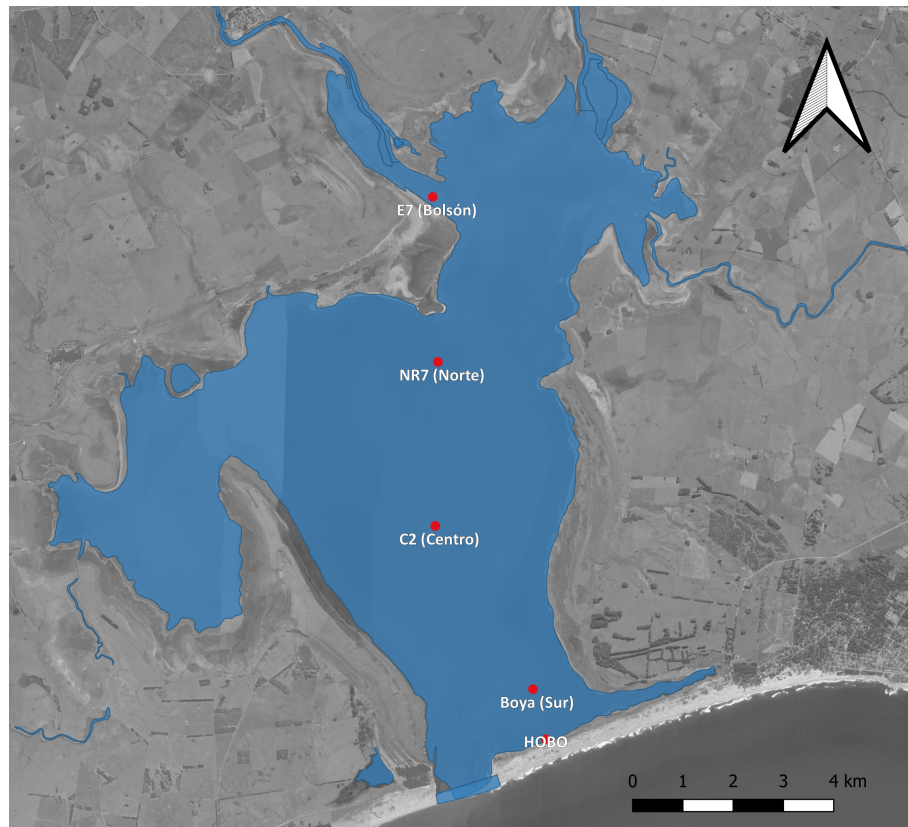


Figura 2.8: Ubicación de los puntos que en los que se muestra el ciclo medio anual y la función de distribución de probabilidad.

2.2.1. Análisis de componentes principales

A continuación se presenta un breve resumen de los conceptos y metodología del Análisis de Componentes Principales (PCA), la cual fue tomada de Wilks (2011). Este análisis consiste en reducir el número de variables en un conjunto de datos y generar un nuevo conjunto donde las variables son combinación lineal de las variables del conjunto original de datos. Es decir, dado un conjunto de observaciones x de dimensión K , el PCA encuentra un conjunto

u de dimensión M que contiene la mayor parte de la información del conjunto x . Si existe una correlación importante entre las variables del conjunto inicial de datos, con lo cual hay información redundante, el número de variables se reducirá considerablemente ($K \gg M$). A este nuevo conjunto de variables u se les llama componentes principales.

Usualmente es conveniente trabajar con combinaciones lineales de las anomalías $x' = x - \bar{x}$, donde \bar{x} es la media de x . Los componentes principales u_m , con $m = 1, \dots, M$ son combinaciones lineales de x' y se ordenan con varianza descendente. De esta forma, las primeras componentes principales son las que contendrán mayor información del conjunto original de datos. Los elementos u_m de u están definidos unívocamente (excepto por el signo) por los vectores propios de la matriz de covarianza de x . En particular, el componente principal u_m es definido como la proyección del vector de datos x' en el vector propio e_m (ecuación 2.18).

$$u_m = e_m^T x' \quad (2.18)$$

Los M vectores propios contienen un elemento perteneciente a cada una de las variables x_k , y cada uno de las M componentes principales es una especie de promedio ponderado de los x_k valores. A pesar de que los pesos de $e_{k,m}$ no suman 1, el cuadrado de los mismos si lo hace $\|e_m\| = 1$. Si la muestra consiste en n observaciones (n vectores de datos x , o n columnas en la matriz X), habrán n valores para cada componente principal o nuevas variables e_m .

Geoméricamente, el vector e_1 apunta en la dirección en la que el vector de datos en su conjunto presenta mayor varianza (en el espacio K -dimensional de x'). El primer vector propio está asociado con el valor propio más grande λ_1 , el segundo vector propio e_2 con el segundo valor propio más grande λ_2 , el cual es perpendicular a e_1 y se alinea en la dirección con la segunda mayor varianza. Subsecuentemente el resto de los vectores propios se nombran de acuerdo a magnitudes decrecientes de sus vectores propios y son perpendiculares a todos los vectores propios previos. Los vectores propios definen un nuevo sistema de coordenadas. En particular la matriz ortogonal E cuyas columnas son los vectores propios define la relación dada en la ecuación 2.19.

$$u = [E]^T x' \quad (2.19)$$

Una de las propiedades a destacar de los componentes principales es que son

no-correlacionadas. Es decir, la matriz de correlación de las nuevas variables u_m es la identidad. Esta propiedad implica que la covarianza entre dos pares de u_m es cero, por lo que la correspondiente covarianza es diagonal D . La matriz de covarianza de los componentes principales se obtiene a partir de la diagonalización de la matriz de covarianza de los datos S_x cumpliendo la relación presentada en la ecuación 2.20.

$$S_u = E^{-1}S_xE = D \quad (2.20)$$

Cada elemento del vector propio obtenido del análisis PCA puede representarse en el espacio en la misma ubicación que los datos correspondientes. Los mapas obtenidos describen qué ubicaciones están contribuyendo más fuertemente a los componentes principales respectivos. Visto de otra manera, tales mapas indican la distribución geográfica de anomalías de datos simultáneas representadas por los componentes principales correspondientes. Estas presentaciones geográficas de vectores propios también se interpretan como representaciones de modos de variabilidad no correlacionados de los campos de los que se extrajo el PCA (Wilks, 2011).

Para el análisis de componentes principales se seleccionaron aquellos nodos que en todo momento se encuentran mojados y se descartó el resto, por esta razón el número de nodos puede variar según el escenario estudiado. De los 2809 nodos que componen la laguna, en el escenario de apertura a 1.4 m se encontraron siempre mojados 1479 nodos, en el de apertura a 1.6 m, 1643 nodos y cuando la apertura se estableció a 2.2 m, los nodos mojados en todo momento fueron 1675. Estos nodos corresponden a las variables del PCA, mientras que las observaciones es la serie temporal para cada nodo, con datos cada 1 hora desde 1988 a 1997, siendo en total 87.673 datos por nodo.

Capítulo 3

Datos disponibles

En este capítulo se presenta una revisión y análisis de la información disponible relevante para el desarrollo de esta tesis. Los datos disponibles incluyen: precipitación, niveles dentro y fuera de la laguna, oleaje, datos de apertura, datos de temperatura y salinidad, topografía y batimetría, así como datos atmosféricos. El objeto de este capítulo es estudiar la cobertura espacial y temporal de dichos datos y su calidad, para la utilización de los mismos en la modelación y evaluación de resultados.

Se recopilaron los datos medidos en la Laguna de Rocha y alrededores provenientes de: campañas puntuales, instrumentos colocados en sitio durante un período de tiempo, estaciones pluviométricas y meteorológicas, datos de hindcast y datos de reanálisis, detallando cobertura espacial y temporal de los mismos, origen, instrumentos de medición y completitud y calidad en el caso de mediciones continuas. Esta información se cargó a base de metadatos en GIS donde es posible identificar fácilmente la información disponible y sus características.

En general los datos disponibles están asociados a tesis de grado y posgrado de estudiantes de Facultad de Ciencias, Centro Universitario Regional Este (CURE), Facultad de Ingeniería, o a algún proyecto de investigación. Los datos de apertura medidos desde 1956 hasta 2016, fueron medidos y reportados por la Dirección Nacional de AGUA (DINAGUA) y posteriormente por la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA). Por otra parte se tienen datos medidos por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), de un Hindcast local de alta resolución (Alonso et al. 2018) y del reanálisis global ERA5 (Hersbach et al. 2020). Las simulaciones de largo plazo fueron imple-

mentadas con datos del reanálisis ERA5 corregida con mediciones locales, y del hindcast local, lo cual permitió contar con un período extenso, continuo y completo de datos.

3.1. Precipitación, evaporación y caudales

Los datos de precipitación provienen de dos fuentes; medidos INUMET y del reanálisis ERA5. La figura 3.1 muestra las cuencas de aporte, la ubicación de los pluviómetros y de los datos del reanálisis ERA5. Los datos proporcionados por INUMET fueron medidos en cuatro estaciones pluviométricas; Garzón, Coronilla, El Canelón y Rocha, ubicadas en las cuencas de aporte a la laguna y sus alrededores. Los diferentes pluviómetros consultados abarcan distintos períodos de registro y en general presentan huecos en la información, que van desde valores puntuales a años sin registro. La precipitación en la cuenca se determinó con el método del inverso de la distancia al cuadrado.

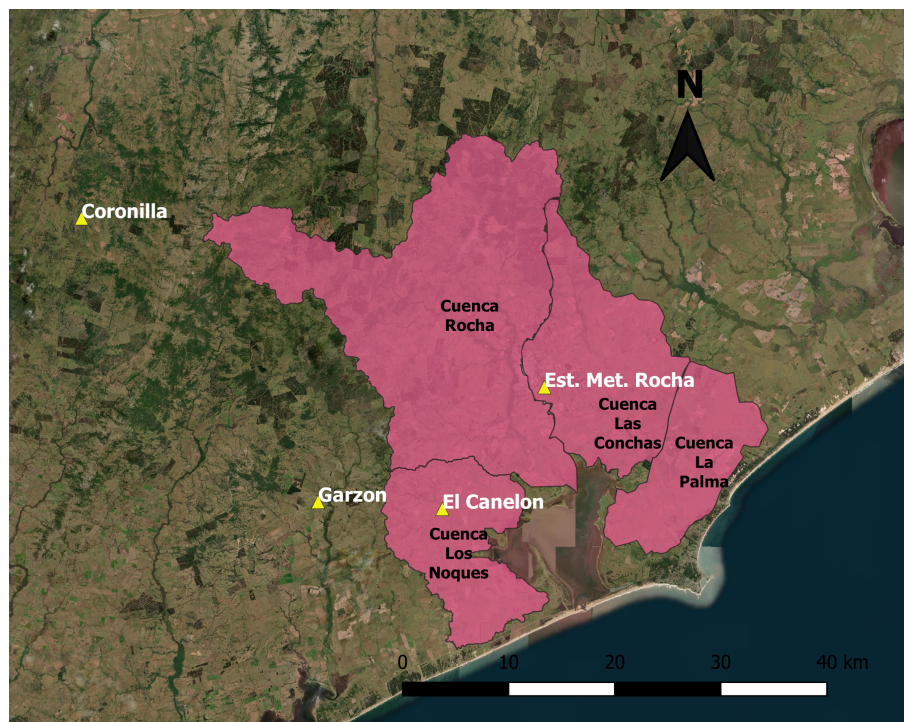


Figura 3.1: Subcuencas de aporte a la Laguna, pluviómetros utilizados y ubicación de los datos del reanálisis ERA5.

La figura 3.2 se muestra el ciclo medio anual de precipitaciones de cada uno de los pluviómetros y de los datos del reanálisis ERA5. Para los datos medidos

se puede observar que los promedios mensuales de precipitación en la cuenca del arroyo Los Noques son sistemáticamente menores al resto, lo que se asocia a valores de precipitación menores registrados en el pluviómetro de Garzón (ver figura 3.1). Los promedios mensuales de datos de ERA5 presentan un comportamiento más uniforme que los datos medidos; en los meses de marzo, abril y mayo las registros muestran un mayor volumen de precipitación que los datos del reanálisis mientras que de octubre a noviembre los valores medidos son menores. La mayor diferencia es de 40 mm, se observó en el mes de marzo. En general se aprecia escasa variabilidad interanual, siendo marzo y abril los meses más lluviosos. Por otra parte, la figura 3.3 muestra el ciclo de desviación estándar de la precipitación media anual registrada y del ERA5; en este caso se observó que los datos de ERA5 presentan una desviación sistemáticamente menor.

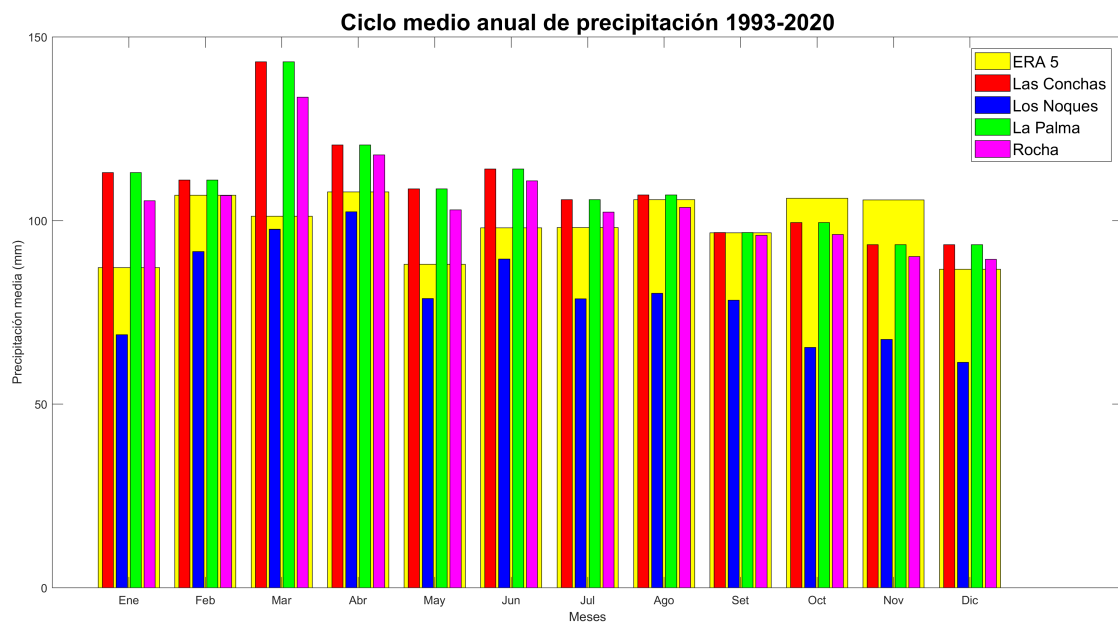


Figura 3.2: Ciclo medio anual de precipitación para cada una de las cuencas y de ERA5.

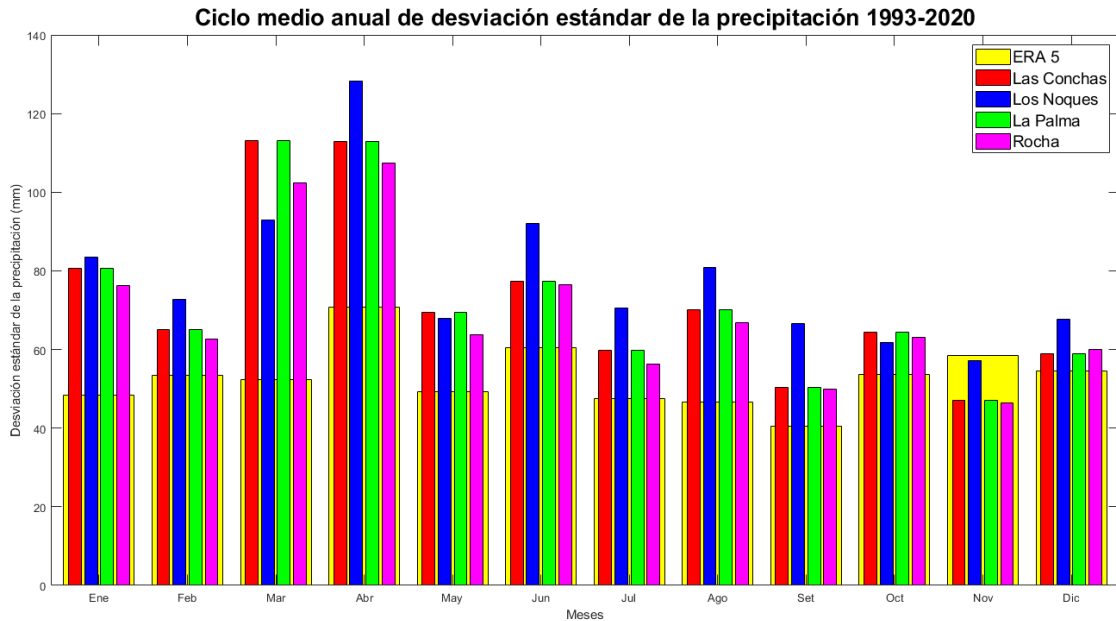


Figura 3.3: Ciclo medio anual de la desviación estándar de la precipitación para cada una de las cuencas y de ERA5.

Los datos de evaporación proceden de DINAGUA y de ERA5. En la figura 3.4 se presenta un gráfico de la media mensual de la evaporación estimada con datos de DINAGUA y la media mensual de los datos de ERA5. Los datos de DINAGUA se calcularon a partir de la evaporación media mensual en tanque A, medida en la ciudad de Rocha, ubicada a 10 km al noreste de la laguna, para los años 1985 a 1999, corregidos por el factor 0.7 (según Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011). La evaporación diaria se estimó asumiendo que para un mismo mes, cada día se evapora la misma cantidad de agua. Los datos de ERA5 presentan una frecuencia horaria, por lo que se acumularon para obtener valores diarios. El nodo de ERA 5 más cercano a la laguna se encuentra a 7 km hacia el sur de la estación de Rocha. El ciclo medio anual de evaporación de estos datos presenta mayores diferencias en los meses de verano, siendo menor la evaporación en los datos del reanálisis. En el acumulado anual, el registro muestra una evaporación 20 mm mayor a los datos del reanálisis.

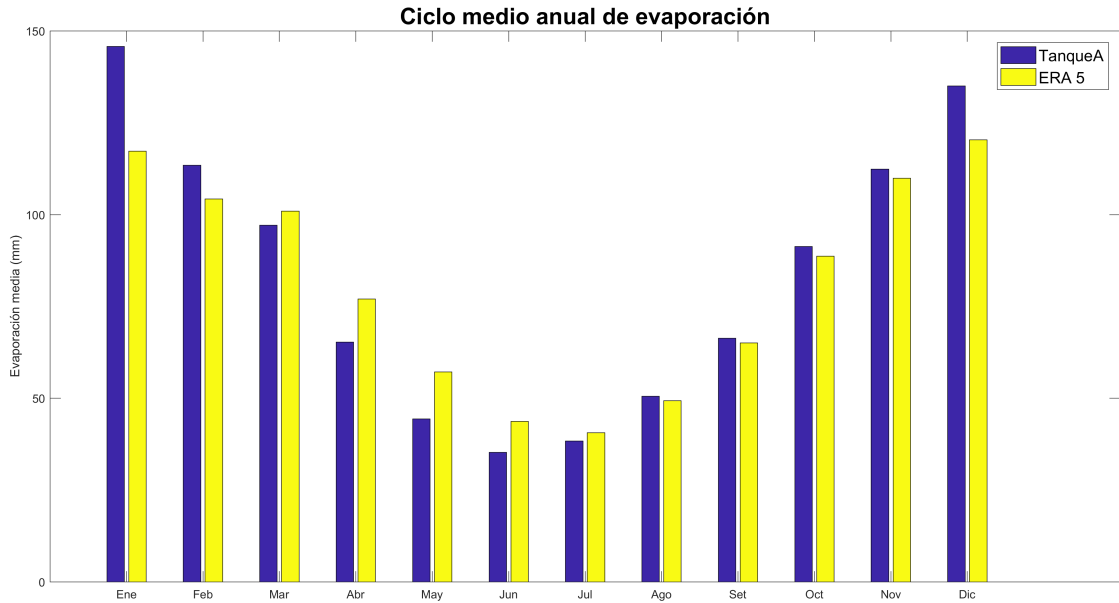


Figura 3.4: Evaporación media mensual medida en Tanque A y corregida en Rocha para el período 1985-1999 y del reanálisis ERA5.

Los caudales de aporte, tanto para los datos medidos como para los provenientes del reanálisis, se determinaron a partir de los datos de precipitación y evaporación mediante el modelo de paso diario GR4J (“Génie Rural à 4 paramètres Journalier”, Perrin et al. 2003). Con los parámetros de calibración hallados en Teixeira (2019). La tabla 3.1 presenta los parámetros de las cuencas utilizados en la implementación del modelo hidrológico; pendiente media de la cuenca (S), longitud hidráulica, área y tiempo de concentración (Tc).

Tabla 3.1: Parámetros morfológicos de las subcuencas de aporte a la Laguna de Rocha

Cuenca	S (%)	Long. Hidraulica (km)	Area (km ²)	Tc (h)
Rocha	0.426	67.2	562	14.2
Las Conchas	0.498	41.1	219	9.14
Los Noques	0.210	18.5	164	6.89
La Palma	0.227	29.4	135	9.57

3.2. Niveles y oleaje

Los datos de nivel se agrupan en nivel de mar y nivel en la laguna, provenientes de mediciones y de un hindcast local de alta resolución (Alonso et al. 2018). La figura 3.5 muestra la ubicación de las distintas estaciones de medición.



Figura 3.5: Ubicación de las lecturas de nivel y oleaje

Dentro de la laguna se registraron niveles en dos ubicaciones durante dos períodos distintos. En la ubicación Boya (ver figura 3.5) se registraron medidas de profundidad con una boya instalada en la laguna 2015, que estuvo midiendo hasta 2016. Las medidas de profundidad se pasaron a nivel a partir de conocer la cota de fondo en la posición de la boya, en este procedimiento se asume que dicha cota se mantuvo constante durante todo el período de medición. En diciembre 2019 se instaló un sensor de nivel y temperatura en la estación HOBO (ver figura 3.5) con una frecuencia de medición quinceminutal, este

sensor mide nivel en base a la diferencia de presión dentro y fuera del agua. En el anexo 1.1 se presenta un reporte de la instalación del sistema de adquisición y los datos obtenidos.

Los datos de nivel de mar fueron medidos en el puerto de La Paloma por la Administración Nacional de Puertos (ANP) y de la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) en la estación Mareógrafo (ver figura 3.5). Los datos de ANP se encuentran limitados superiormente por la ubicación del sensor, impidiendo registrar valores mayores a 1.15 m PRH. Se contó también con datos de nivel y oleaje (dirección media y pico, período medio y pico, altura de ola significativa) provenientes del mismo hindcast local de niveles (Alonso et al. 2018), en las ubicaciones indicadas como Hindcast en la figura 3.5.

3.3. Viento

Se dispone de datos de viento de tres fuentes: INUMET, ERA 5 y boya. Los datos de viento fueron medidos por INUMET en la estación meteorológica de Rocha en el período del 2000 al 2020 con una frecuencia horaria a 10 m de altura. Los datos de la boya fueron medidos de diciembre 2015 a diciembre 2016 cada 10 minutos a 2 m de altura. Al comparar las series se observó que el viento en la Laguna sistemáticamente presenta una intensidad superior al medido en la ciudad de Rocha. Debido a que el período de medición en la boya es más corto que lo necesario para realizar la calibración del modelo y simulaciones a largo plazo, se ajustaron los datos de la estación meteorológica para poder trabajar con ellos. Los datos de INUMET y del reanálisis ERA5 se corrigieron estadísticamente, a partir de los datos de la boya, los cuales fueron llevados a 10 m de altura mediante un perfil logarítmico, aplicando el método de cuantiles. La figura 3.6 muestra el gráfico de cuantiles y su curva de ajuste potencial. En este gráfico se detectó además que los datos medidos por INUMET presentan una mayor discretización que los registrados en la boya.

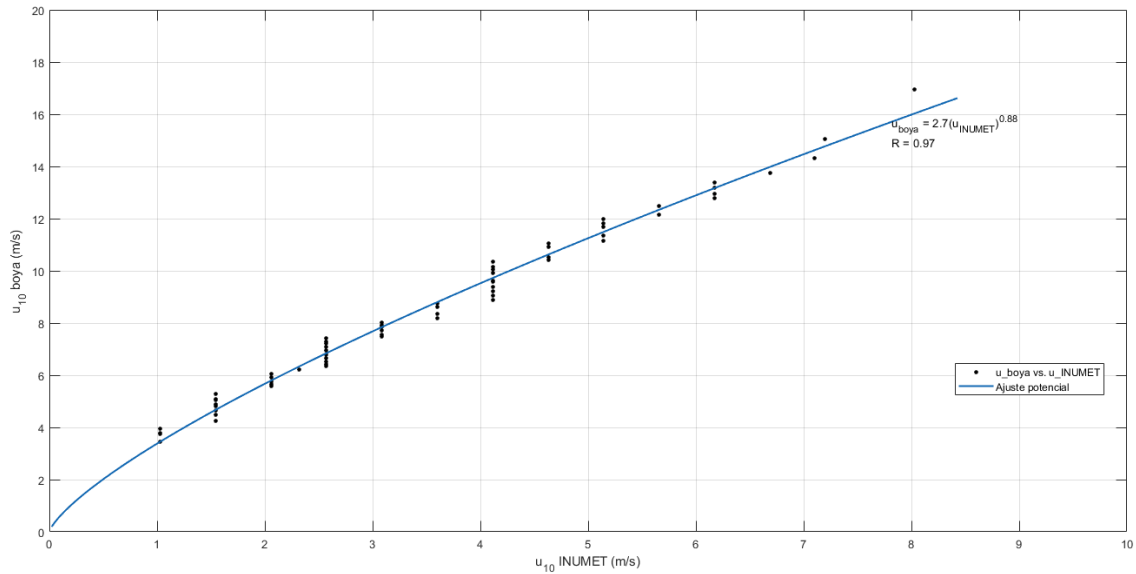


Figura 3.6: Gráfico de cuantiles de velocidad medidos en la boya y corregidos para 10 m de altura y en la estación de INUMET en Rocha y ajuste potencial en azul.

En cuanto a la dirección del viento, se observan diferencias importantes, en particular en los datos registrados en la boya, donde las direcciones predominantes son más marcadas. La figura 3.7 muestra las rosas de los vientos de los tres conjuntos de datos para diciembre 2015 y los períodos de medición completos. Se puede observar que en los datos registrados por la boya la dirección predominante es el NW, mientras que en los datos de INUMET se observan dos direcciones predominantes; NE y SW. Los datos del reanálisis presentan un comportamiento más homogéneo, con vientos predominantes del NE y SW.

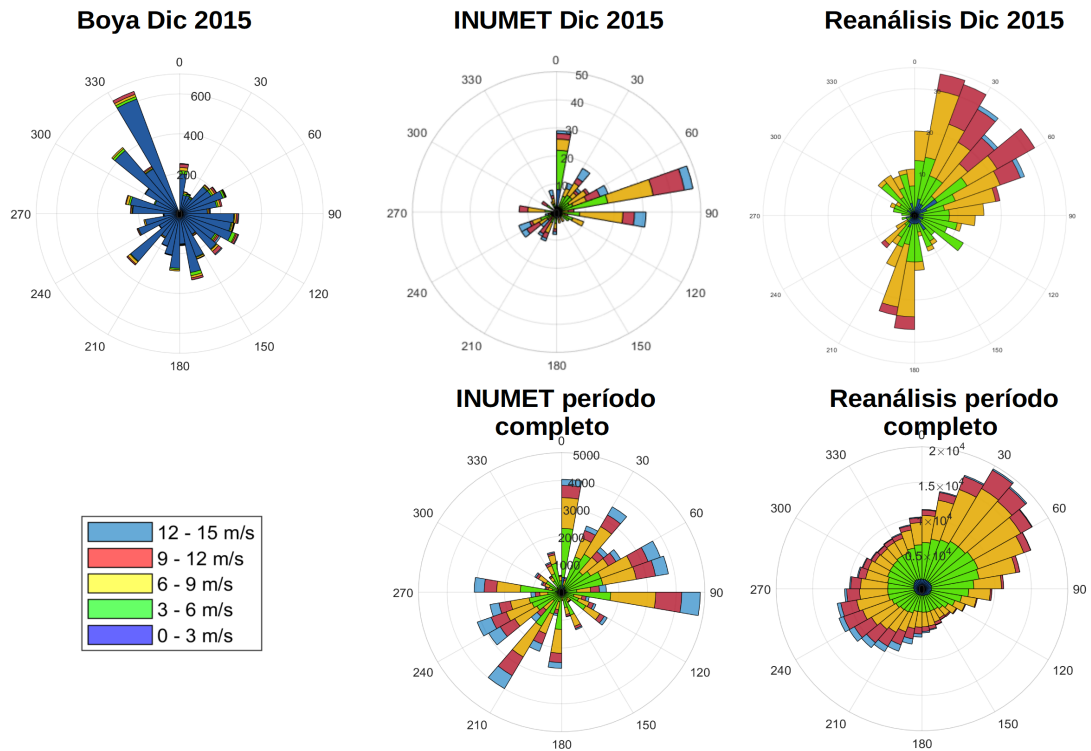


Figura 3.7: Rosas de viento para los datos medidos en la boya (izquierda), medidos en Rocha (centro) y del reanálisis ERA5 (derecha) para diciembre 2015 (arriba) y todo el período de medición de INUMET (abajo centro), y del reanálisis (abajo derecha).

3.4. Salinidad

Los datos de salinidad medidos provienen de campañas y presentan una gran variedad de ubicación, período y frecuencia de medición, que van desde quincenal a estacional a medidos en la boya de forma continua. La figura 3.8 muestra la ubicación de las estaciones donde se registró salinidad (a excepción de la estación HOB0). Las mediciones de datos puntuales abarcan desde 1987 hasta la fecha. El número de datos medidos varía en cada estación, así como el período en el que fueron tomados los datos. En la tabla 3.2 se muestra el número de datos tomado en cada estación del año y se indica qué porcentaje se tomó con la laguna abierta. Se observa que en algunas estaciones el número de datos es muy bajo, lo que debe ser tenido en consideración en el análisis estadístico. Respecto a si la laguna se encontraba abierta o cerrada, la mayor diferencia se encontró en la estación Barra Vieja, donde 9 de los 12 datos

fueron tomados con barra abierta y 3 con barra cerrada. El desglose de toma de datos por estación muestra que usualmente en invierno es cuando se realizan menos registros. En la tabla 3.3 se muestran los valores de mediana, media y desviación estándar de los datos de salinidad.

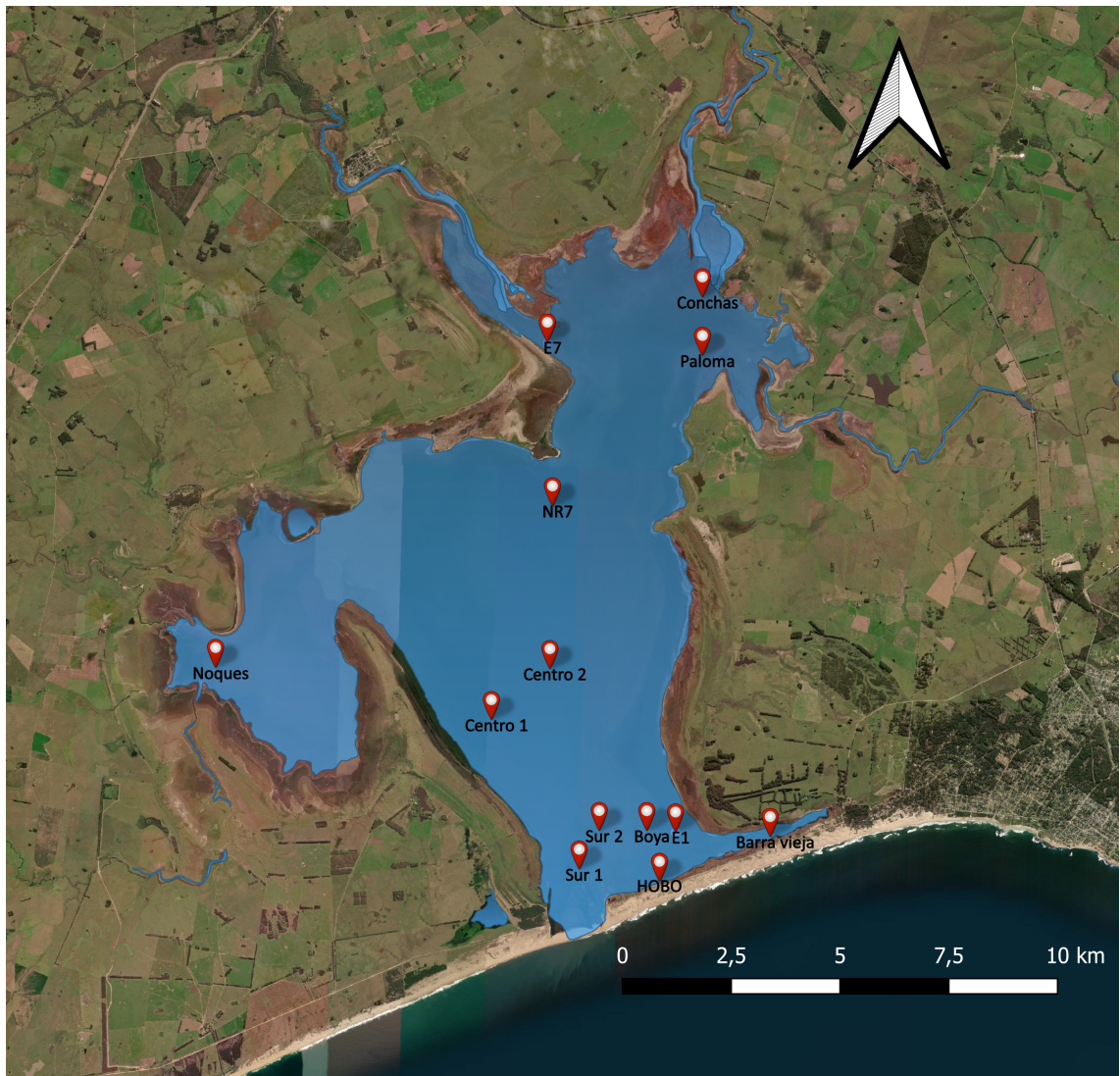


Figura 3.8: Puntos en los que se midió temperatura y salinidad dentro de la laguna.

Se contó además con datos medidos con la boya (presentada en la sección 3.2) que cuenta con un sensor de conductividad y con un miniCTD en el período marzo a mayo 2016. En el gráfico de la figura 3.9 se comparan los datos obtenidos con la boya contra los datos obtenidos en un mismo punto con un miniCTD; se observa que los valores registrados en la boya difieren en gran medida a los del CTD, en particular a partir del mes de abril, donde caen a

valores cercanos a cero. Por este motivo se decide no trabajar con los valores de salinidad de la boya. Mirando los datos del CTD y mediciones puntuales se puede apreciar además la variación temporal que presenta la salinidad en un punto de la laguna, oscilando entre 0 y 18 PSU en cuestión de semanas.

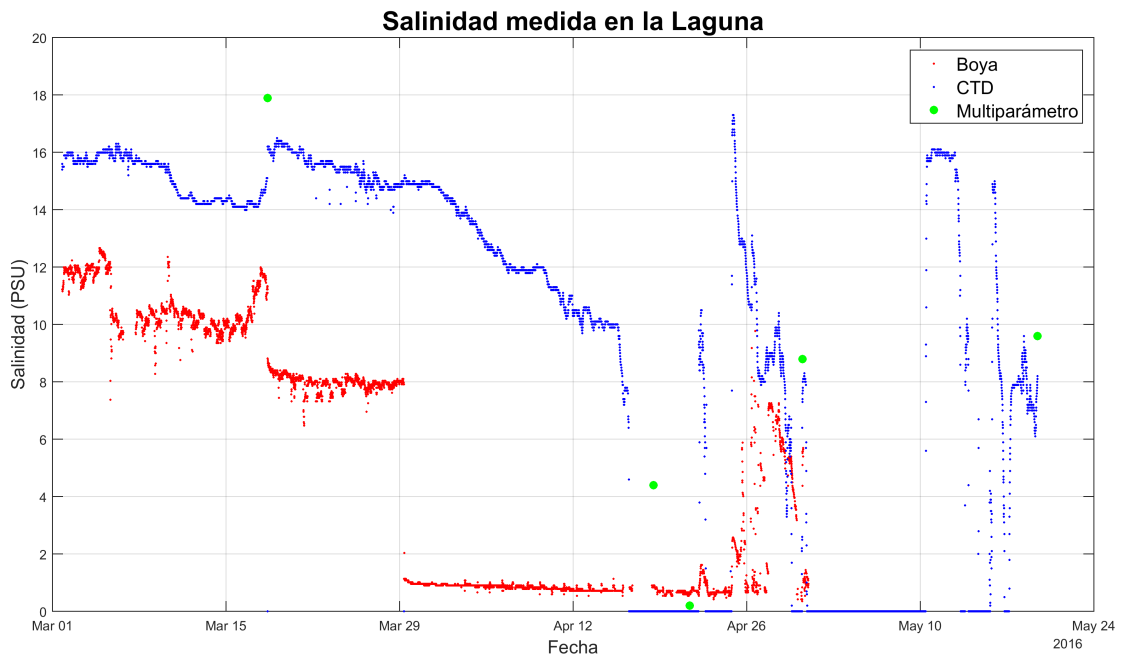


Figura 3.9: Comparación de medidas realizadas con la boya, con un CTD y con un multiparámetro entre marzo y mayo de 2016.

