



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA INSTALACIÓN DE UN DIQUE EN EL
ESTUARIO DEL RÍO MAIPO POR MEDIO DE MODELACIÓN
NUMÉRICA EN TELEMAR-3D**

Memoria de Título presentada por

Pablo Severin Díaz

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

y el grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesores Guía
Raúl Flores Audibert
Karina Soto Rivas

OCTUBRE, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis del efecto de la instalación de un dique en el estuario del río Maipo por medio de modelación numérica en TELEMAT-3D

Nombre del candidato(a): Pablo Severin Díaz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil / Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Campus: Casa Central

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Flores Audibert, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente
DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27-10-2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27-10-2025

Firma:



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA INSTALACIÓN DE UN DIQUE EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO POR MEDIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA EN TELEMAT-3D

AUTOR:

Pablo Severin Díaz

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL y grado de MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Profesor Guía: Raúl Flores Audibert.....

Nombre Miembro 1 Comisión: Karina Soto Rivas.....

Nombre Miembro 2 Comisión: Maricarmen Guerra Paris.....

Valparaíso, Chile, 27 de octubre de 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, mi mamá, mi papá, mi hermano y mis abuelos, por apoyarme en todo a lo largo de mi vida. A Catalina por acompañarme durante ya más de un año, por los momentos que hemos pasado juntos, y por estar conmigo en los instantes de mayor estrés. Y a mis amigos, por siempre estar para conversar y descansar.

Agradezco también a los profesores Raúl Flores y Karina Soto, que me apoyaron durante esta investigación, y estuvieron siempre dispuestos a ayudar con mis dudas.

Finalmente, quiero agradecer a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) que aportó financiamiento a esta investigación por medio del proyecto FONDECYT N°1231494 y a la Universidad Técnica Federico Santa María por las diversas becas a las que me permitió acceder durante el desarrollo de mis estudios, sin las cuales no hubiese podido desarrollar todas mis capacidades.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Problema de Investigación	6
1.2. Objetivos	7
1.2.1. Objetivo general	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
2. Marco Teórico	8
2.1. TELEMAC-3D	8
2.1.1. Ecuaciones	8
3. Metodología	11
3.1. Descripción del área de estudio	11
3.2. Campañas de terreno	12
3.2.1. Septiembre de 2021	12
3.2.2. Enero de 2022	13
3.2.3. Octubre de 2022	13
3.3. Modelo en TELEMAC-3D	14
3.3.1. Dimensiones de la malla	14
3.3.2. Descripción de la malla 2D	15
3.3.3. Inclusión del dique	16
3.3.4. Condiciones iniciales y de borde	17
3.3.5. Configuración del modelo	18
3.3.6. Validación del modelo	18

3.4. Análisis de los flujos de salinidad a partir de los resultados del modelo	19
4. Resultados	20
4.1. Validación del modelo	20
4.2. Resultados del modelo	21
4.2.1. Estratificación y perfiles de salinidad	21
4.2.2. Intrusión	22
4.2.3. Flujo de salinidad	23
4.2.4. Distorsión de la marea	24
5. Discusión	26
5.1. Análisis de resultados del modelo	26
5.1.1. Estratificación y perfiles de salinidad	26
5.1.2. Intrusión	27
5.1.3. Flujos de Salinidad	28
5.1.4. Distorsión de la marea	29
6. Conclusión	30
7. Anexos	33
7.1. Perfiles de salinidad media, mínima y máxima	34

Índice de figuras

3.1. Cuenca y cauces del río Maipo	12
3.2. Batimetría del modelo en TELEMAC-3D	15
3.3. Malla 2D del modelo en TELEMAC-3D	15
3.4. Detalle de la zona del dique de la malla 2D del modelo en TELEMAC-3D	16
3.5. Perfiles transversales de los diques simulados	16
3.6. Serie de tiempo de marea	18
4.1. Validación del modelo	21
4.2. Clasificación de la estratificación de acuerdo a Geyer y MacCready (2014), para los distintos casos de estudio	22
4.3. Diagramas de caja para la intrusión salina	23
4.4. Flujos de salinidad normalizados para el rango mareal de 1.44 metros.	23
4.5. Flujos de salinidad normalizados para el rango mareal de 0.36 metros.	24
4.6. Comparación de duración media de fases de llenante y vaciante	25
7.1. Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $12\text{m}^3/\text{s}$, aguas abajo del dique	34
7.2. Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $12\text{m}^3/\text{s}$, aguas arriba del dique	35
7.3. Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $4\text{m}^3/\text{s}$, aguas abajo del dique	36
7.4. Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $4\text{m}^3/\text{s}$, aguas arriba del dique	37

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA INSTALACIÓN DE UN DIQUE EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO POR MEDIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA EN TELEMAC-3D

Pablo Severin¹, Raúl Flores¹, Karina Soto¹
1 Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este estudio evalúa el impacto de la instalación de un dique en un estuario de pequeña escala con el objetivo de reducir la salinidad durante periodos de sequía, utilizando el modelo hidrodinámico TELEMAC-3D. Se simularon distintas configuraciones de dique y se compararon sus efectos entre sí y respecto de un escenario de referencia sin dique. Los resultados muestran que los diques con una abertura central, para permitir el paso del flujo, son más efectivos que aquellos que operan únicamente mediante sobrepaso. Asimismo, se observó que la reducción del ancho de la abertura incrementa la disminución de la salinidad aguas arriba, aunque con un aumento de las velocidades en las inmediaciones del dique, además de producir una mayor retención de salinidad en la cercanía del dique. Adicionalmente, se identificó que la presencia del dique modifica la dinámica aguas abajo, favoreciendo una mayor estratificación, especialmente bajo condiciones de caudal reducido. Los resultados muestran también que los diques producen distorsión en la marea, reduciendo la duración de la fase llenante e incrementando la de la fase vaciante. En términos generales, los resultados indican que los diques cumplen su función principal de disminuir la salinidad aguas arriba. Sin embargo, este beneficio tiene como contrapartida un incremento en la estratificación aguas abajo, lo que podría reducir los procesos de mezcla y potencialmente generar alteraciones ecológicas en el estuario. Su efectividad es mayor en condiciones de bajo caudal, posicionándolos como una herramienta viable para mitigar la intrusión salina durante eventos de sequía prolongada, aunque con posibles impactos secundarios que deben considerarse en su evaluación ambiental.

Palabras claves: *Estuario, Salinidad, Intrusión, Estratificación, Dique, Modelación Numérica, TELEMAC-3D.*

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problema de Investigación

La circulación en un estuario es uno de los principales factores que determinan el intercambio de material entre el río y el océano (Ralston et al., 2012; Schettini et al., 2017). El comportamiento de la circulación estuarina puede cambiar debido a intervenciones en la cuenca, por ejemplo, urbanizaciones, cambios en uso de suelo y deforestación, entre otros (Schettini et al., 2017), y por cambios en el clima que modifican la hidrología y los flujos que llegan al estuario (Clarke et al., 2017).

En Chile, existe un conocimiento limitado sobre los efectos que las intervenciones en las cuencas hidrográficas, cada vez más frecuentes, generan en el funcionamiento hidrodinámico de los estuarios y en sus ecosistemas asociados. Las condiciones de sequía persistentes durante la última década (Bobadilla et al., 2024), sumadas a la sobreexplotación de los recursos hídricos producto del otorgamiento de derechos de agua (Ricalde et al., 2022), han provocado serias dificultades en el abastecimiento de agua para consumo humano y actividades productivas. En comunidades costeras, la reducción del caudal fluvial que alcanza los estuarios intensifica la intrusión salina, afectando directamente las bocatomas utilizadas para el suministro de agua potable. En respuesta a esta problemática, en algunos sistemas, como el río Maipo, se han implementado diques en el cauce con el objetivo de reducir la salinidad y mantener niveles hídricos adecuados para la operación de los sistemas de abastecimiento. Sin embargo, estas estructuras pueden alterar de manera significativa las condiciones hidráulicas aguas abajo y la disponibilidad de agua dulce en el estuario. Dada la relevancia ecológica y socioambiental de los sistemas estuarinos, resulta fundamental evaluar cómo la instalación de diques —con bloqueo parcial o total del flujo— modifica la circulación, la distribución de salinidad y el transporte de sedimentos, a fin de comprender sus implicancias en la dinámica estuarina y en la sustentabilidad de sus servicios ecosistémicos.

Diversos estudios han analizado los efectos hidrodinámicos asociados a la instalación de diques en estuarios de gran escala (Figuroa y Son, 2024; Figuroa, Son y Lee, 2022; Figuroa et al., 2020; Zhang et al., 2022). Mediante modelación numérica, Figuroa, Son y Lee (2022) evaluaron el efecto de una represa, caracterizada por el bloqueo completo del flujo y descargas periódicas controladas, identificando alteraciones significativas en la estratificación, los patrones de circulación, el transporte de sedimentos y los niveles de agua, incluyendo distorsiones en la propagación mareal. Estos efectos variaron en función de la localización del dique y de la frecuencia de descarga. En la misma línea, Hendrickx et al. (2024) emplearon modelación numérica para investigar un dique temporal de material granular, sumergido en el río Mississippi, implementado como

medida de mitigación frente a la intrusión salina durante periodos de sequía. Sus resultados mostraron que, si bien la cuña salina puede superar la estructura, el dique reduce el momentum mareal, atenuando la longitud de la intrusión salina. Asimismo, el incremento en la altura del dique mejora su efectividad, siendo este efecto más pronunciado para estructuras de menor altura, por debajo del 50 % de la profundidad del flujo. Si bien estos estudios aportan evidencia relevante sobre la influencia de los diques en la hidrodinámica estuarina, su enfoque ha estado centrado en sistemas de gran tamaño y caudal. Se desconoce aún la aplicabilidad de estas conclusiones en estuarios de menor escala y caudal, como los característicos de la costa de Chile, donde no se han desarrollado investigaciones equivalentes.

En esta investigación, que forma parte del proyecto Fondecyt N°1231494, se emplea el modelo hidrodinámico tridimensional TELEMAC 3D para analizar las implicancias de la instalación de diques en estuarios de pequeña escala y bajo flujo. Como caso de estudio se considera el estuario del río Maipo, representativo de los sistemas fluvio-estuarinos de bajo caudal característicos de la zona central de Chile. El objetivo es evaluar cómo la presencia de diques modifica la circulación, la estratificación y la intrusión salina en este tipo de estuarios, generando evidencia que permita avanzar en la comprensión de su comportamiento hidrodinámico y en la pertinencia de aplicar este tipo de medidas estructurales en sistemas hídricos vulnerables. Se propone la siguiente pregunta de investigación: “¿Cuál es el efecto de la construcción de diques sobre la hidrodinámica y la circulación de un estuario de pequeña escala y bajo flujo?”

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la salinidad y estratificación en un estuario de pequeña escala y bajo flujo, producto de la instalación de un dique en el cauce, mediante un modelo numérico basado en el estuario río Maipo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Generar un modelo numérico simplificado para representar la situación del estuario con y sin dique.
- Clasificar el estuario usando números adimensionales en términos de su estratificación, identificando posibles cambios de régimen por la presencia de dique.
- Caracterizar la salinidad y estratificación en el estuario en condiciones con y sin dique.
- Estudiar el efecto del dique en la circulación del estuario a partir de los resultados del modelo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. TELEMAC-3D

TELEMAC-3D (Galland et al., 1991) es un programa de modelación de mecánica de fluidos que resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y del momentum en las direcciones x , y y z sobre una malla no estructurada mediante el método de elementos finitos. Describe las velocidades en 3 dimensiones (U, V, W), la profundidad h (junto con la altura de la superficie libre S), en cada paso de tiempo. Además resuelve el transporte de trazadores, que se pueden separar en dos categorías, los llamados trazadores activos (principalmente temperatura y salinidad), que afectan la densidad del agua [...] y los trazadores pasivos, que no afectan el flujo, solamente son transportados (EDF, 2022). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en la representación de estuarios con intrusión salina, permitiendo reproducir altos gradientes de salinidad (e.g., Bitencourt et al., 2020; Isserty et al., 2022; Le Mouel et al., 2025).

La malla de TELEMAC-3D consiste en prismas triangulares, formados por la superposición de varias capas de una malla triangular 2D. La mayoría de variables se definen en los nodos de cada capa, haciendo por tanto que sean variables 3D, a excepción de aquellas que por su naturaleza son 2D, como la elevación del fondo.(EDF, 2022).

2.1.1. Ecuaciones

2.1.1.1. Navier-Stokes

TELEMAC-3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes considerando presión hidrostática o presión dinámica, siendo esta última la opción por defecto. El modelo considera las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta(U) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta(V) + F_y \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \Delta(W) + F_z \quad (2.4)$$

Donde:

- x, y, z : Componentes espaciales, siendo z la componente vertical, en m.
- t : Tiempo, en s.
- U : Componente de la velocidad en dirección x , en m/s.
- V : Componente de la velocidad en dirección y , en m/s.
- W : Componente de la velocidad en dirección z , en m/s.
- ρ : Densidad del agua, en kg/m^3 .
- p : Presión, en Pa.
- g : Aceleración de gravedad, en m/s^2 .
- ν : Viscosidad cinemática del agua, en m^2/s .
- F_x, F_y, F_z : Terminos asociados a otras fuerzas (Viento, Coriolis, Fricción de fondo, etc.), en m/s^2 .