Tabla 3.2: Número de datos registrados en cada estación. Se indica que porcentaje se tomó con la laguna abierta y en cada estación del año.

Estación	N datos	Abierta	Ver	Oto	Inv	Prim
E1	135	54 %	31 %	24 %	13 %	31 %
E7	124	47 %	36 %	22 %	18 %	24
NR7	9	44 %	33 %	22 %	11 %	33 %
Conchas	9	44 %	33 %	22 %	11 %	33 %
Palma	9	44 %	33 %	22 %	11 %	33 %
Noques	9	44 %	33 %	22 %	11 %	33 %
Centro 1	20	70 %	20 %	25 %	10 %	45 %
Centro 2	12	67 %	17 %	17 %	8 %	58 %
Sur 1	15	73 %	13 %	27 %	7 %	53 %
Sur 2	8	25 %	25 %	50 %	0 %	25 %
Boya	11328	77 %	35 %	65 %	0 %	0 %
Boya CTD	11330	58 %	27 %	73 %	0 %	0 %
Boya puntual	17	71 %	18 %	18 %	12 %	53 %
Barra vieja	12	75 %	8 %	17 %	8 %	67 %

Tabla 3.3: Estadísticos de los datos de salinidad medidos dentro de la laguna en las diferentes estaciones

Estación	Salinidad (PSU)		
	Mediana	Media	Std
E1	10.6	11.9	6.5
E7	3.1	4.6	4.8
NR7	14.2	12.5	5.3
Conchas	14.2	12.5	5.3
Palma	12.7	12.9	5.8
Noques	11.5	13.0	7.5
Centro 1	15.7	14.4	6.6
Centro 2	11.0	11.6	4.6
Sur 1	16.2	14.8	7.8
Sur 2	8.8	11.2	6.0
Boya	5.4	5.2	4.4
Boya CTD	9.8	12.5	6.3
Boya Puntual	16.5	15.3	5.8
Barra vieja	17.1	17.4	7.9

3.5. Temperatura del agua

Para el análisis de los datos de temperatura del agua, los datos se separaron en; (1) temperatura de los arroyos, (2) temperatura del agua de la laguna y (3) temperatura del agua del océano. Para la temperatura de los arroyos se tienen datos de medidas puntuales de nueve campañas en los arroyos Rocha, Las Conchas y La Palma y en dos campañas en Los Noques con el objetivo de tener una serie continua de temperatura de entrada del agua de los arroyos. Los valores de temperatura registrados se promedian en los meses que hay datos, luego se suavizan los puntos realizando una interpolación spline cúbica; el resultado se muestra en la figura 3.10. Esta serie se ingresa como condición de borde.

En el caso de la temperatura en la laguna los datos provienen de tres

fuentes: mediciones puntuales en campañas, boya y sensor HOBO. Se tienen datos puntuales medidos dentro de la laguna en las 12 estaciones marcadas en la figura 3.8, excepto en la estación Centro 2. En la tabla 3.4 se muestran los valores de mediana, media y desviación estándar de los datos. Las medias en distintos puntos de la laguna muestran una diferencia de temperatura de hasta 3.5°C . Los valores más altos se observan en la zona norte y de los bolsones mientras que los más bajos están en la zona sur, sin embargo, cabe destacar que los datos en las estaciones **E1** y **E7** no presentan grandes diferencias y fueron medidos los mismos días. La boya y el sensor HOBO fueron presentados en la sección 3.2.

Los datos de temperatura en el océano son los del reanálisis global ERA 5 (Hersbach et al. 2020); se observó un marcado ciclo anual con mayores temperaturas en los meses de diciembre a febrero y menores de junio a setiembre.

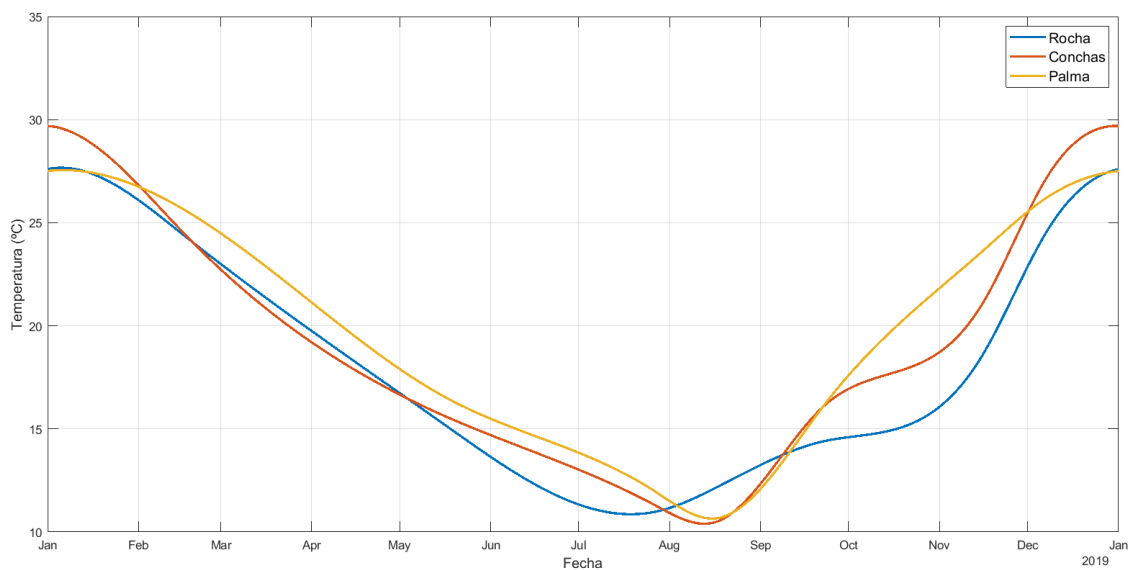


Figura 3.10: Curva de temperatura estimada del agua en los arroyos interpolada a partir de los datos medidos.

Tabla 3.4: Estadísticos de los datos de temperatura medidos dentro de la laguna en las diferentes estaciones

Estación	Temperatura (°)		
	Mediana	Media	Std
E1	19.2	19.9	4.5
E7	20.3	19.8	5.1
NR7	19.3	20.2	5.5
Conchas	18.4	20.3	4.7
Paloma	18.1	20.9	4.6
Noques	19.2	19.0	4.1
Centro 1	18.5	19.3	4.8
Sur 1	18.4	17.4	4.8
Sur 2	18.0	17.7	4.2
Boya	19.8	19.4	2.2
Boya CTD	19.7	18.5	2.2
Boya Puntual	18.7	17.8	3.5
HOBO	17.7	18.2	5.3
Barra vieja	18.8	17.8	5.5

3.6. Variables atmosféricas

La implementación del modelo de intercambio de calor requiere otros parámetros meteorológicos además de los mencionados anteriormente, como temperatura del aire, humedad relativa y nubosidad. Se tienen dos fuentes para estos datos; INUMET y el reanálisis ERA 5.

Los datos son provistos por INUMET, medidos en la estación meteorológica de Rocha, con una frecuencia horaria desde el 2000 hasta el 2020, con períodos de datos faltantes. Por otra parte, se cuenta con datos de temperatura del aire medidos en la boya en el periodo diciembre 2015 - octubre 2016. La temperatura del aire se corrige con la registrada en la boya mediante el método de cuantiles y posteriormente se le aplica a toda la serie, que fueron utilizados para corregir los datos de INUMET y del reanálisis ERA5. En la figura [3.11](#)

se presenta el gráfico de cuantiles para la temperatura del aire medida en la estación meteorológica de Rocha y en la boya corregido para 10 m de altura (azul), y los cuantiles de datos del reanálisis ERA5 contra los de la boya (rojo).

Los datos de humedad relativa y nubosidad del reanálisis se compararon con los medidos por INUMET, y se observó que, si bien los datos de ambas fuentes no coinciden exactamente, siguen la misma tendencia (ver figura 3.12).

Grafico de cuantiles de Temperatura del aire ERA5 e INUMET contra cuantiles de datos de la boya

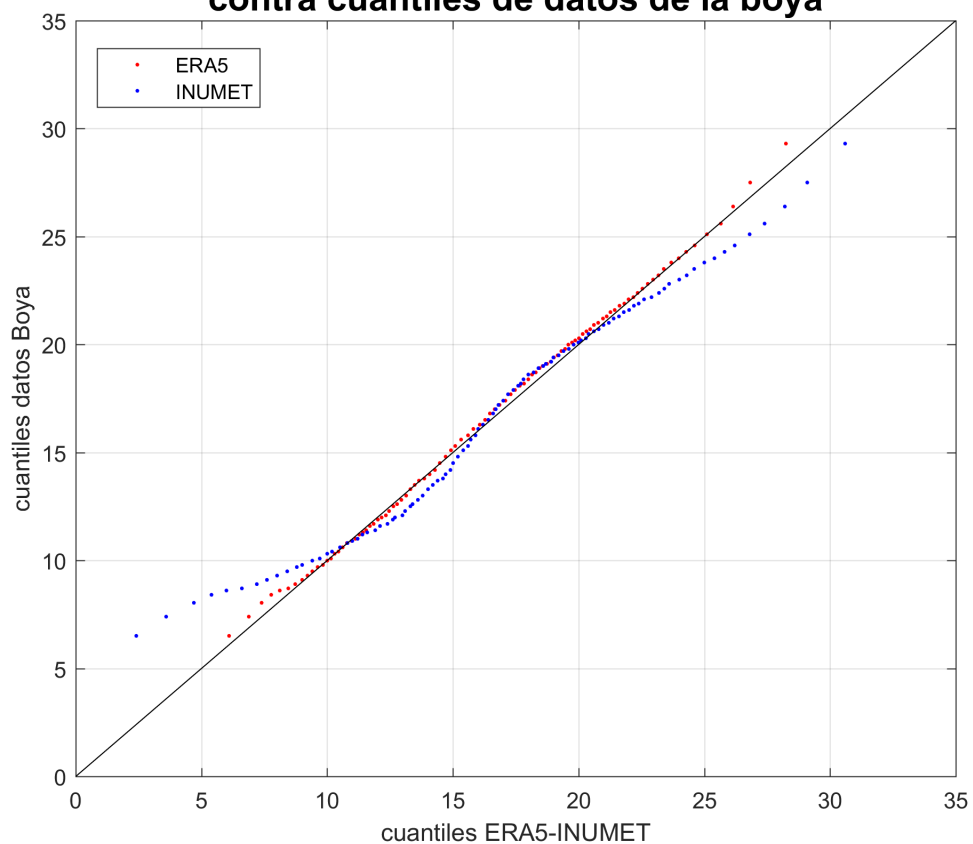


Figura 3.11: Gráfico de cuantiles de la temperatura del aire medida en Rocha y en la boya y del reanálisis y en la boya.

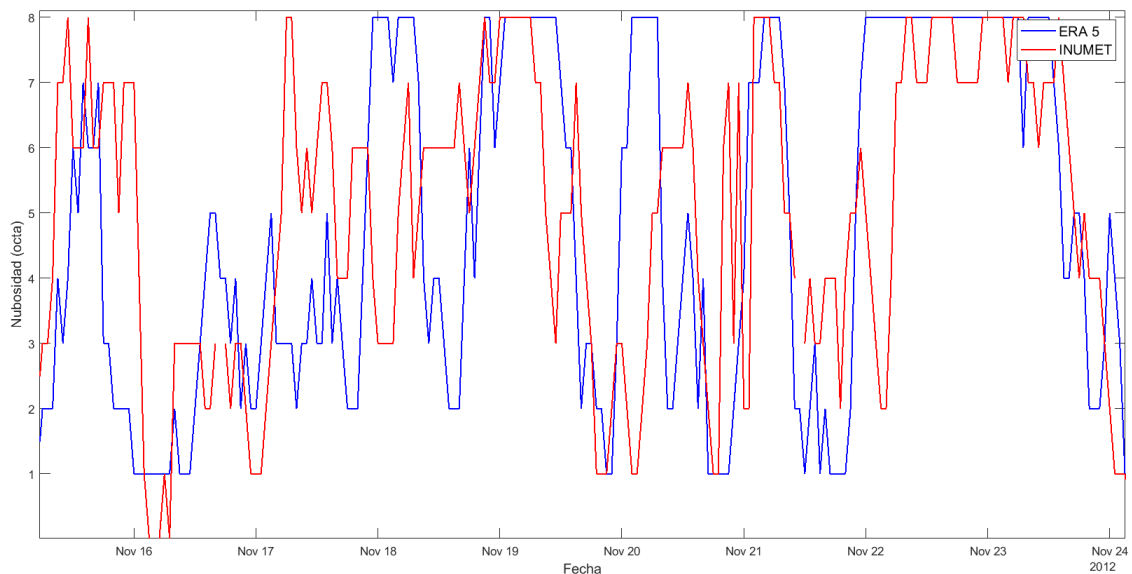


Figura 3.12: Nubosidad medida por INUMET (rojo) y proveniente del reanálisis ERA5 (azul).

3.7. Datos de aperturas

No existe un registro sistemático de las aperturas de la Laguna de Rocha, que incluya cuándo ocurrió la apertura, si fue natural o artificial y cuándo se cierra la barra. Se cuenta con datos parciales registrados por DNH entre 1956 y 2005 y datos registrados por el guardaparques de DINAMA de 2004 a 2007 y de 2013 a 2015. Estos datos se complementaron con imágenes satelitales de Earth Explorer, Planet Explorer y Google Earth. A partir de estos registros se diagramó el estado de la barra de la laguna: abierta o cerrada. En la figura 3.13 se muestra el resultado; en rojo se indican los momentos en los que la barra de la laguna está abierta, en azul los momentos en los que está cerrada y en negro los momentos en los cuales no es posible inferir el estado de la barra a partir de los datos disponibles. Con estos datos de apertura estimados, se observa que en promedio la mitad del tiempo la laguna se encuentra abierta y la mitad cerrada. El número de aperturas por año oscila entre 1 y 7, siendo 2 la cantidad de aperturas anuales más usual.

Durante las aperturas artificiales ocurridas en julio 2018 y abril 2021 se realizaron campañas de medición que permitieron comprender el proceso de apertura y evolución del canal de conexión entre la laguna y el océano. Se

registró el ancho del canal los días horas posteriores a la apertura y se lograron medir velocidades y sección del canal algunas semanas después de la apertura. Inicialmente, el canal presenta una evolución rápida del ancho hasta las 48 h después de abierto aproximadamente. En ambas aperturas se observó que el ancho máximo del canal fue del orden de los 120 m, luego de lo cual el ancho presenta cambios mínimos por varias semanas, modificando su forma en planta y profundidad.

Durante la campaña de 2018 se estimaron las velocidades en el canal a las 24 h de la apertura mediante técnicas de PIV y se obtuvieron velocidades de hasta 4 m/s en algunas zonas del canal (ver detalles en Teixeira, 2019). En 2016 y 2021 se midió la profundidad del canal entre 2 y 4 semanas después de la apertura, registrando profundidades de entre 2 m y 3 m en la zona más profunda del canal y velocidades máximas 1.5 m/s y medias del orden de entre 0.36 m/s y 0.44 m/s.

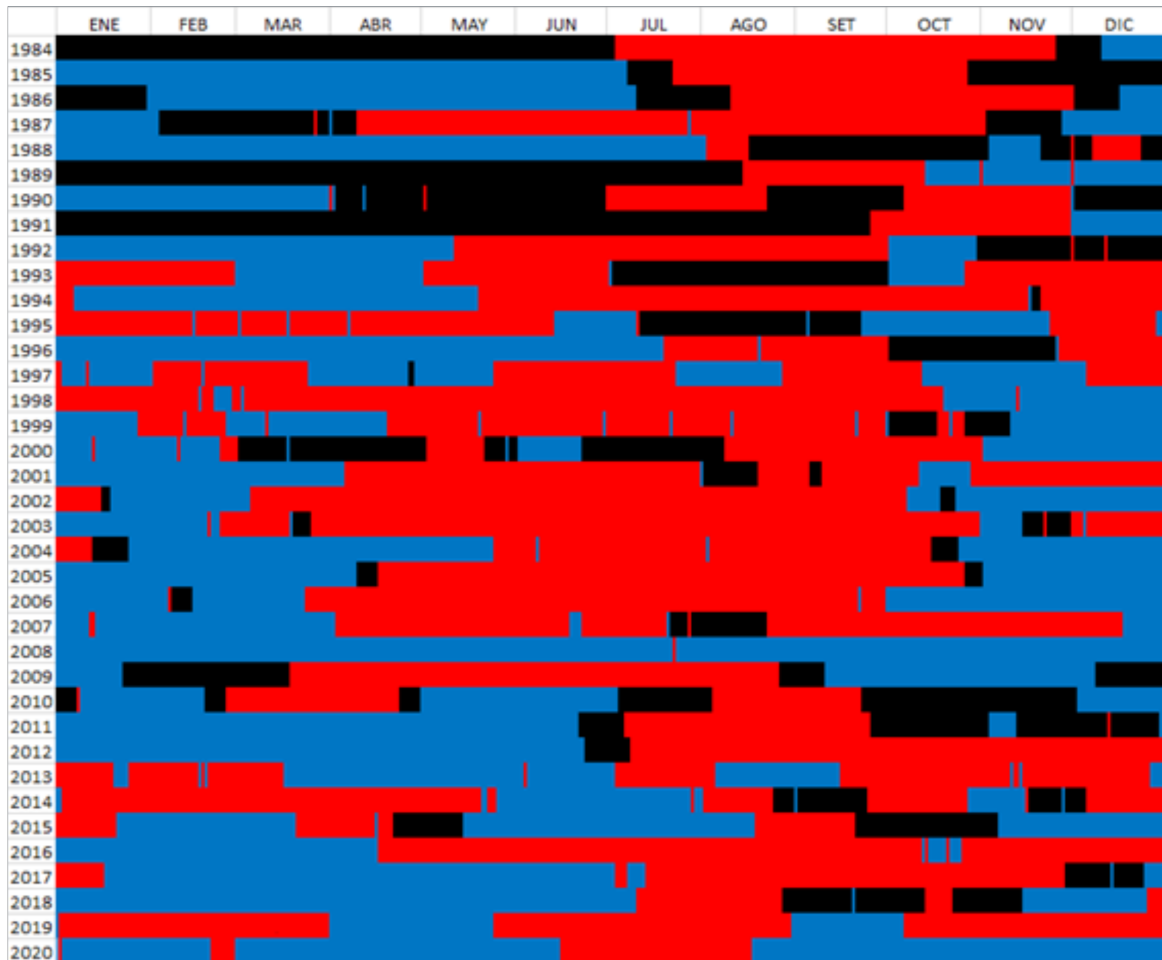


Figura 3.13: Apertura de la Laguna. En rojo se muestran los períodos en los que la Laguna se encuentra abierta. En azul los períodos en los que la Laguna se encuentra cerrada y en negro los momentos en los que no se puede inferir si la misma estaba abierta o cerrada.

3.8. Topografía y batimetría

Los datos batimétricos y topográficos provienen de diversas fuentes:

- Batimetría de la laguna realizada con ecosonda de Manejo Costero (CURE) en 2012.
- Batimetría del mar en la zona de la desembocadura de la Laguna (2012)
- Carta náutica 03 Servicio Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) 2004
- Topografía de flecha de la laguna y algunas zonas puntuales del terreno próximo a la laguna, realizada por el Instituto de Agrimensura de la

Facultad de Ingeniería (2013)

- Modelo Digital del Terreno (MDT) para Uruguay desarrollado por REpositorio Nacional de REpositorios Digitales de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto (RENARE) del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP)(2018).
- Relevamiento topográfico de la zona de la barra durante una campaña en octubre de 2020.

La batimetría final de la Laguna de Rocha se obtuvo utilizando las batimetrías realizadas en 2012, el relevamiento topográfico de 2013 y el MDT de Renare. Entre la batimetría de la laguna y el MDT queda una franja inundable donde no se tienen datos medidos. En esta zona, se estimó la batimetría a partir de perfiles lineales entre ambos conjuntos de datos. Por otra parte, la batimetría de la zona del mar, proviene de una interpolación de la carta náutica 03 del SOHMA, realizada por el IMFIA. En la imagen [3.14](#) se muestra la batimetría final para la laguna y la zona del mar modelada.

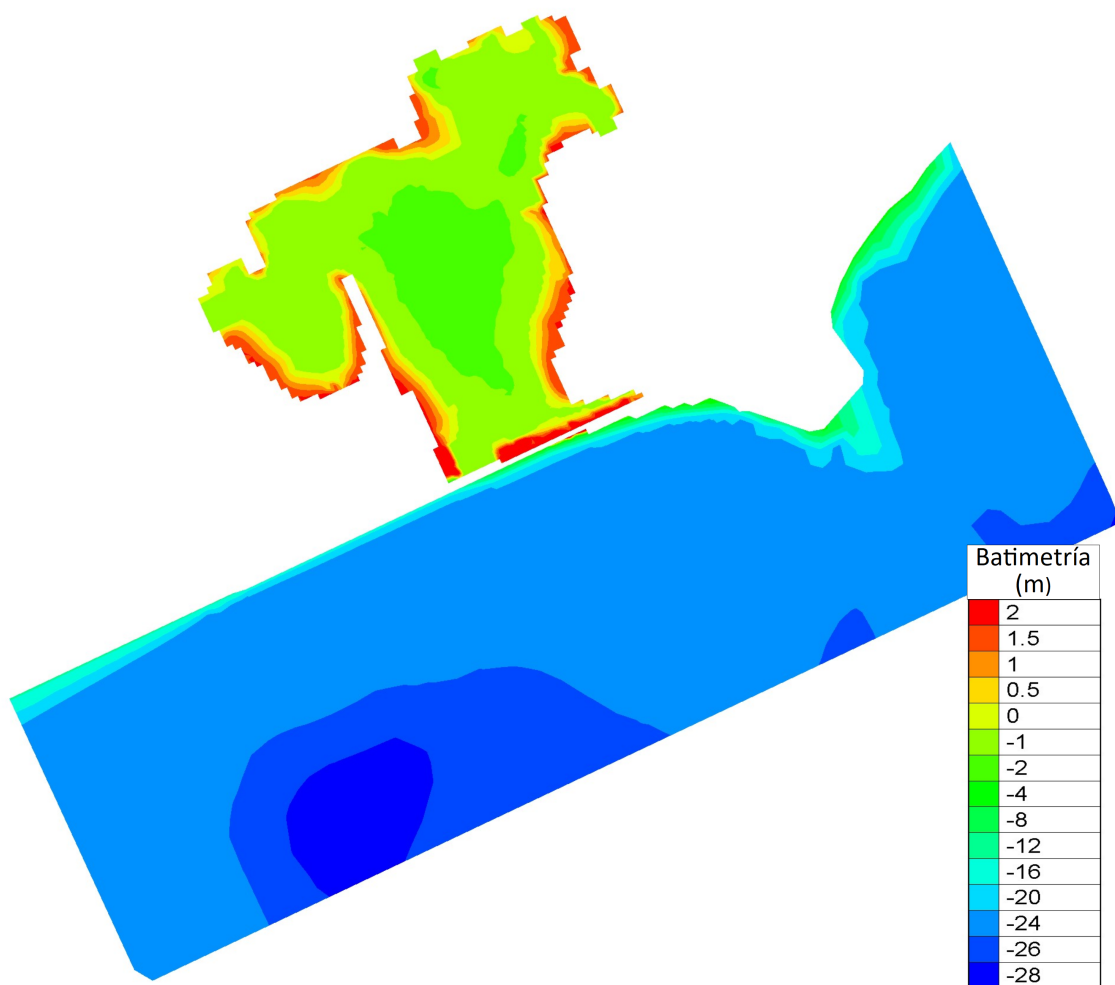


Figura 3.14: Batimetría final de la Laguna de Rocha y la zona costera modelada

3.9. Resumen de datos

Las tablas 3.5 y 3.6 resumen los datos disponibles dentro de la Laguna de Rocha, la zona costera cercana y datos atmosféricos. Para cada uno se indica la ubicación en la que se tomaron, el o los responsables de medición, el período y la frecuencia de medición y el uso que se le dio en este trabajo.

Tabla 3.5: Resumen de datos disponibles en la Laguna de Rocha, zona costera y datos atmosféricos, parte I

Variable	Ubicación	Responsable	Período	Frecuencia	Uso
Precipitación	Rocha	INUMET	1980-actualidad	horaria	Calculo de caudales para calibración y validación del modelo
	Rocha	ERA5	1985-actualidad	horaria	Calculo de caudales para simulaciones a largo plazo
	Puerto de La Paloma	DNH-ANP	1950-actualidad	horaria	Testeo del modelo hidromorfodinámico simplificado
Nivel en la laguna	Varios puntos a 4 km de la costa	IMFIA	1985-2020	horaria	Aplicación del modelo 2D
	Frente a comunidad de pescadores	IMFIA	2019-2021	cada 15 minutos	Ajuste de parámetros del modelo
	Zona sur de la laguna	CURE	2015-2016	cada 10 minutos	Ajuste de parámetros del modelo de cálculo de caudales
	punto a 4 km de la costa	IMFIA	1985-2020	horaria	Calculo de transporte de sedimentos litoral
Oleaje	Sur de la Laguna	UDELAR SNAP	2015-2016	cada 10 minutos	Ajuste de datos de INUMET
	Rocha	INUMET	2000-2021	horaria	Calibración del modelo
Viento	Rocha	ERA5	1985-2021	horaria	Simulaciones a largo plazo

Tabla 3.6: Resumen de datos disponibles en la Laguna de Rocha, zona costera y datos atmosféricos, parte II

Variable	Ubicación	Responsable	Período	Frecuencia	Uso
Salinidad	Varios puntos en la laguna	UDELAR MA	1987-1987, 1993-2006, 2013-2018	Variable	Descripción de la laguna. Comparación con resultados del modelo.
Temperatura del agua	Boya	UDELAR	2015-2016	10 minutos	Se descartan
	Varios puntos en la laguna	UDELAR MA SNAP	1987-1987, 1993-2006, 2013-2018	Variable	Descripción de la laguna.
	Boya	UDELAR	2015-2016	10 minutos	Descripción de la laguna. Ajuste de parámetros del modelo de intercambio de calor con la atmósfera. Comparación con resultados del modelo.
Radiación solar, Nubosidad, Humedad relativa, Temperatura del aire	Frente a la comunidad de pescadores	UDELAR	2019-2020	15 minutos	Calibración de parámetros del modelo de intercambio de calor con la atmósfera.
	Rocha	INUMET	2000-2020	Horaria	Forzantes del modelo de intercambio de calor con la atmósfera
Batimetría	-	UDELAR SOHMA	SNAP 2012, 2013, 2016	-	Modelo hidrodinámico multiescala

Capítulo 4

Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados del modelo bidimensional multiescala. En la primera parte se presentan los resultados del análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo; y en la segunda se analizan los resultados de la simulación a largo plazo y se comparan los resultados para los diferentes escenarios.

4.1. Calibración y validación

La calibración y validación del modelo se organiza en varios apartados; el primero de ellos presenta el análisis de sensibilidad y calibración del modelo hidro-morfodinámico de resultados; el segundo presenta un análisis de sensibilidad y calibración de los parámetros del modelo de intercambio de calor con la atmósfera, y el tercero y el cuarto apartado presentan la comparación de datos de temperatura y salinidad medidos y modelados respectivamente.

4.1.1. Modelo hidro-morfodinámico simplificado

En el anexo 3 se presenta un análisis de sensibilidad de los resultados de nivel en la laguna y la geometría y velocidad en el canal a los parámetros del modelo hidro-morfodinámico. A continuación se resumen brevemente los resultados del mismo.

La longitud del canal (L), el número de manning (n) y el coeficiente de pérdida localizada a la salida y entrada del canal (m) influyen en la pérdida de carga del canal lo cual se ve reflejado en la velocidad y geometría del mismo. La relación entre el ancho y la profundidad del canal (α) no tiene mayores

efectos en los resultados dentro del rango de valores estudiados. El coeficiente aplicado a la concentración de sedimentos en el océano (n_{CO}) influye sobre la cota de fondo del canal, conduciendo hacia un cierre progresivo del mismo. Los resultados presentan una alta sensibilidad al coeficiente de transporte de sedimentos (k); una selección inadecuada del mismo puede llevar a valores de profundidad en el canal poco razonables e incluso a la inestabilidad del modelo. La tasa de crecimiento de la berma de arena (Δ_{berm}) es relevante para determinar si, tras un evento de precipitación, la laguna se vuelve a abrir naturalmente o no. La tolerancia que se le da a la profundidad del canal para definir que deja de pasar agua (TOL) no genera mayores cambios en los resultados para valores entre 0.1 m y 0.4 m para la apertura estudiada, no obstante para valores menores conduce a una apertura anticipada en comparación con los datos registrados. En base a los resultados del análisis de sensibilidad se seleccionaron los parámetros k , n_{CO} y Δ_{berm} para la calibración. Una vez que se seleccionaron los parámetros de ajuste se procedió a la calibración de los mismos comparando los datos de nivel medido y modelado en la estación HOBO. La tabla 4.1 muestra los parámetros del modelo, el rango de variación estudiado en el análisis de sensibilidad y los valores calibrados o seleccionados.

Los resultados del modelo calibrado se muestran en la figura 4.1 junto con los niveles medidos en la estación HOBO, el nivel en el océano frente a la laguna y el fondo del canal. En el período inicial de apertura del canal se observa un retraso en el descenso del nivel modelado respecto al medido, posteriormente se ve un descenso más rápido en el modelo durante la profundización del canal. En los sucesivos aumentos y descensos del nivel se observa una mayor inercia en los valores modelados. Respecto a la cota de fondo del canal, la profundización inicial modelada es más lenta que la observada; a las 24 horas de la apertura en el modelo la profundidad es menor a 1 m, y su ancho es menor a 30 m, mientras que en la realidad el ancho medido supera los 100 m en este tiempo (ver anexo 1).

Tabla 4.1: Valor recomendado de los parámetros, rango típico, rango de valores estudiado y valor utilizado, con un * se indican los parámetros calibrados.

Parámetro	Valor recomendado	Rango típico	Rango estudiado	Valor utilizado
L (m)	-	200 - 2000	150 - 400	300
n	-	-	0.016 - 0.024	0.016
m	4	2 - 4	2-4	4
α	-	-	20 - 45	33
n_{Co}^*	-	-	0.5 - 3	1.5
k^*	2e-4	-	1e-3 - 1e-7	4e-5
Δ_{berm} (m/año)*	-	-	1 - 10	6
TOL (m)	-	-	0.05 - 0.4	0.2

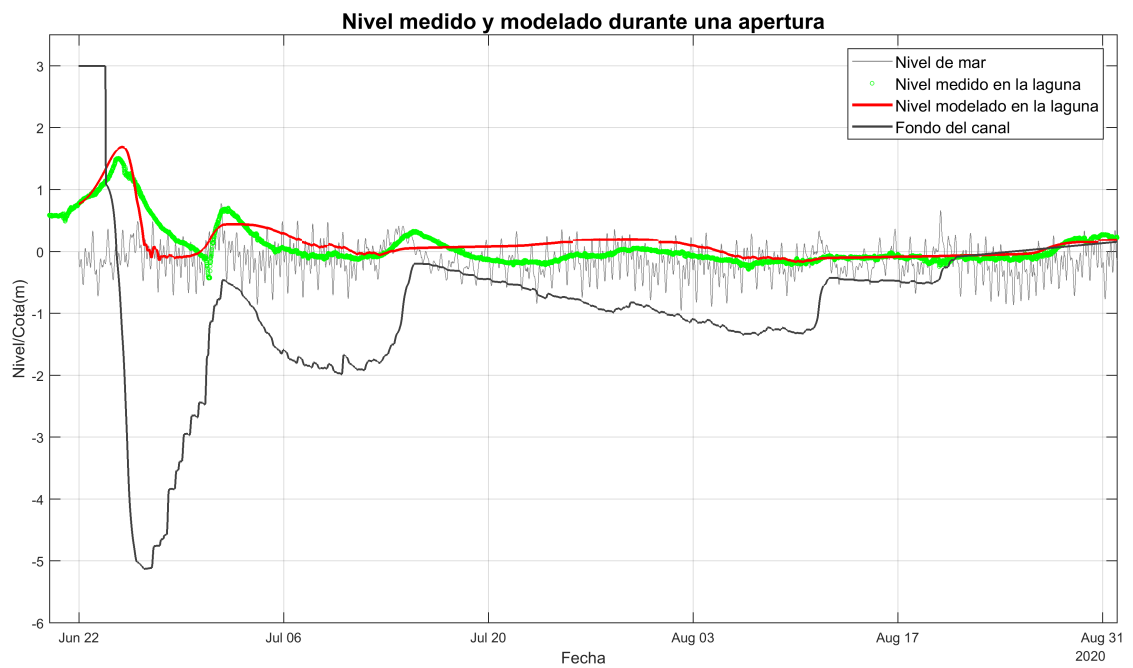


Figura 4.1: Resultados del modelo hidro-morfodinámico con parámetros calibrados y datos de nivel medidos en verde.

4.1.2. Modelo de intercambio de calor con la atmósfera

La figura 4.2 presenta la sensibilidad de los resultados de temperatura en la estación Boya, para distintos valores de los parámetros de calibración. En estos gráficos se puede observar que e_{air} y a tienen un mayor efecto, mientras que para distintos valores de b prácticamente no cambian los resultados.

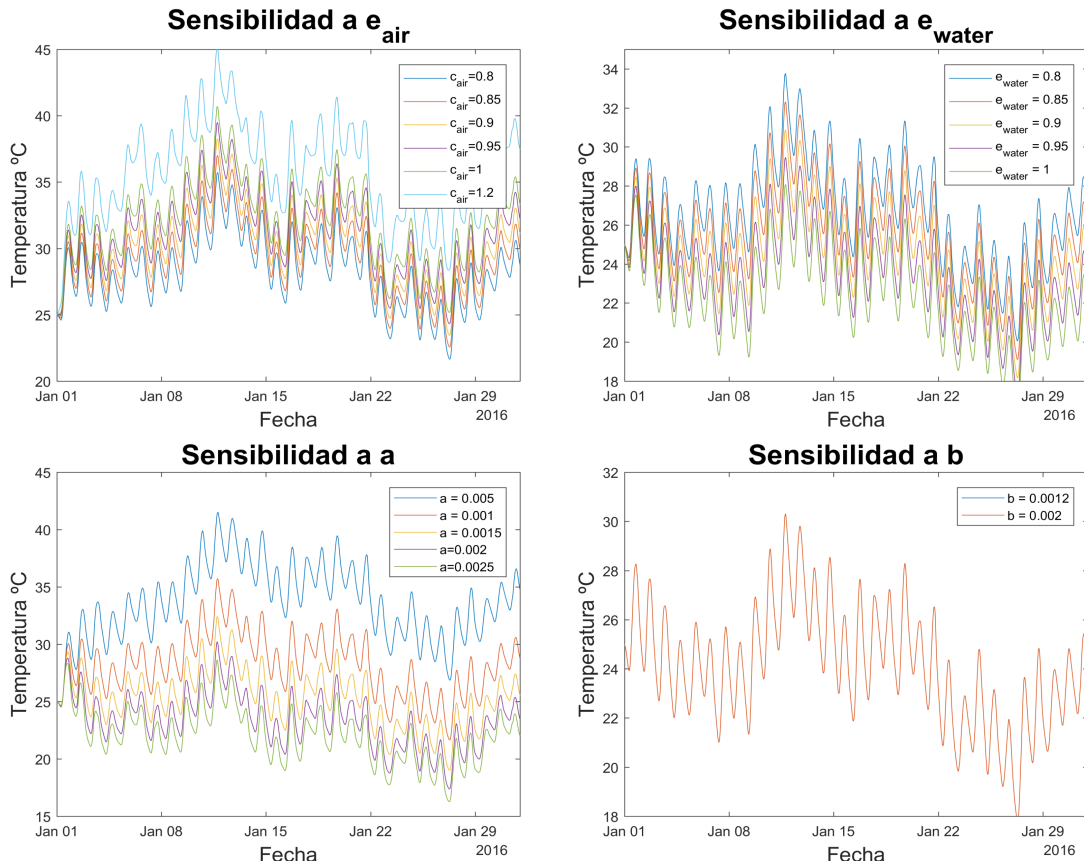


Figura 4.2: Sensibilidad de la temperatura a los distintos parámetros de calibración del modelo de intercambio de calor con la atmósfera.