La versión no hidrostática utiliza la ecuación 2.5 para separar la presión en su parte hidrostática y una componente dinámica.

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz + p_d \quad (2.5)$$

Donde:

- p_{atm} : Presión atmosférica, en Pa.
- ρ_0 : Densidad de referencia, en kg/m^3 .
- Z_s : Elevación de la superficie libre, en m.
- $\Delta \rho$: Variación de la densidad respecto a la densidad de referencia, en kg/m^3 .
- p_d : Presión dinámica, en Pa.

2.1.1.2. Transporte de trazadores

Para transporte de trazadores, como la salinidad, el modelo utiliza la ecuación 2.6:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2.6)$$

Donde:

- T : Cantidad de trazador, en su unidad correspondiente.
- ν_T : Difusividad del trazador, en m^2/s .
- Q : Aporte de fuentes o sumideros, en unidad correspondiente al trazador.

2.1.1.3. Ley de estado

Como se mencionó anteriormente, los trazadores incluidos en el modelo tienen la capacidad de influir en la densidad del agua, si se definen como trazadores activos. Cuando solo se considera el efecto de la temperatura y/o la salinidad, el modelo utiliza la ecuación 2.7:

$$\rho = \rho_{ref} \left[1 - \left(7 (T - T_{ref})^2 - 750S \right) \cdot 10^{-6} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

- ρ : Densidad del agua, en kg/m^3 .
- T_{ref} : Temperatura de referencia, 4°C .
- ρ_{ref} : Densidad de referencia, correspondiente a la densidad del agua a la temperatura de referencia, con salinidad igual a 0, con valor 999.972 kg/m^3 .
- S : Salinidad en g/L .

Capítulo 3

Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

Para la elaboración del modelo de este estudio, se replicaron características del estuario del río Maipo, considerado como representativo de los estuarios de la zona central de Chile. Sin embargo, esto no implica que el modelo elaborado corresponda específicamente al estuario del río Maipo, sino que se identificaron sus principales características y dimensiones para desarrollar un modelo simplificado. Esta aproximación permite contar con un modelo de carácter general, capaz de adaptarse al comportamiento típico de estuarios de esta zona, sin restringirse a representar exclusivamente un único estuario. El objetivo es identificar soluciones aplicables a un rango más amplio de condiciones, manteniendo las magnitudes en el orden de las observadas en estuario del río Maipo, con el fin de conservar la relevancia física del estudio.

El río Maipo está situado en la zona central de Chile, y recorre desde la Cordillera de los Andes (Los Nacimientos, aproximadamente 3135 m.s.n.m) hasta su desembocadura entre las ciudades de San Antonio y Santo Domingo, teniendo una longitud total aproximada de 250 km. Su cuenca tiene una superficie estimada de 15000 km², ocupando parte de las regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador Bernardo O'Higgins. Limita al norte con la cuenca del río Aconcagua y al sur con la del río Rapel (Niemeyer, 1980). En la Figura 3.1 se puede observar la ubicación de la cuenca, así como sus cauces.

El río Maipo posee un régimen mixto, presentando crecidas por lluvia en invierno y por derretimiento de nieve en verano y su estuario puede calificarse como micromareal, con un rango mareal entre 1.2 y 1.7m durante las campañas de terreno realizadas, y régimen principalmente semidiurno (Roco et al., 2024). En su desembocadura, forma un humedal costero de gran importancia ambiental, albergando una abundante diversidad biológica (Soto-Rivas et al., 2024). Tiene un ancho variable espacial y temporalmente, que oscila entre 90 y 120 metros y una profundidad entre 2 y 3 metros. El caudal medio mensual para octubre de 2022 fue estimado por Jusari (2024), con un valor de 12 m³/s, mientras que Soto-Rivas et al., 2024 determinó que el caudal mínimo registrado corresponde a 2 m³/s, y que el caudal ecológico es de 4 m³/s. Cerca de su desembocadura, es de gran importancia para las ciudades costeras de San Antonio y Santo Domingo, en las que destacan actividades económicas como la agricultura, y la pesca artesanal. Además, ambas ciudades requieren de suministro de agua potable, que obtienen principalmente desde el río. Debido a las condiciones de sequía de los últimos años, la planta de agua potable de Santo Domingo se ha visto enfrentada a un exceso de salinidad en su captación, planteando la instalación de un dique como solución temporal.

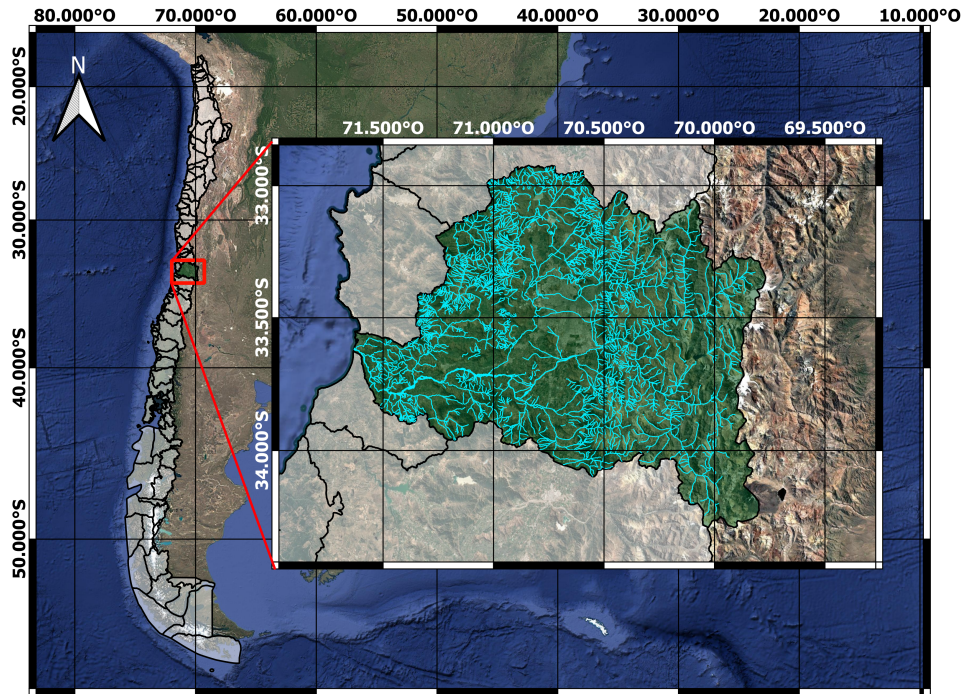


Figura 3.1: Cuenca y cauces del río Maipo. Elaborada a partir de foto satelital de Google y NASA (2025), mapa de cuencas de DGA (2024) y líneas de cauces de BCN (2018)

3.2. Campañas de terreno

3.2.1. Septiembre de 2021

Se realizó una campaña de medición de datos en el estuario del río Maipo entre el 4 y el 10 de septiembre de 2021. Cerca de la desembocadura se instalaron instrumentos en puntos fijos para medir salinidad, turbidez y presión, y, adicionalmente, se realizaron transectos con un ADCP para obtener mediciones de velocidad, así como mediciones puntuales con CTD y turbidímetro con el fin de tener perfiles verticales de salinidad y turbidez. Además, aproximadamente 2.5 km aguas arriba de la desembocadura se realizaron transectos con ADCP y perfiles puntuales con CTD y turbidímetro. Adicionalmente, a lo largo de la campaña se extrajeron muestras de agua cerca de los sensores de la desembocadura en distintos momentos y se realizaron vuelos de dron grabando vídeo.

A continuación, se presenta una descripción de los instrumentos antes mencionados:

- Zona de la desembocadura:
 - Arreglo 1, compuesto por un turbidímetro AQUAlogger310TY con un CTD YSI600LS cerca de la superficie y otro CTD YSI600LS cerca del fondo, amarrados a un ancla.
 - Sensor de presión HOBO en el fondo, cerca del Arreglo 1.

- CTD RBR-TU, utilizado para generar perfiles, se bajó y subió amarrado a una cuerda. El instrumento es CTD y turbidímetro lo que permite obtener perfiles tanto de salinidad como turbidez para un mismo lugar, al mismo tiempo.
- ADCP Teledyne RDI Stream Pro 2MHz para realizar transectos.
- Aguas arriba:
 - ADCP Teledyne Sentinel V20, montado en un kayak para los transectos. Adicionalmente, en el kayak se instaló un sonar Garmin ECHOMAP UHD 64cv
 - Castaway-CTD y turbidímetro AQUAlogger310TY amarrados juntos, utilizados durante los transectos para obtener perfiles verticales.

3.2.2. Enero de 2022

Nuevamente se llevó a cabo una campaña de medición de datos en el estuario del río Maipo desde el 17 hasta el 22 de enero. Se colocaron sensores en puntos fijos, algo más dispersos a lo largo del estuario que en la campaña anterior, y más cercanos a la curva. Se pueden separar principalmente en 3 zonas, la primera, más cercana al mar, incluyó instrumentos para medir salinidad y turbidez, luego, en la zona central se instalaron sensores para medir turbidez, salinidad y presión y finalmente aguas arriba se colocaron instrumentos para medir salinidad y presión. De la misma manera que en la campaña anterior, a lo largo de esta se midieron perfiles de salinidad y turbidez, se tomaron muestras de agua y se realizaron vuelos de dron.

A continuación, se presenta una descripción de los instrumentos antes mencionados:

- Tramo recto aguas abajo de la curva:
 - Arreglo 1, compuesto por un turbidímetro AQUAlogger310TY con un CTD YSI600LS cerca de la superficie y otro CTD YSI600LS cerca del fondo, amarrados a un ancla.
- Centro:
 - Arreglo 2, compuesto por un turbidímetro AQUAlogger310TY con un CTD YSI600LS cerca de la superficie y otro CTD YSI600LS cerca del fondo, amarrados a un ancla.
- Tramo recto aguas arriba de la curva:
 - Arreglo 3, compuesto por Open CTD cerca de la superficie y sensor de presión HOBO en el fondo
 - ADCP Teledyne Sentinel Workhorse, en la superficie

3.2.3. Octubre de 2022

En Octubre de 2022 se realizó la última campaña de medición asociada a esta investigación. Se colocaron sensores principalmente en 3 zonas. Cerca de la desembocadura se colocó un sensor de presión, en la curva central del estuario se colocaron sensores de salinidad y turbidez, y algo más aguas arriba en el estuario se instalaron instrumentos para medir salinidad junto con un ADCP. También, al igual que en las campañas anteriores, se midieron perfiles de salinidad y turbidez, además de tomar muestras de agua y realizar vuelos de dron.

A continuación, se presenta una descripción de los instrumentos antes mencionados:

- Tramo recto aguas abajo de la curva:
 - Sensor de presión RBR.
- Curva Central:
 - Arreglo 1, compuesto por un turbidímetro AQUAlogger310TY con un CTD YSI600LS cerca de la superficie y otro CTD YSI600LS, junto con un sensor de presión HOBO cerca del fondo, amarrados a un ancla.
- Tramo recto aguas arriba de la curva:
 - Arreglo 2, compuesto por CTD YSI600LS cerca de la superficie y un sensor de presión de bajo costo en el fondo.
 - ADCP Teledyne Sentinel Workhorse, en la superficie.

3.3. Modelo en TELEMAC-3D

3.3.1. Dimensiones de la malla

Se consideró un estuario recto, de 7423 metros de largo y 140 metros de ancho, cuya sección transversal corresponde a una parábola, de manera que la forma del fondo en el estuario está dado por la Ecuación 3.1:

$$Z_b = m \cdot x + 0.001y^2 - 2.5 \quad (3.1)$$

donde x es la coordenada longitudinal del estuario, cuyo origen se encuentra en la desembocadura; los valores positivos corresponden a aguas arriba del río, y los valores negativos, a aguas adentro del mar; y es la coordenada transversal del estuario, cuyo origen está en el centro del cauce; z_b es la coordenada vertical del fondo del estuario; m_0 es la pendiente del lecho en la dirección x .

Para el nivel medio del mar, el río tiene una profundidad máxima de 2.5 m en el centro y un ancho de 100 m, mientras que la pendiente del lecho es 0.0003. Estos valores se basan en las dimensiones principales del río Maipo en su desembocadura. Por otro lado, la batimetría del mar presenta una pendiente de 0.014 cerca de la costa, que disminuye a 0.0029 mar adentro, según mediciones batimétricas cercanas al río Maipo.

Para la unión entre el fondo del río y del mar, se optó por utilizar el valor mínimo entre el obtenido de las ecuaciones correspondientes a cada uno, obteniendo un canal que, al prolongarse hacia el mar, se vuelve cada vez menos profundo, como se puede observar en la Figura 3.2, que muestra la batimetría del modelo.

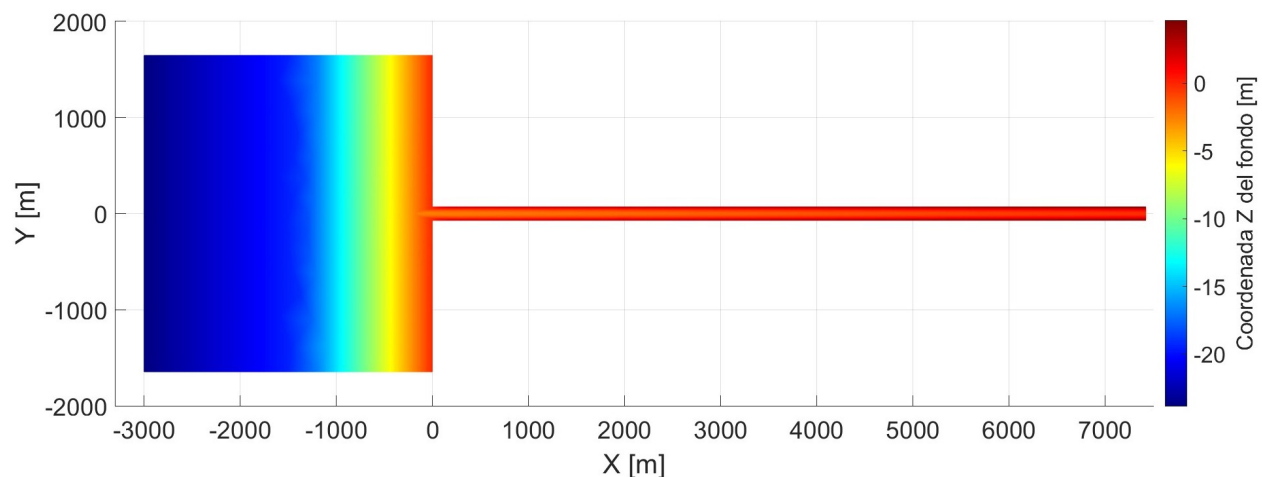


Figura 3.2: Batimetría del modelo en TELEMAC-3D

3.3.2. Descripción de la malla 2D

La malla computacional bidimensional está compuesta por 7866 nodos, con una resolución variable (ver Figura 3.3). Se asignó una mayor resolución en la zona del dique ($X=2000\text{m}$), con 3 metros, mientras que en el resto del estuario es de 14 metros, disminuyendo gradualmente en el mar hacia aguas afuera hasta alcanzar los 300 metros. En la dirección vertical, se utilizaron 9 capas equidistantes.

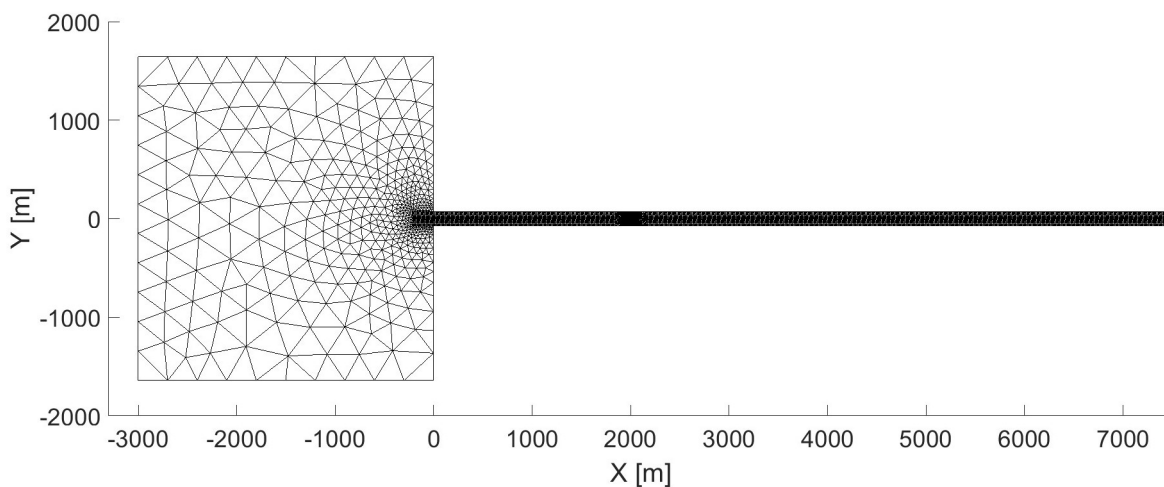


Figura 3.3: Malla 2D del modelo en TELEMAC-3D

En la Figura 3.4 se muestra un acercamiento a la zona del dique, donde se puede ver la malla más gruesa usada en la mayor parte del río, además de la malla refinada y la unión de ambas.

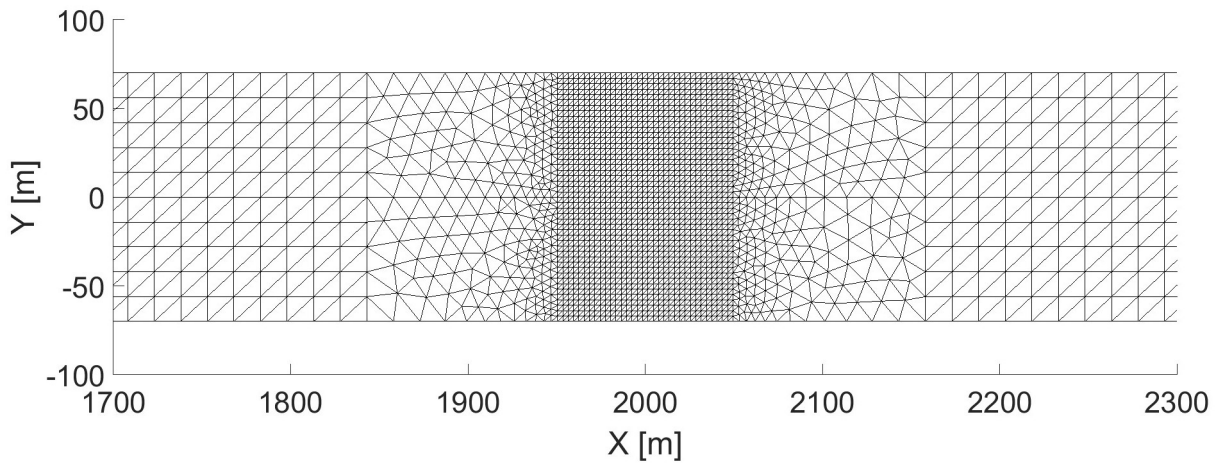


Figura 3.4: Detalle de la zona del dique de la malla 2D del modelo en TELEMAC-3D

3.3.3. Inclusión del dique

Con la intención de evaluar el efecto de instalar un dique, y también para comparar el desempeño de diferentes tipos de dique, se consideraron 6 casos con igual malla 2D, pero con distintas coordenadas Z para el fondo en la ubicación del dique, que se muestran en la Figura 3.5.

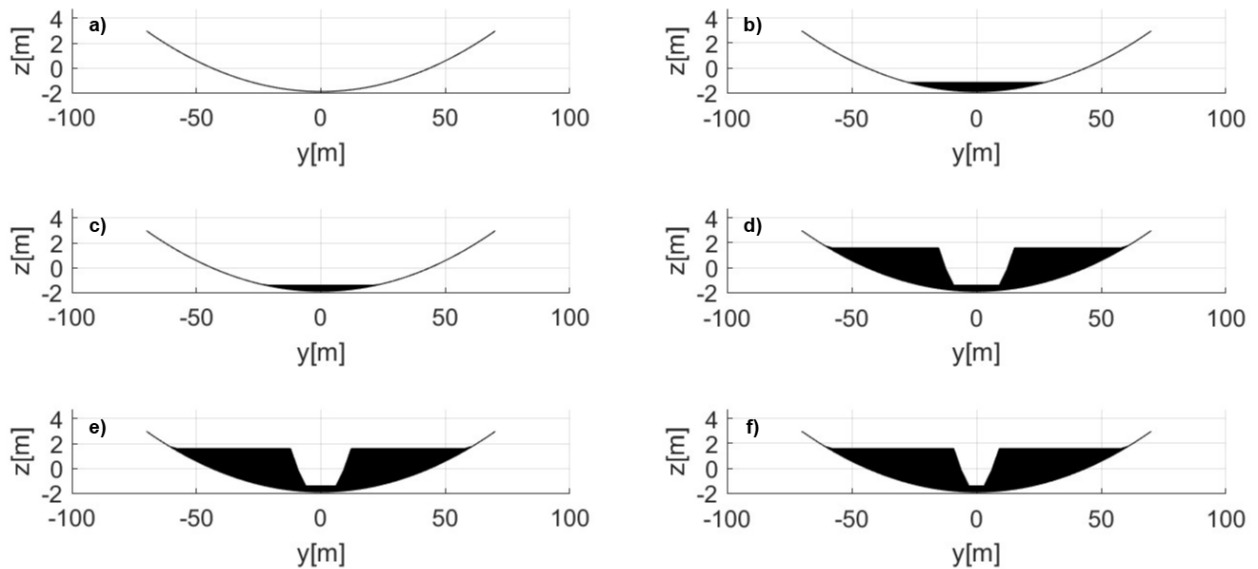


Figura 3.5: Perfiles transversales de los diques simulados, ubicados en $x = 2000$ m, donde $Z = 0$ corresponde al nivel medio del mar. a) Caso sin dique. b) Caso con un dique que permite el flujo por sobrepaso, con una altura de 0.75 m. c) Caso con un dique que permite el flujo por sobrepaso, con una altura de 0.5 m. d) Caso con un dique con abertura al centro, de forma trapezoidal de base 18 m. e) Caso con un dique con abertura al centro, de forma trapezoidal de base 12 m. f) Caso con un dique con abertura al centro, de forma trapezoidal de base 6 m.

A continuación, se describen los diques presentados en la Figura 3.5:

- Sin Dique (Figura 3.5a): Corresponde a la malla de la Figura 3.3, con la topografía de la Figura 3.2.

- Diques con sobrepaso: Estos corresponden a diques que bloquean el fondo de la sección, hasta una cierta altura, y que permiten el flujo por encima de esta. La intención es dificultar el flujo en la parte de la sección con mayor salinidad, debido a la diferencia de densidad. Se consideraron 2 alturas diferentes:
 - Dique de 0.75 metros de altura con sobrepaso (Figura 3.5b).
 - Dique de 0.5 metros de altura con sobrepaso (Figura 3.5c).
- Diques con Abertura al Centro: Estos corresponden a diques que también bloquean el fondo, como los con sobrepaso (en este caso, se optó que lo bloquearan hasta 0.5 [m]), pero que además bloquean la altura completa en los lados de la sección. Lo anterior se logró introduciendo taludes en los lados, de manera que la abertura es trapezoidal. La pendiente de los taludes corresponde al 50 % (dependiendo de los materiales de construcción, podría ser deseable utilizar taludes menores, lo que no está dentro del alcance de este estudio). Se consideraron 3 casos diferentes según la longitud del fondo del trapecio:
 - Dique con Abertura al Centro de 18 metros de ancho (Figura 3.5d).
 - Dique con Abertura al Centro de 12 metros de ancho (Figura 3.5e).
 - Dique con Abertura al Centro de 6 metros de ancho (Figura 3.5f).

Para la definición de los casos de estudio se presentaron limitaciones debidas al comportamiento del flujo y las características de TELEMAC-3D. Entre ellas, para los diques que permiten el flujo por sobrepaso, se consideró también un caso con altura de 1 m, pero para esa altura en las mareas más bajas el dique actuaba como vertedero, ya que la superficie del dique quedaba por encima del nivel de la marea, lo que no es deseable. Por otro lado, en los casos de abertura al centro, las dimensiones del dique estuvieron limitadas por el tamaño de la malla, de manera que para que el dique fuera simétrico, las aberturas debían tener anchos de múltiplos de 6 metros.

La implementación de los diques en el modelo se hizo por medio de la rutina FORTRAN de TELEMAC-3D `user_t3d_corfon.f`, que permite modificar el fondo de la malla 2D por medio de código, por lo que no fue necesario generar una nueva malla para cada caso, solamente indicar por medio del archivo FORTRAN las modificaciones deseadas.

3.3.4. Condiciones iniciales y de borde

Para el borde aguas arriba del río, se consideró una condición de altura libre y caudal constante. Cabe destacar que, en el caso del río Maipo, la estación fluviométrica más cercana al estuario se encuentra varios kilómetros aguas arriba, y la zona entre la estación y el estuario incluye captaciones de agua potable y para uso agrícola. Debido a lo anterior, se seleccionaron dos caudales. El primero, de 12 m³/s, fue medido durante una campaña realizada en octubre de 2022 por Jusari (2024). Por otro lado, se utilizó un caudal de 4 m³/s, correspondiente al caudal ecológico del río calculado por Soto-Rivas et al. (2024).

Para el borde del mar que no corresponde a playa (es decir, los bordes sur, oeste y norte), se consideró una condición de altura definida y flujo libre. El valor de la altura definida se varió de acuerdo a una serie de tiempo, para replicar la marea, que corresponde a la generada por Soto-Rivas et al. (2024) para el mismo estuario, que es de régimen semidiurno y con un rango máximo de 1.5 m aproximadamente, como se puede ver en la Figura 3.6. La altura inicial del modelo es de 1 m en todos los nodos

Para el mar se consideró una salinidad de 33.8 PSU, a partir de las mediciones realizadas en las campañas de terreno, y el modelo comienza con ese valor de salinidad en todos sus nodos.