El modelo de temperatura se calibró para el período 11/2019 a 10/2020 comparando el error medio cuadrático ($RMSE$) de las series de temperatura medida y simulada en la ubicación HOBO (ver figura 2.8). El menor valor obtenido para el error medio cuadrático fue $RMSE = 2^{\circ}C$ para $e_{air} = 0.8$, $e_{water} = 0.92$, $a = 0.001$ y $b = 0.0006$. La figura 4.3 muestra la serie de datos medidos y modelados con los parámetros calibrados en la estación HOBO desde el 20 de junio al 20 de julio de 2020. En ésta se puede apreciar que, para el período representado, la amplitud de las oscilaciones es mayor en el modelo que en la realidad.

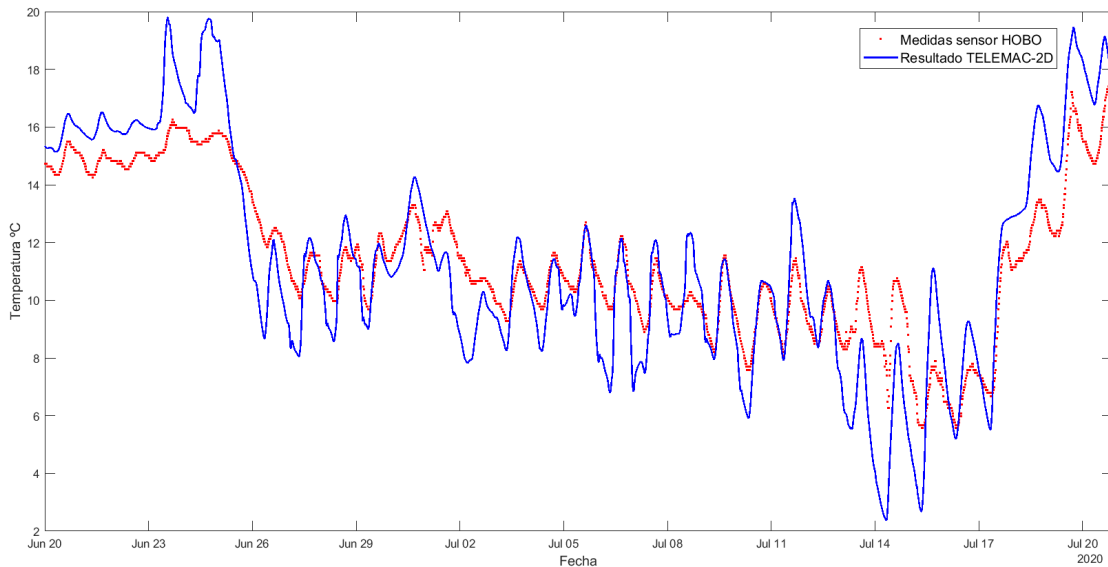


Figura 4.3: Temperatura medida y modelada en la estación HOBO del 20 junio al 20 de julio de 2020.

4.1.3. Comparación de los resultados de temperatura con datos medidos

La serie de temperatura presentó inestabilidades en los nodos de la laguna que tiene poca profundidad, alcanzando valores poco razonables. A modo de ejemplo, en el gráfico de la figura 4.4 se muestra la temperatura y nivel para el período junio a octubre de 1991, para el escenario 2.2 m , donde se identifica una apertura artificial y dos aperturas naturales. En el momento posterior a la apertura se observó un aumento considerable del rango diario de temperatura, que coincide con un descenso en la profundidad en ese punto. Este comportamiento se repite en cada apertura para los tres escenarios estudiados. Por otra parte, para el escenario 2.2 m, en el período 22 noviembre de 1995 al 9 de enero de 1996, se dan inestabilidades en la temperatura con niveles bajos, en ubicaciones con poca profundidad, alcanzando máximas de casi 50°C y diferencias entre el día y la noche de 30°C . Dado que las inestabilidades observadas son acotadas en el tiempo, se decidió aplicar una media móvil de 24 horas para filtrarlas y poder trabajar con la serie.

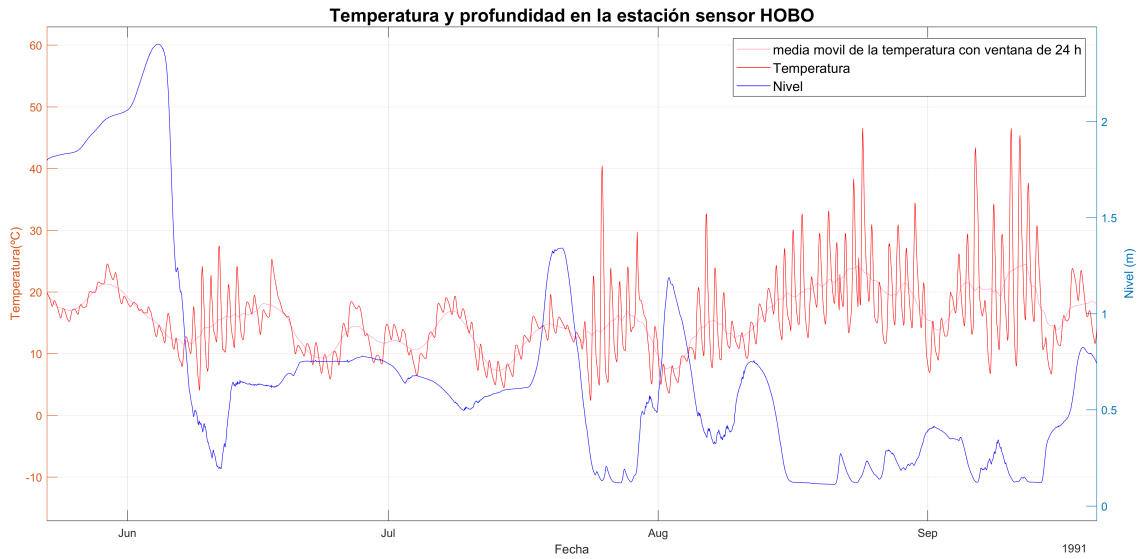


Figura 4.4: Temperatura y profundidad en la estación HOBO para el período Junio 1991 - Octubre 1991 y nivel de apertura 2.2 m

La tabla 4.2 muestra la media y desviación estándar de los datos observados y modelados en las distintas estaciones para los distintos escenarios de apertura suavizados con una media móvil de 24 horas. Los resultados del modelo muestran un comportamiento homogéneo, mientras que los estadísticos de los datos medidos muestran valores menores en las zonas de centro-sur, sur y barra vieja. En todas estaciones se detectó un problema de sobreestimación de la temperatura modelada, lo que llevó a explorar las posibles causas de las diferencias observadas. Las tres razones principales identificadas son: modelo de intercambio atmosférico inadecuado, necesidad de diferenciar coeficiente de calibración según la estación del año, datos utilizados para el ajuste de los coeficientes de calibración insuficientes, y/o medidos en una localización inadecuada (poco profunda).

Tabla 4.2: Media y desviación estándar de datos registrados y modelados de temperatura en las diferentes estaciones

Estación	Medida	Media (std)		
		Escenario	Escenario	Escenario
		1.4 m	1.6 m	2.2 m
E1	19.9(4.5)	22.3(7.2)	22.2(7.1)	22.2(7.1)
E7	19.8(5.1)	21.5(6.9)	21.4(6.8)	21.4(6.7)
NR7	20.2(5.5)	21.7(6.9)	21.5(6.8)	21.5(6.8)
Centro 1	19.3(4.8)	22.1(6.8)	22.0(6.8)	22.0(6.8)
Sur 1	17.4(4.8)	22.1(7.0)	22.0(6.9)	22.0(7.0)
Boya	19.4(2.2)	22.2(7.1)	22.2(7.0)	22.2(7.0)
Boya CTD	18.5(2.2)	22.2(7.1)	22.2(7.1)	22.2(7.1)
Boya Puntual	17.8(3.5)	22.2(7.1)	22.2(7.0)	22.2(7.0)
HOBO	18.2(5.3)	22.2(7.8)	22.2(7.6)	22.2(7.5)
Barra Vieja	17.8(5.5)	22.3(7.4)	22.2(7.4)	22.2(7.3)

La exploración de posibles problemas se realiza de forma conceptual, en función de lo visto en el modelo utilizado, en la calibración de los parámetros del modelo de intercambio con la atmósfera (ver capítulo 2) y los datos medidos en campo. El procedimiento de calibración, los datos disponibles (en particular la localización de los mismos), y la búsqueda de un único valor para el parámetro e_{air} pueden ser una de las causas que contribuyen a las diferencias entre la temperatura modelada y registrada.

De forma exploratoria se realizó una calibración de los parámetros para el período enero-marzo 2016 con los datos medidos en la boya (ver capítulo 3). En este período la laguna permaneció cerrada y los caudales de aporte fueron bajos. Los parámetros se calibraron siguiendo el procedimiento de calibración presentado en el capítulo 2. La tabla 4.3 muestra parte de los resultados del error medio cuadrático entre los datos medidos y modelados en 2016; el mejor resultado se obtuvo para $e_{air} = 0.6$ y $a = 0.001$, con un $RMSE = 1.5^{\circ}\text{C}$, mientras que para los valores obtenidos con la calibración de 2020 el error medio cuadrático de la serie es 5.2°C . La diferencia puede estar dada por la localización del instrumento de medición; la boya se ubicó a una profundidad

de -1 m PRH aproximadamente, mientras que el sensor HOBO se instaló a una profundidad de -0.2 m PRH.

Tabla 4.3: Error medio cuadrático para distintas combinaciones de e_{air} y a comparando con datos medidos de enero a marzo 2016.

RMSE		a				
		0.0007	0.001	0.0015	0,002	0,0025
e_{air}	0,55	1,64				
	0,6		1,49	2,42		
	0,65			1,81		
	0,7			1,64		
	0,75			1,89	1,92	
	0,8	10,67	5,22	2,66	1,87	2,27
	0,85	12,19	6,33	3,45	2,14	2,08
	0,9	13,67	7,43	4,27	2,62	2,11
	0,95	15,12	8,51	5,11	3,2	2,33
	1	15,68	8,94	5,45	3,45	2,46

4.1.4. Comparación de los resultados de salinidad con datos medidos

La tabla 4.4 muestra la media y desviación estándar de los datos observados y modelados en las distintas estaciones y los distintos escenarios de apertura. Si bien la media de la salinidad modelada es un orden menor a la registrada para todos los escenarios estudiados, es posible observar el gradiente de salinidad sur-norte identificado en Rodríguez-Gallego et al. 2014; todas las estaciones presentan coherencia en este sentido excepto Barra Vieja, donde la media de los valores medidos es la más elevada del registro, mientras que los modelados son similares a los del centro de la laguna. Si se comparan los resultados de los diferentes escenarios entre sí se observa que los valores son muy similares en los 3 escenarios; siendo la mayor diferencia menor a 1 PSU para el escenario 2.2 m.

En la figura 4.5 se muestran los resultados de salinidad media para el escenario 1.6 m superpuestos con los valores de salinidad media registrados en las estaciones norte y sur, en las que se registraron un total de 150 valores durante el período que se utilizó en la modelación.

Tabla 4.4: Media y desviación estándar de datos de salinidad registrados y modelados en las diferentes estaciones en PSU

Estación	Medida	Media(std)		
		Escenario	Escenario	Escenario
		1.4 m	1.6 m	2.2 m
E1	11.9(6.5)	3.9(4.3)	3.8(4.4)	3.3(3.8)
E7	4.6(4.8)	0.5(0.5)	0.5(0.6)	0.4(0.5)

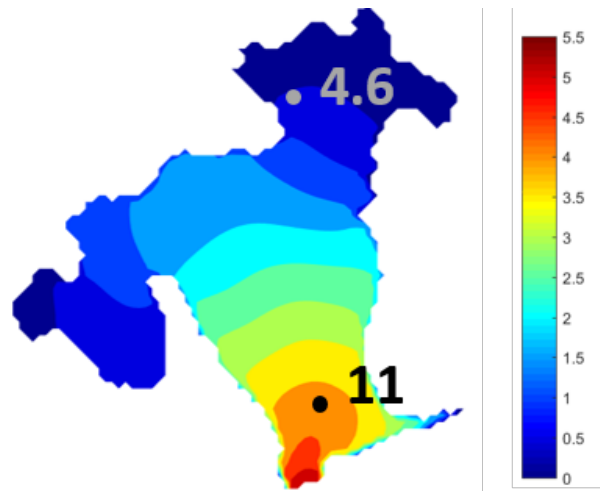


Figura 4.5: Resultados de campo de valores medios de salinidad para el escenario 1.6 m. Se indican los valores medios de datos medidos en las estaciones norte y sur.

En los resultados modelados se observa el mismo gradiente norte sur registrado, sin embargo los valores modelados son considerablemente menores a los medidos en sitio. Se observó además que el gradiente modelado se encuentra suavizado respecto al medido; las diferencias en el modelo entre norte y sur son de 4.5 PSU mientras que las medias de los valores registrados llegan a 6.7 PSU. A continuación se exploran posibles causantes del mismo: (1) efecto del coeficiente de difusión en los resultados de salinidad y (2) efecto de considerar o no que la salinidad en el mar no se ve afectada por la pluma agua dulce. Otra posible causa es que la permanencia de la conexión entre la laguna y el mar, aunque esta no fue explorada. Complementariamente se estudió el comportamiento después de una apertura.

Análisis de sensibilidad al coeficiente de difusión

Debido a la falta de datos de salinidad medidos, el coeficiente de difusión no fue calibrado. En la bibliografía se vio que éste puede tener una gran variación dependiendo de las condiciones de los cuerpos de agua estudiados. Okubo (1971) recopilan valores hallados en diferentes estudios para diversos cuerpos de agua que incluyen mar abierto, bahías y ríos, los mismos van desde $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ a $10.4 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que Fischer 1979 recopila valores de coeficientes de dispersión en distintos cuerpos de agua; los valores reportados van desde $0.12 \text{ m}^2/\text{s}$ a $1500 \text{ m}^2/\text{s}$. En ambos casos se observaron variaciones de hasta un orden dentro del mismo cuerpo de agua. Las simulaciones a largo plazo se realizaron utilizando un coeficiente de $10 \text{ m}^2/\text{s}$. Con el objetivo de evaluar el efecto de este parámetro en los resultados de salinidad se realizaron corridas para el año 1991, para el escenario 1.6 m, variando el coeficiente de difusión. Los valores considerados fueron: $0 \text{ m}^2/\text{s}$ (sin difusión), $1 \text{ m}^2/\text{s}$, $10 \text{ m}^2/\text{s}$ y $1000 \text{ m}^2/\text{s}$. Los resultados se presentan en las figuras 4.6 y 4.7.

La figura 4.6 muestra los resultados de campos medios y de desviación estándar de salinidad para el escenario 1.6 m para distintos coeficientes de difusión. Se observó que a medida que aumenta el coeficiente de difusión el gradiente de salinidad se suaviza. En todos los casos se presenta el mismo gradiente sur-norte, aunque la forma de la distribución varía ligeramente, así como los máximos valores medios alcanzados, que presentan valores desde 8 PSU para un $CD = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$, hasta 15 PSU para $CD = 0 \text{ m}^2/\text{s}$ en la zona de entrada del canal de conexión.

Al comparar las series de salinidad en varios puntos de la laguna, mostradas en la figura 4.7, se observaron grandes diferencias en el comportamiento entre las estaciones. En las estaciones Bolsón y Norte, se observó que al aumentar el coeficiente de difusión aumenta la salinidad máxima alcanzada, aunque sigue siendo considerablemente más baja que los valores registrados. En la estación Centro los resultados son más similares entre sí, y en general, luego de una apertura, se tiene que para el mayor coeficiente de difusión se presentan mayores valores de salinidad, pero luego la situación se invierte, en los períodos que no hay ingreso de agua, teniendo mayores valores de salinidad para menores coeficientes de difusión. Lo mismo ocurre en la estación boya (ubicada en la zona sur de la laguna). En la Barra Vieja, se observa que en los meses de enero a marzo la salinidad se encuentra entre la modelada en la zona centro y sur y

la medida en la zona norte, mientras que después de junio es más similar a la salinidad de la zona centro.

En general se vio que la forma de los campos de salinidad se ve afectada ligeramente por el valor del coeficiente de difusión dentro del rango estudiado, aunque la cobertura espacial de los datos medidos no suficientes como para saber cuál es la distribución que se asemeja más a la real. En cuanto al comportamiento temporal las mayores diferencias se observaron en las zonas más alejadas de la boca del canal, mientras que en la zona Centro y Sur las diferencias no son significativas y prácticamente no modifican los valores de los estadísticos.

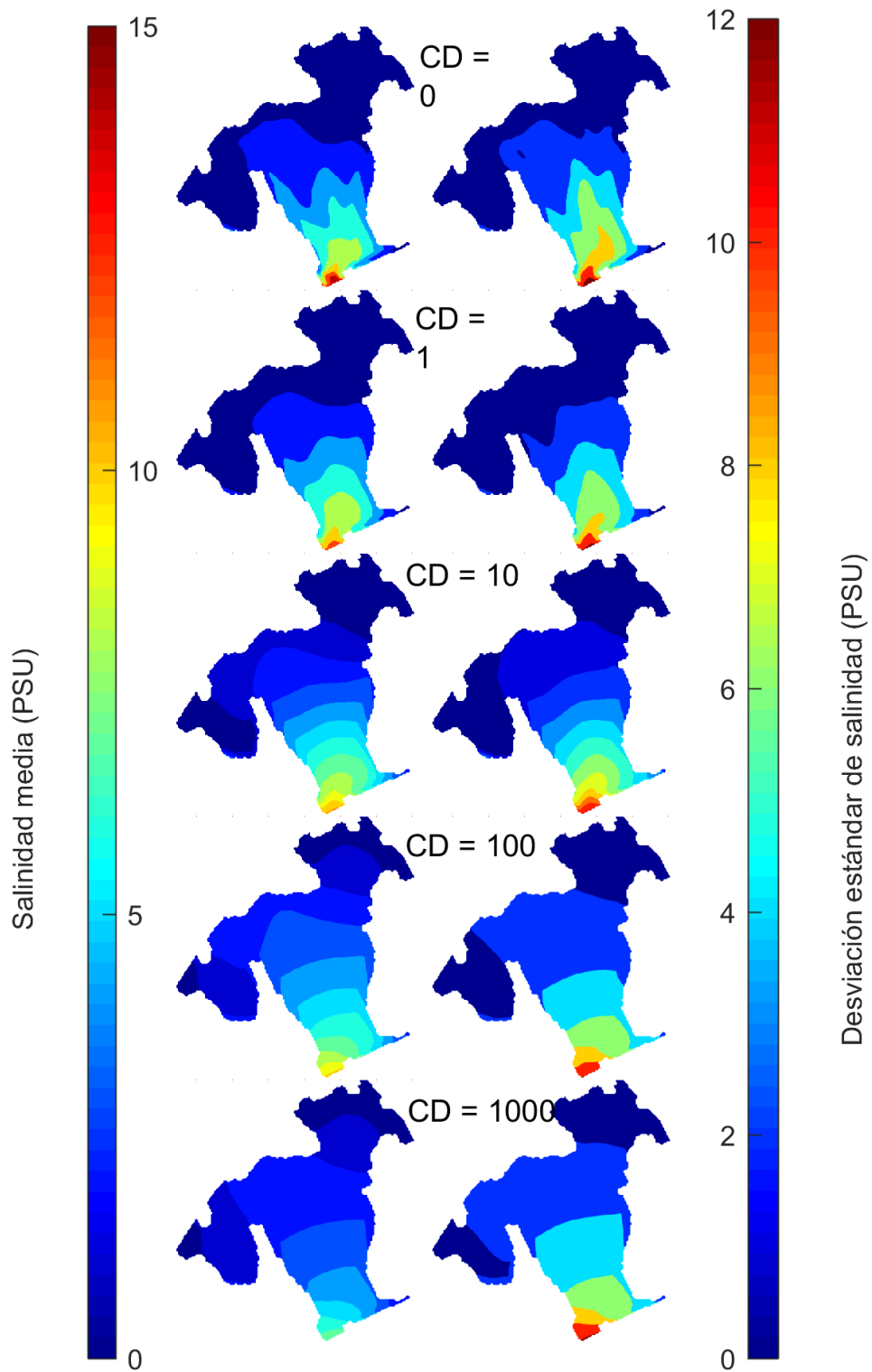


Figura 4.6: Media y desviación estándar de salinidad en la laguna en 1991, escenario 1.6 m para distintos coeficientes de difusión.

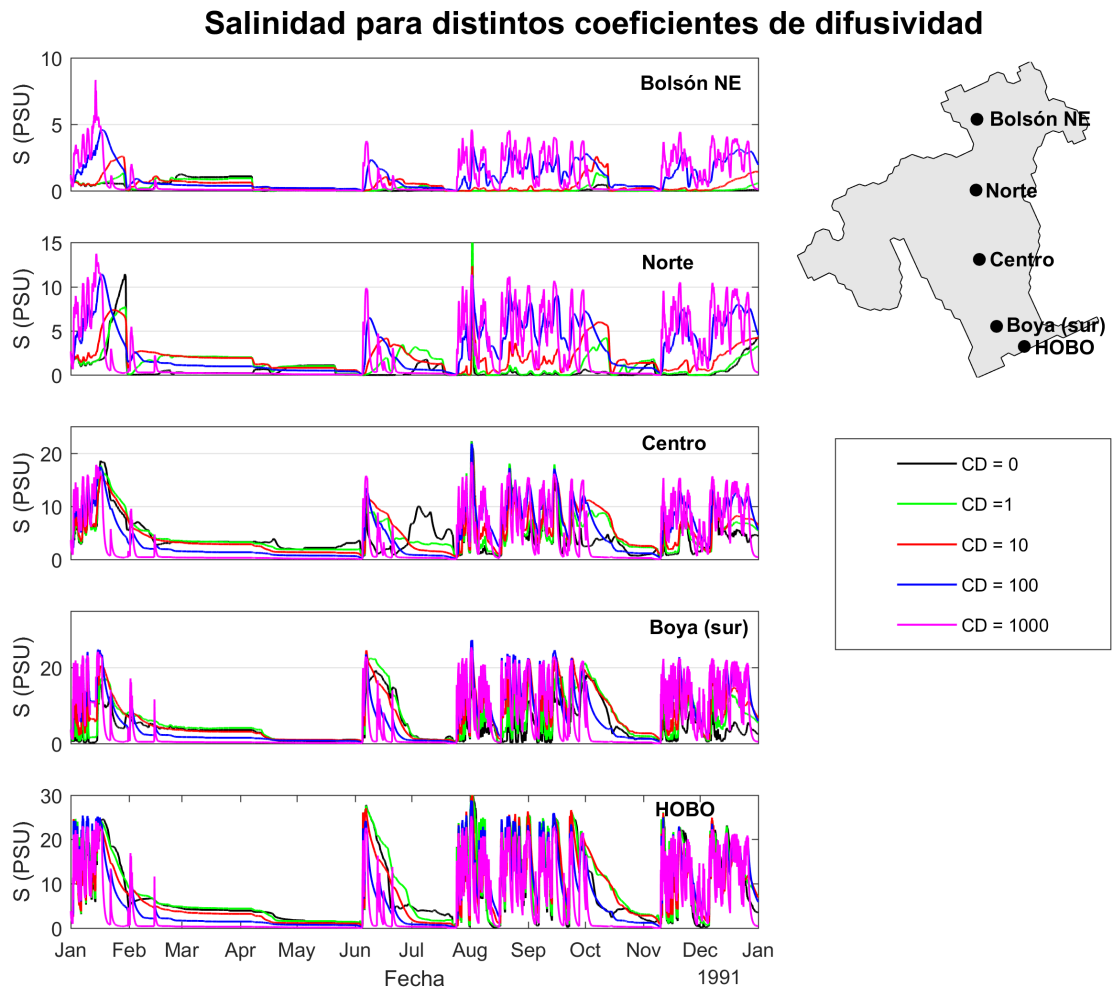


Figura 4.7: Salinidad en la distintas estaciones para los diferentes coeficientes de difusión considerados.

Efecto de la pluma de agua dulce en la salinidad de la laguna

En el modelo, el agua del océano que ingresa a la laguna presenta una salinidad afectada por la pluma de la descarga de agua dulce en el océano. Por ejemplo, si la pluma de descarga presenta una salinidad de 30 PSU, el agua que ingresa a la laguna a través del canal va a tener esa salinidad. Una de las posibilidades que se exploraron fue considerar que la pluma de descarga no afecta la salinidad en el mar, es decir el agua que ingresa desde el océano a través del canal de conexión tiene una salinidad de 35 PSU, correspondiente a aguas abiertas. Se corrieron nuevamente los 13 años de simulación para el escenario 1.6 m, y el coeficiente de difusión $10 \text{ m}^2/\text{s}$. La figura 4.8 muestra los campos medios y de desviación estándar de los resultados con y sin considerar

que la pluma de descarga afecta la salinidad. Se observó un leve aumento en la salinidad; el valor medio en las zonas sur 1 PSU, mientras que en la zona centro aumenta 0.5 PSU y en el norte no hay cambios. La desviación estándar tiene el mismo comportamiento que la media, con un aumento de 1 PSU aproximadamente en la zona desde la boca hasta el centro de la laguna.

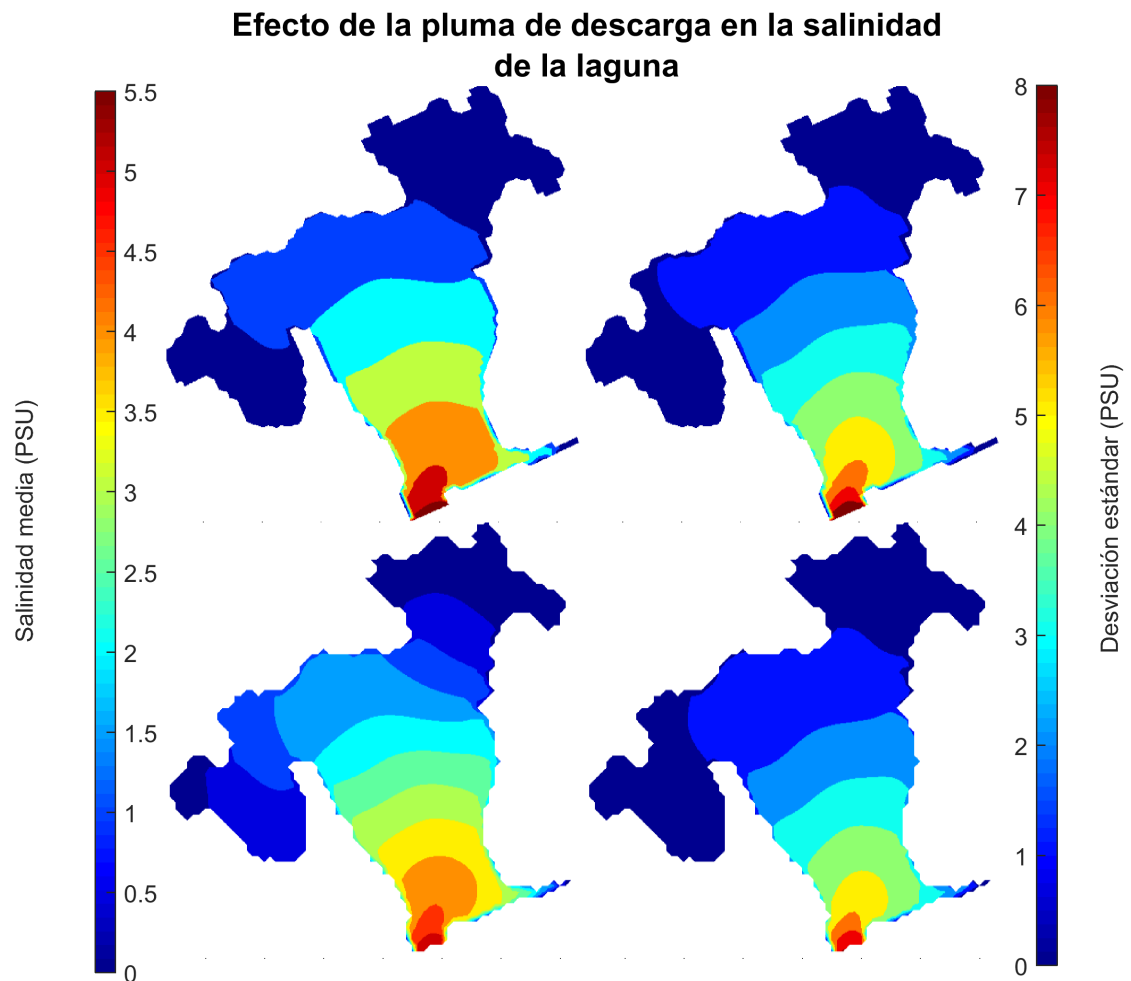


Figura 4.8: Salinidad media (izquierda) y desviación estándar (derecha) en la laguna sin efecto (arriba) y con efecto (abajo) de la pluma de descarga para un escenario de 1.6 m.

Salinidad en la laguna posterior a una apertura

Con el objetivo de evaluar el comportamiento y evolución de los campos de salinidad modelada después de una apertura para los distintos escenarios se compararon; los resultados a las 3 horas que comienza a ingresar agua de mar a la laguna; el momento de mayor salinidad dentro de la misma; y se

identificó el momento en que la salinidad alcanza el mayor efecto espacial. Inicialmente, se corroboró que el comportamiento cualitativo es similar en todas las aperturas artificiales. Se seleccionó a modo de ejemplo la apertura ocurrida entre el 15 de mayo de 1991 y el 03 de junio de 1991 dependiendo del escenario estudiado. Los resultados de salinidad se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11, complementando el análisis con las series de las figuras 4.12 y 4.13.

En la apertura presentada se observó una diferencia en el tiempo desde que se abre la barra hasta que comienza a ingresar agua de mar a la laguna, que es de 110, 77 y 67 horas para los escenarios 1.4 m, 1.6 m y 2.2 m respectivamente. Para el resto de las aperturas, se identificó que, en general, se cumple que a mayor nivel de apertura, menor tiempo hasta de descarga. Este tiempo depende de los ciclos de marea y los caudales afluentes, pero generalmente es entre 2 y 10 días.

La figura 4.9 muestra el campo de salinidad dentro de la laguna 3 horas después de que comienza a ingresar agua desde el océano, la misma para los diferentes escenarios de apertura; se observó que la forma y valores alcanzados difiere en cada apertura, lo que se asocia a la marea y el nivel en la laguna. En la figura 4.12 se presenta un gráfico con los niveles en la laguna y el mar para los distintos escenarios de apertura, identificando el momento de cada apertura, e indicando el tiempo entre la apertura y que el ingreso de agua.

Los campos de salinidad máxima dentro de la laguna para los distintos escenarios se presentan en la figura 4.10. Se observó que los valores más altos de salinidad alcanzan mayor extensión en la apertura a 2.2 m, lo que nuevamente se asocia con el nivel de mar y caudal de los tributarios. En otras aperturas no se distinguieron grandes diferencias en las plumas de salinidad dentro de la laguna para los distintos escenarios.

La figura 4.11 presenta la salinidad en la laguna el día 17 de julio de 1991 para los diferentes escenarios de apertura, que es el que la salinidad presenta una mayor extensión en los tres escenarios. Este momento coincide para los tres casos, lo que se asoció a una marea alta ocurrida entre el 12 y el 16 de julio, sumado a un bajo nivel en la laguna. Como era de esperar la mayor salinidad observada fue en el escenario 2.2 m, dado que la apertura ocurrió mas tarde. En todos los casos el efecto llegó hasta la zona norte de la laguna, pero no a los bolsones.

Para corroborar si se cumple que el tiempo que tarda en ingresar el agua

del océano a la laguna disminuye a medida que aumenta el nivel de apertura, bajo las mismas condiciones de forzantes, se realizó una simulación de corto plazo modificando el nivel inicial de forma que la apertura en los tres escenarios ocurra en el mismo momento. La figura 4.13 muestra los resultados obtenidos, donde se puede observar que este comportamiento ocurre para niveles de mar menores a 1.1 m PRH, que corresponde a un percentil mayor al 99 %.