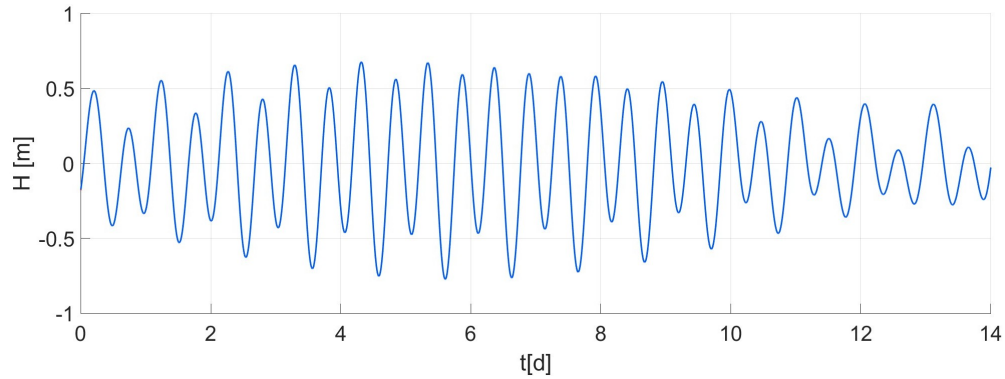


Figura 3.6: Serie de tiempo de marea utilizada en el modelo.

3.3.5. Configuración del modelo

Se eligió la opción no hidrostática para las ecuaciones de Navier-Stokes (que es la opción por defecto en TELEMAC-3D) y se utilizó un paso de tiempo de 0.3 s, que fue elegido para cumplir ampliamente la condición de convergencia de Courant-Friedrichs-Lewy (Courant et al., 1967). Se activó la opción para que la salinidad tenga efecto en la densidad del agua, de acuerdo a la ley de estado presentada en la ecuación 2.7.

Se eligió Manning como ley de fricción, asignando un coeficiente $n=0.05$, correspondiente a un valor para corrientes con algunos matorrales y piedras, niveles bajos y con pendientes poco eficientes de acuerdo a Chow (1959), además validado para el estuario del río Maipo por Soto-Rivas et al. (2024). También, se activó el término de Coriolis, con coeficiente de $8.076 \cdot 10^{-5}$, que corresponde a la latitud aproximada del estuario del río Maipo.

Para las planicies mareales, se seleccionó la opción que no considera los nodos secos para la resolución de las ecuaciones, definiendo que un nodo está seco si su profundidad de agua es menor a 1 cm. Esta elección se realizó como una opción deseable para evitar la influencia de los nodos secos en los gradientes, dado que sus valores solo se modifican cuando los nodos del elemento vuelven a mojarse. Para la turbulencia vertical se eligió el modelo $k-\epsilon$ (Launder y Spalding, 1983), mientras que para la turbulencia horizontal se optó por el modelo de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), ya que esta combinación de modelos es ampliamente utilizada.

Para todas las simulaciones se utilizó un período previo de 2 días para asegurar la convergencia, seguido de 14 días para simular un ciclo quincenal de marea.

3.3.6. Validación del modelo

Para la validación del modelo, se buscó reproducir el comportamiento esperado del estuario para los resultados obtenidos en el caso sin dique. Se utilizó la clasificación estuarina de Geyer y MacCready (2014), que caracteriza el tipo de estuario en función del número de Froude del río $Fr_f = U_r/N_0$ y del coeficiente de mezcla $M = ((C_D U_T^2)/(\omega N_0 H^2))^{1/2}$. En estas expresiones, U_r y U_T son las velocidades del río y de la marea, respectivamente, C_D es el coeficiente de arrastre, ω es la frecuencia de la marea, y H la profundidad media del estuario. La frecuencia de flotabilidad se aproxima a $N_0 = (\beta g S_{ocean} H)^{1/2}$, donde g es la aceleración de gravedad, $\beta = 7.7 \times 10^{-4} \text{ PSU}^{-1}$ es el coeficiente de expansión salina y S_{ocean} es la salinidad del océano.

3.4. Análisis de los flujos de salinidad a partir de los resultados del modelo

Se analizaron los flujos de salinidad en el estuario a partir de los resultados del modelo para el caso con caudal de 12 m³/s. Para ello, se descompuso el flujo total de salinidad en 4 componentes asociadas a diferentes mecanismos de transporte, utilizando el método propuesto por Garcia et al. (2022). En este método el flujo total de salinidad F corresponde al presentado en la ecuación 3.2 (Hendrickx et al., 2024):

$$F = \overline{\int usdA} \quad (3.2)$$

donde u es la velocidad del flujo en m/s, s es la salinidad en PSU y A es el área de la sección transversal en m². La línea horizontal corresponde a la media temporal para un ciclo de marea M₂. De acuerdo a Garcia et al. (2022), el flujo se puede separar en componentes asociadas a (1) promedio temporal y de la sección transversal, también llamado flujo neto o residual, (2) variación de la marea, pero promediada en la sección transversal, conocido como oscilación mareal, (3) variación en la sección transversal, pero promediado temporalmente, también llamado circulación estuarina o flujo residual local y (4) variación temporal y en la sección transversal, conocido como flujo por corte dependiente del tiempo. Según Garcia et al. (2022), los componentes de la velocidad se pueden calcular siguiendo las ecuaciones 3.3 a 3.7, en las que el subíndice de u está asociado a la numeración de las componentes antes mencionadas.

$$u_1 = \frac{\overline{\int u dA}}{\overline{\int dA}} \quad (3.3)$$

$$u_2 = \frac{\int u dA}{\int dA} - u_1 \quad (3.4)$$

$$u' = u - u_2 - u_1 \quad (3.5)$$

$$u_3 = \frac{\overline{u' dA}}{\overline{dA}} \quad (3.6)$$

$$u_4 = u' - u_3 \quad (3.7)$$

Para descomponer la salinidad, el procedimiento es equivalente al de la velocidad u . Una vez determinados $u_1, u_2, u_3, u_4, s_1, s_2, s_3$ y s_4 , se tiene la ecuación 3.8:

$$F \approx u_1 s_1 \overline{\int dA} + u_2 s_2 \overline{\int dA} + \int u_3 s_3 d\overline{A} + \int u_4 s_4 dA = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (3.8)$$

de manera que F_1 es el flujo neto, F_2 es el flujo por oscilación mareal, F_3 es el flujo por circulación y F_4 el flujo por corte dependiente del tiempo.

Cabe destacar que para poder representar adecuadamente la variación espacial, la sección transversal se debe dividir en elementos de igual área, para cada instante de tiempo, de acuerdo a Dronkers y Van de Kreeke (1986).

Capítulo 4

Resultados

4.1. Validación del modelo

El número de Froude del río se varió debido a que se utilizaron dos caudales: $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y $4 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el coeficiente de mezcla, M , varía a lo largo de todo el ciclo quincenal de marea. Los puntos obtenidos para los distintos ciclos se presentan en el panel (a) de la Figura 4.1.

De acuerdo con la clasificación de Geyer y MacCready (2014), para el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ el estuario debería presentar una cuña salina permanente para todos los ciclos. En los paneles (b) y (c) de la Figura 4.1 se puede observar que durante la fase llenante no desaparece la cuña, verificando que se cumple el comportamiento predicho.

En cambio, para el caudal más bajo, el estuario se clasifica como cuña salina dependiente del tiempo durante las mareas de mayor amplitud; es decir, en los momentos de mayor mezcla (principalmente durante la fase llenante), la cuña puede desaparecer, lo que se puede verificar con el panel (d) de la Figura 4.1. Por otro lado, cuando la marea es de menor amplitud, la cuña debería ser permanente. Esta dinámica también se observó al analizar los perfiles longitudinales del modelo como se puede ver en el panel (e) de la Figura 4.1.

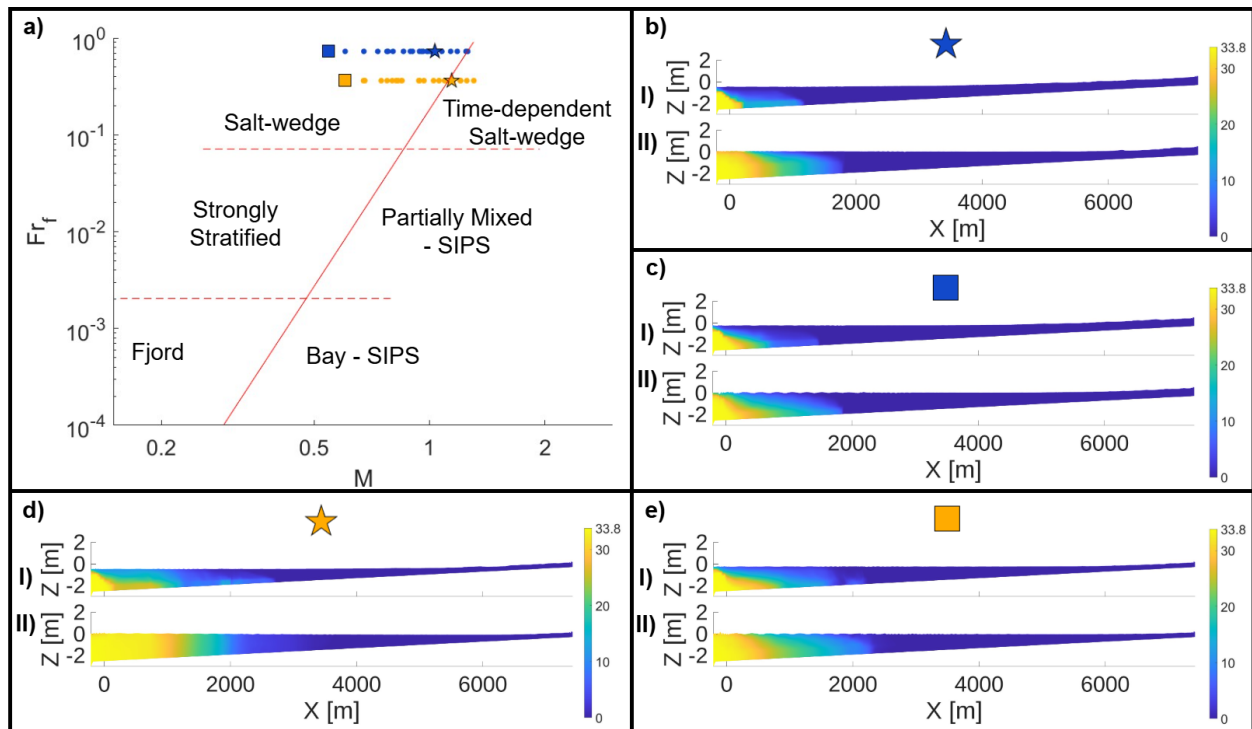


Figura 4.1: Validación del modelo y perfiles longitudinales de salinidad en el estuario para el caso sin dique. El panel a) muestra la ubicación en el espacio paramétrico definido por Geyer y MacCready (2014) de los distintos caudales (azul para $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y naranja para $4 \text{ m}^3/\text{s}$) y ciclos de marea. En este, con cuadrados y estrellas se indican los ciclos cuyos perfiles longitudinales aparecen en los demás paneles. En los paneles b) a e) se muestran perfiles longitudinales de salinidad en el estuario. En cada uno de estos, I) es durante la marea baja y II) durante la fase de llenante, cuando la marea muestra mayor capacidad de generar mezcla. b) está asociado al caso con caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, cerca de la sizigia, c) al mismo caudal pero cerca de la cuadratura, d) corresponde al caso con caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ cerca de la sizigia y finalmente, e) está también asociado al caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, pero cerca de la cuadratura.

4.2. Resultados del modelo

4.2.1. Estratificación y perfiles de salinidad

Para caracterizar la estratificación, se aplicó la clasificación de Geyer y MacCready (2014) para cada ciclo semidiurno y cada caudal a todos los casos, y se generó un rectángulo que contiene todos los puntos asociados a ese tipo de dique, obteniendo la Figura 4.2. Se puede notar que en general los diques incrementan la estratificación, desplazando al estuario hacia la región de cuña salina.

Adicionalmente, a partir de los resultados del modelo, se estudiaron los perfiles de salinidad verticales medios, mínimos y máximos normalizados por la altura, aguas abajo del dique en las coordenadas $X = 1200\text{m}$, $X = 1400\text{m}$, $X = 1600\text{m}$, $X = 1800\text{m}$ y aguas arriba del dique en las coordenadas $X = 2200\text{m}$, $X = 2400\text{m}$, $X = 2600\text{m}$, $X = 2800\text{m}$. En las Figuras 7.1 a 7.4 del Anexo 7.1 se muestran los perfiles obtenidos.