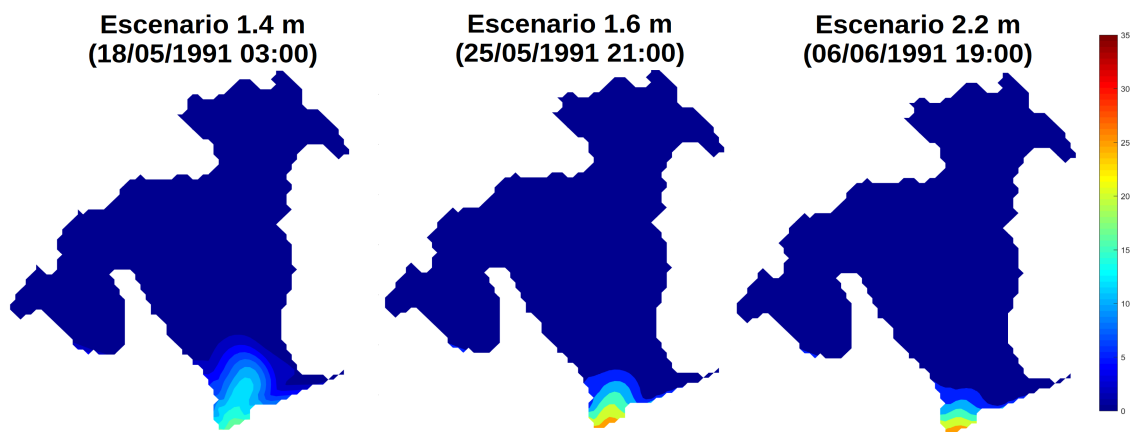


Figura 4.9: Salinidad en la laguna tres horas después de que comienza a ingresar agua de mar en la primera apertura de 1991 para los escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

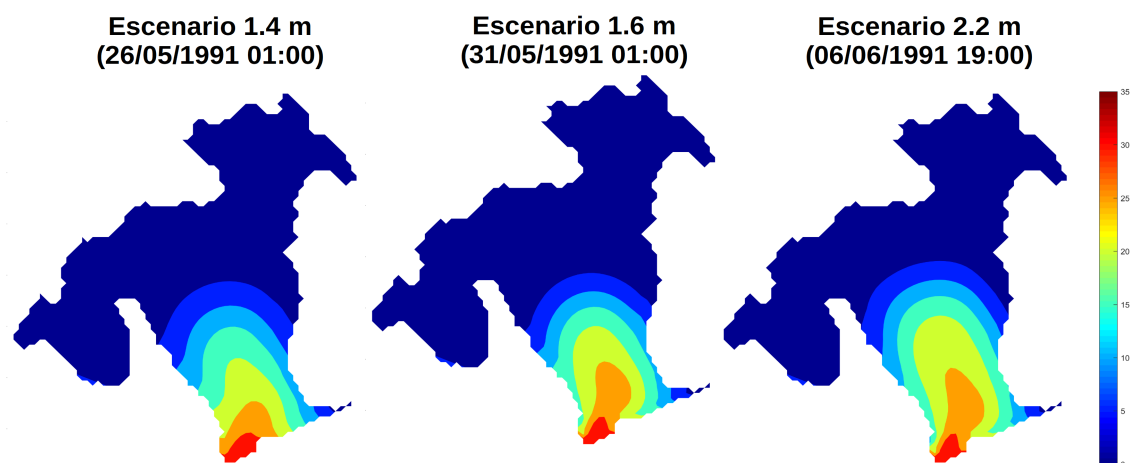


Figura 4.10: Mayor efecto en la salinidad dentro de la laguna para los distintos escenarios: 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

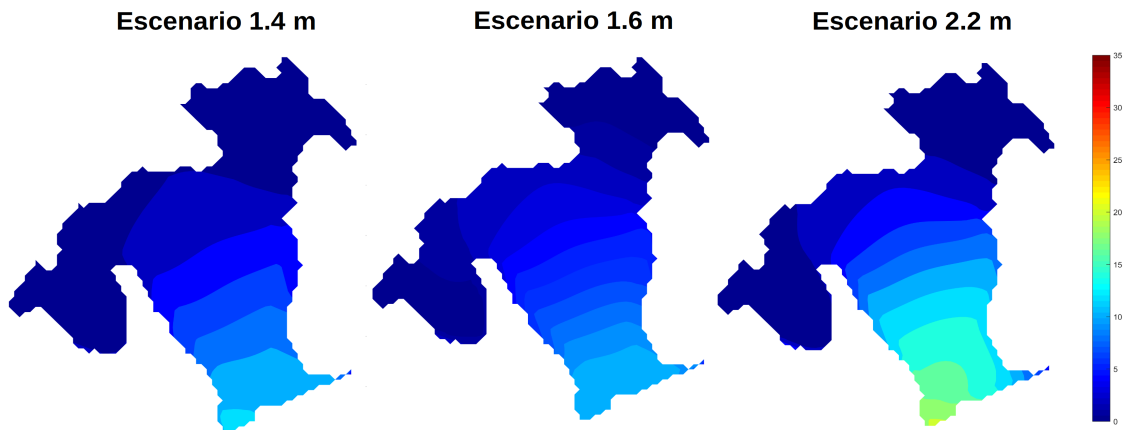


Figura 4.11: Salinidad el 17 de junio de 1991 dentro de la laguna para los distintos escenarios: 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

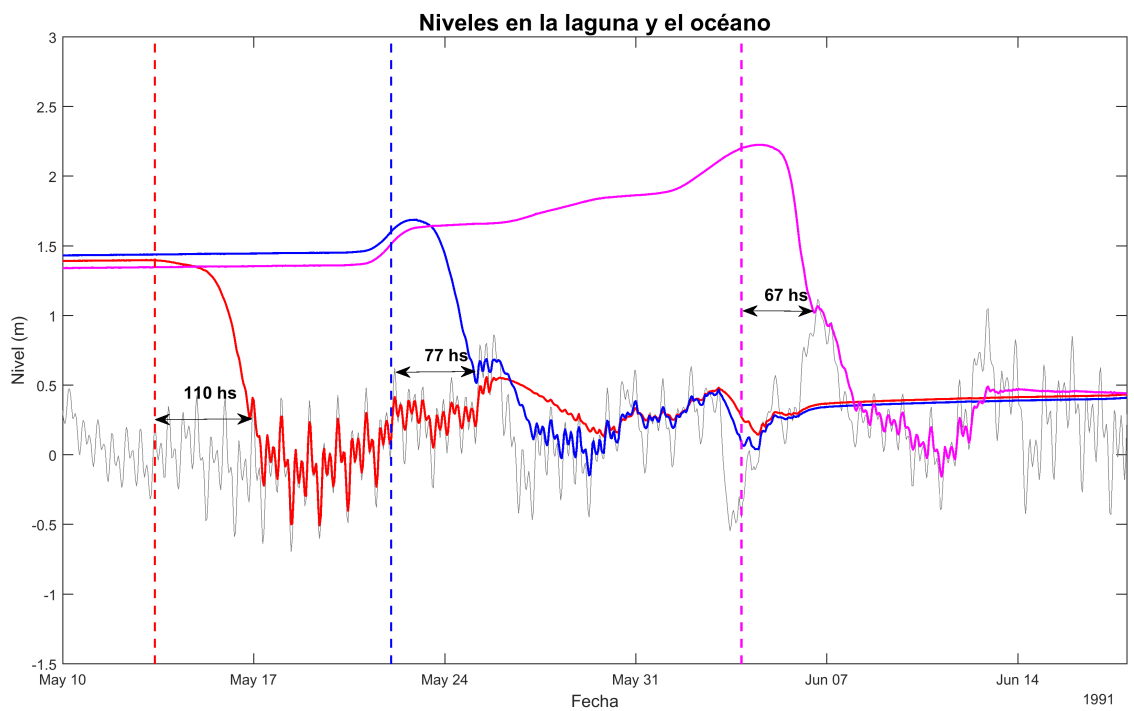


Figura 4.12: Nivel en la laguna y en el océano para los distintos escenarios de apertura; escenario 1.4 m en rojo, escenario 1.6 m en azul y escenario 2.2 m en magenta. Con líneas punteadas se identifican las aperturas ocurridas en cada escenario y se indica el tiempo entre la apertura y el comienzo del ingreso de agua a través del canal.

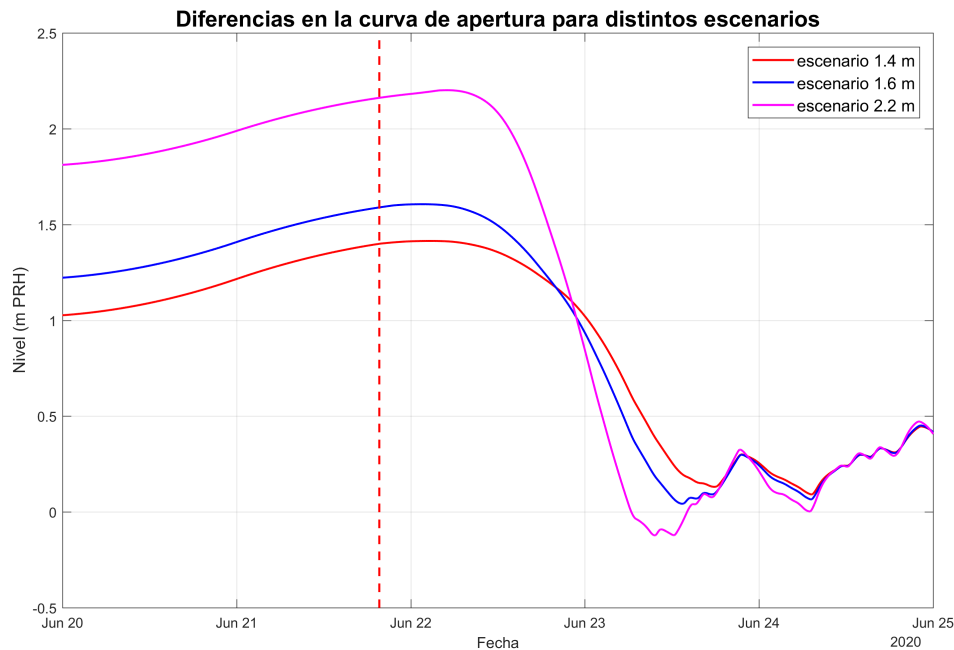


Figura 4.13: Comparación de la disminución del nivel en la laguna después de una apertura con las mismas condiciones forzantes para los tres escenarios estudiado

4.2. Análisis de escenarios de aperturas

En la presente sección se analizan los resultados del canal de conexión, nivel en la laguna, patrones de circulación, temperatura y salinidad, obtenidos a partir de la modelación a largo plazo. En la sección 4.2.1 se exponen los resultados de aperturas por año e intercambio entre la laguna y el océano para los tres escenarios estudiados. Se presentan los ciclos medios anuales de velocidad, nivel en la laguna (frente a la boca del canal), ancho del canal y área del canal. En la sección 4.2.2 se muestra el ciclo medio anual de niveles. En la sección 4.2.3 se presentan los patrones de circulación dentro de la laguna analizados mediante componentes principales y el efecto del viento sobre los mismos. En la sección 4.2.4 presentan los campos medios y de desviación estándar de temperatura y el ciclo medio en dos estaciones para los distintos escenarios y se comentan los resultados del análisis de componentes principales. En la sección 4.2.5 se presentan los campos medios y de desviación estándar de salinidad dentro de la laguna así como ciclos medios de la misma en algunos puntos identificados en el capítulo 2, se realiza un análisis de componentes principales. Para la pluma de descarga se calcularon los campos medios y modos asociados a las primeras

componentes principales.

4.2.1. Canal de conexión

La conexión entre la laguna y el océano se caracterizó por número de aperturas por año, intercambio de flujo entre la laguna y el océano y ciclos medios anuales de las diferentes características geométricas del canal y el flujo que circula a través de él con sus respectivas desviaciones estándar.

La tabla 4.5 muestra el número de aperturas por año para cada escenario, indicando si se trata de aperturas naturales o artificiales. Para contabilizar el número de aperturas, se consideraron aquellas para las cuales el canal permaneció cerrado un tiempo y luego, por un aumento en el nivel de la laguna, la barra se abre, ya sea de forma natural o artificial, es decir, no fueron tenidos en cuenta los sucesivos cierres y aperturas de poca duración que pueden tener lugar debido a los cambios en el nivel de mar. El número de aperturas por año encontrado es congruente con las aperturas registradas (ver capítulo 3). Por otra parte, se vio que en el escenario 1.4 m todas las aperturas son artificiales, mientras que al aumentar el nivel aumenta el número de aperturas naturales. Respecto a los caudales intercambiados y velocidades máximas estimadas, se observó que las velocidades y caudales salientes son mayores a los entrantes. Por otra parte, una vez que se abre el canal de conexión, es usual que el intercambio de caudal sea intermitente, debido al efecto del nivel de mar y el transporte de sedimento litoral, este comportamiento fue observado también en campo.

Tabla 4.5: Número de aperturas por año en los escenarios estudiados por elevación del nivel en la laguna

Escenario	Aperturas por año	Naturales	Artificiales
1.4 m	2.3	100 %	0 %
1.6 m	2.1	91 %	9 %
2.2 m	1.5	88 %	12 %

Intercambio de flujo entre la laguna y el océano

En la tabla ?? se muestran los caudales entrantes y salientes para cada uno de los escenarios estudiados para los diez años de simulación. Se observó que a

medida que aumenta el nivel de apertura disminuye el caudal intercambiado, tanto desde como hacia la laguna, sin embargo estas diferencias no son grandes. Como era de esperar, los resultados muestran que el flujo saliente es mayor al flujo entrante, con una relación aproximada de 3 a 1. En cuanto a las velocidad, se observó que en la salida de flujo las velocidades alcanzadas son mayores que en ingreso, esto se asocia con una mayor diferencia entre los niveles del océano y el mar. El caudal bruto disminuye a medida que aumenta el nivel de apertura, siendo la diferencia entre los escenarios máximo y mínimo menor a un 8 %.

Tabla 4.6: Caudal intercambiado entre la laguna y el océano para los distintos escenarios de apertura

Escenario	Q_{in} (Mm ³ /año)	$V_{in, max}$ (m/s)	Q_{out} (Mm ³ /año)	$V_{out, max}$ (m/s)
1.4 m	0.59	2.41	1.70	3.40
1.6 m	0.58	2.58	1.66	3.55
2.2 m	0.52	2.85	1.61	4.31

Geometría del canal

La tabla 4.7 muestra el valor medio, máximo y desviación estándar del ancho, tirante y área cuando el canal está abierto. Se observó que los valores de ancho medio y máximo se incrementan a medida que aumenta el nivel de apertura, al igual que la desviación estándar. En el caso del ancho del canal, los valores medios obtenidos mediante la simulación numérica van desde 70 m a 81 m, con diferencias de 7 m entre los escenarios 1.4 m y 1.6 m y de 4 m entre los escenarios 1.6 m y 2.2 m. Sus máximos varían entre 220 m y 271 m; para los escenarios 1.4 m y 1.6 m es presenta un cambio mínimo (1 m), mientras que para el escenario de apertura a 2.2 m aumenta 50 m. Los anchos máximos medidos en campo rondan los 150 m (ver anexo 1), pero no se tiene certeza de que sea efectivamente el máximo, ya que no se le dio seguimiento continuo a ninguna apertura durante más de 36 horas. En cuanto la profundidad del canal, los valores medios y máximos determinados mediante la simulación numérica van desde 6.7 m a 8.2 m; si bien no se tienen mediciones de las profundidades máximas en el momento posterior a la apertura, las mediciones realizadas dos semanas después muestran profundidades de 2 m a 3 m en el canal. En base a lo observado durante la apertura se estima que estos valores se ven ampliamente superados en los primeros días después de la apertura (ver anexo 1 de Teixeira,

2019), por lo que los resultados obtenidos para profundidades se consideran razonables.

La figura 4.14 corresponde a los ciclos medios anuales del ancho y la velocidad en el canal y con su respectiva franja de desviación estándar, así como curvas de probabilidad acumulada para estas variables. En el escenario 2.2 m se observó un ciclo marcado, mientras que en los escenarios 1.4 m y 1.6 m no está muy definido. Se observó que la media del ancho del canal aumenta en el mes de abril y los meses de invierno (julio-agosto-setiembre). En cuanto a la desviación estándar se observaron máximos mayores para el escenario 2.2 m. Por otra parte, para los niveles más bajos la desviación estándar es similar en todo el año, mientras que para el nivel más alto se observa un ciclo similar al de los valores medios. Las curvas de probabilidad acumulada muestran que para anchos menores a 125 m se tiene una probabilidad mayor de encontrar anchos más grandes a medida que disminuye el nivel de apertura, mientras que para anchos mayores a 125 m esta tendencia se revierte. Esto se asocia al número de aperturas que ocurren en cada escenario, es decir, como el escenario 1.4 m presenta un mayor número de aperturas y un mayor tiempo conectado con el mar, es más probable encontrar canales de poco ancho en este escenario.

En cuanto a la velocidad, los valores medios oscilan entre -0.4 m/s y 0.05 m/s, con desviaciones estándar entre -0.8 m/s y 0.6 m/s. En el gráfico se observa que durante marzo y abril los flujos son bajos para todos los escenarios de apertura considerados y que los máximos de media y desviación estándar se dan para los meses de mayo a setiembre. La distribución de probabilidad muestra que la mayor parte del tiempo el flujo es cercano a cero (el canal se encuentra cerrado en términos de intercambio de flujo entre la laguna y el océano) y que los valores negativos presentan una mayor probabilidad que los positivos, lo que era de esperar ya que el flujo neto es hacia el mar.

Tabla 4.7: Valor medio (μ), desviación estándar (σ) y máximo para ancho (B), profundidad (h) y área (A) del canal considerando solo los momentos en que el canal está abierto para los tres escenarios estudiados

Variable	Escenario		
	1.4 m	1.6 m	2.2 m
μ_B (m)	70	77	81
σ_B (m)	41	43	55
B_{max} (m)	220	221	271
μ_h (m)	2.1	2.3	2.5
σ_h (m)	1.3	1.3	1.7
h_{max} (m)	6.7	6.7	8.2
μ_A (m ²)	202	238	293
σ_A (m ²)	207	241	359
A_{max} (m ²)	1463	1480	2226

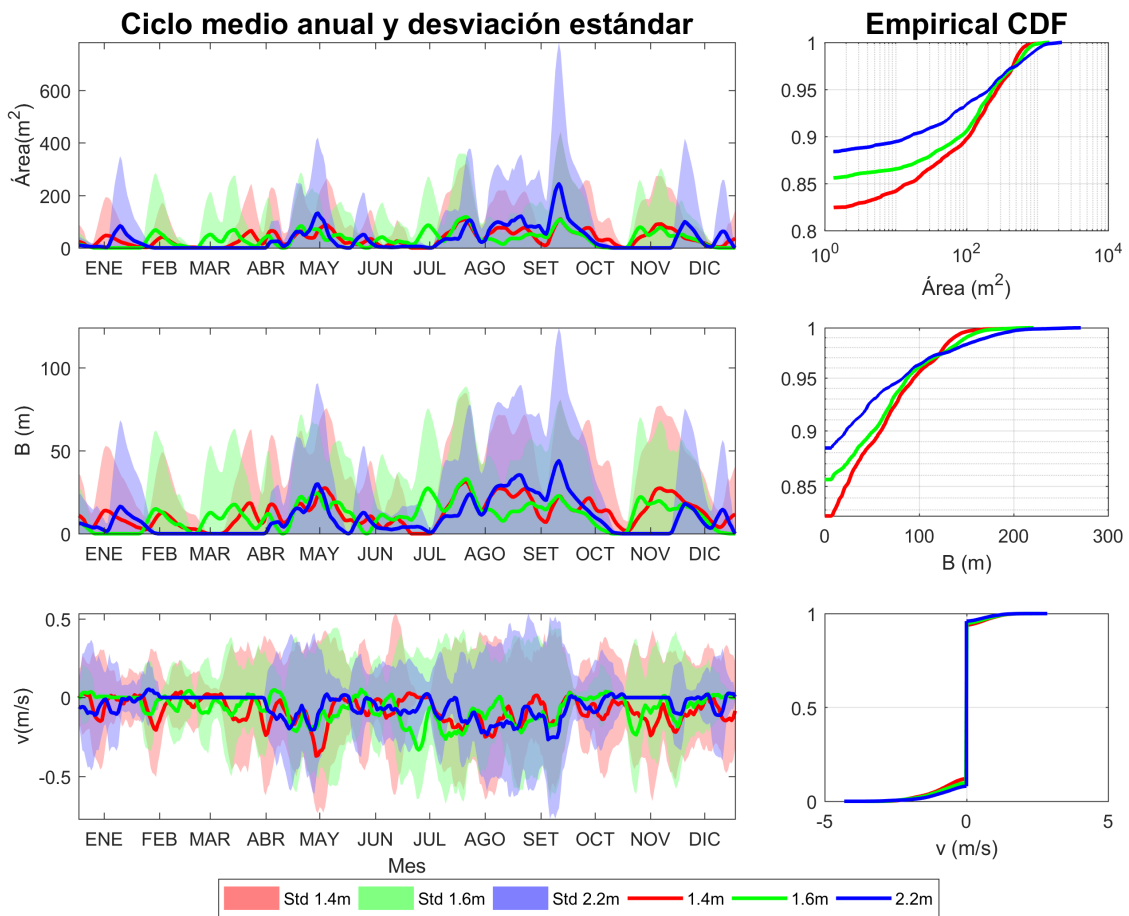


Figura 4.14: Ciclo medio de área (arriba izquierda), ancho (centro izquierda) y velocidad (abajo izquierda) en el canal y franja del ancho de una desviación estándar. A la derecha se presentan las curvas de probabilidad acumulada de área (arriba), ancho (medio) y velocidad (abajo). Para los tres escenarios de apertura estudiados: 1.4 m (rojo), 1.6 m (verde) y 2.2 m (azul).

4.2.2. Nivel en la laguna

El nivel es homogéneo en toda la laguna, presentando variaciones del orden del cm. Los campos medios y de desviación estándar presentan valores uniformes dentro de la laguna por lo que no se presentan sus resultados.

Ciclo medio anual

La figura 4.15 presenta el ciclo medio anual y la función de probabilidad acumulada para valores modelados en la estación *HOBO* en los tres escenarios de apertura estudiados. Para esta variable se observó un ciclo más marcado

para el escenario 2.2 m, que para los escenarios 1.4 m y 1.6 m, presentando mayores niveles en los meses más fríos. Respecto a la desviación estándar se vio que la misma aumenta a medida que aumenta el nivel de apertura. Como era de esperar la probabilidad de obtener mayores niveles en la laguna aumenta a medida que aumenta el nivel de apertura.

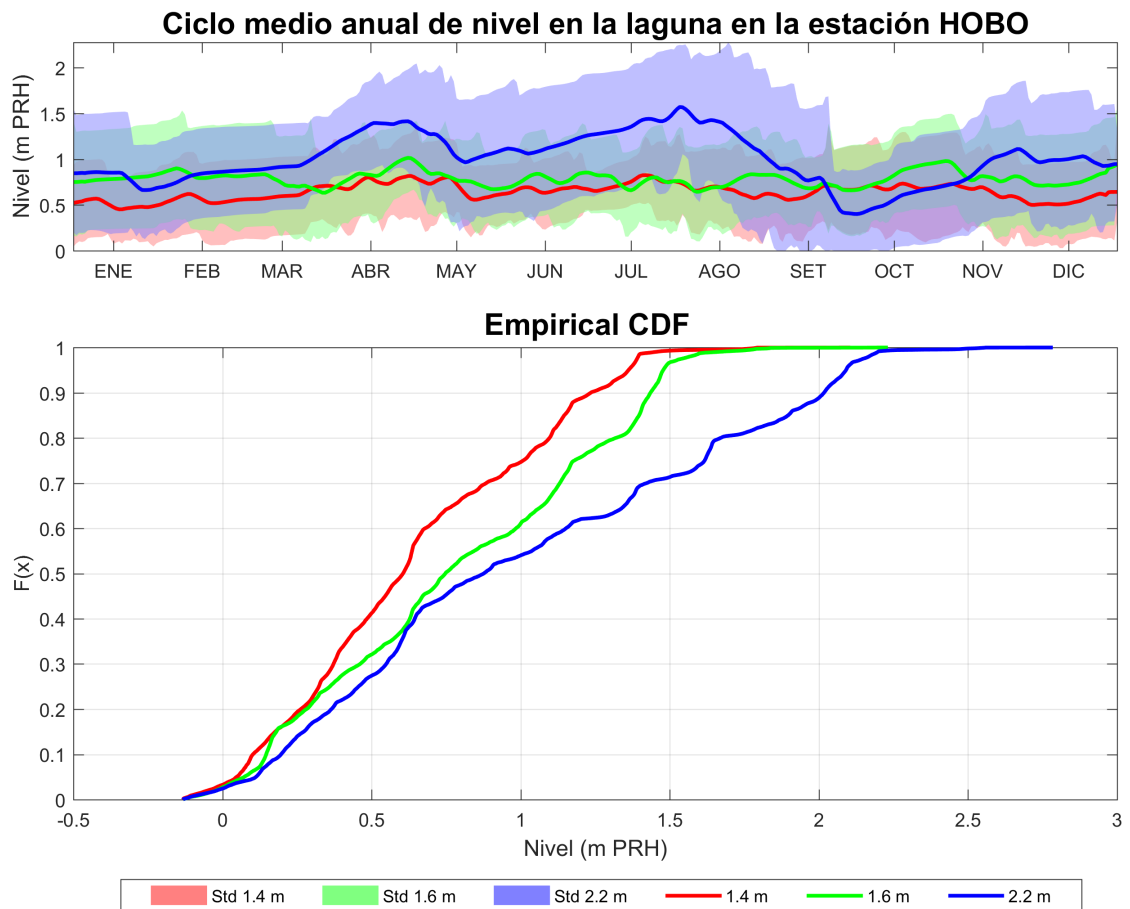


Figura 4.15: Ciclo medio anual con franja del ancho de la desviación estándar (arriba) y función de probabilidad acumulada (abajo) para el nivel de agua modelado en la estación *HOBO*

4.2.3. Patrones de circulación

Los patrones de circulación en la laguna fueron analizado mediante componentes principales; los vectores propios asociados a el primer y segundo componente principal se representan gráficamente para identificar los campos que explican la mayor parte de la varianza.

Las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 muestran el modo asociado al primer, segundo y tercer componente principal de velocidades respectivamente, para los tres escenarios estudiados. Por otra parte en la tabla 4.8 se muestra la correlación para cada escenario para las tres primeras componentes principales y 9 forzantes.

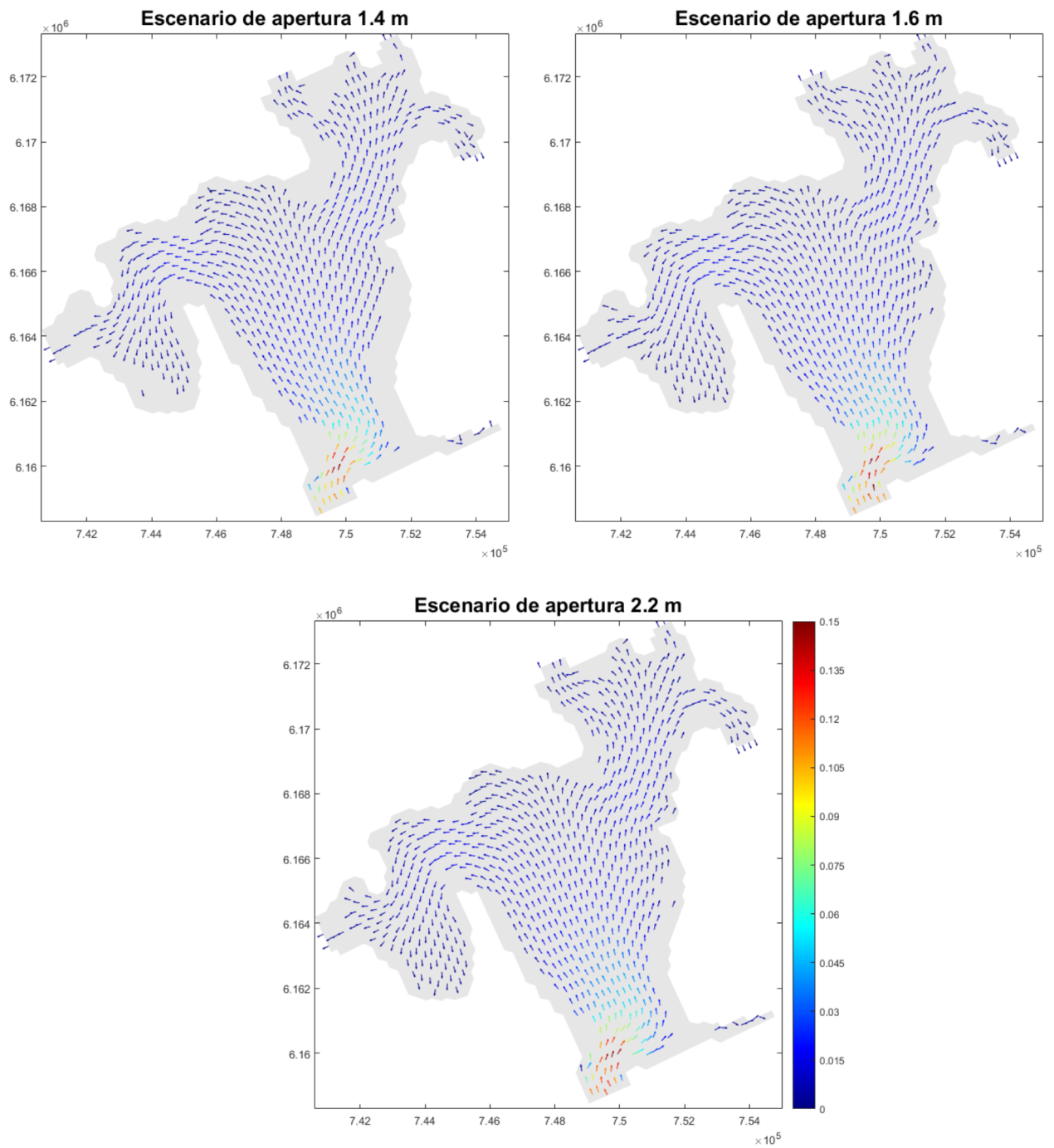


Figura 4.16: Modo asociado al primer componente principal de velocidades, para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

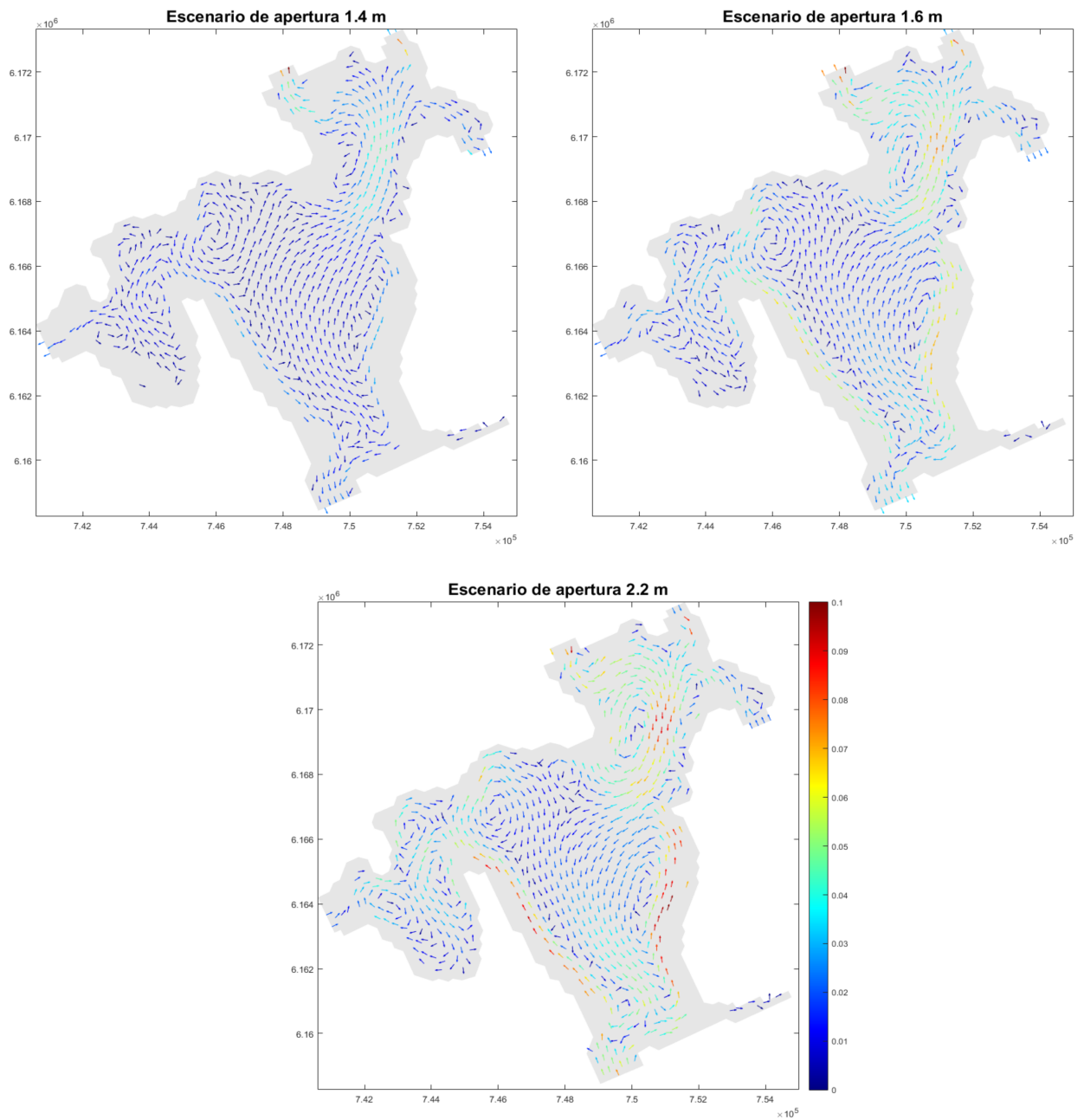


Figura 4.17: Modo asociado al segundo componente principal de velocidades para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

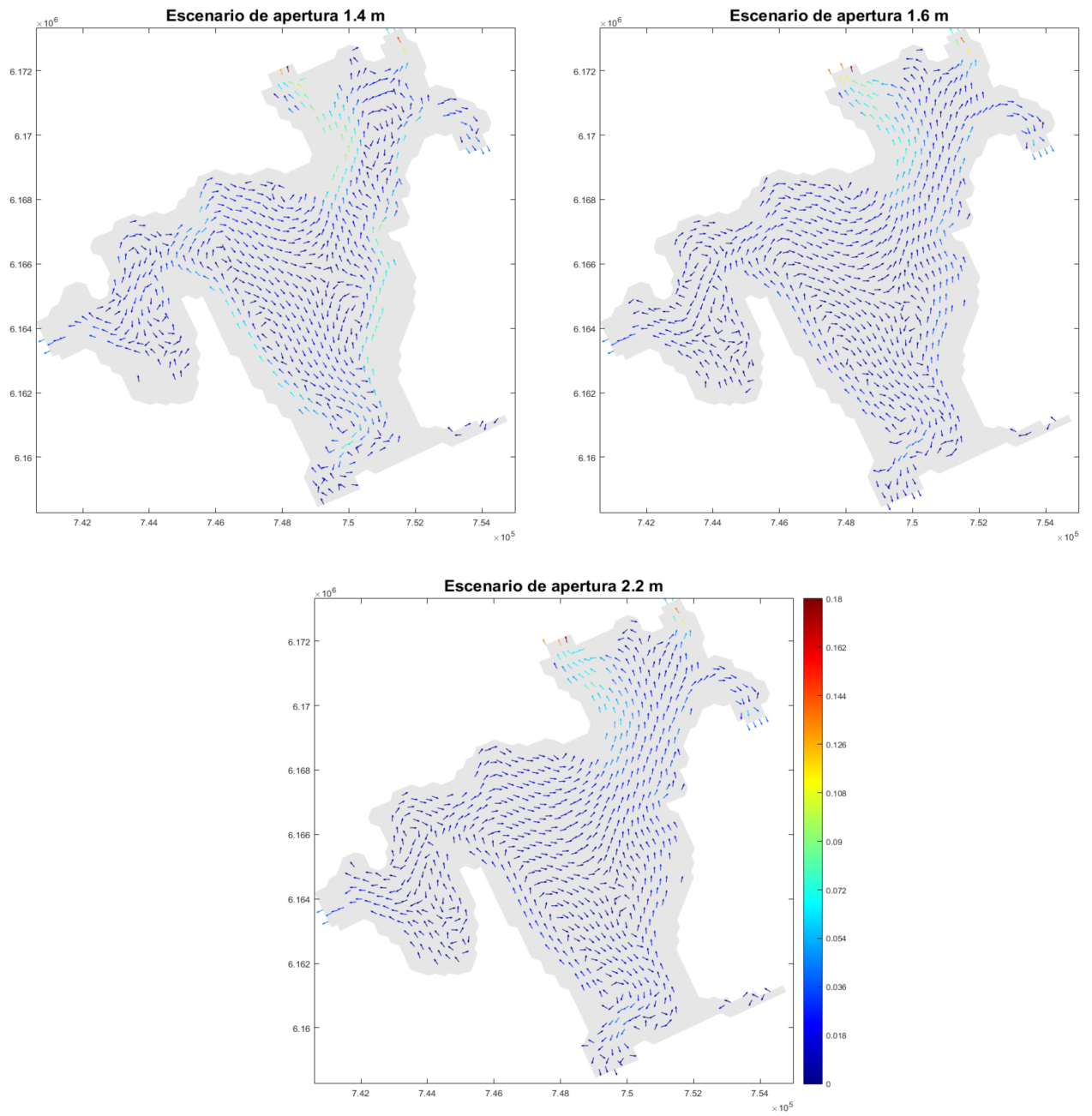


Figura 4.18: Modo asociado al tercer componente principal de velocidades para escenarios de apertura a 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

Tabla 4.8: Correlación entre componentes principales y los forzantes para los tres primeros componentes para cada escenario. U es la componente del viento según x , V la componente del viento según y , Q_{in} el caudal que ingresa a través de los arroyos, P la precipitación, η_O el nivel en el océano frente al canal de conexión, η_L el nivel en la laguna frente al canal de conexión, Q_{ch} el caudal que circula a través del canal, V_{ch} la velocidad en el canal y Zf_{ch} la cota de fondo del canal. Con - se indica la correlación no es estadísticamente significativa.

			U	V	Q_{in}	P	η_O	η_L	Q_{ch}	v_{ch}	Zf_{ch}
Escenario	1.4	PC1	0.08	0.06	-0.11	-0.02	0.19	0.14	0.89	0.58	0.31
		PC2	-0.08	-	-0.59	-0.23	-0.01	0.50	-0.11	-0.05	0.33
		PC3	-0.09	-0.11	-0.65	-0.21	-0.09	-0.50	0.07	0.12	-0.13
	1.6	PC1	0.09	0.04	-0.10	-0.01	0.17	0.13	0.89	0.59	0.32
		PC2	-0.05	0.02	-0.33	-0.13	-	0.67	-0.12	-0.06	0.41
		PC3	-0.10	-0.07	-0.79	-0.28	-0.07	-0.28	-	0.09	-0.03
	2.2	PC1	0.03	0.04	-0.16	-0.04	0.14	0.14	0.84	0.53	0.35
		PC2	0.03	-0.11	0.17	0.09	-0.07	-0.68	0.16	0.04	-0.35
		PC3	-0.10	-0.09	-0.81	-0.28	-0.08	-0.13	0.02	0.06	0.04

El modo asociado al primer componente principal representa el 79.8%, 79.4% y 79.3% de la varianza para los escenarios 1.4 m, 1.6 m y 2.2 m respectivamente. Este modo parece estar asociado a la entrada y salida de agua a través del canal de conexión entre la laguna y el océano. Las mayores velocidades ocurren en la zona cercana a la boca y se reducen hacia en norte de la laguna. Este modo se correlaciona fuertemente con el caudal en el canal de conexión (ver tabla 4.8).

El modo asociado al segundo componente principal representa el 6.5% de la varianza total para el escenario 1.4 m, el 7.3% para el escenario 1.6 m y el 7% para el escenario 2.2 m. En este modo se observaron patrones de circulación con velocidades mayores en los bordes de la laguna y en la entrada de los arroyos para los tres escenarios. Las velocidades máximas alcanzadas aumentan a medida que aumenta el nivel de apertura. Se correlaciona principalmente con el nivel en la laguna, y representa un 7% de la varianza aproximadamente. La correlación aumenta a medida que aumenta el nivel de apertura, se observa además un cambio de signo en el escenario 2.2 m. Por otra parte, se observa una disminución en la correlación con el caudal de entrada de los arroyos, siendo la mayor para el escenario 1.4 m.

El tercer componente principal explica el 5% de la varianza para los escenarios de apertura 1.4 m y 1.6 m y el 4.2% para el escenario 2.2 m. En este

modo se observaron mayores velocidades en la zona de ingreso de agua desde los arroyos con una disminución en el módulo de las velocidades a medida que aumenta el nivel de apertura. En el caso del escenario 1.4 m, se identificaron velocidades mayores en los bordes de la laguna que en los otros escenarios estudiados. El modo asociado al tercer componente principal se correlaciona fuertemente con el caudal que ingresa a la laguna desde los arroyos, aumentando a medida que aumenta el nivel de apertura artificial. El escenario 1.4 m este escenario es el que presenta una menor correlación con el caudal afluente de los tres estudiados, y aparece también una correlación de 0.5 con el nivel en la laguna, mientras que en los otros escenarios la correlación disminuye a 0.13, lo que podría explicar la diferencia en los patrones de circulación.

Efecto del viento

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los patrones de circulación en la laguna bajo diferentes efectos de viento, caudales y nivel inicial. Mientras que en la figura 4.21 se muestran los resultados de los patrones de circulación para la barra cerrada con un nivel de agua alto.

El viento extremo (14 m/s, que corresponde a un percentil del 95 %) en ambas direcciones (NE y SW) tiene un efecto en el módulo de la velocidad y patrones de circulación. Una dirección de viento del noreste (45°) provoca que las velocidades dentro de la laguna sean más del doble que en una condición sin viento, en particular en la zona de la desembocadura del canal y los bordes del cuerpo central de la laguna. Mientras que para la condición de viento suroeste (240°) el aumento en el módulo de la velocidad es considerablemente menor. En ambos casos se detectó que la celda de circulación que se forma en el centro de la laguna en condiciones de viento extremo no se observa en estado de calma.

El efecto del caudal de aporte fluvial, con viento del noreste, se reflejó únicamente en el módulo de la velocidad en la zona cercana al canal de conexión entre la laguna y el océano, en particular en el caso que el nivel inicial es bajo. Cuando el viento extremo tiene una dirección sudoeste las mayores velocidades se dan para el caso en el que el caudal que ingresa es alto y el nivel inicial en la laguna también.

Al comparar los resultados para una misma condición de caudal se observó que en caso de caudales altos las velocidades son mayores para un nivel inicial bajo, mientras que en el caso de caudales bajos son mayores para un nivel

inicial alto. Los caudales altos elevan rápidamente el nivel de la laguna, lo que lleva a pensar que podría haber un nivel intermedio entre los niveles alto y bajo considerados que maximice las velocidades dentro de la laguna. Fue posible ver que, para un viento noroeste, con un caudal alto, las velocidades son ligeramente mayores que para uno bajo, independientemente de la condición inicial de nivel. En la condición sin viento el módulo de la velocidad es muy similar en todos los casos, siendo levemente mayor cuando el nivel inicial y el caudal fluvial son altos.

Al comparar los patrones de circulación en el caso de la barra cerrada (figura 4.21) se observa que, con condiciones de viento extremas, las zonas de mayor velocidad son similares. Sin embargo, la dirección de circulación en algunas de las celdas cambia y en los bordes norte y este de la laguna. En el caso sin viento, los patrones están asociados a las descargas de los cursos de agua, teniendo una zona de mayores velocidades en torno a la entrada de los mismos, mientras que en el cuerpo de la laguna las velocidades son despreciables.

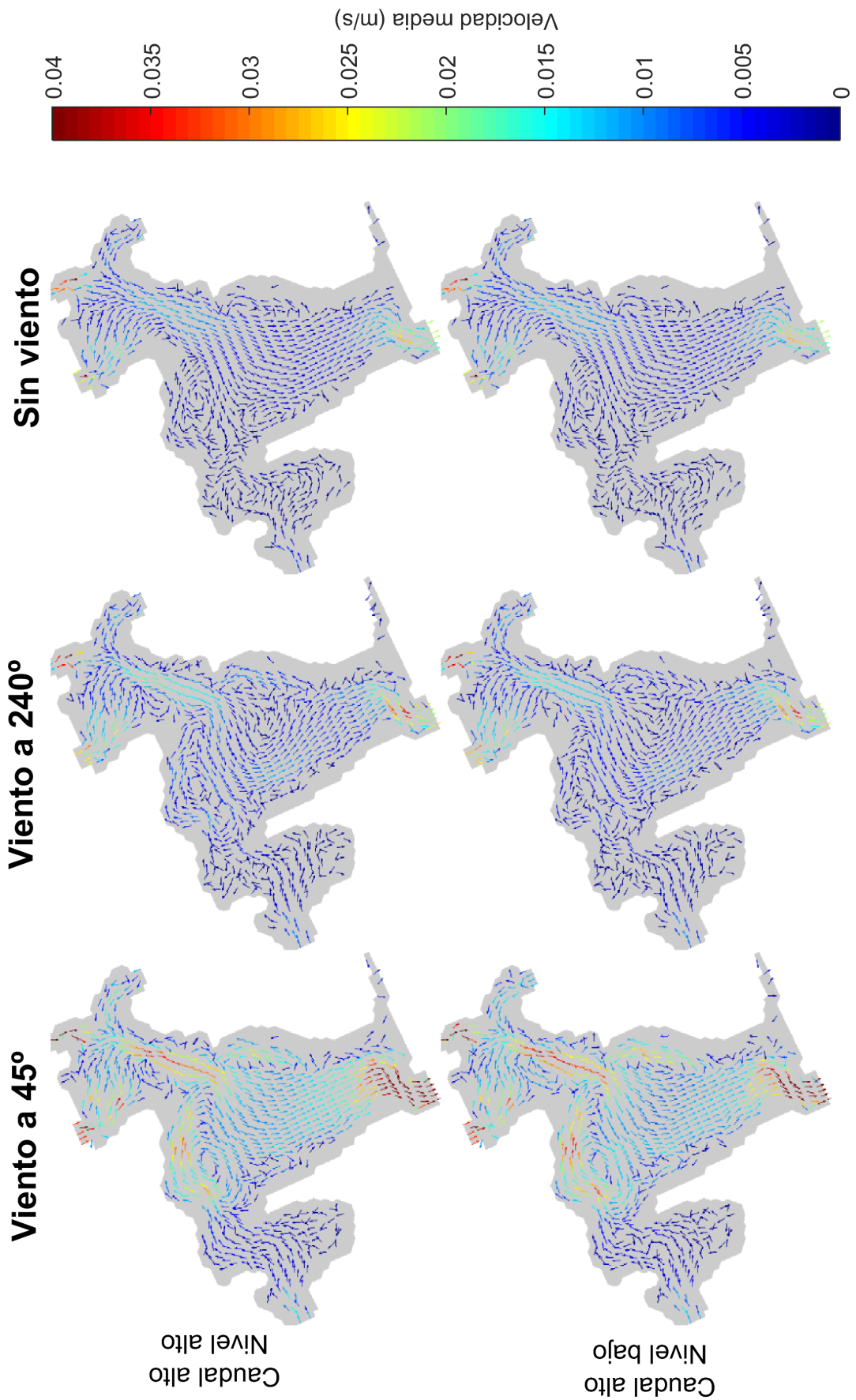


Figura 4.19: Circulación dentro de la laguna para caudales altos

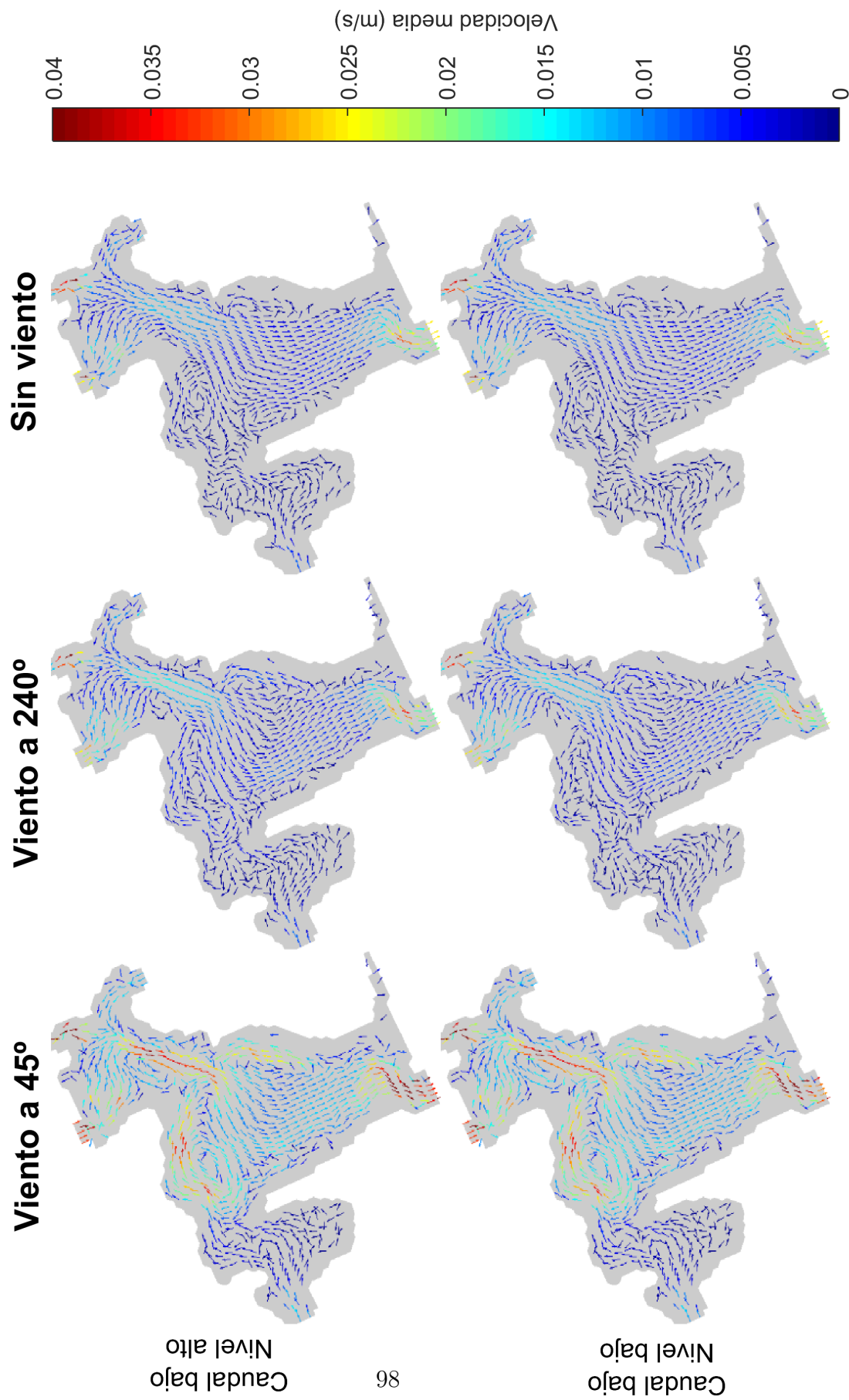


Figura 4.20: Circulación dentro de la laguna para caudales bajos

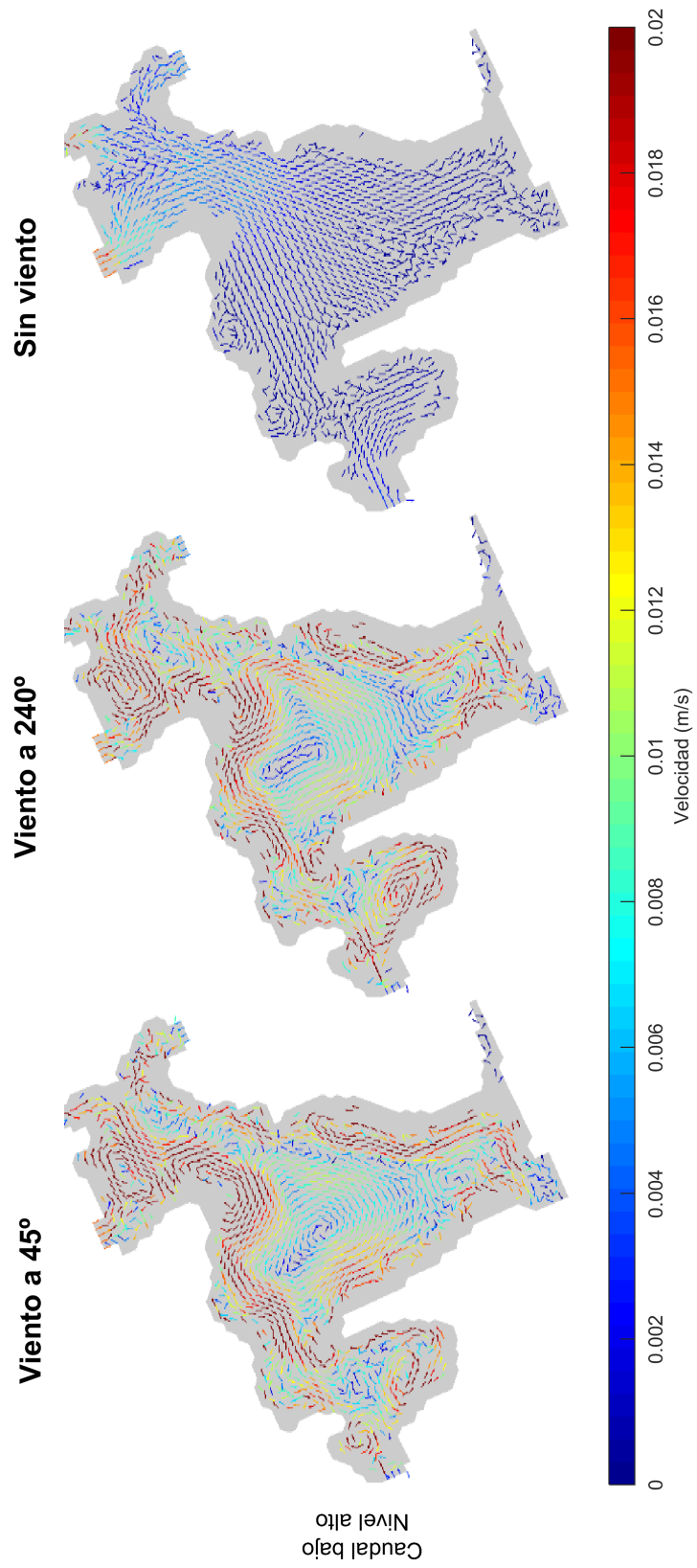


Figura 4.21: Circulación dentro de la laguna con la barra cerrada

4.2.4. Temperatura

Los datos de temperatura se analizaron mediante; campos medios y de desviación estándar en la laguna, ciclo medio anual en varios puntos y PCA de los resultados (en la sección 4.2.5 se presenta la metodología de análisis). El análisis de componentes principales mostró que el modo asociado al primer componente principal no aporta más información que la obtenida a partir de los campos medios y de desviación estándar.

Campos medios y ciclo medio anual

La figura 4.22 muestra los campos medios y desviación estándar de la temperatura dentro de la laguna para los tres escenarios de apertura estudiados. La temperatura media del agua en la laguna es casi uniforme para todos los escenarios, excepto por la zona cercana a la descarga de los arroyos y en la entrada del canal de conexión. La zona de la laguna afectada por la descarga de los arroyos aumenta a medida que aumenta el nivel de apertura, mientras que el área donde la temperatura se ve afectada por la entrada de agua oceánica es similar en todos los casos. Respecto a la desviación estándar, se obtuvieron menores valores en las zonas de ingreso de agua de los arroyos y en la zona central de la laguna, donde las isotermas siguen las curvas batimétricas. A medida que aumenta el nivel se agranda la zona con menor desviación estándar en el centro de la laguna. Por otra parte, la desviación estándar de la temperatura es significativamente mayor en los bordes de la laguna donde la profundidad es reducida, aunque el área que ocupan es despreciable respecto al área total de la laguna.

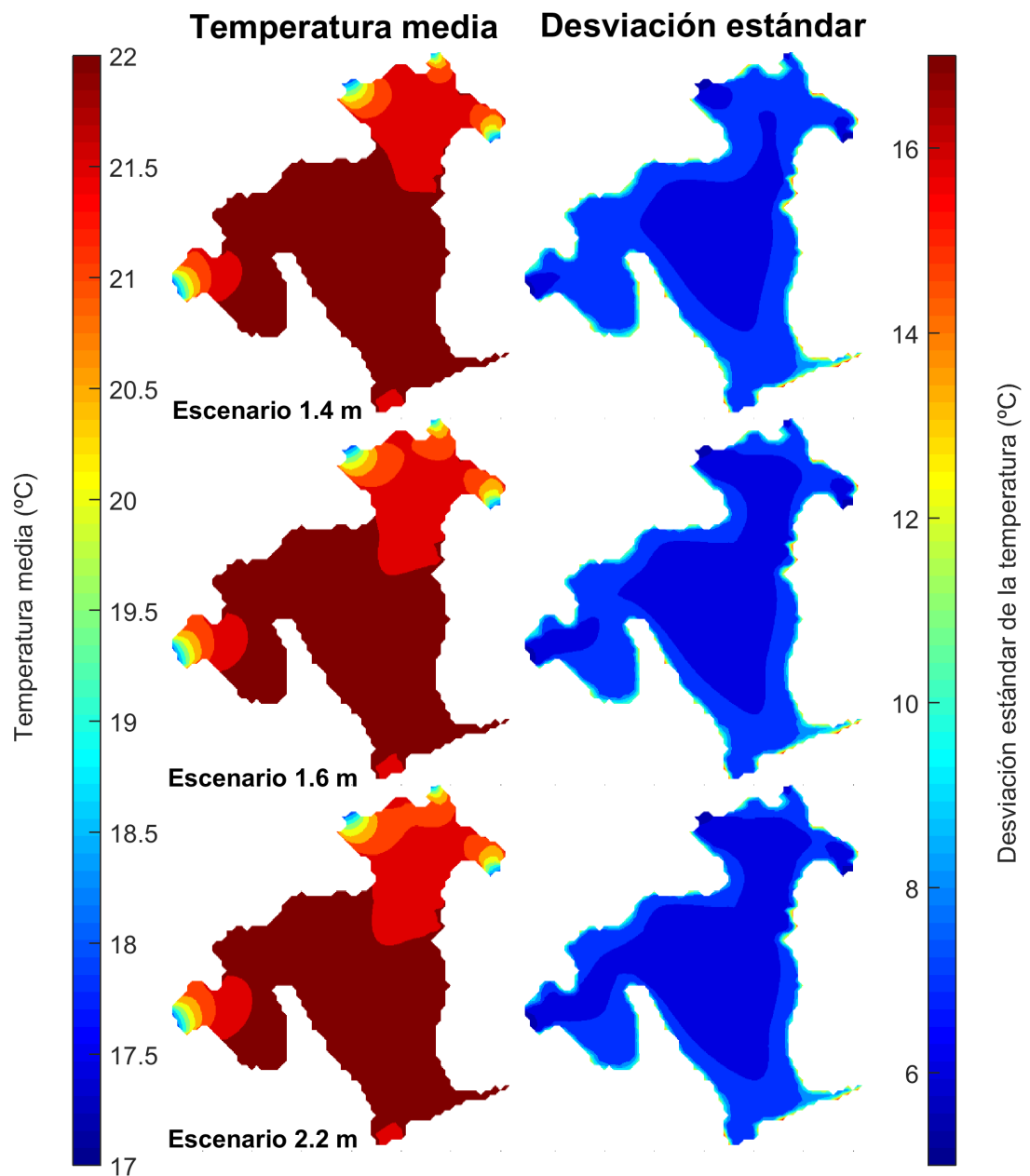


Figura 4.22: Campos medios de temperatura y desviación estándar en la laguna para los tres escenarios de apertura

La figura 4.23 muestra los ciclos medios anuales y funciones de probabilidad acumulada en la estación Boya, ubicada en la zona sur de la laguna y la estación HOB0, ubicada frente a la comunidad de pescadores. Los resultados muestran que la temperatura presenta un claro ciclo anual con baja desviación estándar y el mismo comportamiento que la temperatura del aire sin diferencias

significativas entre los distintos escenarios de apertura. La curva de probabilidad acumulada muestra que los valores máximos alcanzados son mayores en la estación *HOBO* que se encuentra en la zona de menor profundidad.

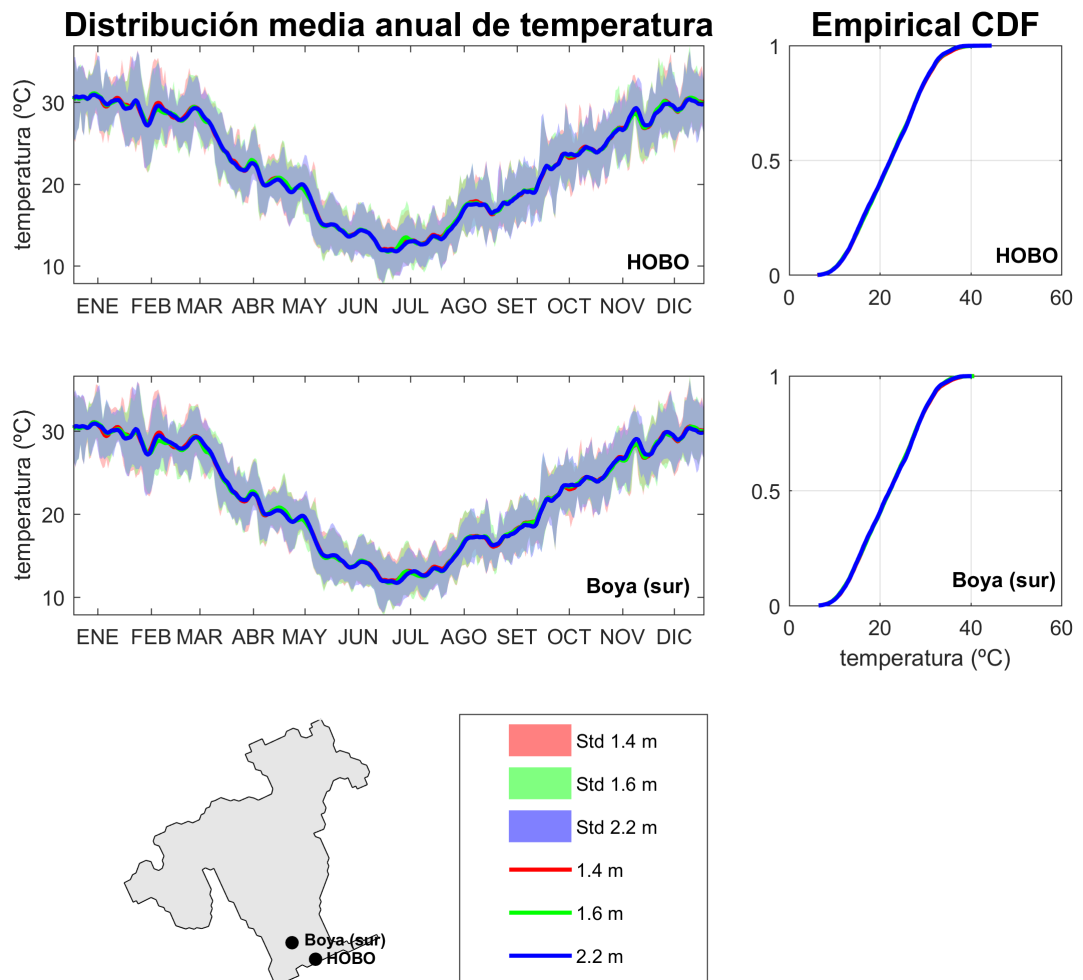


Figura 4.23: Ciclo medio anual de temperatura y su desviación estándar en las estaciones Boya (abajo) y HOBO (arriba) para los tres escenarios de apertura estudiados

4.2.5. Salinidad

Los resultados de salinidad dentro de la laguna se analizaron mediante campos medios, ciclos medios anuales y análisis de componentes principales. La salinidad en la pluma de descarga se estudió mediante campos medios y de desviación estándar y PCA.

Campos medios y ciclo medio anual

La figura 4.24 muestra los campos medios y desviación estándar de la salinidad dentro de la laguna para los tres escenarios de apertura estudiados. La figura 4.25 muestra los ciclos medios y función de probabilidad acumulada en 5 puntos dentro de la laguna.

En la figura 4.24 se observa que los campos medios de salinidad presentan un gradiente sur-norte, variando desde 0 PSU en el norte a entre 3.5 PSU y 5.5 PSU, según el escenario de apertura. La salinidad media en la zona cercana a la boca del canal de conexión entre la laguna y el océano disminuye a medida que aumenta el nivel de apertura. En cuanto a la desviación estándar, los menores valores se dieron para el escenario 2.2 m, mientras que para 1.4 m y 1.6 m no se presentaron grandes diferencias, alcanzándose valores de 6 a 8 PSU en la zona de entrada del canal de conexión y alrededor de 3 PSU en el centro de la laguna. En la zona entre los bolsones y el cuerpo central se observan mayores valores de desviación estándar para el escenario 1.6 m. En general tanto la mayor salinidad media como su desviación estándar ocurren en la zona cercana a la boca del canal de conexión.

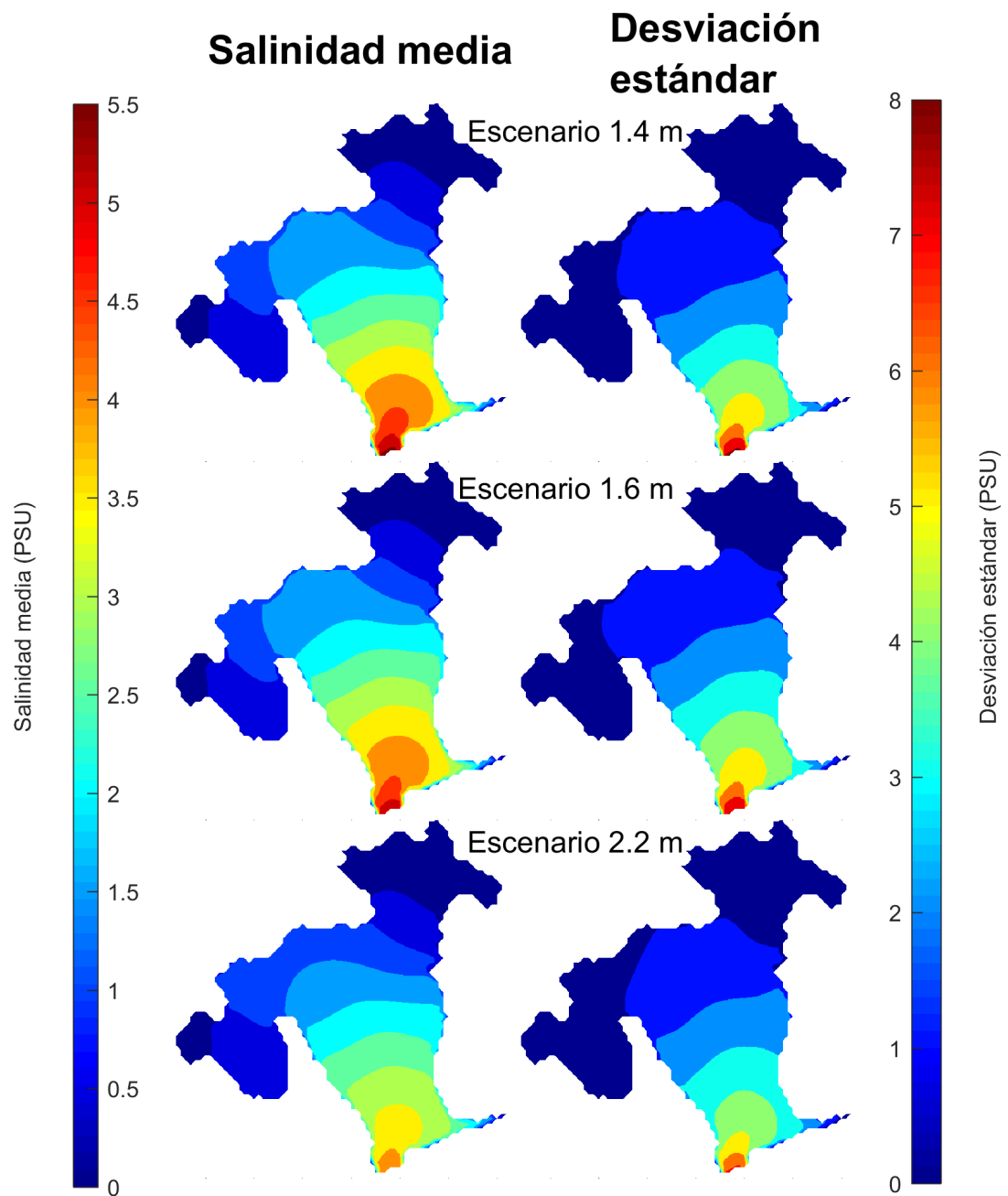


Figura 4.24: Campos medios de salinidad y desviación estándar en la laguna para los tres escenarios de apertura

Los resultados presentados en la figura 4.25 ponen de manifiesto que la salinidad alcanza mayores valores en el sur de la laguna, seguida por el centro y la zona frente a la comunidad costera (estación HOB0). Estas tres distribuciones presentan una forma semejante. En las zonas norte y del bolsón noreste los resultados son similares en la distribución, siendo mayor la salinidad

media en la estación norte. En cuanto a la desviación estándar es mayor en la zona centro y sur de la laguna, que en la zona norte y del bolsón noreste. No se identifica un ciclo anual marcado, pero sí un incremento en la salinidad en los meses de enero-febrero, mayo-junio y setiembre octubre, los cuales se vuelven más perceptibles a medida que aumenta el nivel de apertura. A su vez, la desviación estándar calculada también es mayor en estos mismos períodos. Los máximos y mínimos de salinidad ocurren para el escenario 2.2 m, aunque la diferencia respecto a los otros escenarios estudiados no es significativa. La distribución empírica de probabilidad muestra que la probabilidad de obtener mayores valores de salinidad aumenta a medida que desciende el nivel de apertura. En general, la curva es más tendida cuanto menor es el nivel de apertura del canal de conexión, excepto en la ubicación del sensor HOB0, donde el comportamiento es diferente al resto de las estaciones seleccionadas.

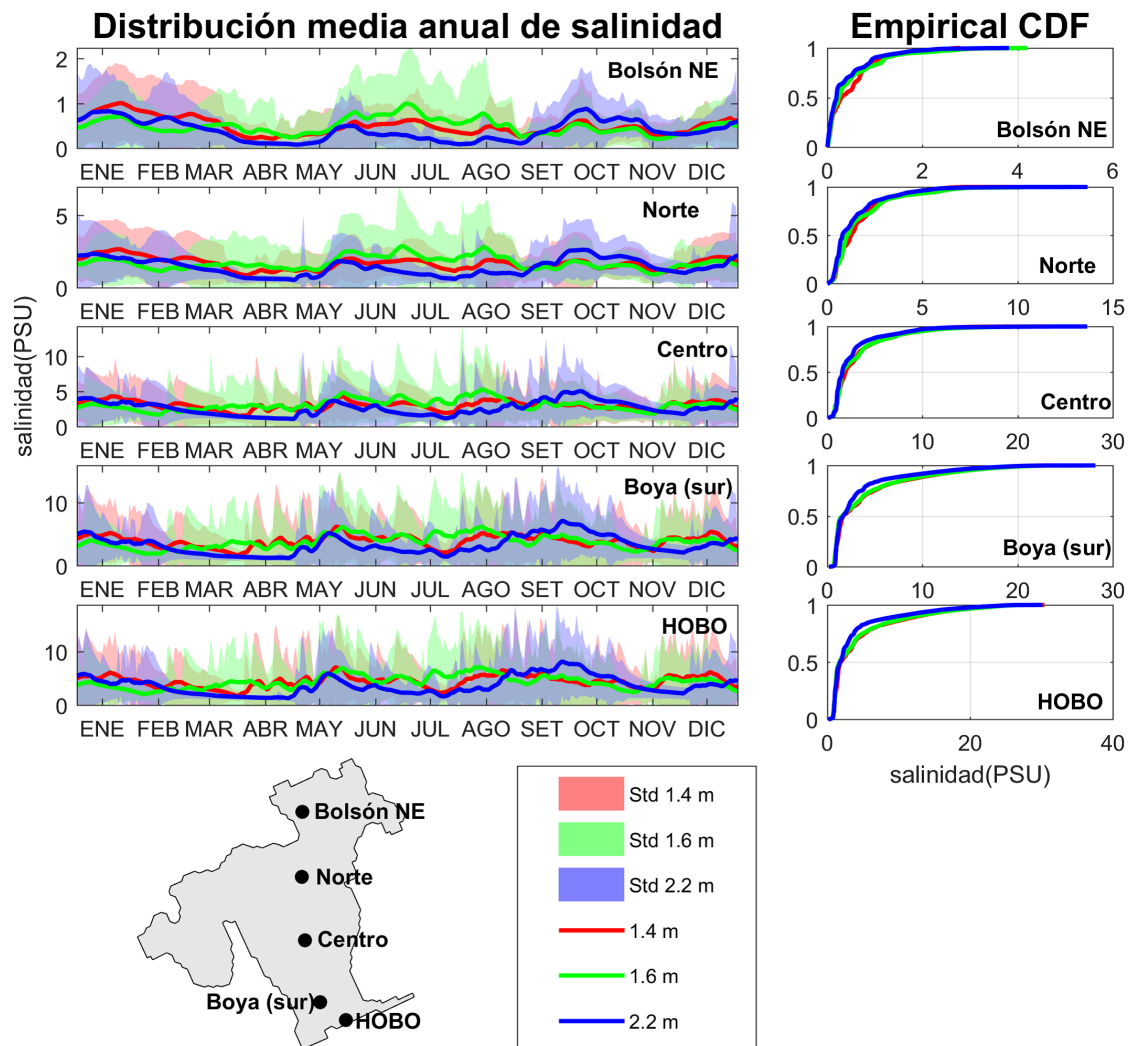


Figura 4.25: Ciclo medio anual y función de distribución de probabilidad en varios puntos de la laguna para todos los escenarios estudiados.

Análisis de componentes principales

Los dos primeros componentes principales de forma conjunta explican más del 96 % de la varianza total de la salinidad. Las figuras 4.26 y 4.27 se presentan los modos principales de los campos de salinidad para los tres escenarios estudiados.