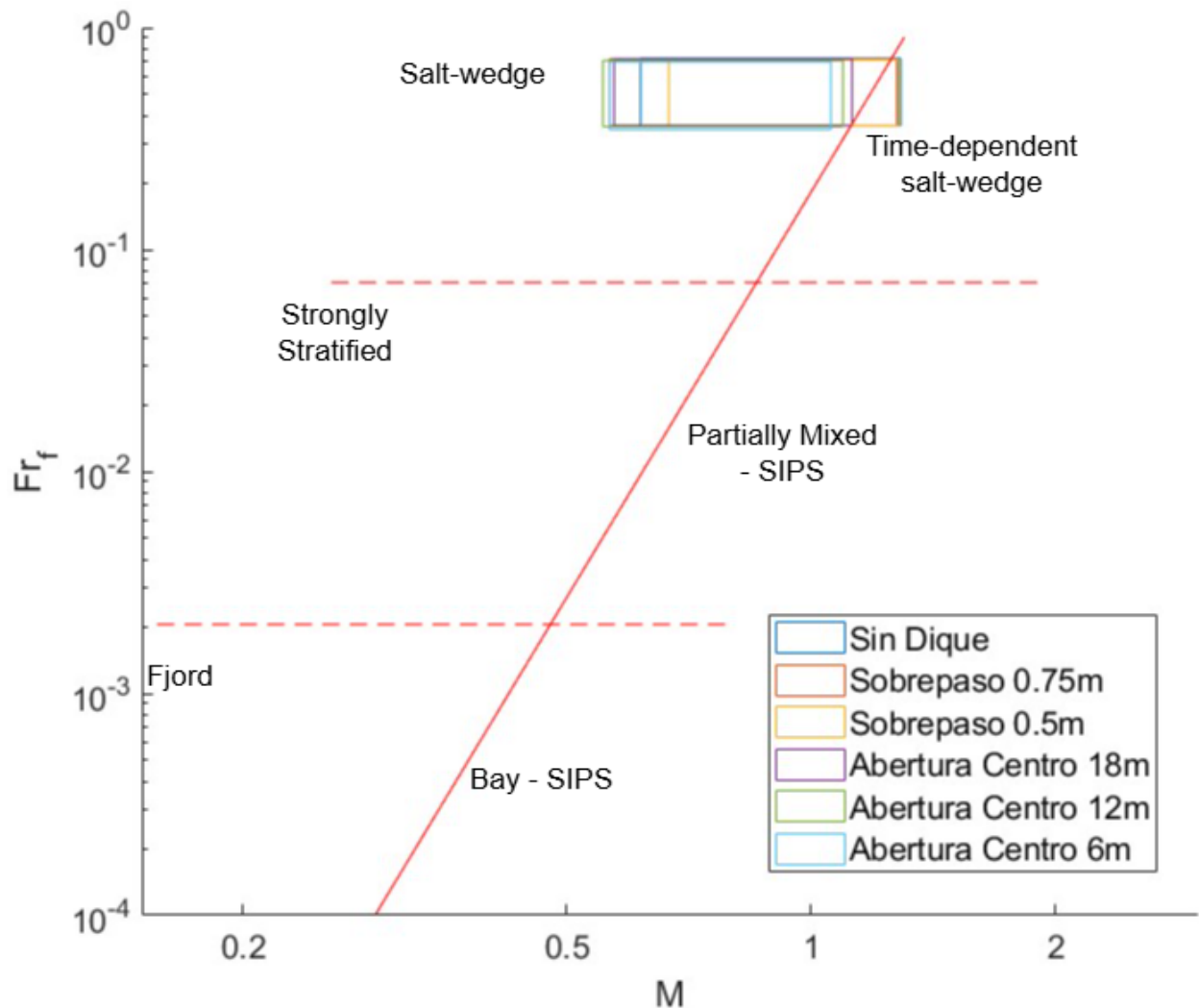


Figura 4.2: Clasificación de la estratificación de acuerdo a Geyer y MacCready (2014), para los distintos casos de estudio. Cada rectángulo corresponde a un caso distinto de acuerdo a los mostrados en la Figura 3.5 e indica el rango en que se mueve el estuario al cambiar la amplitud de la marea a lo largo del tiempo y al considerar distintos caudales.

4.2.2. Intrusión

Para cada caso, en cada instante de tiempo, se calculó la intrusión como el punto con mayor valor de la coordenada X en el estuario en que hubiera al menos 1 PSU. Con el objetivo de comparar la intrusión en los diferentes casos se realizaron diagramas de caja. En la Figura 4.3 se muestra la comparación del modelo entre el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y $4 \text{ m}^3/\text{s}$. En ella se observa, que la intrusión es menor para el caudal mayor, lo que es un resultado esperable, debido a que con un menor caudal el río opone menos resistencia frente a la marea, que es idéntica en ambos casos. Adicionalmente, se puede ver que para el caudal menor, los diques reducen la intrusión máxima en mayor medida que para el caudal más grande.

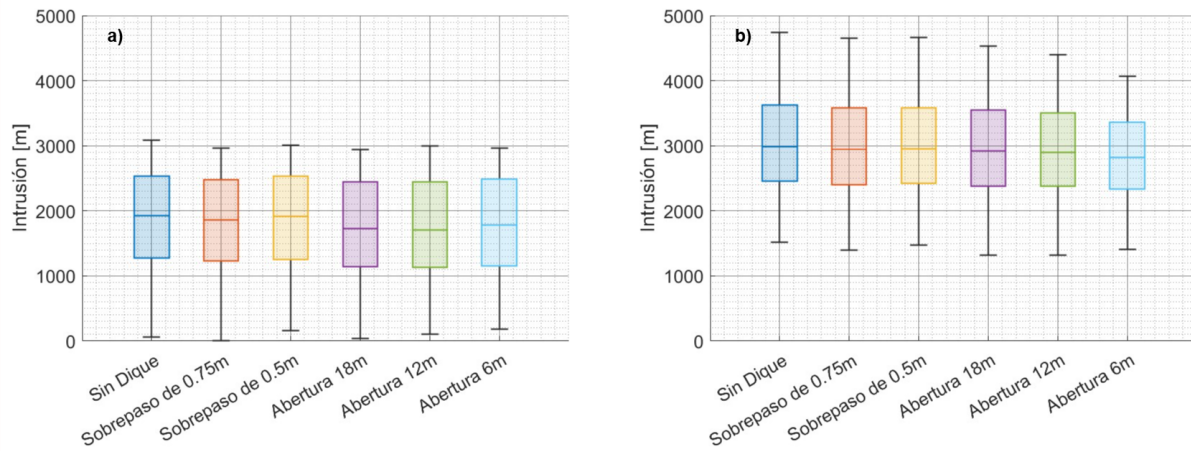


Figura 4.3: Diagramas de caja para la intrusión salina. Se consideró la intrusión como el mayor valor de x en que en el centro de la sección hay como mínimo 1 PSU en cualquier z . (a) Muestra la intrusión para el modelo con caudal $12 \text{ m}^3/\text{s}$. (b) Muestra la intrusión para el modelo con caudal $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.3. Flujo de salinidad

Se aplicó el procedimiento descrito en la sección 3.4 para 2 ciclos semidiurnos, correspondientes a los de mayor (1.44 m) y de menor (0.36 m) rango mareal simulados, para una serie de secciones transversales en el estuario, cada 150 metros a lo largo del eje x , y cada 50 metros cerca del dique. A partir de este análisis se obtuvieron las Figuras 4.4 y 4.5.

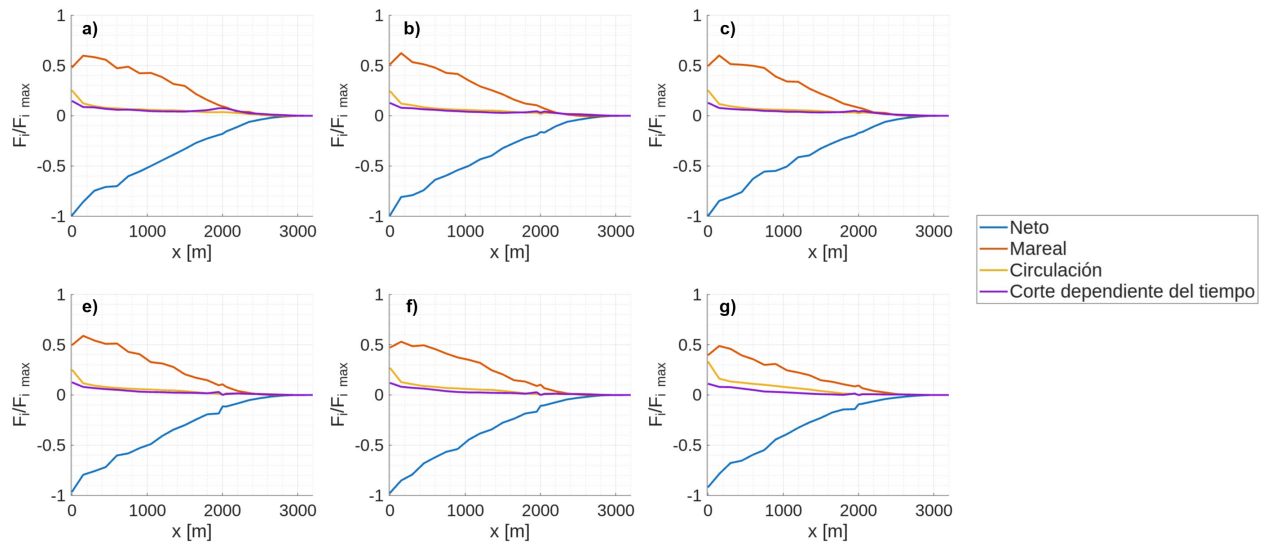


Figura 4.4: Flujos de salinidad normalizados para el rango mareal de 1.44 metros. a) Caso sin dique. b) Caso con dique con flujo por sobrepaso, con altura de 0.75 metros. c) Caso con dique con flujo por sobrepaso, con altura de 0.5 metros. d) Caso con dique con abertura al centro de 18 metros. e) Caso con dique con abertura al centro de 12 metros. f) Caso con dique con abertura al centro de 6 metros. Un valor negativo de F_i indica que el flujo es en dirección al mar y positivo en dirección hacia aguas arriba del río.

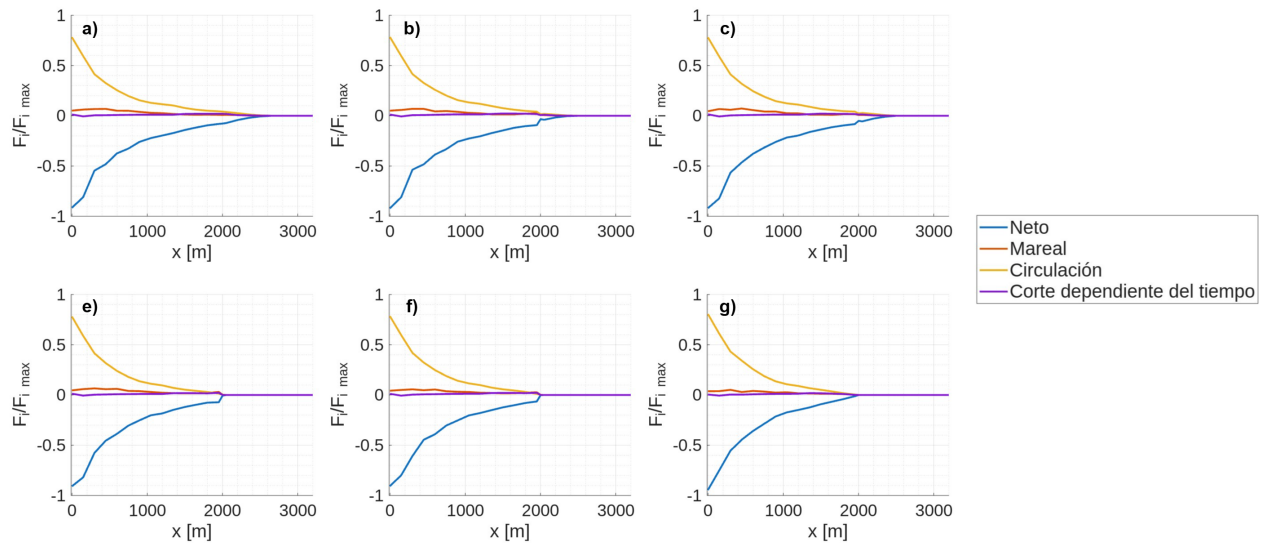


Figura 4.5: Flujos de salinidad normalizados para el rango mareal de 0.36 metros. a) Caso sin dique. b) Caso con dique con flujo por sobrepaso, con altura de 0.75 metros. c) Caso con dique con flujo por sobrepaso, con altura de 0.5 metros. d) Caso con dique con abertura al centro de 18 metros. e) Caso con dique con abertura al centro de 12 metros. f) Caso con dique con abertura al centro de 6 metros. Un valor negativo de F_i indica que el flujo es en dirección al mar y positivo en dirección hacia aguas arriba del río.

En todos los paneles de las Figuras 4.4 y 4.5, el eje vertical corresponde a $F_i/F_{i,max}$, donde F_i corresponde a F_1 (Neto), F_2 (Mareal), F_3 (Circulación) o F_4 (Corte dependiente del tiempo) según fueron descritos en la sección 3.4 y $F_{i,max}$ corresponde al máximo valor absoluto de cualquiera de los F_i para todos los casos y para los rangos mareales de 1.44 metros y 0.36 metros, de manera que los gráficos son comparables.

4.2.4. Distorsión de la marea

Debido a que se modelaron 14 días, no se realizó un análisis armónico de la marea y se optó por graficar, para cada caso, la duración media de las fases llenante y vaciante a lo largo del estuario para los ciclos semidiurnos contenidos en la simulación, lo que se muestra en la Figura 4.6. En ella, se puede observar que al progresar hacia el interior del estuario, incluso en la ausencia de dique, se reduce la duración de la fase llenante y se extiende la fase vaciante. Sin embargo, también se puede apreciar que el efecto es mayor cuando hay dique.

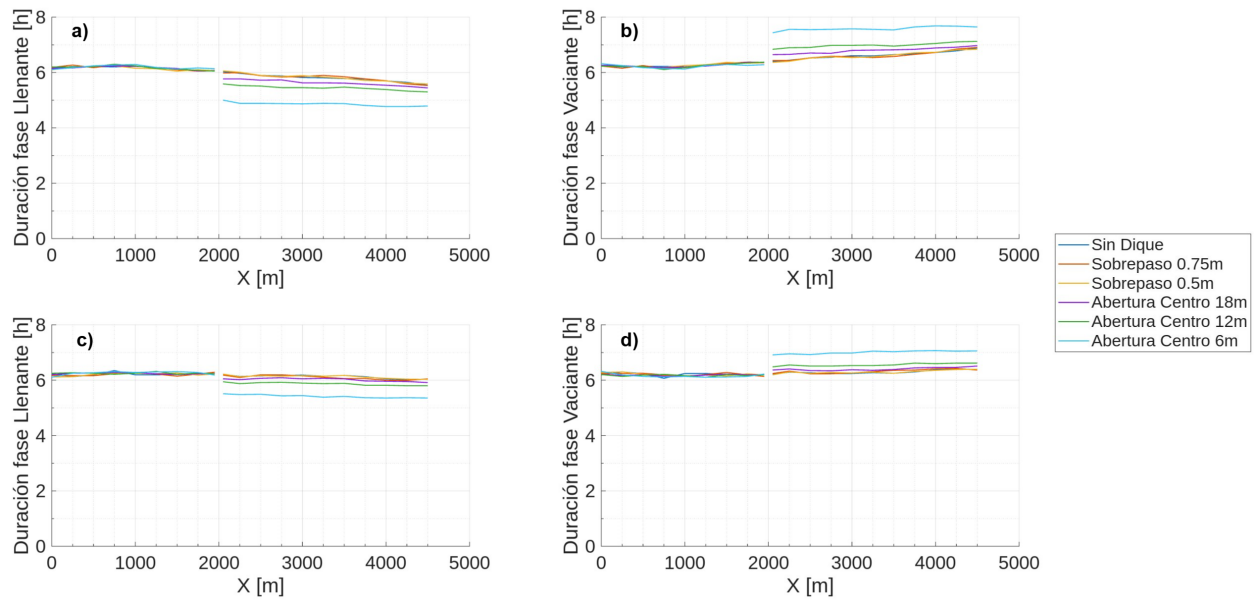


Figura 4.6: Comparación de duración media de fases de llenante y vaciante a lo largo del estuario para los distintos caudales y diques. a) Duración media de la fase llenante para el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$. b) Duración media de la fase vaciante para el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$. c) Duración media de la fase llenante para el caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. d) Duración media de la fase vaciante para el caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Capítulo 5

Discusión

5.1. Análisis de resultados del modelo

5.1.1. Estratificación y perfiles de salinidad

Como se observa en la Figura 4.2, los diques afectan la estratificación en el estuario, principalmente disminuyendo el parámetro M , que está asociado al efecto de la marea en la mezcla, según Geyer y MacCready (2014). Esto provoca que el comportamiento del estuario se desplace en el espacio paramétrico hacia la zona de cuña salina. Lo anterior se condice con las conclusiones obtenidas por Hendrickx et al. (2024) para el río Mississippi, donde se notó una disminución del momentum de la oscilación de la marea debido a la instalación de un dique. Figueroa, Lee et al. (2022) también observaron que al instalar una presa en su modelo para el estuario del río Geum, se producía una disminución de M en el espacio paramétrico propuesto por Geyer y MacCready (2014), aunque en ese estudio también existen variaciones importantes del parámetro Fr_f debido a que la presa interrumpe el flujo y luego libera agua cada ciertos intervalos de tiempo. De lo anterior, se puede notar que, aunque puedan existir diferencias para un estuario pequeño, en general la instalación de un dique tiene un efecto similar en la estratificación que en estuarios más grandes y caudalosos.

Los diques que mayor efecto tienen son aquellos con abertura al centro, que prácticamente no dejan puntos dentro de la región *time-dependent salt-wedge*. Aquí es importante destacar que estos diques estarían afectando de manera significativa la mezcla del estuario. Además, dado que para caudales más altos en el estuario del río Maipo lo natural es la presencia de una cuña salina permanente, los resultados de este estudio no permiten establecer con certeza si el efecto de estos diques podría suponer una amenaza ambiental para el ecosistema en el estuario, o si, por el contrario, el favorecer la permanencia de la cuña salina podría mantener una situación más estable en periodos de sequía.

Respecto a los diques que permiten el flujo por sobrepaso, se observa que estos no tienen efectos significativos en los valores de M más altos, es decir, cuando la amplitud de la marea es más alta, no parece existir una gran diferencia de estratificación para este tipo de diques. Sin embargo, para las mareas más cercanas a la cuadratura, el comportamiento varía, mientras el dique con sobrepaso de 0.75 m disminuye M cerca de la cuadratura, el dique con sobrepaso de 0.5 m por otro lado incrementa M . Una posible explicación es que, el dique de 0.5 m de altura podría ser suficientemente pequeño para no debilitar significativamente la marea,

pero aun así, suficientemente grande como para producir mezcla. Sin embargo, se requeriría de más casos de estudio para poder confirmar esta afirmación.

Al observar los perfiles de salinidad aguas abajo del dique, para el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, en la Figura 7.1, se puede notar que no existen grandes diferencias entre los distintos casos, esto debido a que, en general, para este caudal, incluso en el caso sin dique, la mayoría de los días la salinidad máxima no alcanza a superar la posición del dique ($X = 2000\text{m}$), como se puede notar en la Figura 4.3. La mayor variación se produce en el perfil de salinidad máxima para los diques con abertura al centro, sobre todo cerca del dique, principalmente en $X = 1600\text{m}$ y $X = 1800\text{m}$. Una posible explicación es que estos diques concentran el flujo del río, y, por lo tanto, durante la vaciante, no se alcanzan grandes salinidades en el centro de la sección, desplazando la cuña.

Al analizar los perfiles de salinidad aguas arriba del dique, para el caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, en la Figura 7.2, se observa que, en general, el perfil de salinidad media en las distintas posiciones del eje X se reduce con la presencia de los diques, aunque el efecto es poco notorio en los diques que permiten el flujo por sobrepaso. Por su parte los diques con abertura al centro reducen significativamente el perfil de salinidad máximo observado, especialmente, el caso con abertura de 6 m. Además, en estos casos, particularmente cerca de la posición del dique ($X = 2000\text{m}$), se observa una disminución en la estratificación de los perfiles de salinidad, lo que probablemente se debe a la turbulencia generada por la contracción y expansión del flujo de la marea al pasar por el dique.

En los perfiles de salinidad aguas abajo del dique para el caso con caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 7.3) se observa que en $X = 1200\text{m}$ y $X = 1400\text{m}$ el perfil de salinidad mínima no es 0, lo que se puede confirmar al ver los diagramas de caja de la Figura 4.3 (b). Asimismo, se puede notar que, en todos los casos, el perfil de salinidad máxima corresponde a 33.8 PSU para todas las alturas, debido a que en este caso, la marea es capaz de entrar considerablemente al estuario. En cuanto a los perfiles medios mostrados en esta imagen, se observa que cerca de las superficie son similares en general, sin embargo, hacia el fondo, la salinidad es menor en los casos de dique con abertura al centro, especialmente cerca del dique. Probablemente, esta diferencia se puede atribuir tanto a la mezcla generada por el dique como a la mayor capacidad del río de desplazar la cuña en el centro de la sección durante la fase vaciante debido a la concentración del flujo debida al dique.

Finalmente, en los perfiles de salinidad aguas arriba del dique para el caso con caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, que se muestran en la Figura 7.4, se puede notar que el mayor efecto de los diques ocurre en la salinidad máxima lejos del dique, donde el caso con abertura al centro de 6 m logra reducir significativamente la salinidad máxima, especialmente en la superficie. Probablemente esto se debe a que el dique es capaz de reducir el momentum de la marea, favoreciendo la estratificación a una cierta distancia del dique, ya que como se mencionó anteriormente, cerca del dique se produce mezcla debido a los cambios en la sección transversal. Adicionalmente, los diques logran reducir también la salinidad media en el fondo, aunque no en gran medida.

5.1.2. Intrusión

En la imagen (a) de la Figura 4.3, asociada al caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, se puede ver que, en lo referente a la intrusión máxima, los diques no suponen una variación considerable. Los diques con abertura al centro la disminuyen como máximo en 150 m y los con sobrepaso en 100 m. Por otro lado, es posible ver en las intrusiones mínimas que algunos diques incluso la incrementan, esto se debe a que estos diques retienen algo de salinidad cuando la marea baja, y esta lentamente es liberada debido a la mezcla con el agua del río. Respecto a la mediana, es

posible notar que los diques con abertura al centro son los más efectivos, reduciendo en cerca de 200 m la intrusión mediana.

En la imagen (b) de la Figura 4.3, asociada al caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, es posible notar que los diques tienen un efecto mucho más importante para este flujo. En este caso, se observa que, mientras más restrictivo es el dique, mayor es el efecto de reducción de la intrusión, llegando a reducirse la intrusión máxima en prácticamente 700 metros en el caso del dique con abertura al centro de 6 metros. Respecto a la intrusión mínima, si bien hay variaciones, estas no son particularmente significativas, aunque, nuevamente, al observar los diques con abertura al centro, se aprecia que mientras más pequeña es la abertura, mayor es la intrusión mínima. Esto puede explicarse, al igual que antes, por la retención de agua y salinidad durante la vaciante.

Hendrickx et al. (2024) estudiaron diques que permiten el flujo por sobrepaso para el río Mississippi, y observaron que, a medida que el río es más débil en comparación con la marea, la reducción porcentual de la intrusión salina debida al dique disminuye. Este comportamiento también se evidencia en el presente estudio para los diques que permiten el flujo por sobrepaso. Sin embargo, al analizar los diques con abertura en el centro, se observa lo contrario: se producen mayores reducciones porcentuales de la intrusión máxima cuando el río tiene menor caudal. Además, la retención de salinidad antes mencionada en relación a la Figura 4.3 concuerda con lo que señalan Hendrickx et al. (2024), que indican que diques altamente restrictivos pueden retener salinidad que, en condiciones naturales, sería evacuada durante la fase vaciante. Pese a lo anterior, es importante destacar una diferencia clave respecto a lo observado por Hendrickx et al. (2024): los diques que permiten el flujo por sobrepaso en el presente estudio no fueron particularmente efectivos en la reducción de la intrusión para ninguno de los caudales estudiados. Esto es a pesar de estar en rangos de altura normalizada y ubicación similares a los estudiados por Hendrickx et al. (2024), que sí observaron que fueron efectivos, reduciendo la intrusión en porcentajes cercanos al 20 %, lo que podría deberse a una diferencia entre el comportamiento de los estuarios pequeños respecto a aquellos de mayores dimensiones y caudal.

5.1.3. Flujos de Salinidad

Al comparar las Figuras 4.4 y 4.5, se puede notar que el comportamiento de los flujos de salinidad en el estuario presenta diferencias importantes. En primer lugar, para todos los diques así como para el caso sin dique, cuando la marea tiene menor amplitud, la mayor parte del flujo de salinidad hacia el interior del estuario se produce por circulación. En cambio, cuando la amplitud de la marea es mayor, la principal componente del flujo de sal hacia el interior del estuario es la oscilación mareal. Los comportamientos anteriores son comunes en estuarios de cuña salina (e.g. Valle-Levinson, 2022; Paiva y Schettini, 2021; Hendrickx et al., 2024). Cuando la marea tiene una amplitud pequeña, el río expulsa salinidad en gran parte de la sección transversal. Sin embargo, la salinidad puede ingresar al estuario por el fondo, debido a la diferencia de densidad, lo que aparece en el componente de circulación en la descomposición, ya que es un fenómeno residual y local. Por otro lado, cuando la marea tiene mayor amplitud, gran parte del flujo de salinidad lo produce la oscilación, que transporta una gran cantidad de agua salada hacia el interior del estuario.

En la Figura 4.4, correspondiente al ciclo de mayor amplitud, se puede observar que el flujo de salinidad no se detiene en el dique, ubicado en $X = 2000\text{m}$, e incluso se ve que los diques que permiten el flujo por sobrepaso no producen grandes diferencias en el flujo de salinidad aguas arriba del dique. Para los diques con abertura al centro, se observa que el flujo residual de salinidad, en dirección al mar, aguas arriba del dique, es menor que en los casos de los diques que permiten el flujo por sobrepaso. Además, entre estos últimos, el con altura de 0.75 metros presenta un menor flujo residual de salinidad hacia el mar más bajo que el que tiene una altura de 0.5 metros, lo que nuevamente muestra que los diques más restrictivos también favorecen la

retención de salinidad. La mayor retención por parte de los diques con abertura al centro puede deberse tanto a que bloquean una mayor parte de la sección, como a la existencia de recirculación, de forma similar a las cavidades laterales, como las estudiadas por Jackson et al. (2015).

Por otro lado, en la Figura 4.5, que está asociada a la menor amplitud de marea, el flujo de salinidad tanto hacia el interior como hacia el exterior del estuario disminuye considerablemente e incluso, para los diques con abertura al centro, prácticamente se detiene en la ubicación del dique ($X = 2000m$). Otra observación para esta amplitud de marea es que, mientras más restrictivo es el dique, la disminución de los flujos es más paulatina a lo largo del estuario, lo que se puede observar de mejor manera en el panel (g) de la la Figura 4.5, asociado al dique con abertura al centro de 6 metros. En este, no se produce una caída repentina de los flujos; en su lugar, estos presentan, en general, una menor magnitud que en los demás casos a lo largo de todo el estuario aguas abajo del dique.