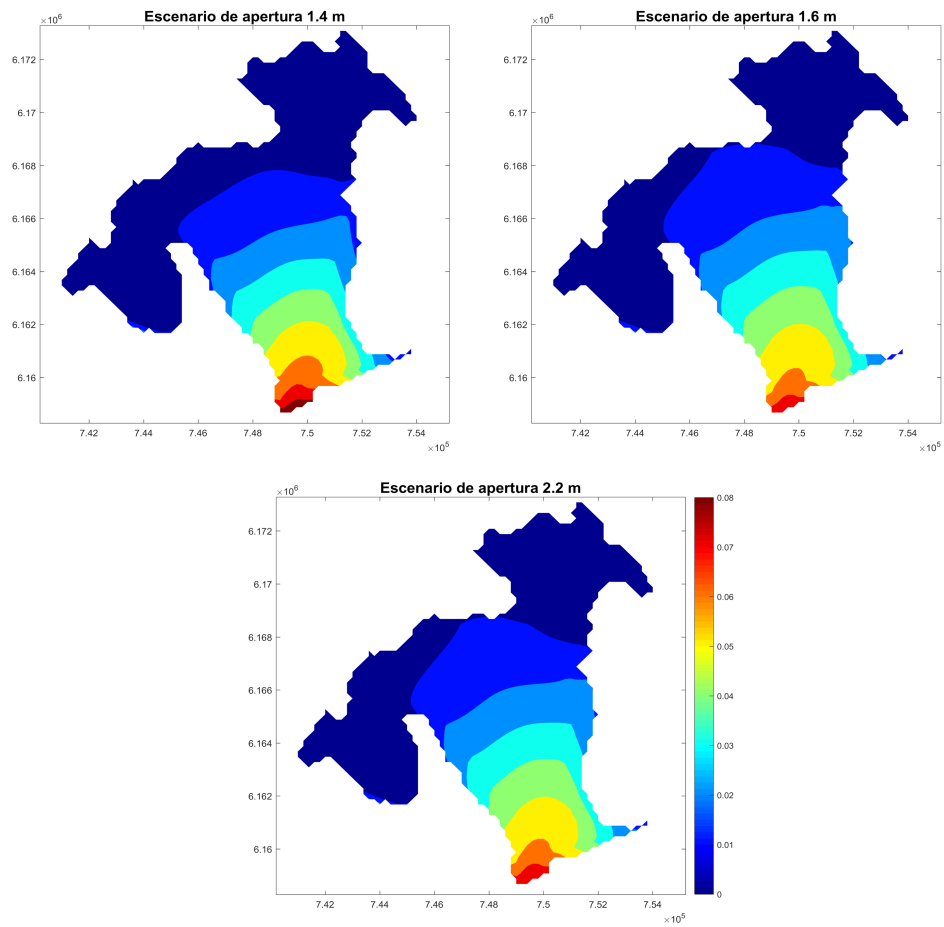


Figura 4.26: Modo asociado al primer componente principal de salinidad, para los tres escenarios de apertura estudiados; 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

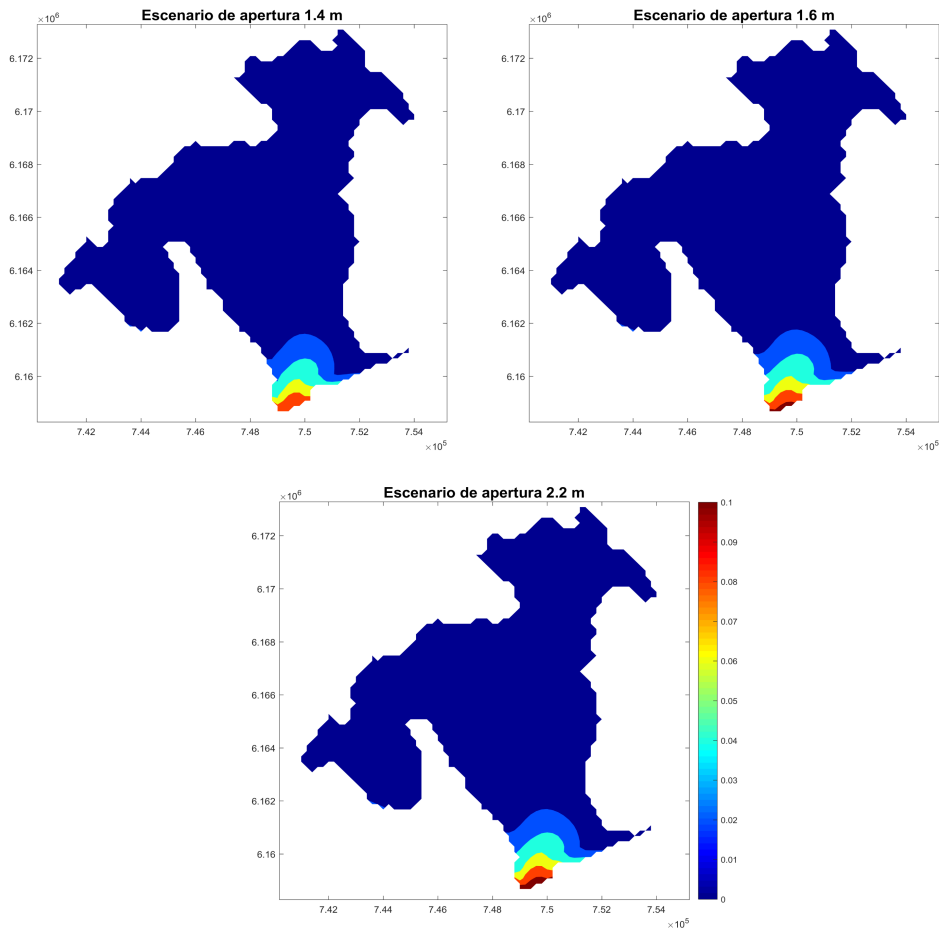


Figura 4.27: Modo asociado al segundo componente principal de salinidad, para los tres escenarios de apertura estudiados; 1.4 m (arriba izquierda), 1.6 m (arriba derecha) y 2.2 m (abajo).

La figura 4.26 muestra el modo asociado al primer componente principal, el cual representa el 85.3 %, 84.9 % y 87.1 % de la varianza para los escenarios 1.4 m, 1.6 m y 2.2 m respectivamente. En el gráfico se observa una ligera diferencia en los máximos alcanzados en la zona de ingreso de agua a través del canal de conexión, siendo los valores mayores para el escenario 1.4 m. Por otra parte, el efecto de la salinidad llega un poco más al norte del cuerpo central de la laguna en los escenarios 1.6 m y 2.2 m.

La figura 4.27 muestra el modo asociado al segundo componente principal de salinidad para los escenarios estudiados. Este componente representa el 10.7%, 11.6% y 9.2% de la varianza para aperturas a nivel 1.4 m, 1.6 m y 2.2 m respectivamente. En la zona sur, el campo de salinidades es similar al observado en los primeros 6 a 10 días posteriores a una apertura.

En la tabla 4.9 se muestra la correlación para cada nivel de apertura para los dos primeros componentes principales y 12 forzantes. La figura 4.28 muestra 18 meses de la serie de salinidad de los modos asociados a la primera y segunda componente principal conjuntamente con los forzantes con los que presenta mayor correlación. El primer componente principal está correlacionado, con signo negativo, con el nivel en la laguna y la cota de fondo del canal; este modo es similar a los campos de salinidad máximos observados en la laguna. Cuando la laguna esta cerrada se da un aumento de nivel y disminución de la salinidad; una vez que se abre el nivel desciende y a los pocos días comienza a ingresar agua de mar y la salinidad aumenta. Lo mismo ocurre con la cota de fondo del canal; cuando la laguna se esta cerrada la cota de fondo del canal es alta y salinidad disminuye a medida que ingresa agua de los arroyos. A los pocos días de la apertura, cuando la cota del canal es baja se da un aumento de salinidad por ingreso de agua de mar. El segundo componente principal deja de tener correlación con el nivel de la laguna y solo presenta una correlación con la cota de fondo del canal. Este modo es similar a los campos observados cuando se comienza a dar el ingreso de agua de mar. La correlación con la cota de fondo del canal se explica de la misma forma que para el modo asociado al primer componente principal. El hecho de que deje de tener correlación con el nivel en la laguna, viene dado porque en el momento que comienza a ingresar agua desde el océano el nivel en la laguna se ve afectado por el nivel en el océano; en la serie temporal se puede ver la salinidad mayor se da para niveles bajos en la laguna, pero que, debido al ingreso de agua desde el océano, un aumento de salinidad viene dado conjuntamente aumento del nivel de la laguna.

Tabla 4.9: Correlación entre los resultados del análisis de componentes principales para salinidad y los forzantes para los tres primeros componentes. U es el componente de la velocidad según x , V el componente de la velocidad según y , Q_{in} el caudal que ingresa a través de los arroyos, P la precipitación, T_{air} la temperatura del aire, $Nubo$ la nubosidad, Rad la radiación solar, η_O el nivel en el océano frente al canal de conexión, η_L el nivel en la laguna frente al canal de conexión, Q_{ch} el caudal que circula a través del canal, V_{ch} la velocidad en el canal y Zf_{ch} la cota de fondo del canal. Con - se indica cuando no hay correlación.

		U	V	Q_{in}	P	T_{air}	Nubo	Rad	HR	η_O	η_L	Q_{ch}	V_{ch}	Zf_{ch}	
Escenario	1.4	PC1	-	0.02	0.02	0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.03	0.08	-0.56	0.14	0.08	-0.53
	PC2	0.05	0.08	0.10	-	-0.11	0.02	-0.03	-	0.13	0.05	0.06	0.07	-0.30	
1.6	PC1	0.02	0.08	-	-	-0.15	0.02	-0.04	-0.02	0.11	-0.61	0.12	0.07	-0.54	
	PC2	0.05	0.05	0.06	-	-0.02	-	0.01	-0.02	0.10	-0.01	0.07	0.08	-0.34	
2.2	PC1	0.03	-0.02	-	-	-0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	-0.58	0.08	-	-0.57	
	PC2	0.04	0.12	0.06	-0.01	-0.19	0.01	-0.06	-0.03	0.15	0.11	0.05	0.13	-0.26	

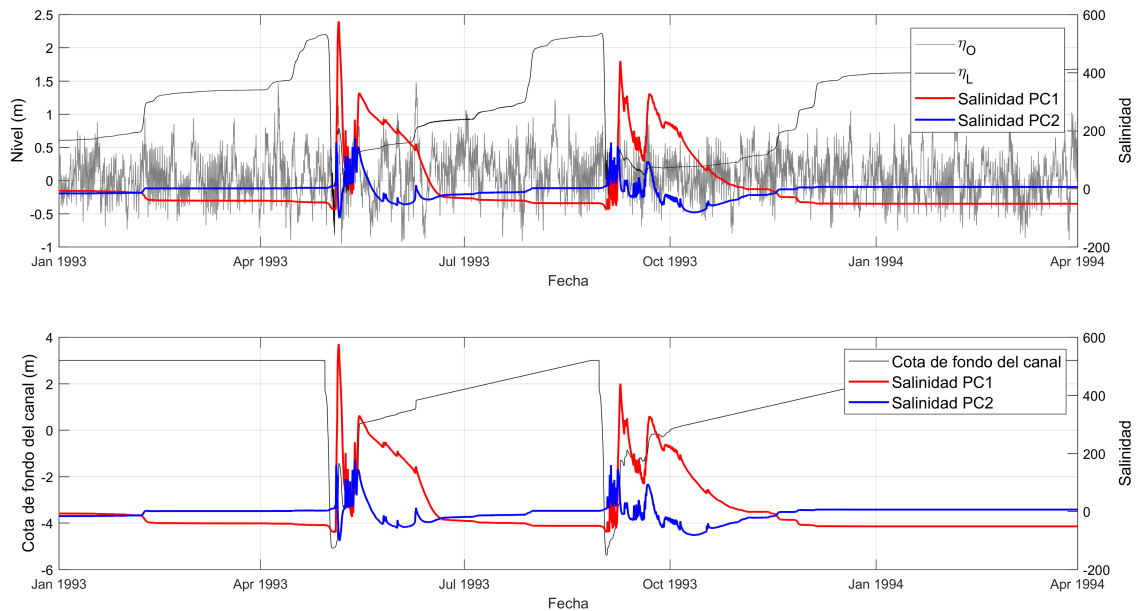


Figura 4.28: Series de salinidad correspondientes a los modos asociados al primer y segundo componente principal, con nivel de la laguna y el océano (arriba) y cota de fondo del canal (abajo).

Pluma de descarga

La salinidad en la pluma de descarga de la laguna al océano se analizó mediante valores medios y desviación estándar del campo de salinidades y componentes principales para cada uno de los escenarios. Cualitativamente se observó que al inicio la pluma es más definida y presenta menores valores de salinidad, a medida que avanza el tiempo y disminuye el caudal de descarga

la salinidad de la pluma va aumentando y la forma no es tan definida. La extensión de la pluma se ve afectada por el nivel del océano en el momento de la apertura.

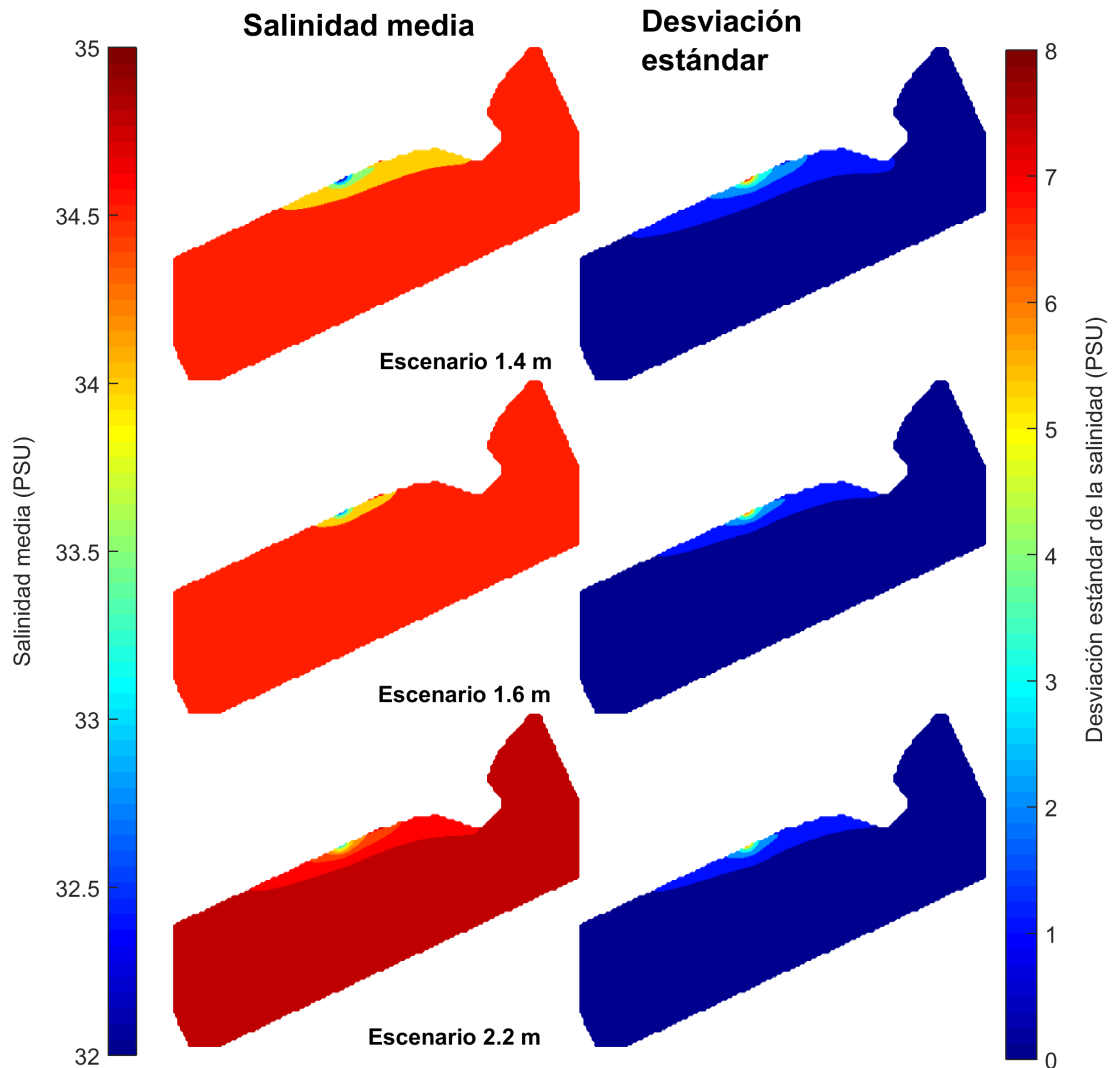


Figura 4.29: Media y desviación estándar de la salinidad en el océano para los tres escenarios estudiados

La figura 4.29 muestra los campos medios y desviaciones estándar de la salinidad en la pluma de descarga, las salinidades medias son entre 32 y 35 PSU, presentando los menores valores en la zona de la boca del canal de conexión. La pluma media es paralela a la costa y abarca unos 15 km, y se encuentra desfasada hacia el este. La salinidad media en el océano se ve afectada por la descarga en los escenarios 1.4 m y 1.6 m, con valores medios entre 34.5

PSU y 35 PSU, mientras que para el escenario 2.2 m los valores medios no se ven afectados en el océano fuera de la pluma de descarga. Los valores de salinidad en la pluma aumentan a medida que aumenta el nivel de apertura. Estas dos últimas observaciones se justifican debido al número de aperturas totales en cada escenario, sumado a que el tiempo en el que la laguna descarga disminuye al aumentar el nivel como se observó en la sección anterior. La desviación estándar de la salinidad en el océano varía entre 0 y 8 PSU. La pluma presenta una forma simétrica respecto a la desembocadura del canal de conexión. Al igual que en el caso de la salinidad media los valores aumentan a medida que aumenta el nivel e apertura.

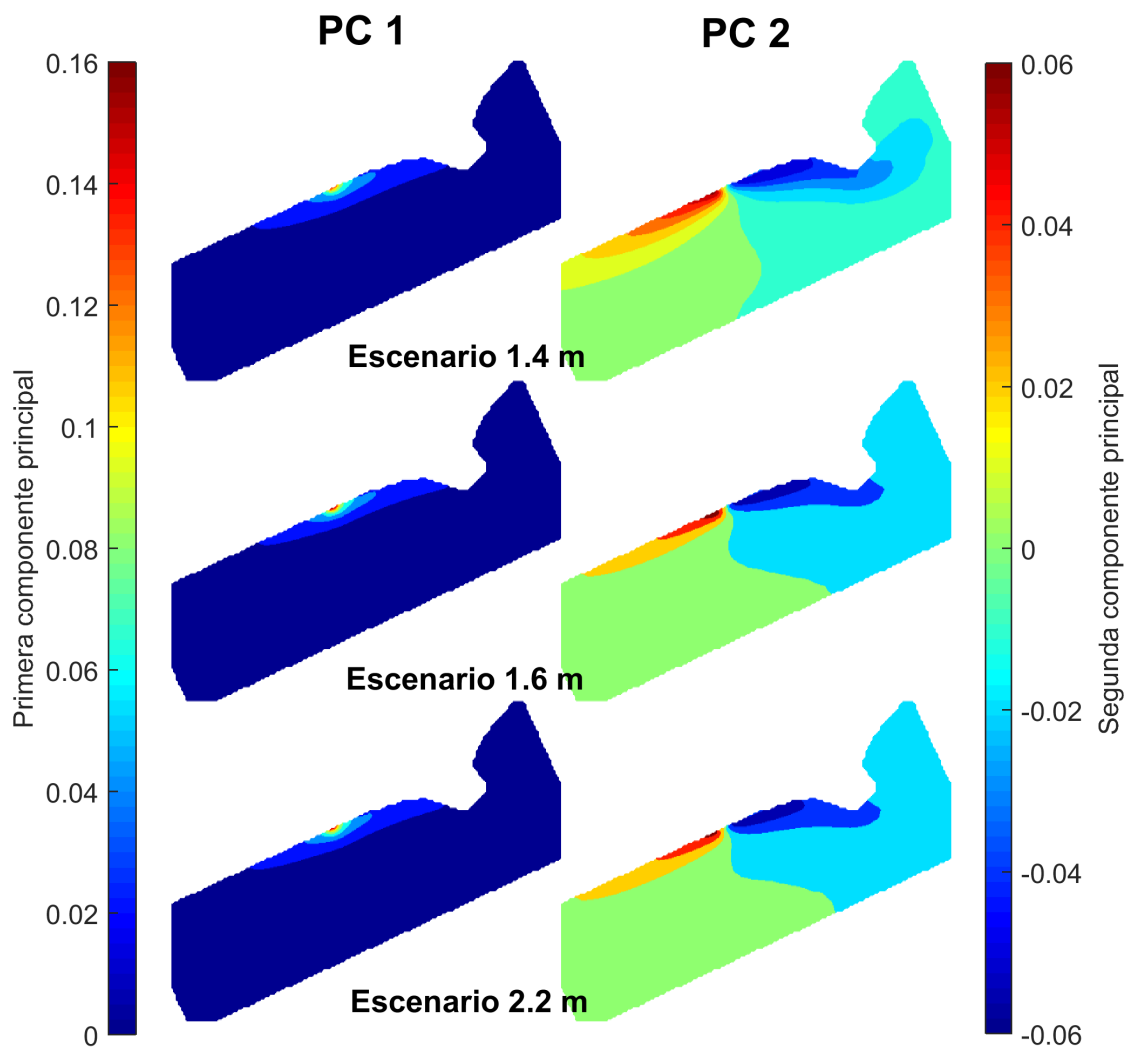


Figura 4.30: Modo asociado al primer (izquierda) y segunda (derecha) componente principal para los tres escenarios estudiados

Del análisis PCA de la pluma de salinidad en el océano se desprende que los dos primeros componentes principales explican más del 85 % de la varianza. En la figura 4.30 se presenta el modo asociado a dichos componentes para cada uno de los escenarios estudiados. El primer componente explica aproximadamente el 75 % de la varianza en todos los casos; el campo que observado es similar al campo medio (ver figura 4.29) en términos de distribución de la salinidad. En cuanto al modo asociado al segundo componente principal es posible visualizar las plumas que se generan hacia el este y el oeste (con diferente signo) debido al gradiente en los niveles de mar impuestos en las condiciones de borde. Si se comparan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios se puede ver que tanto para el primer como el segundo componente principal, el área del océano afectada por la pluma de descarga disminuye a medida que aumenta el nivel de apertura. En el modo asociado al segundo componente principal es interesante ver la diferencia en la zona central de la grilla, donde, para el escenario 1.4 m, el cambio de signo se mueve hacia el oeste a medida que se avanza hacia aguas profundas mientras que en los otros casos se mueve hacia el este. Respecto a los máximos y mínimos no se encontraron diferencias significativas.

Capítulo 5

Discusión

Se implementó un modelo bidimensional multiescala de la Laguna de Rocha, acoplando un modelo hidrodinámico integrado en la vertical con un modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal de conexión entre la laguna y el océano. Se incluyó además el transporte de temperatura y salinidad e intercambio de calor con la atmósfera. El modelo mencionado fue parcialmente calibrado y no fue validado debido a la escasez de datos medidos.

El estudio se enfocó en simular nivel, patrones de circulación, temperatura y salinidad dentro de la laguna, así como la pluma de descarga para varios escenarios, explorando cómo estos elementos se ven afectados por la política de apertura de la barra de la laguna. Se compararon los resultados entre ellos evaluando el efecto que puede tener la selección del nivel de apertura artificial en las variables hidrodinámicas y físico-químicas más relevantes para cada escenario de apertura definido.

Respecto a la metodología aplicada, se observó que el crecimiento de la berma determina si ocurre una re-apertura de la barra de arena luego del cierre. En el modelo implementado, la tasa de crecimiento de la berma se consideró constante, mientras que se espera que en la realidad este valor dependa del oleaje.

Los datos de registros de apertura de la laguna no son 100% confiables debido a su subjetividad; es probable que, en la mayoría de los casos que el registro fue tomado manualmente, se haya considerado que la laguna está abierta si existe un canal entre la laguna y el mar aunque la lámina de agua en el mismo sea de apenas un par de centímetros, mientras que en el modelo se requieren al menos 20 cm de agua para considerar laguna abierta.

El modelo hidro-morfodinámico simplificado presentó resultados razonables de velocidades, ancho y profundidades en comparación a lo observado. El análisis de sensibilidad aplicado se realizó de forma individual para cada uno de los parámetros; una variación conjunta de los mismos podría llevar a resultados igual de aceptables con un conjunto diferente de parámetros. Este análisis deja en evidencia la importancia de tener bien caracterizados los sedimentos y de realizar mediciones durante la apertura del canal.

Contar con un registro de varios meses que incluye una apertura artificial, permitió calibrar algunos de los parámetros del modelo hidro-morfodinámico simplificado y ajustar los otros. Para la validación del modelo se requieren datos adicionales de transporte de sedimento, evolución de la sección y caudal del canal de conexión durante la apertura y hasta varias semanas después, en simultaneo con mediciones de nivel, temperatura y salinidad dentro y fuera de la laguna, y el oleaje en el océano.

El número de aperturas anuales encontrado para los diferentes escenarios es coherente con los registros que se tienen. Como era de esperar este número disminuye a medida que aumenta el nivel de apertura. El ciclo anual de velocidades en el canal decrece desde octubre a marzo y presenta picos en julio para el escenario 1.6 m, y agosto para los escenarios 1.4 m y 2.2 m.

El nivel de la laguna se mostró uniforme en el espacio, con variaciones del orden de pocos centímetros. La realidad muestra que dependiendo de las condiciones de viento, con un nivel alto en la laguna, estas variaciones pueden ser mayores. No se encontró un ciclo anual para los escenarios con apertura a 1.4 m y 1.6 m, pero sí se observa un ciclo para la apertura a 2.2 m, con mayores niveles entre mayo a setiembre y picos en enero, mayo y setiembre, lo cual concuerda con lo presentado por Conde et al. [2019](#).

Los patrones de circulación dentro de la laguna se estudiaron mediante un análisis de componentes principales. Se observó que la salida e ingreso de agua a través del canal de conexión tiene un efecto importante en los mismos. Los patrones asociados a condiciones extremas de viento, nivel y caudal muestran la importancia de la dirección del viento en los mismos, en particular en el módulo de la velocidad. Se observó que para el caso de la laguna conectada con el mar, los campos medios de velocidades presentan siempre la misma dirección, independientemente de la dirección del viento. Mientras que, con la laguna cerrada, se observaron diferencias en la dirección de circulación; esto último concuerda con lo observado por Boutron et al. [2015](#).

La modelación de la temperatura presentó una serie de problemas; se identificó que en los momentos en los que la profundidad es baja después de una apertura el modelo de temperatura se vuelve inestable, alcanzando valores que se van del rango previsto. Por otra parte el modelo sobreestima la temperatura en general, lo que se asocia a una inadecuada calibración de los parámetros. El procedimiento de calibración, los datos disponibles, y la búsqueda de un único valor para el parámetro e_{air} pueden ser otra de las causantes que contribuyen a las diferencias entre la temperatura modelada y registrada. El coeficiente de calibración para verano 2016 resultante fue $e_{air,2016} = 0.6$, dando un $RMSE = 1.5^{\circ}\text{C}$, mientras que al aplicar este mismo coeficiente a los datos de 2020, el RMSE aumentó a 4.2°C . Con el mismo procedimiento se determinó el $e_{air,2020} = 0.8$, obteniendo un $RMSE = 2^{\circ}\text{C}$. Estas diferencias pueden estar asociadas a que el efecto de la radiación atmosférica debería atenuarse más en verano o a que el sensor HOBO, del cual se obtuvieron los datos para la segunda calibración, no es representativa del resto de la laguna; la boya se encontraba en una zona con cota de -1 m aproximadamente, mientras que la cota de la ubicación del sensor es -0.2 m, a esto se suma que en el modelo se observaron diferencias entre los niveles simulados y medidos de hasta 20 cm.

El comportamiento general de la temperatura, luego de suavizar los resultados mediante la aplicación de una media móvil, sigue el ciclo de la temperatura del agua, y los aportes fluviales y a través del canal de conexión tienen un efecto local, lo que concuerda con lo reportado en Bonilla et al. 2005, Rodríguez-Graña et al. 2008, y Amaral, 2020 entre otros. Se observaron zonas de menor temperatura media cerca de la desembocadura de los arroyos y el canal de conexión, y que estas áreas se incrementan al aumentar el escenario de apertura. Al comparar los resultados medidos y modelados se observó que en los segundos la temperatura es homogénea en toda la laguna, mientras que las mediciones no muestran lo mismo. De todas formas, se debe tener en cuenta que, para la temperatura, es importante el momento del año del registro. En el caso de las estaciones E1 y E7, que cuentan con número de datos similar tomados en los mismos momentos, la media de temperatura presenta una diferencia de 0.1°C , que es similar a las diferencias espaciales observadas en la modelación.

Comparando los datos registrados y medidos se observó un gradiente de sur a norte de la laguna en todos los casos, coincidiendo con lo reportado en Rodríguez-Gallego et al. 2014, en las zonas norte y bolsón la salinidad mode-

lada alcanzó apenas los 5 PSU, mientras que en la zona centro y sur alcanza los 30 PSU. La salinidad media presentó mayores valores para los escenarios de aperturas a niveles más bajos, aunque las diferencias fueron menores a 1 PSU. Al comparar las medias anuales en distintos puntos se observó que en la zona norte y de los bolsones el ciclo es más marcado que en el centro y sur. Se destaca que en esta comparación puede influir el número de mediciones y momento en que se realizaron; en particular, en la estación Barra Vieja el 75 % de los registros se tomaron con la barra abierta.

Con el objetivo de explorar las posibles causas de estas diferencias se realizaron una serie de pruebas; se analizó la sensibilidad de los resultados al coeficiente de difusión y el efecto de considerar o no una disminución en la salinidad en la descarga que vuelve a ingresar a la laguna. Finalmente se concluye que el problema no está en considerar la salinidad de la pluma de descarga para el ingreso de agua desde el océano, ya que no se observaron diferencias significativas en los resultados. Por otra parte, los resultados de variación del coeficiente de difusión muestran cambios para un $CD = 100 \text{ m}^2/\text{s}$, principalmente en la zona norte de la laguna, aunque no se observan grandes diferencias entre las series para $CD = 100 \text{ m}^2/\text{s}$ y $CD = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$.

Otras posibles causantes de las diferencias entre los resultados del modelo y los datos medidos son: (1) tiempo de conexión menor que en la realidad por cierre prematuro de la barra de arena, (2) ingreso de agua salada por infiltración a través de la barra de arena cuando el nivel en el mar supera el nivel en la laguna pero la barra se encuentra cerrada, (3) salinidad preexistente en la laguna o a una combinación de todas ellas. Comparando la salinidad dentro de la laguna luego de una apertura, se identificó que la distribución depende del nivel de mar en el momento de la apertura y los días posteriores, por lo que el momento en el que ocurre la misma es clave. Un resultado interesante es que a medida que aumenta el nivel de apertura disminuye el tiempo que tarda en ingresar agua desde el océano al canal. Presumiblemente, esto ocurre debido a que se tiene una mayor diferencia de nivel entre la laguna y el océano, lo que provoca que la descarga sea más rápida, aunque el volumen descargado es mayor. En cuanto a la distribución anual, no se identificaron ciclos para ninguno de los escenarios, lo cual concuerda con lo presentado por Rodríguez-Gallego et al. [2014](#).

Capítulo 6

Conclusiones generales y futuras líneas de trabajo

En este trabajo de tesis se presentó el desarrollo e implementación de un modelo bidimensional multiescala adecuado para la representación de la Laguna de Rocha, incluyendo la modelación de la formación, evolución y cierre del canal de conexión entre la laguna y el océano. La implementación se realizó en TELEMAC-2D, acoplando el modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal como subrutina.

El estudio de antecedentes en la modelación de lagunas costeras de cierre y apertura intermitente permite establecer que hasta el momento no se han desarrollado modelos de éstas características; el modelo implementado es el primero en acoplar un modelo 2D con un modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal que permite estudiar el comportamiento de las variables hidrodinámicas y físico-químicas más relevantes dentro de la laguna y el comportamiento del canal de conexión, sin incurrir en las complejidades de realizar un modelo bidimensional del canal de conexión entre la laguna y el océano.

Este modelo es aplicable tanto para conocer el efecto de un evento particular sobre las variables más relevantes de la laguna (e.g.: el efecto de una apertura artificial del canal en la salinidad), como para realizar un análisis de mediano a largo plazo de las variables de interés. En este sentido el modelo es útil no solo para el manejo de la laguna, sino también para comprender el funcionamiento del ecosistema, dado que la salinidad afecta directamente la presencia y composición de especies y la distribución de diferentes organismos en la laguna (Bonilla et al. [2005](#), Rodríguez-Gallego et al. [2014](#), Amaral, [2020](#)).

Si bien los resultados deben ser interpretados con precaución debido a que el modelo no pudo ser calibrado y validado adecuadamente, se cumplió con el objetivo de generar una herramienta con gran potencial para el estudio del comportamiento de la laguna y la comprensión de los procesos que en ella ocurren.

La organización y sistematización de los datos existentes así como la creación de una base de metadatos permitió conocer en profundidad los datos disponibles para trabajar, así como sus características y falencias. Adicionalmente las diferentes modelaciones fueron complementadas con datos medidos in situ en el marco del proyecto ANII en el que se enmarca esta tesis. En particular se destaca la relevancia de haber contado con datos de nivel y temperatura medidos de forma continua dentro de la laguna por 10 meses consecutivos y las campañas realizadas durante distintas aperturas del canal de conexión.

De la implementación del modelo se concluye que la temperatura y salinidad no se reproducen adecuadamente. Si bien los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de valores esperables, en el caso de la temperatura los estadísticos de los valores modelados muestran que el modelo sobreestima la temperatura, especialmente en los meses cálidos. Por otra parte, la salinidad es subestimada en la zona alta de la laguna, a su vez, en los valores medidos se observó que en general la salinidad se mantiene durante un tiempo después de la apertura (semanas), mientras que en el modelo este plazo es de días.

La comparación de los resultados para distintos escenarios de apertura permite concluir que el nivel al que se abre la laguna de forma artificial tiene un efecto sobre el momento en el que se da la apertura, la hidrodinámica del canal de conexión, el nivel de la laguna, los patrones de circulación y la salinidad. Mientras que se observó que la temperatura dentro de la laguna no presenta grandes cambios en los distintos escenarios.

Otra conclusión importante que se obtuvo con este trabajo es que, considerando la escasa variación espacial en los niveles dentro de la laguna, podría modelarse que el ésta se encuentra toda con un mismo nivel de agua, y por otra parte, se vio que considerar o no que la salinidad en que ingresa a la laguna se ve afectada por la pluma de descarga no tiene un gran efecto en los resultados de salinidad dentro de la laguna, se puede concluir que el modelo hidro-morfodinámico simplificado del canal se puede ejecutar en matlab y posteriormente utilizar los caudales obtenidos como condición de borde en TELEMAC-2D sin perjuicio de los resultados.

Como futuras líneas de trabajo se plantean tres grandes bloques: (1) mejoras en el modelo implementado; (2) definición y realización de campañas de medición, y calibración y validación del modelo; y (3) posibles líneas de investigación.

Una de las mejoras a aplicar en el modelo implementado es la incorporación del crecimiento de la berma como función del clima de olas; en el modelo se consideró un crecimiento constante de la berma de arena Δ_{berm} de 6 m/año, que se ajustó para el único momento en el que se tenían suficientes datos medidos. Un punto a mejorar sería el estudio del crecimiento de la berma en función del clima de olas y marea. Un ejemplo es la formulación de Booyesen y Theron (2020), ésta se puede implementar con los datos existentes del reanálisis realizado por el IMFIA (Alonso et al. 2018), y su aplicación no requiere un gran trabajo adicional, aunque los autores recomiendan realizar ensayos y calibrar la constante de proporcionalidad dada en la formulación. En cuanto al modelo de temperatura, uno de los puntos a mejorar es la calibración del modelo, ya sea mediante variación estacional de los coeficientes de calibración según algún forzante de entrada del modelo, como temperatura media del aire o radiación solar. También se pueden explorar la implementación y desarrollo de un código compatible de otros modelos como el Ocean (Gill, 1982 y Lane, 1989) que fue calibrado para lagos de estas características.

En esta tesis se refleja la necesidad de realizar mediciones continuas dentro de la laguna y durante aperturas artificiales; se propone la generación de una serie de datos continua dentro de la laguna. Idealmente, se mediría nivel, salinidad, temperatura y velocidad en varios puntos de la laguna, pero de no ser posible, lo fundamental es tener una serie continua de nivel y salinidad en simultáneo. Se propone además la medición durante la apertura del canal y semanas posteriores de geometría y velocidad del mismo.

Como futura línea de investigación se plantea el estudio del efecto del cambio climático en las variables modeladas dentro de la laguna; un posible planteo es la definición de escenarios climáticos en base a datos proyectados en la región para los distintos RCP y diferentes horizontes temporales. Para evaluar los efectos del cambio climático estos resultados se comparan con los obtenidos forzando el modelo con datos actuales.

Bibliografía

- Alonso, R., Santoro, P. y Solari, S. (2018). New Wave Hindcast for the Rio De La Plata Estuary. *Coastal Engineering Proceedings*, (36), 7. <https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.7>
- Amaral, V. (2020). *Bomba de carbono microbiana a lo largo del ciclo hidrológico de una laguna costera* (Tesis de maestría). Universidad de la República. Facultad de Ciencias. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/6430>
- Anthony, A., Atwood, J., August, P., Byron, C., Cobb, S., Foster, C., Fry, C., Gold, A., Hagos, K., Heffner, L., Kellogg, D. Q., Lellis-Dibble, K., Opaluch, J. J., Oviatt, C., Pfeiffer-Herbert, A., Rohr, N., Smith, L., Smythe, T., Swift, J. y Vinhateiro, N. (2009). Coastal lagoons and climate change: Ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*, 14(1). <https://doi.org/10.5751/ES-02719-140108>
- Aubriot, L., Conde, D., Bonilla, S., Hein, V. y Britos, A. (2005). Vulnerabilidad de una laguna costera en una Reserva de Biosfera : indicios recientes de eutrofización. *Taller Internacional de Eutrofización de Lagos y Embalses*, 65-85.
- Baldock, T. E., Weir, F. y Hughes, M. G. (2008). Morphodynamic evolution of a coastal lagoon entrance during swash overwash. *Geomorphology*, 95(3-4), 398-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.001>
- Bonilla, S., Conde, D., Aubriot, L. y Pérez, M. D. C. (2005). Influence of hydrology on phytoplankton species composition and life strategies in a subtropical coastal lagoon periodically connected with the Atlantic Ocean. *Estuaries*, 28(6), 884-895. <https://doi.org/10.1007/BF02696017>
- Booyesen, Z. y Theron, A. (2020). Methods for predicting berm height at Temporarily Open / Closed Estuaries. *Estuarine , Coastal and Shelf Science*, 245(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106906>

- Boutron, O., Bertrand, O., Fiandrino, A., Höhener, P., Sandoz, A., Chérain, Y., Coulet, E. y Chauvelon, P. (2015). An unstructured numerical model to study wind-driven circulation patterns in a managed coastal mediterranean wetland: The Vaccarès lagoon system. *Water (Switzerland)*, 7(11), 5986-6016. <https://doi.org/10.3390/w7115986>
- Brito, A. C., Newton, A., Tett, P. y Fernandes, T. F. (2012). How will shallow coastal lagoons respond to climate change? A modelling investigation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112(October), 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.002>
- Carrasco, A. R., Ferreira, O. y Roelvink, D. (2016). Coastal lagoons and rising sea level: A review. *Earth-Science Reviews*, 154, 356-368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.007>
- Conde, D., Aubriot, L., Bonilla, S. y Sommaruga, R. (2002). ¿Marine intrusions in a coastal lagoon enhance the negative effect of solar UV radiation on phytoplankton photosynthetic rates. *Marine Ecology Progress Series*, 240, 57-70. <https://doi.org/10.3354/meps240057>
- Conde, D., Solari, S., de Álava, D., Rodríguez-Gallego, L., Verrastro, N., Chreties, C., Lagos, X., Piñeiro, G., Teixeira, L., Seijo, L., Vitancurt, J., Caymaris, H. y Panario, D. (2019). Ecological and social basis for the development of a sand barrier breaching model in Laguna de Rocha, Uruguay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219(April), 300-316. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.003>
- Cooper, J. A. (2001). Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. *Geomorphology*, 40(1-2), 99-122. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00039-3)
- De Pascalis, F., Pérez-Ruzafa, A., Gilabert, J., Marcos, C. y Umgiesser, G. (2012). Climate change response of the Mar Menor coastal lagoon (Spain) using a hydrodynamic finite element model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 114, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.12.002>
- Dean, R. y Dalrymple, R. (2004). *Coastal Process with Engineering Application*. Cambridge University Press.
- de Brichambaut., C. P. (1963). *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*. Ed. Gauthier-Villars.
- Dias, J. M. y Lopes, J. F. (2006). Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro La-

- goon (Portugal). *Environmental Modelling and Software*, 21(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.002>
- Fernandes, E., Dyer, K. y Hax, F. (2000). Calibration and Validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*, (Special Issue 45), 470-488.
- Ferrarin, C. y Umgiesser, G. (2005). Hydrodynamic modeling of a coastal lagoon: The Cabras lagoon in Sardinia, Italy. *Ecological Modelling*, 188(2-4), 340-357. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.061>
- FitzGerald, D. M. (1983). Sediment Bypassing At Mixed Energy Tidal Inlets. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 2, 1094-1118. <https://doi.org/10.9753/icce.v18.68>
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K. y Pandey, R. P. (2007). Modifications to SCS-CN Method for Long-Term Hydrologic Simulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), 475-486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:5\(475\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(475))
- Gill, A. E. (1982). Atmosphere-Ocean dynamics. *International Geophysics Series*, Academic Press, 30.
- Gordon, A. D. (1990). Coastal Lagoon Entrance Dynamics. *Coastal Engineering 1990* (pp. 2880-2893). Proceedings of the 22nd International Coastal Engineering Conference. <https://doi.org/10.1061/9780872627765.220>
- Haines, P. E., Tomlinson, R. B. y Thom, B. G. (2006). Morphometric assessment of intermittently open/closed coastal lagoons in New South Wales, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1-2), 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.12.001>
- Hanslow, D. J., Davis, G. A., You, B. Z. y Zastawny, J. (2000). Berm height at coastal lagoon entrances in NSW. *10th ann. NSW coastal conference*, (May 2014), 12. <https://doi.org/10.13140/2.1.4910.9446>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., . . . Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hervouet, J. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with finite element method*. John Wiley; Sons, Ltd.

- Hinwood, J. B. y McLean, E. J. (2015). Predicting the dynamics of intermittently closed/open estuaries using attractors. *Coastal Engineering*, 99, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.02.008>
- Hinwood, J. B., McLean, E. J. y Wilson, B. C. (2012). Non-linear dynamics and attractors for the entrance state of a tidal estuary. *Coastal Engineering*, 61(1), 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.11.007>
- Hong, B. y Shen, J. (2012). Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 104-105, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.03.014>
- Ji, Z.-G. (2009). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes and Estuaries*. John Wiley & Sons, Inc.
- Junes, R. (2020). *Modelo Hidrodinámico del Río Uruguay* (Tesis de maestría). Universidad de la República. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/25336>
- Knoppers, B. (1994). *Chapter 9 Aquatic Primary Production in Coastal Lagoons*. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70014-X](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70014-X)
- Kraus, N. C., Patsch, K. y Munger, S. (2008). Barrier beach breaching from the lagoon side, with reference to Northern California. *Shore and Beach*, 76(2), 33-43.
- Lane, A. (1989). The heat balance of the North Sea. *Tech. Rep. 8, Proudman Oceanographic Laboratory*.
- Mahanty, M. M., Mohanty, P. K., Pattnaik, A. K., Panda, U. S., Pradhan, S. y Samal, R. N. (2016). Hydrodynamics, temperature/salinity variability and residence time in the Chilika lagoon during dry and wet period: Measurement and modeling. *Continental Shelf Research*, 125, 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.06.017>
- Martín-Gómez, V. y Barreiro, M. (2017). Effect of future climate change on the coupling between the tropical oceans and precipitation over Southeastern South America. *Climatic Change*, 141(2), 315-329. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1888-6>
- Martins, I. M., Dias, J. M., Fernandes, E. H. y Muelbert, J. H. (2007). Numerical modelling of fish eggs dispersion at the Patos Lagoon estuary - Brazil. *Journal of Marine Systems*, 68(3-4), 537-555. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.02.004>

- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press.
- McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., Rutherford, I. D. y Stout, J. C. (2017). Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, 292(April), 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.022>
- McSweeney, S. L. (2019). A geomorphic prediction module for Intermittently Open/Closed Estuaries in Victoria. *Corangamite Catchment Management Authority (CCMA)*. <https://doi.org/10.1002/esp.4280>
- Meerhoff, E., Rodríguez-Gallego, L., Giménez, L., Muniz, P. y Conde, D. (2013). Spatial patterns of macrofaunal community structure in coastal lagoons of Uruguay. *Marine Ecology Progress Series*, 492(May 2014), 97-110. <https://doi.org/10.3354/meps10472>
- Mil-Homens, J., Ranasinghe, R., van Thiel de Vries, J. y Stive, M. (2013). Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering*, 75(Complete), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.004>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Uruguay*, 101. http://www.fagro.edu.uy/%7B~%7Dhidrologia/riego/Manual%20Pequeñas%20Presas%20V1-v1%7B%5C_%7D01.pdf
- Narbondó, S., Gorgoglione, A., Crisci, M. y Chreties, C. (2020). Enhancing Physical Similarity Approach to Predict Runoff in Ungauged Watersheds in Sub-Tropical Regions. *Water*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020528>
- Okazaki, S.-i. y Sunamura, T. (1994). Quantitative Predictions for the Position and Height of Berm. *Geographic Review of Japan*, 67, 101-116.
- Okubo, A. (1971). Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 18(8), 789-802. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(71\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(71)90046-5)

- Perrin, C., Michel, C. y Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Ranasinghe, R., Pattiaratchi, C. y Masselink, G. (1999). A morphodynamic model to simulate the seasonal closure of tidal inlets. *Coastal Engineering*, 37(1), 1-36. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00008-3)
- Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M. y Conde, D. (2012). Land suitability assessment in the catchment area of four Southwestern Atlantic coastal lagoons: Multicriteria and optimization modeling. *Environmental Management*, 50(1), 140-152. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9843-4>
- Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M., Defeo, O., Vidal, L., Meerhoff, E. y Conde, D. (2017). Effects of land use changes on eutrophication indicators in five coastal lagoons of the Southwestern Atlantic Ocean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 188, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.02.010>
- Rodríguez-Gallego, L., Sabaj, V., Masciadri, S., Kruk, C., Arocena, R. y Conde, D. (2014). Salinity as a Major Driver for Submerged Aquatic Vegetation in Coastal Lagoons: a Multi-Year Analysis in the Subtropical Laguna de Rocha. *Estuaries and Coasts*, 38(2), 451-465. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9842-1>
- Rodríguez-Graña, L., Calliari, D., Conde, D., Sellanes, J. y Urrutia, R. (2008). Food web of a SW Atlantic shallow coastal lagoon: Spatial environmental variability does not impose substantial changes in the trophic structure. *Marine Ecology Progress Series*, 362(June), 69-83. <https://doi.org/10.3354/meps07401>
- Santoro, P., Fernández, M., Fossati, M., Cazes, G., Terra, R. y Piedra-Cueva, I. (2011). Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 35(5), 2462-2478. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.065>
- Santoro, P. (2017). *Numerical modeling of Montevideo Bay hydrodynamics and fine sediment dynamics* (Tesis doctoral). Universidad de la República. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/10516>
- Saona, G. (2003). Structure by size, sex and maturity stage of the withe croaker (*Micropogonias furnieri*, Desmarest, 1823; Teleostei: Sciaenidae) in the bycatch of the artisanal fishery at Rocha Lagoon, Uruguay. *Ciencias Marinas*, 29(3), 315-324. <https://doi.org/10.7773/cm.v29i3.154>

- Shalby, A., Elshemy, M. y Zeidan, B. A. (2020). Modeling of climate change impacts on Lake Burullus, coastal lagoon (Egypt). *International Journal of Sediment Research*, (40). <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.006>
- Smith, N. P. (1994). Water, Salt and Heat Balance of Coastal Lagoons. *Elsevier Oceanography Series*, 60(100), 69-101. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70009-6](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70009-6)
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications*. Thomas Telford Publications.
- Takeda, I. y Sunamura, T. (1982). Formation and height of berm. *Trans. Jap. Geomorphol. Union*, 3, 145-157.
- Teixeira, M. (2019). *Modelos morfodinámicos aplicados a la gestión de las lagunas litorales. El caso de la Laguna de Rocha* (Tesis de maestría). Montevideo, Uruguay, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20935>
- Tomas, L. M., Rodrigues, M., Fortunato, A. B., Azevedo, A., Leitão, P. C., Oliveira, A., Rocha, A., Lopes, J. F. y Dias, J. M. (2014). Salinity modelling accuracy of a coastal lagoon: A comparative river flow analysis of basin model vs. traditional approaches. *Journal of Coastal Research*, SI70(70), 586-591. <https://doi.org/10.2112/SI70-099.1>
- Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A. y Solidoro, C. (2004). A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4 SPEC. ISS.), 123-145. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.009>
- van de Kreeke, J. y Brower, R. (2017). *Tidal Inlets: Hydrodynamics and Morphodynamics* (Vol. 29). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/9781108157889>
- Vargas, C. I., Vaz, N. y Dias, J. M. (2017). An evaluation of climate change effects in estuarine salinity patterns: Application to Ria de Aveiro shallow water system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 189, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.03.001>
- Vaz, N., Dias, J. M., Leitão, P. y Martins, I. (2005). Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal channel: Ria de Aveiro. *Ocean Dynamics*, 55(5-6), 416-429. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0015-4>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the atmospheric science* (D. H. Renata dmowska y T. Rossby, Eds.; third). Elsevier.

- Wu, W. (2008). *Computational river dynamics*. Taylor; Francis, 2300 AK Leiden, The Netherlands.
- Wu, W. y Li, H. (2017). A simplified physically-based model for coastal dike and barrier breaching by overtopping flow and waves. *Coastal Engineering*, 130(September 2016), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.007>
- Xu, J., Long, W., Wiggert, J. D., Lanerolle, L. W., Brown, C. W., Murtugudde, R. y Hood, R. R. (2012). Climate Forcing and Salinity Variability in Chesapeake Bay, USA. *Estuaries and Coasts*, 35(1), 237-261. <https://doi.org/10.1007/s12237-011-9423-5>
- Yáñez-Arancibia, A., Lara Domínguez, A. L. y Pauly, D. (1994). Coastal Lagoons as Fish Habitats. *Elsevier Oceanography Series*, 60(100), 363-376. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70017-5](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70017-5)

ANEXOS

Anexo 1

Campanas de medición

En el marco del proyecto ANII “Estudio integrado del funcionamiento hidrodinámico y ecológico de una laguna costera: insumos para el manejo de la calidad de agua y reclutamiento de especies costeras” el proyecto CSIC “Medición y modelación de la apertura de la barra de la Laguna de Rocha” se realizaron una serie de campañas de medición así como la colocación de una regla y un sensor de nivel y temperatura dentro de la Laguna.

La colocación de la regla y campañas de medición anteriores a 2019 fueron presentadas en Teixeira (2019). En el presente anexo se complementa la información con la descripción de la colocación del sensor de nivel y temperatura mencionado y las campañas realizadas entre 2019 y 2021.

1.1. Colocación del sensor de nivel y temperatura

En el marco del proyecto en el cual se enmarca la presente tesis se colocó en la Laguna de Rocha un sensor de nivel y temperatura. En este anexo se resumen las características de dicho sensor, su ubicación y colocación y se presentan los datos adquiridos.

1.1.1. Instrumento

El instrumento adquirido es un sensor de nivel y temperatura HOB0, modelo MX-2001. El cual está diseñado para trabajar a la intemperie. Cuenta con un sensor de presión en el agua y otro fuera de ella; el nivel del agua se determi-

na a partir de las presiones registradas. El sensor cuenta con conexión bluetooth y los datos pueden ser descargados con cualquier dispositivo móvil a una distancia menor a 30 m del sensor. En el siguiente link se encuentran las especificaciones técnicas del instrumento: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2001>



Figura 1.1: Sensor HOBO MX-2001.

1.1.2. Colocación y seteo del sensor

El día 11 de noviembre de 2019 se colocó el sensor en la laguna; la ubicación del mismo fue frente a la comunidad de pescadores para tener un mejor acceso al mismo (sin necesidad de embarcación) y seguridad ante posibles actividades de vandalismo. El día de la colocación la laguna se encontraba con un nivel bajo, registrando 40 cm de agua en la ubicación seleccionada. En la figura 1.2 se muestra la ubicación global del sensor dentro de la laguna.

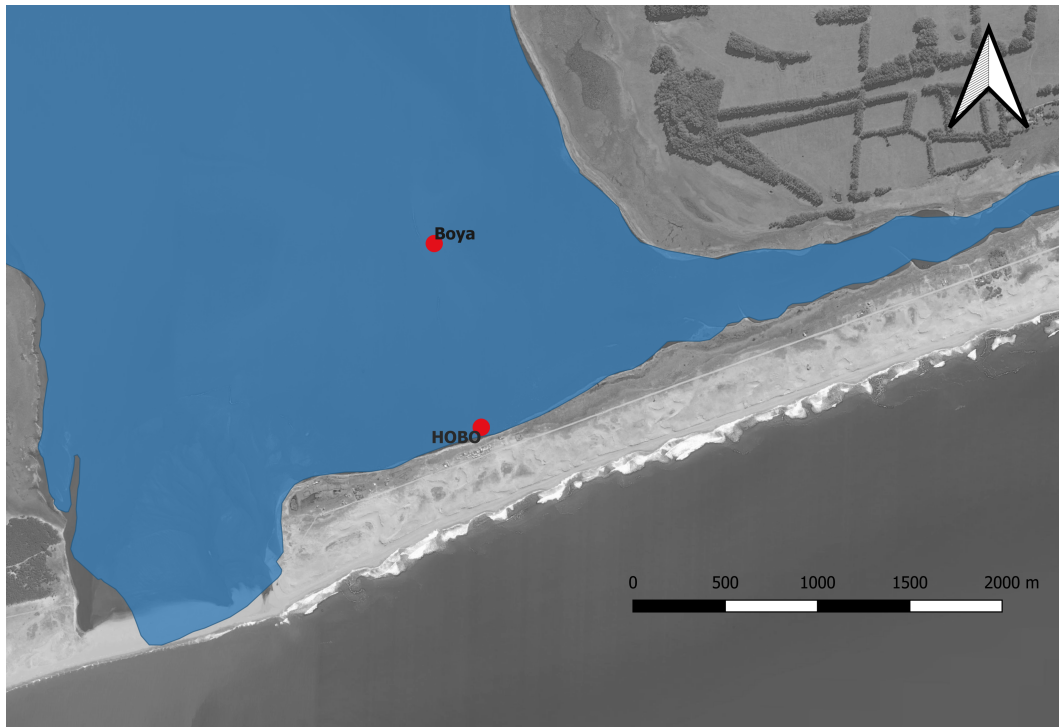


Figura 1.2: Ubicación del sensor en la laguna

El sensor se colocó dentro de un caño de PVC de 110 mm, desmontable en dos mitades, con una tapa en la parte superior, y un tornillo cercano a ésta donde se encuentra la “computadora” y uno de los sensores de presión, desde allí baja un cable conectado al sensor de presión y temperatura del agua, que se encuentra a aproximadamente 20 cm del fondo. El mástil de 2.67 m de altura se fijó al fondo mediante una estaca de hierro galvanizado. Se colocaron además lingas de acero inoxidable, debidamente identificadas con boyas, para tensarlo, que se fijan al fondo con estacas. Se realizaron agujeros a lo largo del mástil para permitir el ingreso del agua y evitar diferencias de presiones dentro y fuera del mismo. Finalmente se colocó sobre el mismo una luminaria alimentada con energía solar que permite identificarlo en horas nocturnas, la figura 1.3 muestran la colocación del sensor.

El sensor fue referenciado al cero Wharton (Wh) a partir de nivelarlo con un mojón colocado en el marco del proyecto (ver Teixeira, 2019), del cual se conoce la cota exacta (+2.8 m Wh), la figura 1.4 muestra el uso del nivel óptico para referenciar los datos. La frecuencia de medición se seteó cada 15 minutos, con lo cual la autonomía del sensor es de 6 meses, por lo que es recomendable descargar los datos cada 4 o 5 meses para asegurarse de no perder información.

Se observó que en los meses de calor el sensor se ve afectado por la presencia de biofouling, por lo que en estos períodos es recomendable aumentar las visitas, no dejando pasar más de 30 días entre una y otra.

Aproximadamente un año y cuatro meses después de colocado el sensor se identificaron errores en los valores de nivel reportados y el sensor fue sustituido por uno de las mismas características.

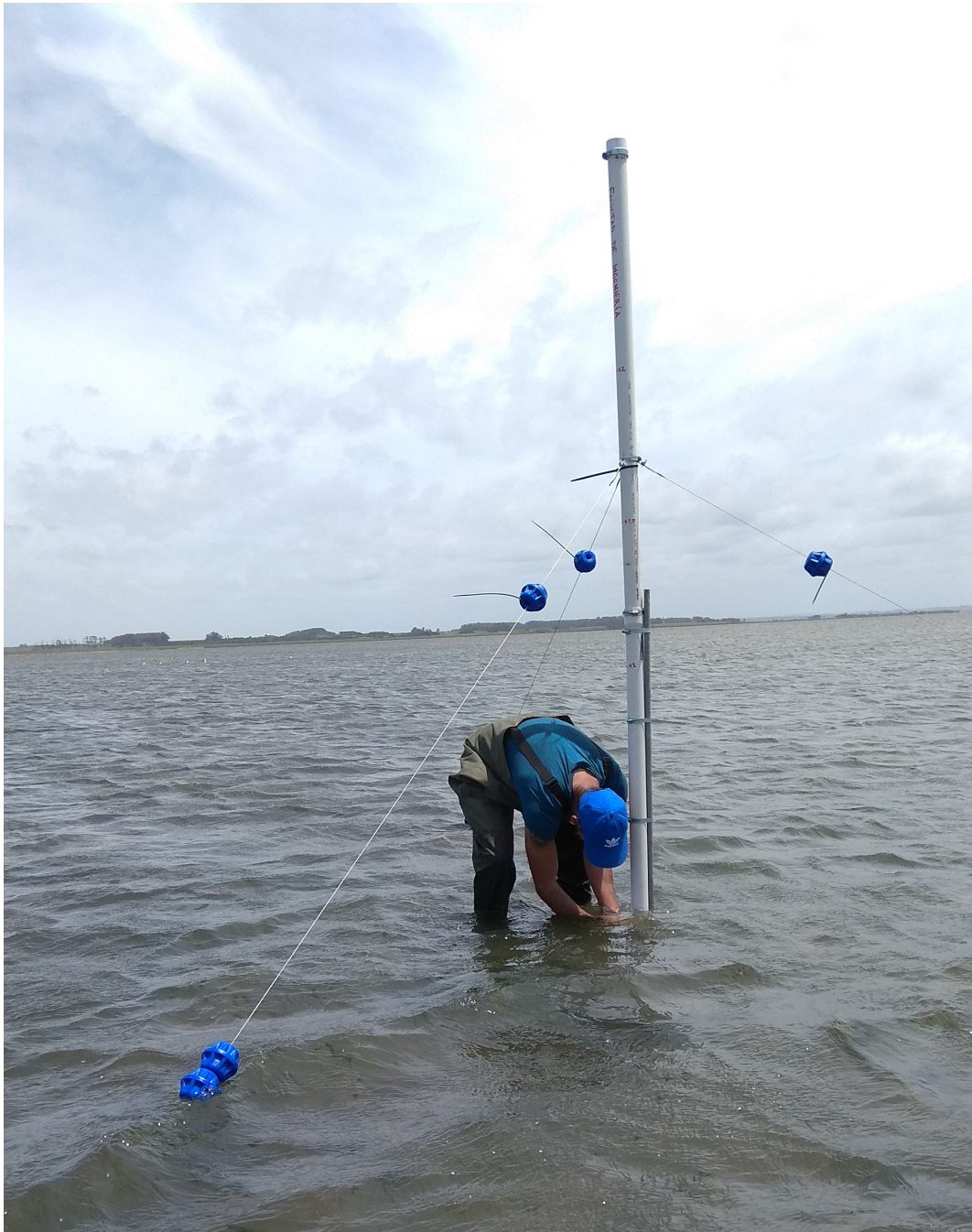


Figura 1.3: Colocación del sensor



Figura 1.4: Referenciado del nivel

1.1.3. Datos registrados

En la figura 1.5 se presentan los datos de nivel registrados con el sensor desde diciembre 2019 a noviembre 2020 conjuntamente con la precipitación medida en la estación meteorológica de Rocha. En el gráfico se indica el mo-

mento aproximado de la apertura y cierre de la barra; se observan que cuando la barra se encuentra cerrada la precipitación tiene un efecto directo en los niveles de la laguna.

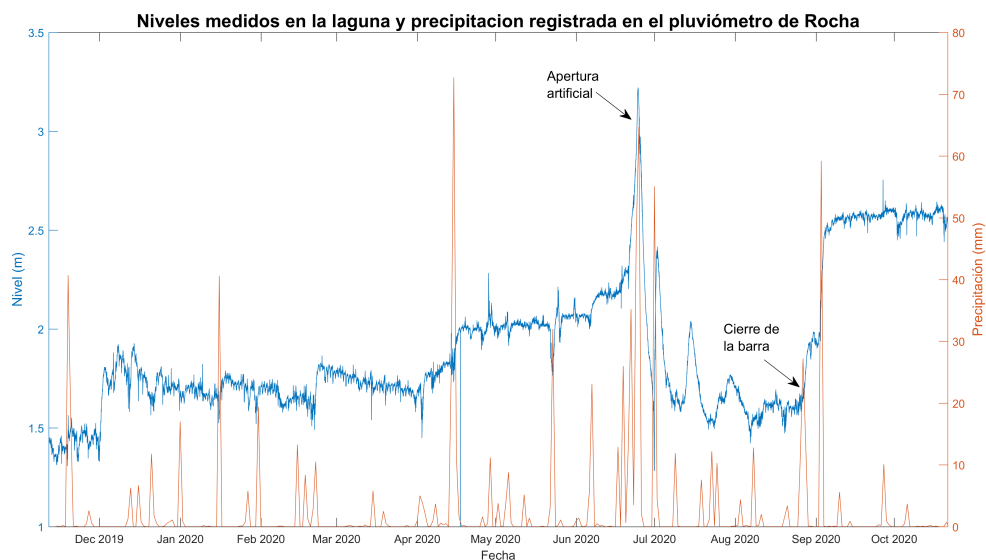


Figura 1.5: Niveles medido en la laguna en el período diciembre 2019 - noviembre 2020 y lluvias registradas en el pluviómetro de Rocha

1.2. Mediciones en el canal de conexión

En la campaña de medición durante la apertura realizada en julio 2018 se constató que la mayor evolución del canal se da en las 24 horas posteriores a la apertura (Teixeira, 2019). En abril de 2021 se realizó una campaña de medición durante la apertura artificial, donde se registró la evolución del canal las 36 h posteriores, con registros cada dos horas en el margen este del canal y durante las horas de luz en el caso del ancho total. Se observó que durante las horas nocturnas (entre 8 y 20 horas después de la apertura en este caso), el canal presenta un aumento en la velocidad de flujo hasta llegar a flujo supercrítico, con antidunas con una altura del orden de 1 m.

El registro de ancho y nivel se muestra en la figura 1.6. Se observa que en las 8 horas posteriores a la apertura la evolución es lenta; pasado este tiempo comienza a darse un rápido aumento del ancho hasta las 24 horas después de la apertura, donde vuelve a decrecer. Respecto al nivel se puede observar que el mismo disminuye cada vez más rápido, presentando un salto cuando el

canal alcanza los 100 m de ancho y estabilizándose cuando llega a 1.5 m. En la figura 1.7 se muestra la evolución en planta del canal obtenida a partir de imágenes georeferenciadas tomadas con un dron. En la figura 1.8 se muestra una foto del canal de conexión entre la laguna y el océano 20 horas después de la apertura.

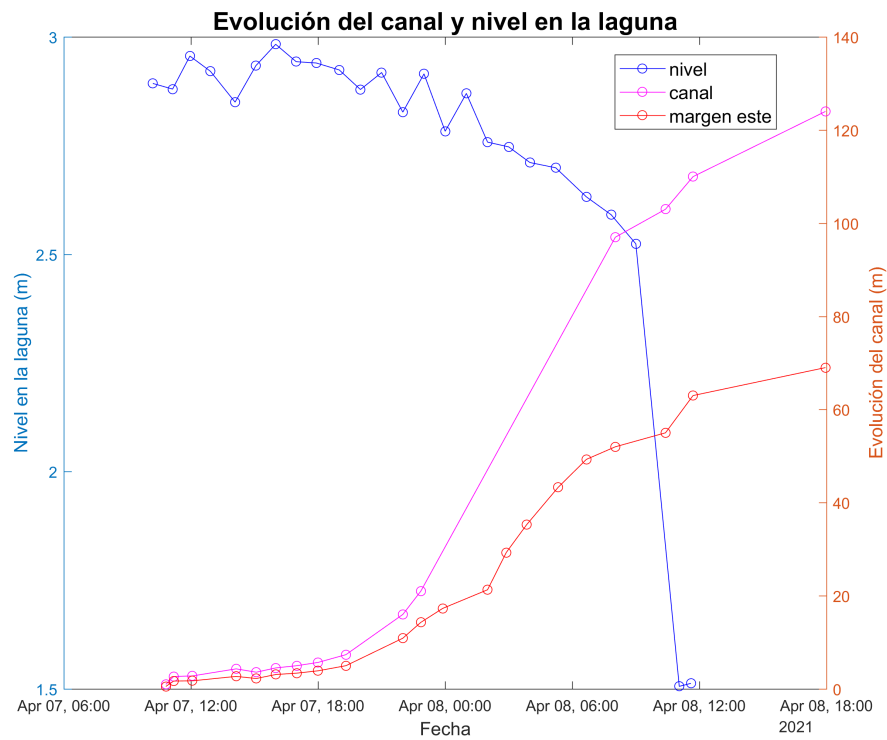


Figura 1.6: Evolución del ancho total del canal, de la margen este respecto al centro del canal y del nivel durante una apertura artificial.

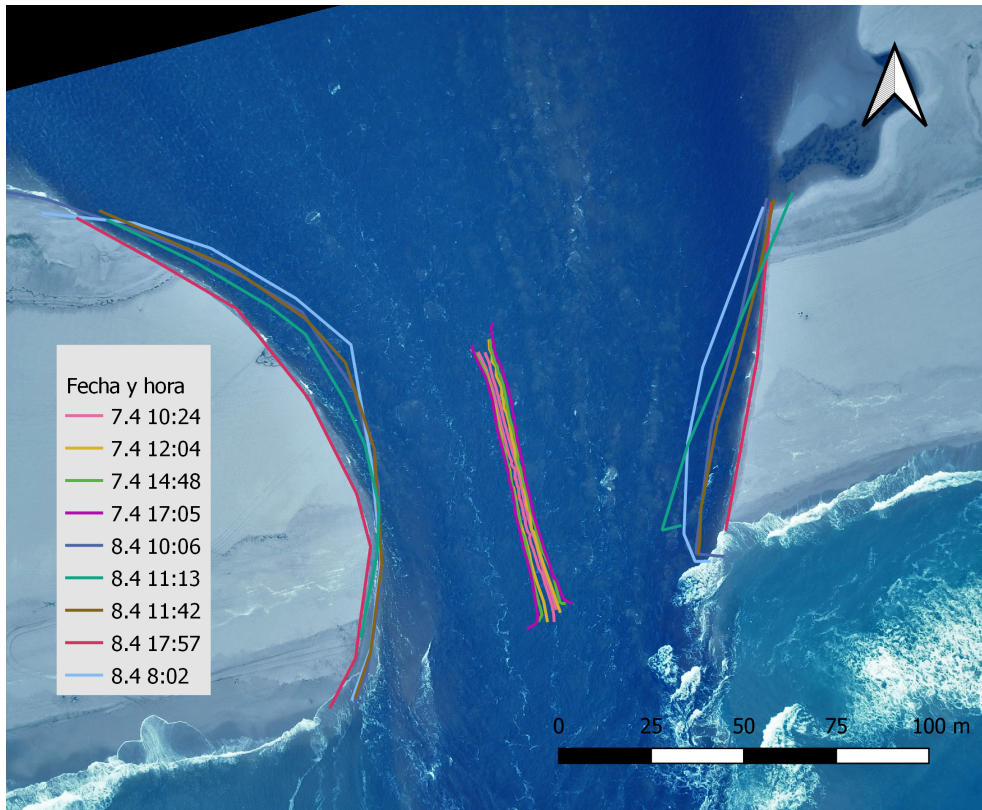


Figura 1.7: Evolución del canal en planta.



Figura 1.8: Canal de conexión entre la laguna y el océano 20 horas después de la apertura.

Anexo 2

Pseudocódigo del modelo implementado

El modelo requiere de un importante número de parámetros y variables de entrada, las cuales se definen previo a la aplicación del mismo. En la siguiente sección se definen los parámetros y variables de entrada, indicando la confianza en cada uno de ellos. Estas definiciones serán de utilidad para comprender los diagramas de flujo y pseudocódigo presentados posteriormente.

Definición de variables de entrada

Δt : intervalo de tiempo utilizado en el modelo Runge-Kutta. Este parámetro toma un valor arbitrario. En este caso se trabajó con 10 segundos y no se tuvieron problemas de estabilidad en el modelo.

L : longitud del canal que se forma entre la laguna y el mar. El rango de valores para los que se desarrolló el modelo van de 200m a 2000m. El canal que se forma entre la Laguna de Rocha y el mar presenta entre 150m y 300m, dependiendo de la ubicación de la apertura y el posterior desarrollo del canal.

N : número de Manning. Los valores típicos van entre 0.016 y 0.02.

M : Coeficiente de pérdida de carga. Incluye pérdidas de entrada y salida y donde el flujo se separa debido a cambios abruptos en la forma del plano o batimetría. Los valores típicos son entre 2 y 4.

α : relación entre el ancho y la profundidad del canal. Este valor se toma igual a 33 y fue estimado a partir de observaciones. Podría presentar variaciones en la etapa inicial de apertura.

$F = 0.015/8$: Coeficiente de rozamiento. El valor de F se redefine en cada paso del modelo en función de la profundidad del canal y el número de Manning.

$C_L = 7.5E - 5$: Coeficiente de transporte de sedimentos en la laguna; generalmente no es relevante, ya que durante la apertura otros procesos dominan el transporte y una vez abierta la laguna, si hay transporte desde el mar, éste será más relevante. Este comportamiento se ha visto durante las aperturas y cierres del canal.

$K = 1E - 5$: Coeficiente de transporte de sedimentos. Depende de las propiedades del sedimento. En este caso no se tiene conocimiento, por lo que se utiliza como un parámetro de ajuste.

$D_{50} = 0.5E - 3$: Diámetro medio nominal del sedimento

$S = 2650/1025$: Densidad relativa de los sedimentos.

$v_s = 1.15e - 6$: Velocidad de caída de los sedimentos

$$DAS = \left(g \frac{S-1}{v_s^2} \right)^{1/3} D_{50}$$

$F2 = \sqrt{g(S-1)D_{50} \left(\frac{0.3}{1+1.2DAS} \right) + 0.055(1 - \exp(-0.02 * DAS))}$: término para calcular la velocidad crítica de movimiento de los sedimentos

Δ_{berm} : Crecimiento de la berma de arena. Se considera un valor fijo, pero este parámetro podría tener una dependencia con el oleaje.

TOL : es la tolerancia que se le da a la diferencia de niveles para definir si la laguna está abierta o cerrada. Este parámetro es arbitrario.

h_{min} : Crecimiento máximo de la berma de arena. Este valor se toma de medidas con GPS realizadas en la zona con la barra cerrada.

AP : Nivel de apertura de la barra. Se considera un valor fijo basado en el protocolo de apertura y en las mediciones realizadas en los momentos previos a la apertura. Sin embargo este valor podría ser diferente para tiempos anteriores a la existencia del protocolo.

h_{ini} : Fondo inicial del canal.

SL_{Lini} : Nivel de agua inicial en la laguna.

$\Delta h_{apertura}$: Diferencia entre el nivel de la laguna y en nivel de fondo inicial del canal en metros.

$C_O(t)$: Coeficiente de transporte de sedimentos desde el mar calculado a partir del oleaje en la rotura.

n_{C_O} : Parámetro de calibración del coeficiente de transporte de sedimentos. En principio se considera igual a 1.5 en base al conocimiento de las costas que se tiene.

$\eta_O(t)$: Serie de nivel de mar medida en el puerto de La Paloma.

$Q(t)$: Serie de caudales de los arroyos, incluye precipitación sobre la laguna y

evaporación desde la misma.