5.1.4. Distorsión de la marea

En la Figura 4.6 se puede observar que para todos los casos, incluso aquellos en que no hay dique, hacia el interior del estuario se reduce la duración de la fase llenante y se extiende la de la fase vaciante. La distorsión de la marea a lo largo de un estuario es un fenómeno común de acuerdo a Valle-Levinson (2022), sin embargo, los diques produjeron un efecto mayor al que se produce de manera natural. Se puede apreciar en los 4 paneles de la Figura 4.6 que los diques que permiten el flujo por sobrepaso no generan gran impacto en la defomación de la marea, manteniéndose las duraciones de ambas fases en valores cercanos al caso sin dique, lo que probablemente se debe a que estos diques no bloquean gran parte de la sección, por lo que la onda no experimenta grandes transformaciones. Por el contrario, los diques con abertura al centro, generan diferencias considerables, y al reducirse el ancho de la abertura, se aumenta el efecto en la duración de las fases, lo que probablemente se debe a que estos diques bloquean gran parte de la sección, forzando a la marea a pasar por una sección estrecha para poder incrementar el nivel al otro lado del dique.

Adicionalmente, se puede notar en la Figura 4.6 que en los paneles (c) y (d), asociados al caudal de $4m^3/s$, la distorsión en la marea para todos los casos es menor que la observada en los paneles (a) y (b), que corresponden al caudal de $12m^3/s$. Lo anterior evidencia que a mayor caudal, se produce una mayor reducción de la duración de la fase llenante e incremento en la duración de la fase vaciante, lo que ha sido observado por diversos investigadores (e.g. Shi et al., 2023; Pénicaud et al., 2025). El efecto de la relación entre la amplitud de la marea y la descarga del río en la duración de las fases, junto con la observación realizada en las secciones anteriores de que los diques con abertura al centro debilitan considerablemente la marea, puede explicar la mayor distorsión observada para diques más restrictivos.

Capítulo 6

Conclusión

Del estudio del modelo desarrollado en esta investigación fue posible concluir que los diques pueden ser una herramienta útil para controlar la intrusión en un estuario, sobre todo cuando el caudal es bajo. De todos modos, es importante notar que este tipo de obras puede llegar a generar un impacto ambiental en los humedales de los estuarios y, por lo tanto, es de gran interés realizar estudios en profundidad cuando se planea la instalación.

Entre los tipos de dique estudiados, destacan los que bloquean gran parte de la sección, permitiendo el flujo por una abertura en el centro que, de acuerdo a los resultados del modelo, lograron limitar la intrusión salina de manera más efectiva en comparación a los otros diques estudiados. Además, lo hicieron sin llegar a funcionar como vertedero, que es uno de los problemas que presentan los diques con sobrepaso más restrictivos que los presentados en los resultados de este documento. Entre los diques con abertura al centro, se observó que mientras menor es la abertura, mayor es la efectividad para detener el flujo de sal hacia el interior. Lo anterior está condicionado por una limitación de materiales, ya que una abertura demasiado pequeña puede generar velocidades que erosionen el dique. Por lo tanto, en proyectos de construcción que consideren este método, será crucial determinar las velocidades en el dique.

Adicionalmente se observó que el método propuesto para clasificar estuarios de Geyer y MacCready (2014) funciona en estuarios pequeños, a pesar de haber sido construido basándose en estuarios más grandes. Asimismo, si bien se identificaron comportamientos similares, se observó que los diques que permiten el flujo por sobrepaso no fueron especialmente efectivos para el estuario estudiado, llegando a una conclusión contraria a la obtenida por Hendrickx et al. (2024) para un estuario de mayor escala.

Este estudio permitió obtener una primera aproximación respecto a los diques más adecuados para instalar en estuarios de bajo caudal como aquellos presentes en la zona central de Chile. Como posibles desarrollos de esta investigación a futuro, resultaría interesante estudiar si al incluir una barra en la desembocadura se obtienen resultados significativamente distintos. Adicionalmente, al construirse en estuarios, cerca del mar, una pregunta importante a considerar es el efecto de un tsunami sobre distintos tipos de diques, así como también el efecto de los diques en un tsunami que ingrese al estuario. Otras líneas de investigación que podrían desarrollarse a partir de este estudio incluyen la elaboración de un conjunto de modelos para estuarios pequeños abarcando distintas características. Del mismo modo, sería valioso explorar otros tipos de dique como alternativas de diseño, por ejemplo, diques con aberturas en los lados.

Bibliografía

- BCN. (2018). Red Hidrográfica: Polilíneas de los drenes de todo Chile [Publicado en Mapoteca Digital de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile].
- Bitencourt, L. P., Fernandes, E., Möller, O., & Ross, L. (2020). The contribution of ENSO cycles to the salinity spatio-temporal variability in a bar-built microtidal estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 40, 101496. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101496>
- Bobadilla, A., Stehr, A., & Toro, N. (2024). Evaluation of climate-change impacts on the temporal and spatial behaviour of drought in South-Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 69(2), 165-184.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Clarke, D. W., Boyle, J. F., & Plater, A. J. (2017). Particle-size evidence of barrier estuary regime as a new proxy for ENSO climate variability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(10), 1520-1534.
- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM journal of Research and Development*, 11(2), 215-234.
- DGA. (2024). Mapa Inventario de Cuencas de Chile [Publicado en Mapoteca Digital de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile].
- Dronkers, J., & Van de Kreeke, J. (1986). Experimental determination of salt intrusion mechanisms in the Volkerak estuary. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(1), 1-19.
- EDF. (2022). *TELEMAC-3D User Manual version v8p4*. Électricité de France R&D.
- Figueroa, S. M., Lee, G.-h., Chang, J., & Jung, N. W. (2022). Impact of estuarine dams on the estuarine parameter space and sediment flux decomposition: Idealized numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(5), e2021JC017829.
- Figueroa, S. M., & Son, M. (2024). Transverse variability of residual currents, sediment fluxes, and bed level changes in estuaries with an estuarine dam: Role of estuarine type, dam location, and discharge interval. *Continental Shelf Research*, 274, 105196.
- Figueroa, S. M., Son, M., & Lee, G.-h. (2022). Effect of estuarine dam location and discharge interval on estuarine hydrodynamics, sediment dynamics, and morphodynamics. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1035501.
- Figueroa, S. M., Lee, G.-h., & Shin, H.-J. (2020). Effects of an estuarine dam on sediment flux mechanisms in a shallow, macrotidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238, 106718.
- Galland, J.-C., Goutal, N., & Hervouet, J.-M. (1991). TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Advances in Water Resources*, 14(3), 138-148. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(91\)90006-A](https://doi.org/10.1016/0309-1708(91)90006-A)
- Garcia, A. M. P., Geyer, W. R., & Randall, N. (2022). Exchange flows in tributary creeks enhance dispersion by tidal trapping. *Estuaries and Coasts*, 45(2), 363-381.
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The estuarine circulation. *Annual review of fluid mechanics*, 46(1), 175-197.

- Google & NASA. (2025). Google Earth [Accedido como mapa base de QGIS el 7 de julio de 2025. Datos del Mapa 2025 Google, Imágenes 2025 NASA].
- Hendrickx, G. G., Manuel, L. A., Pearson, S. G., Aarninkhof, S. G., & Meselhe, E. A. (2024). An Earthen Sill as a Measure to Mitigate Salt Intrusion in Estuaries. *Estuaries and Coasts*, 47(5), 1199-1208.
- Isserty, G., Walther, R., & Bertrand, O. 3D hydrosedimentary models of the Loire Estuary using TELEMAC-3D-TOMAWAC and GAIA. En: *En 28th TELEMAC User Conference*. 2022.
- Jackson, T. R., Apte, S. V., Haggerty, R., & Budwig, R. (2015). Flow structure and mean residence times of lateral cavities in open channel flows: influence of bed roughness and shape. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(5), 1069-1100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10652-015-9407-2>
- Jusari, N. (2024). *Estimación del flujo de sedimentos en suspensión en el estuario del río Maipo mediante métodos acústicos y ópticos* [Tesis de maestría, Universidad Técnica Federico Santa María].
- Launder, B., & Spalding, D. (1983). Paper 8 - The numerical computation of turbulent flows. En S. V. Patankar, A. Pollard, A. K. Singhal & S. P. Vanka (Eds.), *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion* (pp. 96-116). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7>
- Le Mouel, M., Matte, P., Hammouti, A., & Pham Van Bang, D. (2025). Investigation of 3D circulation and secondary flows in the St. Lawrence fluvial estuary at a tidal junction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 313, 109058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.109058>
- Niemeyer, H. (1980). *Hoyas hidrográficas de Chile* (inf. téc.). Dirección Feneral de Aguas.
- Paiva, B. P., & Schettini, C. A. (2021). Circulation and transport processes in a tidally forced salt-wedge estuary: The São Francisco river estuary, Northeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 41, 101602.
- Pénicaud, J., Herrmann, M., Toublanc, F., Vinh, V., & Ouillon, S. (2025). River discharge-tide interactions and tide propagation in the mesotidal tropical estuary of the Van Uc river, Red River delta, Vietnam. *Regional Studies in Marine Science*, 82, 104029.
- Ralston, D. K., Geyer, W. R., & Warner, J. C. (2012). Bathymetric controls on sediment transport in the Hudson River estuary: Lateral asymmetry and frontal trapping. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10).
- Ricalde, I., Vicuña, S., Melo, O., Tomlinson, J. E., Harou, J. J., & Characklis, G. (2022). Assessing tradeoffs in the design of climate change adaptation strategies for water utilities in Chile. *Journal of environmental management*, 302, 114035.
- Roco, A., Flores, R. P., Williams, M. E., & Saldías, G. S. (2024). Observations of river-wave interactions at a small-scale river mouth. *Coastal Engineering*, 189, 104456.
- Schettini, C. A., Valle-Levinson, A., & Truccolo, E. C. (2017). Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. *Regional Studies in Marine Science*, 10, 52-64.
- Shi, L., Ortals, C., Valle-Levinson, A., & Olabarrieta, M. (2023). Influence of river discharge on tidal and subtidal flows in a microtidal estuary: Implication on velocity asymmetries. *Advances in Water Resources*, 177, 104446.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99-164.
- Soto-Rivas, K., Flores, R. P., Williams, M., & Escauriaza, C. (2024). Understanding Salinity Intrusion and Residence Times in a Small-Scale Bar-Built Estuary under Drought Scenarios: The Maipo River Estuary, Central Chile. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1162.
- Valle-Levinson, A. (2022). *Introduction to estuarine hydrodynamics*. Cambridge University Press.
- Zhang, X., Fang, C., Wang, Y., Lou, X., Su, Y., & Huang, D. (2022). Review of effects of dam construction on the ecosystems of river estuary and nearby marine areas. *Sustainability*, 14(10), 5974.

Capítulo 7

Anexos

En las siguientes páginas se presentan figuras y tablas que no se mostraron en el las secciones previas debido a motivos de formato.

7.1. Perfiles de salinidad media, mínima y máxima

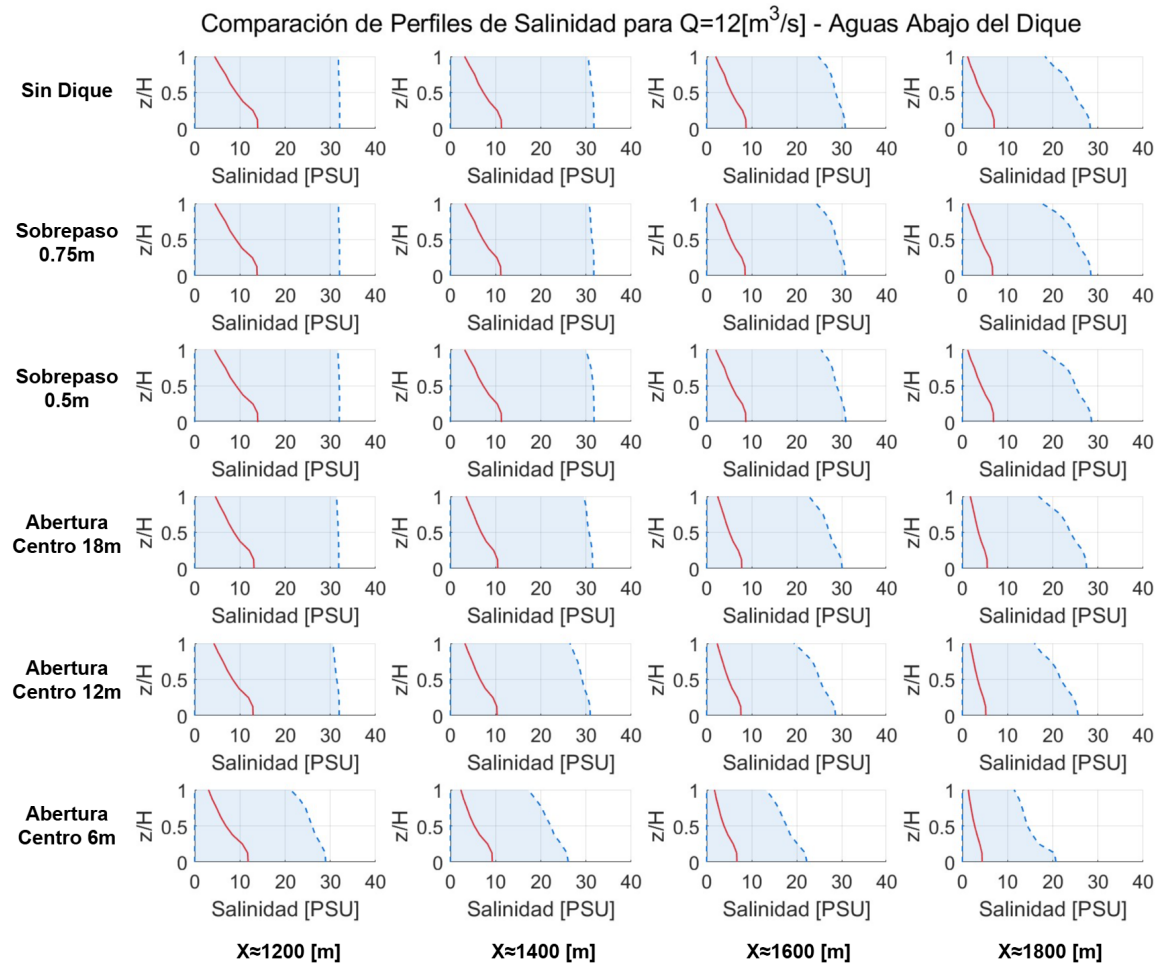


Figura 7.1: Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $12m^3/s$, aguas abajo del dique, para los distintos casos de estudio, en una serie de posiciones del eje X, en el centro del estuario. El perfil medio se marca con una línea continua roja, mientras que los perfiles mínimos y máximos en líneas segmentadas azules. El rango entre el mínimo y máximo se marca en azul claro en el fondo.