VARIABLES DE SALIDA DEL MODELO

$\eta_L(t)$: Nivel en la laguna

$B(t)$: ancho del canal de apertura

$h(t)$: cota de fondo del canal de apertura

$A(t)$: Área transversal del canal

$Q_{CH}(t)$: Caudal que circula por el canal

$u(t)$: Velocidad en el canal

Pseudocódigo

```
1: Pseudocode Q_channel_coll is
2: Input:  $\eta_L, \eta_O, t, L, F, C_L, C_O, TOL, \Delta_{berm}, h_{min}, S, v_s, D_{50}, F_2$ 
3: Output:  $Q_{CH}$ 
   Definición de parámetros y variables
4: for  $t = CH_{NSTEPS}$  do
   Aplica Runge-Kutta para cada paso temporal
5:   for  $j = 1 : 4$  do
6:      $h = h(t)$  :profundidad del canal en el tiempo t en el paso 1
7:     if  $j > 1$  then
8:        $h = h(t) + k_h(j - 1)/C_{RK}(j)$  : prof del canal en tiempo t pasos
       2, 3 y 4 de RK
9:     end if
10:    if  $(\max(\eta_L, \eta_O) + h < TOL)$  then
       No pasa agua por el canal
11:       $u = 0$ 
12:       $k_h(j) = -\Delta_{berm}$ 
13:       $Q(t) = 0$ 
14:    else
15:      if  $(-h > \min(\eta_O, \eta_L))$  then
       Descarga como vertedero de cresta ancha
16:        if  $(\eta_L < \eta_O)$  then
       Vertedero a la laguna
17:           $Q(t) = 1.7B(\eta_O + h)^{1.5}$ 
18:           $\eta_m = \frac{2}{3}(\eta_O + h) - h$ 
19:           $u = -2.55\sqrt{\eta_O + h}$ 
20:        else if  $(\eta_L \geq \eta_O)$  then
       Vertedero al océano
```

```

21:           $Q(t) = 1.7B(\eta_L + h)^{1.5}$ 
22:           $\eta_m = \frac{2}{3}(\eta_L + h) - h$ 
23:           $u = -2.55\sqrt{\eta_L + h}$ 
24:      end if
25:      else
    Flujo en canal
26:           $\eta_m = \frac{\eta_L + \eta_O}{2}$ 
27:           $u^2 = \frac{(\eta_O - \eta_L)g}{L(2+\alpha)\frac{F}{\alpha(\eta_m+h)} + \frac{m}{2L}}$ 
28:           $u = \sqrt{abs(u^2)sgn(u^2)}$ 
29:           $Q(t) = \alpha u(\eta_m + h)^2$ 
30:      end if
    Transporte de sedimentos
31:           $u_c = 7F_2 \left( \frac{\eta_m + h}{D_{50}} \right)^{1/7}$ 
32:      if ( $abs(u) > u_c$ ) then
    Hay transporte de sedimentos
33:           $C = k \left( \left( \frac{u}{u_c} \right)^2 - 1 \right)$ 
34:      else
35:           $C = 0$ 
36:      end if
37:      if ( $u > 0$ ) then
38:           $\Delta C = C - C_O$ 
39:      else
40:           $\Delta C = C_L - C$ 
41:      end if
42:           $k_h(j) = \frac{(\eta_m + h)u\Delta C}{L}$ 
43:      end if
44:  end for
    Calcula variables en  $t + dt$ 
45:       $h(t + dt) = h(t) + \frac{(k_h \text{ coef}_k)dt}{6}$ 
    Verificación berma
46:       $h(t + dt) = max(y_{max}, h(t + dt))$ 
    Verifica política de apertura
47:      if ( $\eta_L > \eta_{L,max}$ ) & ( $-h(t + dt) > \eta_L$ ) then
48:           $h(t + dt) = -\eta_L + \Delta h_{apertura}$ 
49:      end if

```

Actualiza la superficie de la laguna con curva empírica

```
50:   if ( $\eta_L > 0$ ) then  
51:        $A_L = 9.6e3\eta_L^4 + 2.5e4\eta_L^3 - 5.2e5\eta_L^2 + 1e7\eta_L + 9e7$   
52:   else  
53:        $A_L = -1e8\eta_L^4 - 2e8\eta_L^3 - 2e8\eta_L^2 + 6e7\eta_L + 9e7$   
54:   end if  
55: end for
```

Anexo 3

Sensibilidad de los resultados a los parámetros del modelo hidro-morfodinámico simplificado

En el presente capítulo se detalla el análisis de sensibilidad del nivel en la laguna y geometría y velocidad en el canal a los parámetros del modelo hidro-morfodinámico simplificado durante el período abril a setiembre 2020, que incluye una apertura artificial.

En una primera instancia se realiza un análisis de sensibilidad para cada uno de los parámetros, posteriormente se seleccionan los parámetros de calibración y finalmente se calibran los mismos y se define el valor del resto de los parámetros, indicando el criterio utilizado en cada caso.

3.1. Análisis de sensibilidad

El modelo hidro-morfodinámico simplificado implementado cuenta con un elevado número de parámetros a calibrar y se cuenta únicamente con una serie de niveles medidas de forma continua durante una apertura artificial y datos orientativos de geometría y velocidades en el canal, ya que las mediciones fueron realizadas en una apertura distinta.

Se varió cada uno de los parámetros de forma individual dentro de un rango recomendado o en torno al valor utilizado en Hinwood et al. (2012) en los casos

que no se encontraron recomendaciones. Los parámetros estudiados fueron: la longitud del canal (L), el número de manning (n), el coeficiente de pérdida localizada a la salida y entrada del canal (m), la relación entre el ancho y la profundidad del canal (α), un coeficiente aplicado a la tasa de transporte por acción del oleaje (nC_O), el coeficiente de transporte (k), la tasa de crecimiento de la berma de arena (Δ_{berm}), y la tolerancia que se le da a la profundidad del canal para definir que deja de pasar agua (TOL).

3.1.1. Sensibilidad a la longitud del canal

La longitud del canal (L) se varió entre 100 m y 400 m, de forma de cubrir el rango de longitudes histórico observado en fotos satelitales. La figura 3.1 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de L ; se observa que la velocidad no presenta grandes diferencias en sus máximos, pero si en el momento en el que deja de circular caudal. En el nivel en la laguna, se observan diferencias del orden de 20 cm para L entre 100 m y 300 m, y una diferencia mayor a 1 m para $L = 400$ m respecto a las otras condiciones. En el caso del ancho del canal, un valor de $L = 100$ m provoca que se llegue a valores de más de 250 m, que no se alcanzan en la realidad.

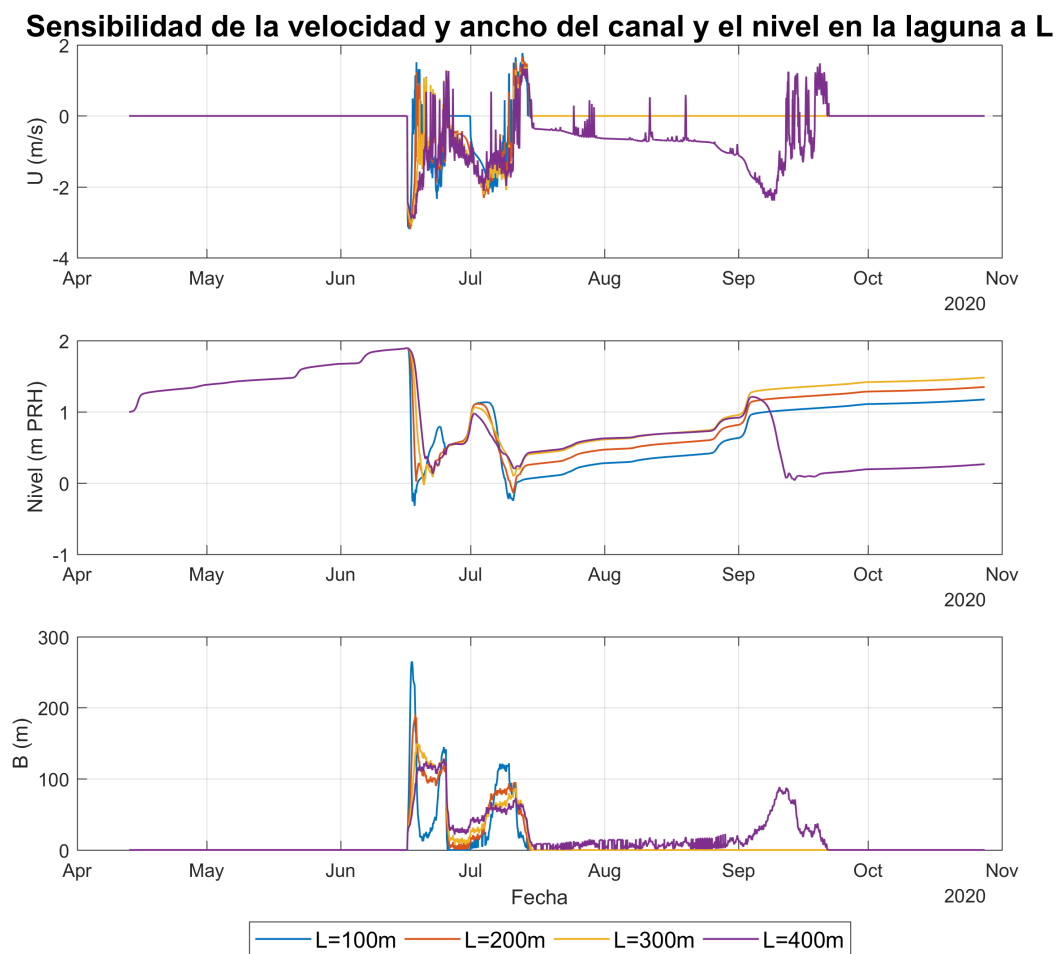


Figura 3.1: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de L .

3.1.2. Sensibilidad al número de manning

El número de manning (n) se varió entre 0.016 y 0.024, cubriendo los valores recomendados en Hinwood et al. (2012). La figura 3.2 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de n ; se observa que la velocidad no presenta grandes diferencias en sus máximos, pero sí en el momento que deja de circular caudal. El nivel en la laguna es similar después de la apertura, pero valores más altos de n provocan una nueva apertura, mientras que para los más bajos la laguna permanece cerrada. En el caso del ancho del canal, no se observan cambios significativos.

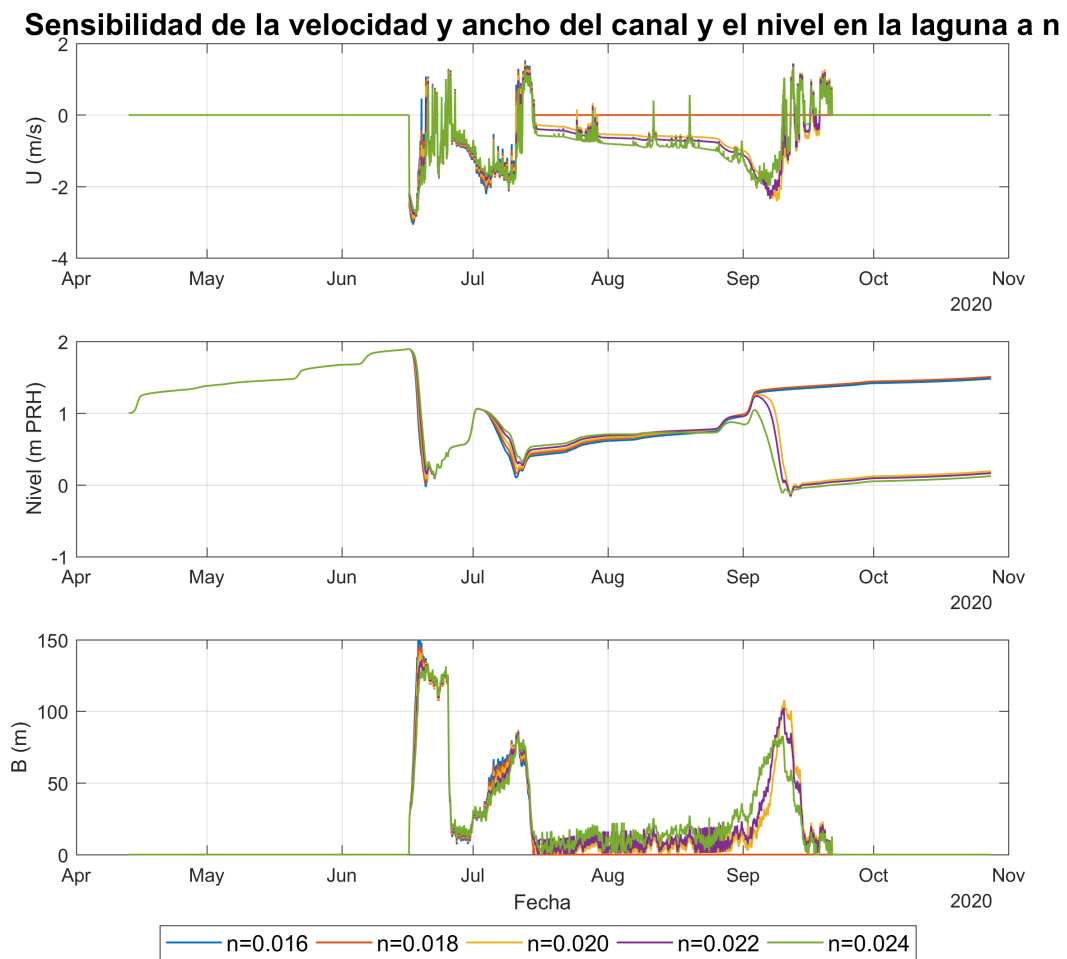


Figura 3.2: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de n .

3.1.3. Sensibilidad a la pérdida de carga localizada

La pérdida de carga localizada (m) se varió entre 2 y 4, rango típico de este parámetro (Hinwood et al. 2012). La figura 3.3 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de m ; se observa que la velocidad no presenta grandes diferencias en sus máximos, pero si en el momento que deja de circular caudal. Para los casos de $m = 2$ y $m = 3$ la laguna permanece más tiempo conectada al mar, mientras que con $m = 4$ se cierra en julio y no se vuelve a abrir en el período estudiado. En todos los casos los valores se mantienen dentro de un rango razonable.

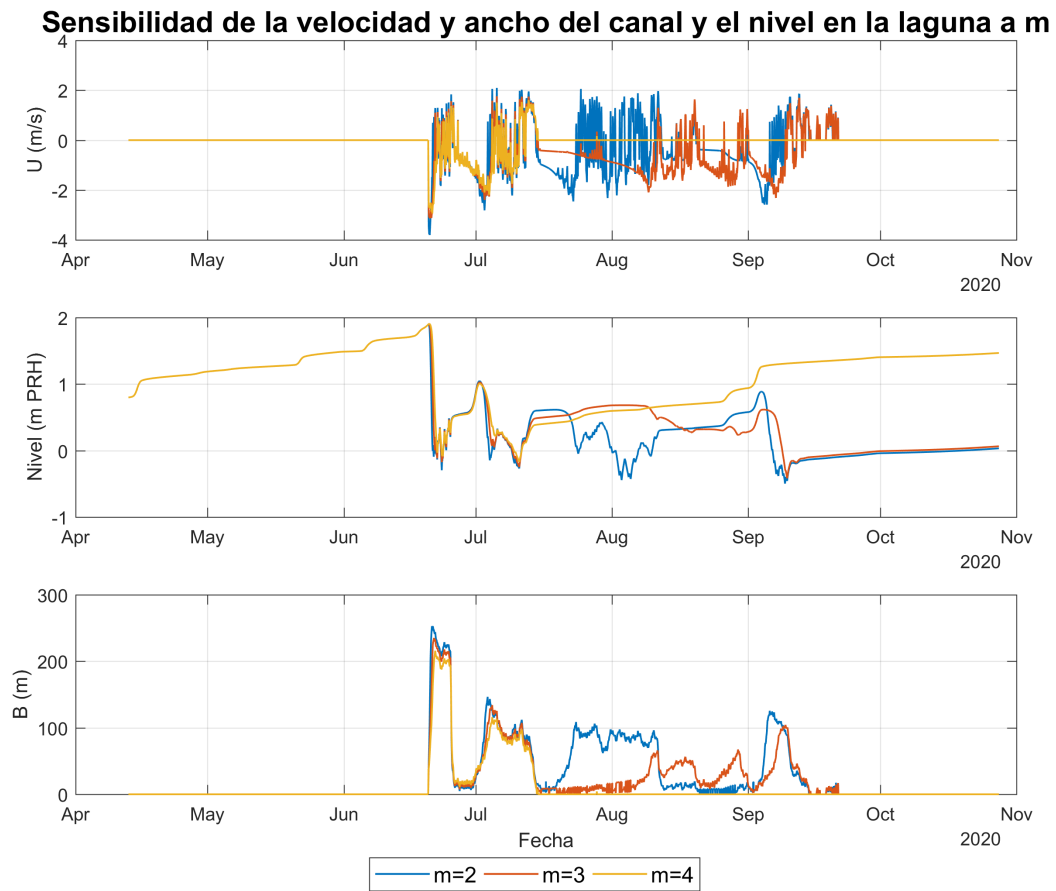


Figura 3.3: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de m .

3.1.4. Sensibilidad a la relación entre el ancho y la profundidad del canal

La relación entre el ancho y la profundidad del canal (α) se varió entre 20 y 45 (rango utilizado por Teixeira (2019) en base a los observado en campo). La figura 3.4 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de α ; se observa que las variaciones son poco significativas, excepto en el ancho máximo alcanzado luego de la primera apertura, que la variación en todo el rango es del orden de 100 m.

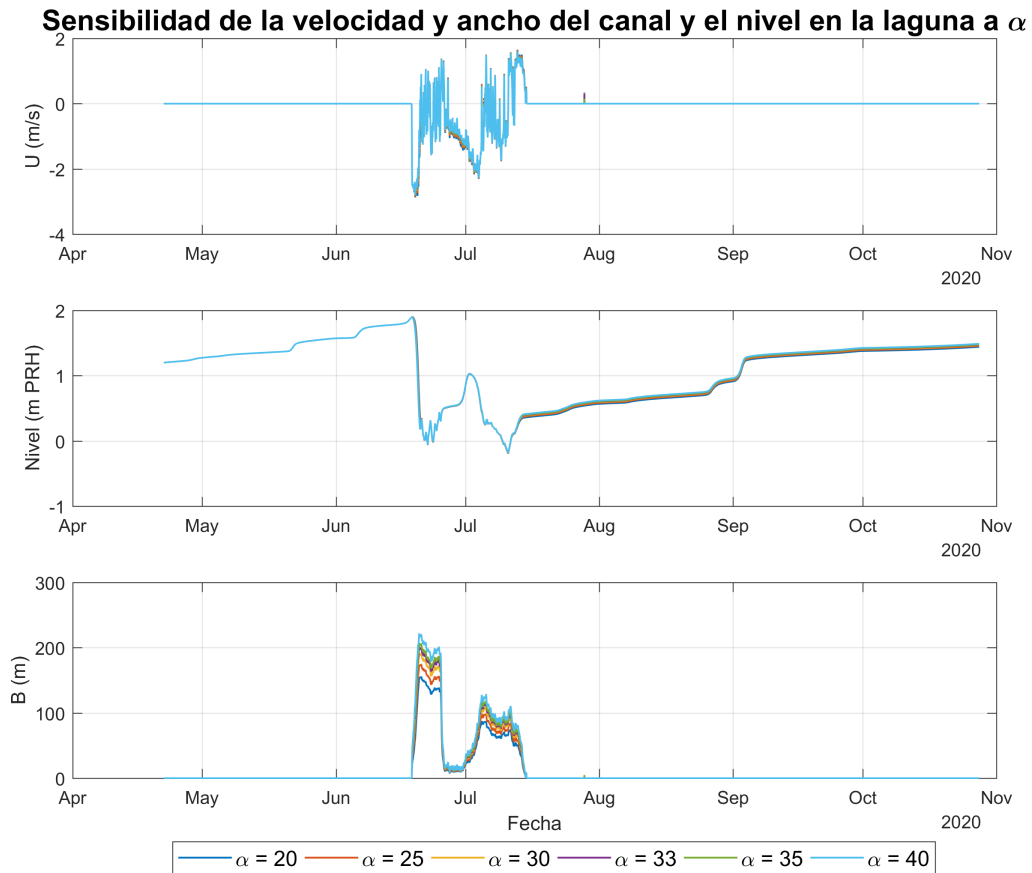


Figura 3.4: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de α .

3.1.5. Sensibilidad al coeficiente de transporte de sedimentos

La concentración de sedimentos en el océano (C_O) se determinó a partir del hindcast de oleaje local de Alonso et al. (2018) y la fórmula de transporte de sedimentos del CERC (Mil-Homens et al. 2013) como se describe en el capítulo 2; se define el coeficiente n_{C_O} por que se multiplica dicha tasa. n_{C_O} se varió entre 0.5 y 3. La figura 3.5 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de n_{C_O} ; se observa que este parámetro tiene una gran influencia en la definición del cierre del canal y si se producen o no nuevas aperturas.

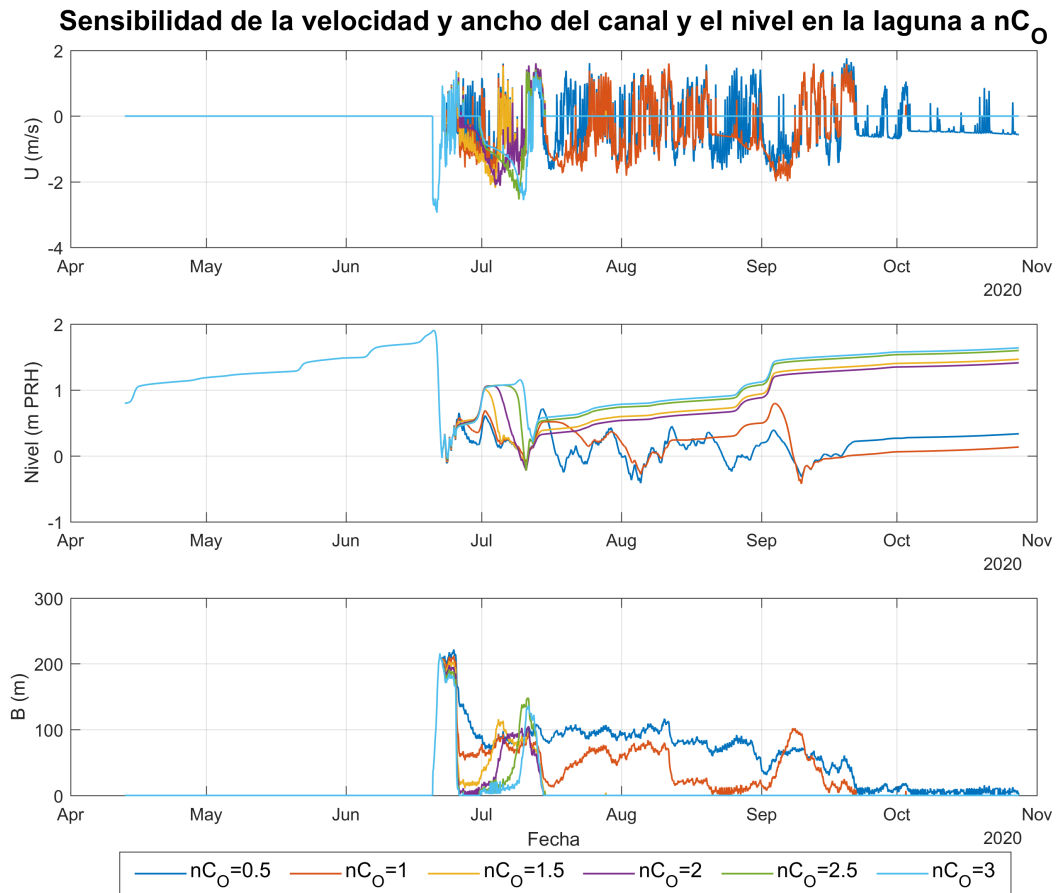


Figura 3.5: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de nC_O .

3.1.6. Sensibilidad a la tasa de transporte de sedimentos

La tasa de transporte de sedimentos (k) se varió entre $1e - 5$ y $1e - 3$. La figura 3.6 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de k ; lo primero que se observó el modelo se desestabiliza para valores de k mayores a $5e - 4$. Para los valores entre $k = 5e - 5$ y $k = 1e - 4$ los valores de velocidad y nivel se mantienen dentro del rango razonables, pero los valores de ancho del canal son mayores a lo esperado. Para el valor de $k = 1e - 5$ los anchos determinados se encuentran dentro del rango esperable

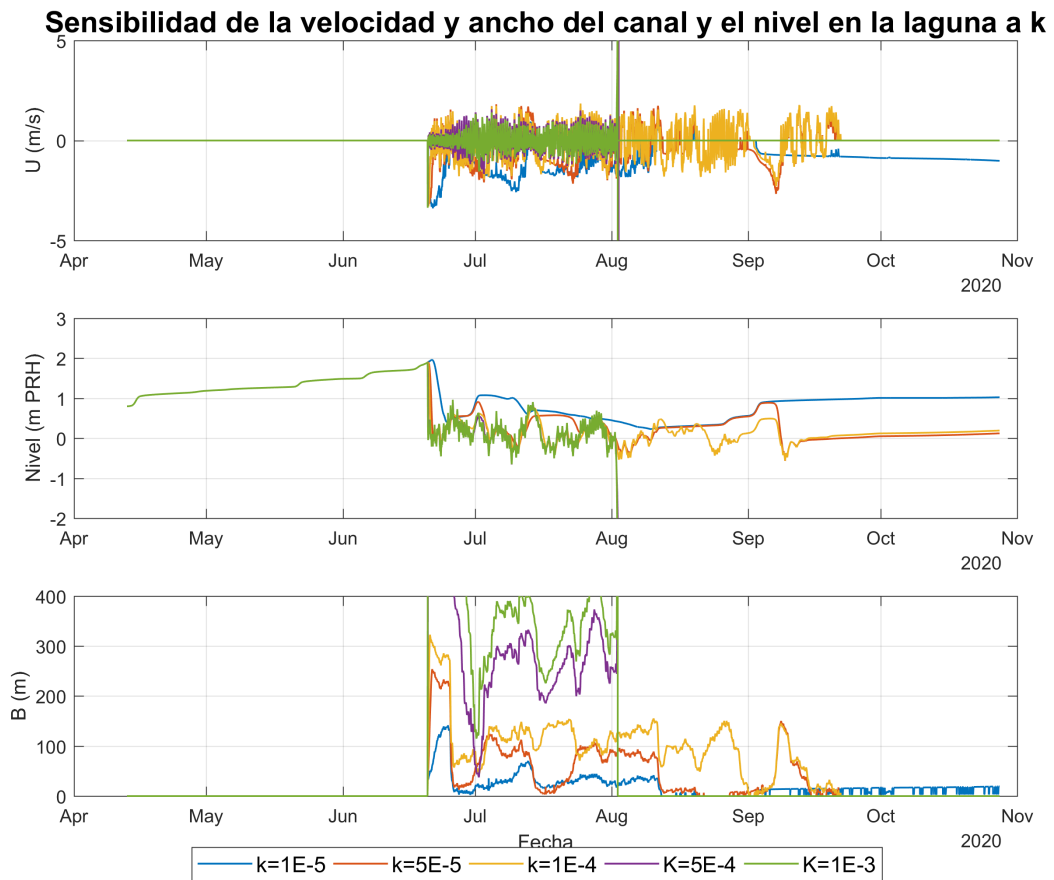


Figura 3.6: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de k .

3.1.7. Sensibilidad a la tasa de crecimiento de la berma

La tasa de crecimiento de la berma de arena (Δ_{berm}) se varió entre 1 y 10 m/año. La figura 3.7 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna junto con la cota de fondo del canal y el ancho del canal a distintos valores de Δ_{berm} ; este parámetro influye en si se vuelve a dar una apertura o no luego del cierre del canal. Se observó que para los valores de 6 m/año a 9 m/año el canal no se vuelve a abrir después del cierre, mientras que para 0.5 m/año y 3 m/año se abre nuevamente.

Sensibilidad de la velocidad y ancho del canal y el nivel en la laguna a Δ_{berm}

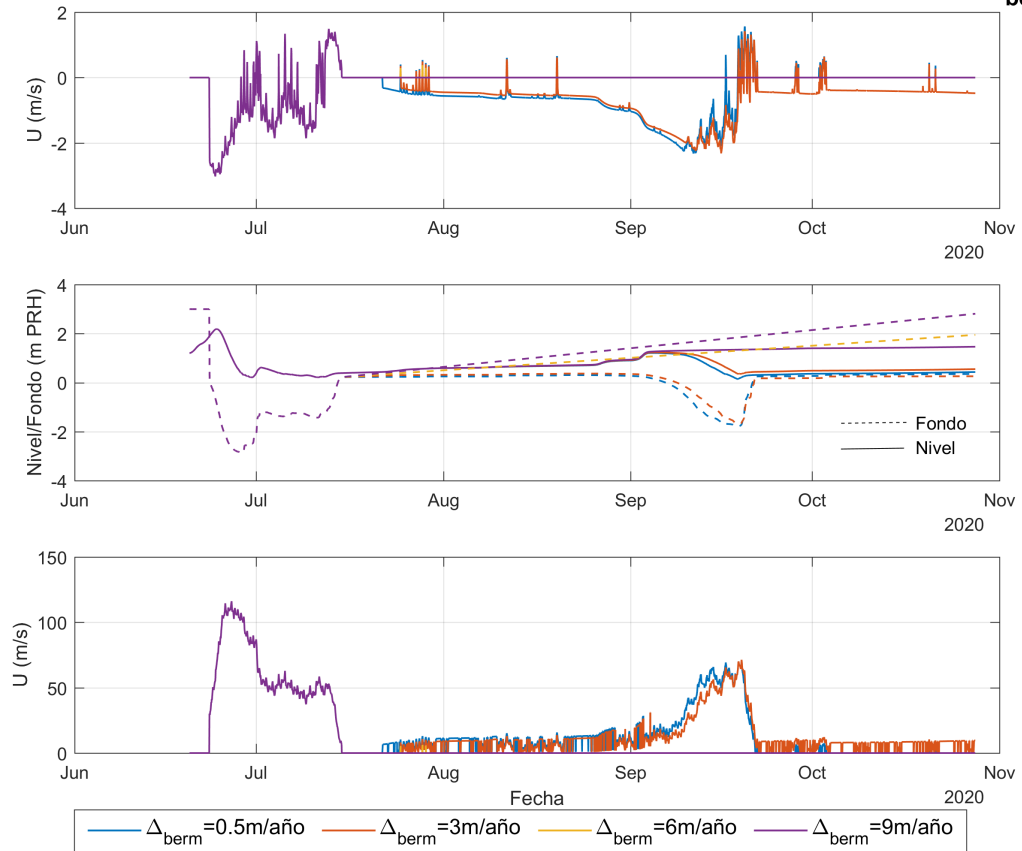


Figura 3.7: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de Δ_{berm} .

3.1.8. Sensibilidad a la tolerancia para el cierre del canal

La tolerancia TOL es la profundidad de la lámina de agua en el canal a partir de la cual se considera que no hay flujo. Este parámetro se varió entre 0.05 m y 0.4 m. La figura 3.8 muestra la sensibilidad de la velocidad en el canal, el nivel en la laguna y el ancho del canal a distintos valores de TOL ; se observa que para una tolerancia de $TOL = 0.05$ m la apertura se adelanta más de 15 días respecto a los otros valores considerados. El valor de tolerancia $TOL = 0.1$ m muestra que en setiembre comienza a circular agua a través del canal, aunque el ancho del mismo se mantiene acotado y no hay una diferencia en los niveles. Los valores de 0.2 m a 0.4 m prácticamente no muestran diferencias en los resultados para la apertura estudiada.

Sensibilidad de la velocidad y ancho del canal y el nivel en la laguna a TOL

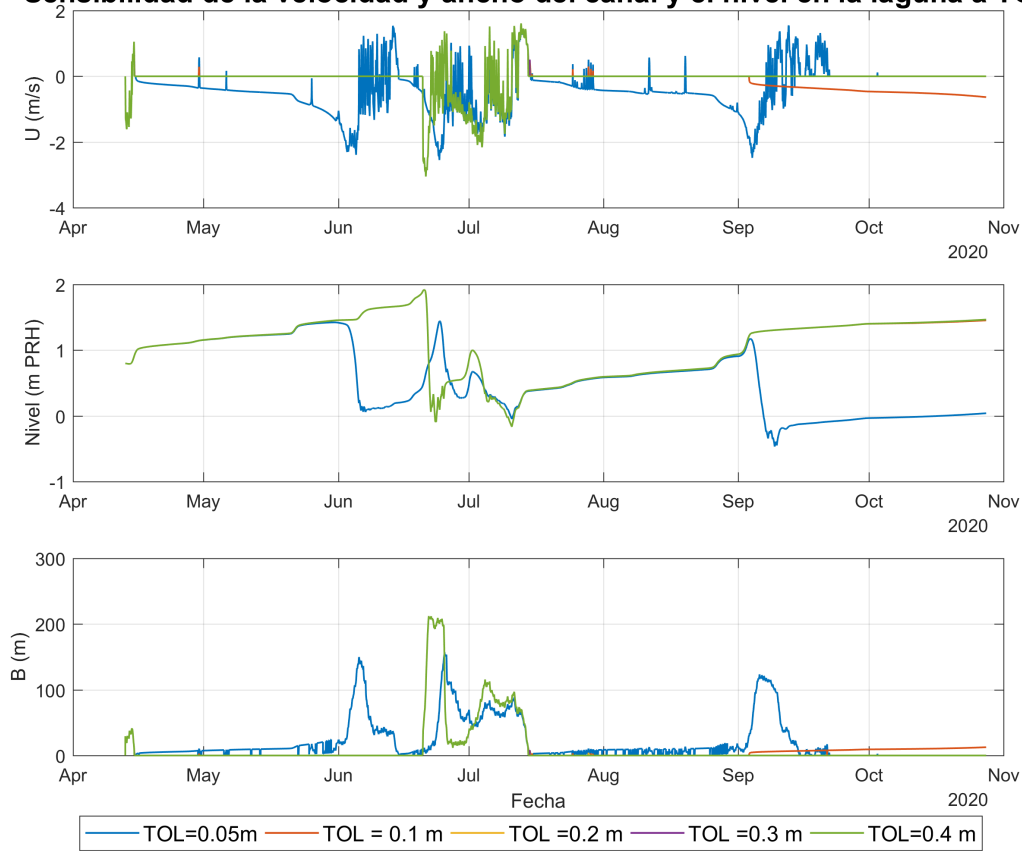


Figura 3.8: Sensibilidad de la velocidad en el canal (arriba), el nivel en la laguna (centro) y el ancho del canal (abajo) para distintos valores de TOL .

3.2. Selección de parámetros para calibrar

El análisis de sensibilidad dejó en evidencia la importancia de la elección del valor de la tasa arrastre de sedimentos k . Por otra parte, los parámetros n_{Co} , Δ_{berm} y m presentan variaciones similares en los resultados, y L , n y α son los que presentan menores variaciones.

Los valores de $L = 300$ m, $m = 4$, $n = 0.016$, $\alpha = 33$ y $n_{Co} = 1.5$ provienen del análisis de sensibilidad del área del canal para condiciones medias realizado por Teixeira (2019). En el presente análisis se verificó que los parámetros asociados a la pérdida de carga (L , m y n), tienen un efecto importante en el momento de la apertura y la existencia de una reapertura del canal, mientras que el parámetro α tiene poco efecto en los resultados.

En el caso de la tolerancia para el cierre de la laguna TOL se descartó el

valor de 0.05 m ya que en el modelo provoca una apertura anticipada, mientras que con el resto de los valores considerados en este análisis esto no sucede. Finalmente se seleccionó $TOL = 0.2$ m.

El parámetro k se calibró comparando el nivel en la laguna medido y modelado, y verificando que el ancho y la velocidad del canal se encontraran dentro de lo esperable, el calibrado es $k = 2e - 5$. El coeficiente aplicado a la concentración de sedimentos en el océano n_{Co} se calibró comparando el momento en que se da el cierre de la barra en la realidad y en el modelo, obteniendo un valor $n_{Co} = 1.5$. El crecimiento de la berma Δ_{berm} se calibró para que no ocurra una segunda apertura en setiembre 2020, ya que en la realidad el canal no se volvió a abrir una vez que se cerró, el valor es $\Delta_{berm} = 6$ m/año.

3.3. Discusión

El modelo hidro-morfodinámico simplificado presenta un elevado número de parámetros a calibrar, y en su mayoría, tienen un efecto importante en los resultados, mientras que se cuenta con único período de apertura medido para su calibración, lo que puede ser una limitante.

Otra de las limitaciones del método de calibración aplicado es que los parámetros son analizados de forma individual; una variación simultánea de los parámetros podría dar lugar a que se obtenga un resultado similar en los niveles en la laguna y geometría y velocidad en el canal para un nuevo conjunto de valores de calibración.