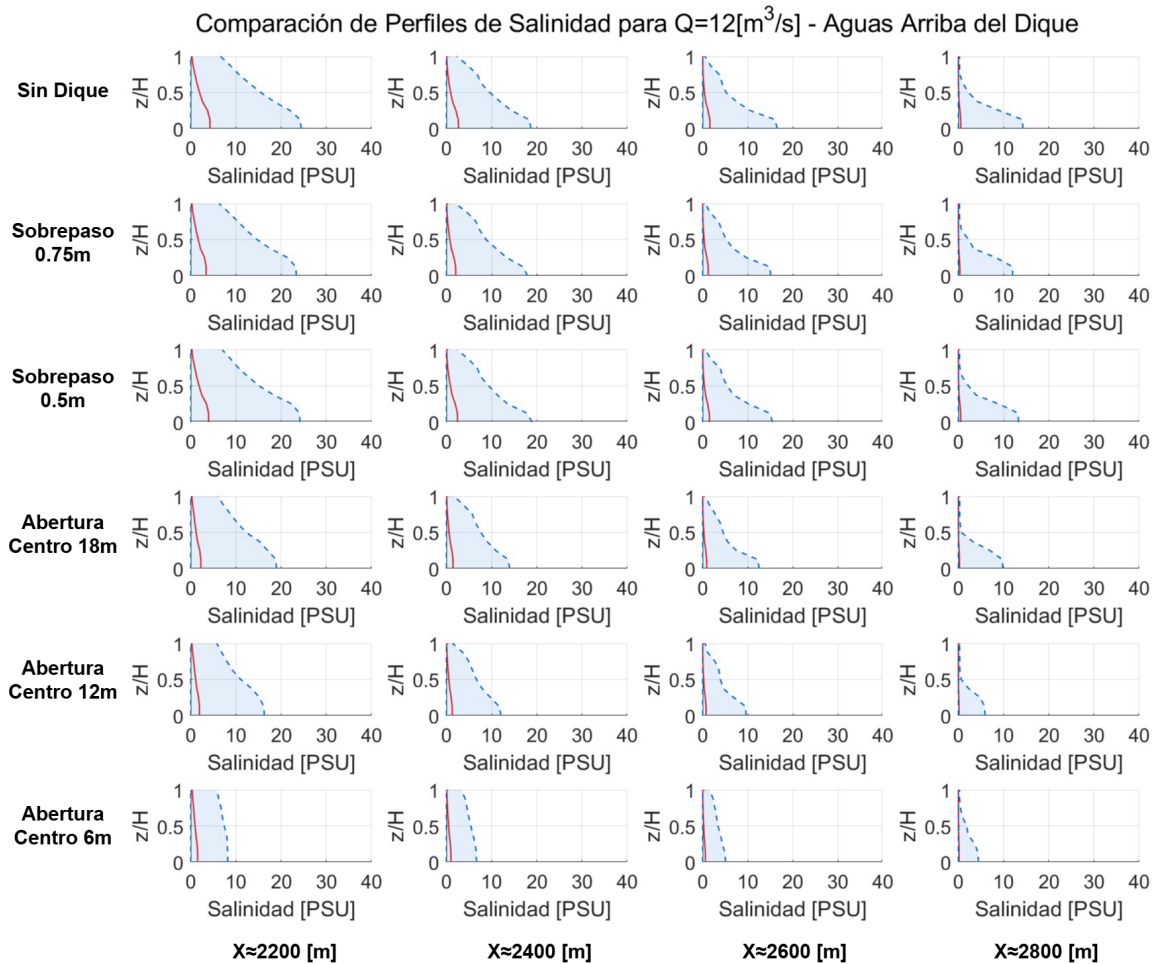


Figura 7.2: Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $12m^3/s$, aguas arriba del dique, para los distintos casos de estudio, en una serie de posiciones del eje X, en el centro del estuario. El perfil medio se marca con una línea continua roja, mientras que los perfiles mínimos y máximos en líneas segmentadas azules. El rango entre el mínimo y máximo se marca en azul claro en el fondo.

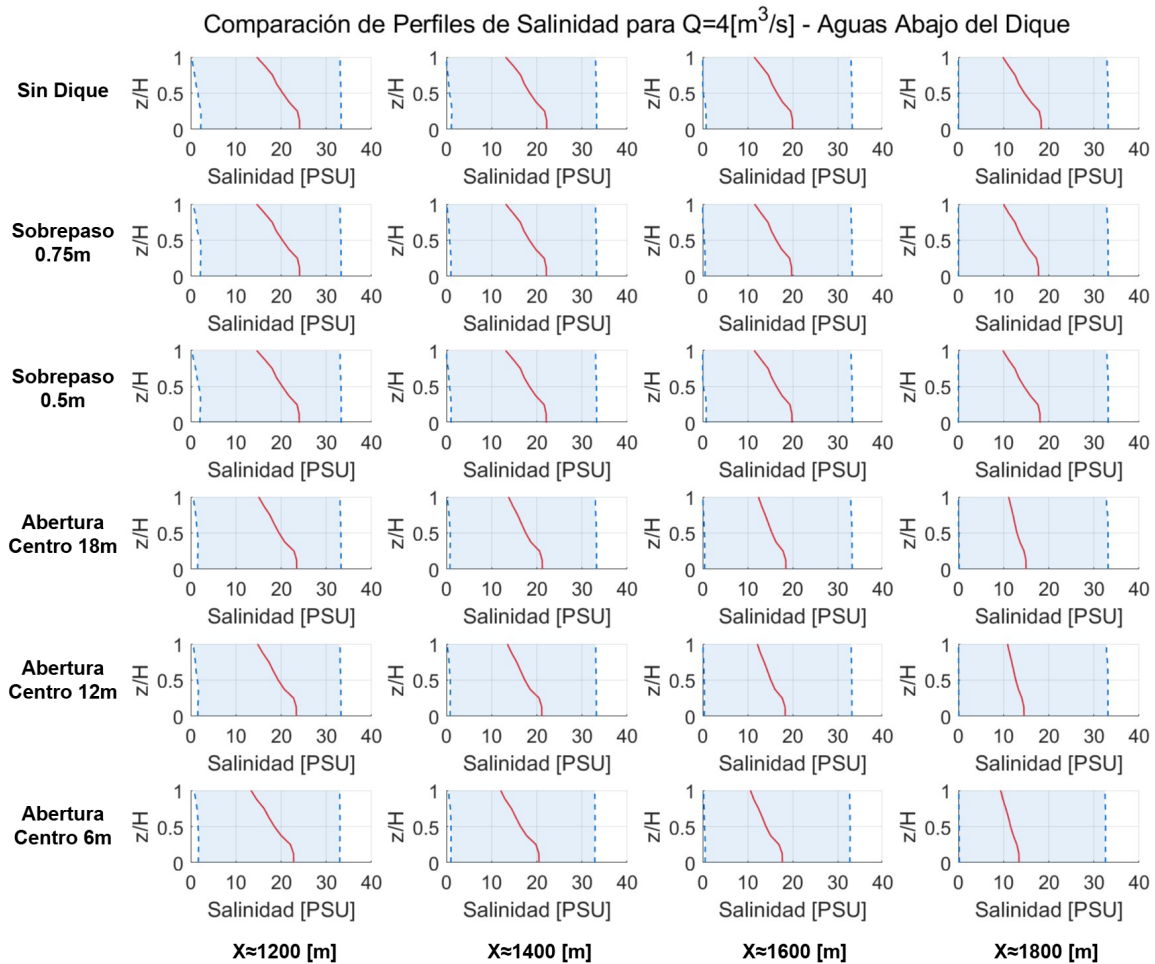


Figura 7.3: Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $4m^3/s$, aguas abajo del dique, para los distintos casos de estudio, en una serie de posiciones del eje X, en el centro del estuario. El perfil medio se marca con una línea continua roja, mientras que los perfiles mínimos y máximos en líneas segmentadas azules. El rango entre el mínimo y máximo se marca en azul claro en el fondo.

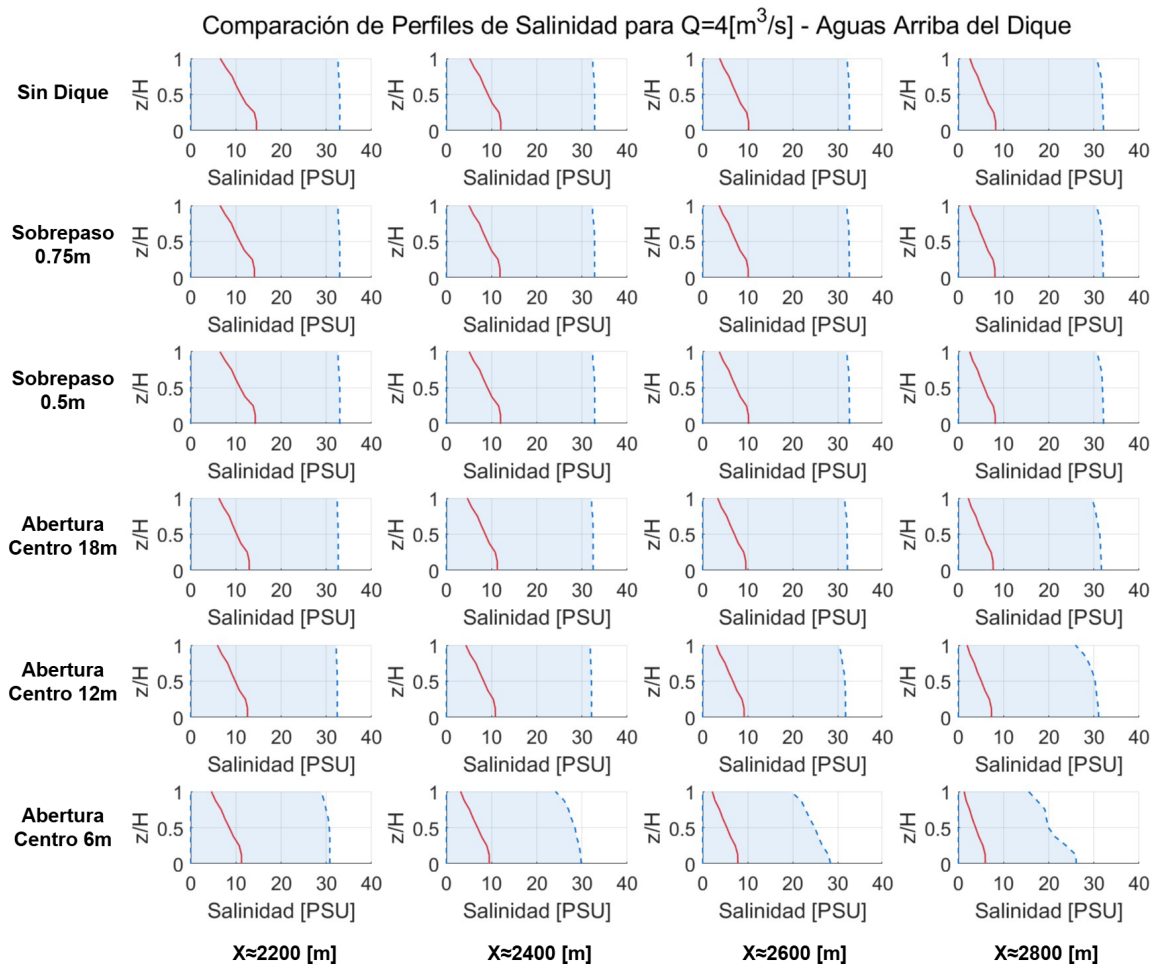


Figura 7.4: Perfiles de salinidad verticales para el caudal de $4m^3/s$, aguas arriba del dique, para los distintos casos de estudio, en una serie de posiciones del eje X, en el centro del estuario. El perfil medio se marca con una línea continua roja, mientras que los perfiles mínimos y máximos en líneas segmentadas azules. El rango entre el mínimo y máximo se marca en azul claro en el fondo.