

## CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO MAIPO

*Leandro Machuca Barra<sup>1</sup>, Mauricio Villagrán V.<sup>2</sup>, Diego Caamaño A.<sup>3</sup>*

*Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. lmachuca@ing.ucsc.cl.*

*Profesor guía, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción. Chile. mvillagran@ucsc.cl.*

*Profesor informante, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción. Chile. dcaamano@ucsc.cl.*

### RESUMEN:

En los últimos años se han evidenciado los efectos del cambio climático a nivel mundial afectando las condiciones climáticas. Esto ha provocado un desbalance estacional, generando aumentos de temperatura, bajas en las precipitaciones y un pronóstico del aumento del nivel del mar. Chile no está exento de estos fenómenos presentándose un escenario actual de importante escasez hídrica. Bajo este contexto, las herramientas tecnológicas que permitan comprender la hidrodinámica de los cuerpos de agua superficiales han adquirido vital importancia.

El presente estudio y sus resultados buscan caracterizar hidrodinámicamente la desembocadura del río Maipo mediante un modelo numérico, cuyo fin es dar respuesta a las problemáticas presentes y futuras que puedan presentar los ecosistemas del estuario.

Para implementar y validar el modelo numérico se han considerado distintos escenarios de caudal y marea que permitan calibrar y representar de la manera más fidedigna el comportamiento hidrodinámico del estuario.

Los resultados muestran un buen ajuste en los distintos escenarios estudiados. Alturas de agua, velocidades y la influencia de la marea se representa adecuadamente para distintos escenarios de caudal. Además, el modelo muestra buenos ajustes al aplicar el constituyente de salinidad. Futuras líneas de investigación pueden incluir otros forzantes que puedan tener influencia en la hidrodinámica del estuario. Algunos de los forzantes que se sugiere incluir corresponden a: temperatura, viento y sedimentos.

**PALABRAS CLAVES:** Hidrodinámica, modelación, río Maipo.

### ABSTRACT:

In recent years, the effects of climate change have been evident worldwide, affecting weather conditions. This has caused a seasonal imbalance, generating temperature increases, lower rainfall and a forecast of sea level rise. Chile is not exempt from these phenomena, presenting a current scenario of significant water scarcity. In this context, technological tools to understand the hydrodynamics of surface water bodies have acquired vital importance.

The present study and its results seek to hydrodynamically characterize the mouth of the Maipo River by means of a numerical model, whose purpose is to respond to the present and future problems that the estuary ecosystems may present.

To implement and validate the numerical model, different flow and tidal scenarios have been considered to calibrate and represent the hydrodynamic behavior of the estuary in the most reliable way.

The results show a good fit in the different scenarios studied. Water heights, velocities and tidal influence are adequately represented for different flow scenarios. In addition, the model shows good fits when applying the salinity constituent. Future lines of research may include other forcings that may influence estuarine hydrodynamics. Some of the forcings suggested to be included are: temperature, wind and sediment.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los estuarios son fundamentales para los ecosistemas y la sociedad, ya que son zonas de desarrollo socio-económico, además de ser fundamentales para la sustentabilidad ambiental, por ser hábitats propicios para gran cantidad de ecosistemas (Ferrera, 2004).

Dada la sequía que atraviesa el país producto del cambio climático (Garreaud & Muñoz, 2014), de los usos y abusos de los recursos que se encuentran a lo largo de los estuarios y al pronóstico de incremento en el nivel del mar (Khojasteh et al., 2021), se hace necesario el estudio de estas zonas tan complejas y críticas para la población.

En la actualidad, se utilizan modelos numéricos que permiten caracterizar estas zonas, los que han sido perfeccionados al nivel de realizar modelos de gran exactitud con respecto a la realidad y que permiten recrear distintas condiciones fluviales. Algunas referencias de este tipo de estudios son “Análisis de los efectos de la descarga del canal del dique sobre la estratificación salina de su desembocadura a la bahía de Cartagena” (Álvarez et al., 2018) y “Metodología para la selección de modelos hidrodinámicos” (Betancur et al., 2015).

Es por esto que la modelación matemática se ha vuelto cada vez más relevante, dado que es una herramienta que permite conocer variables ambientales e hidrodinámicas de un cauce, que ocurren bajo determinadas condiciones de flujo y cómo estas afectan su entorno (Herrera, et al., 2013).

En este marco, el presente proyecto de investigación se ubica en la desembocadura del río Maipo, uno de los sistemas fluviales más importantes y a la vez explotados del país (Urrutia et al., 2021).

El presente estudio busca generar un modelo numérico 2D y 3D utilizando el software Delft3D (Deltares, 2016) a partir de información topo batimétrica del estuario, con el fin de caracterizar la hidrodinámica de la zona de estudio. Para caracterizar la hidrodinámica se definen distintos escenarios de modelación correspondientes a escenarios de caudal históricos proyectados a partir de estaciones fluviométricas (DGA, 2022), condiciones cambiantes de marea y el constituyente de salinidad. Con ellos se caracteriza la hidrodinámica del estuario mediante análisis de la velocidad del flujo, las alturas de agua e intrusión salina.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Caracterizar hidrodinámicamente la desembocadura del río Maipo a partir de herramientas de modelación numérica que permitan obtener resultados para orientar respuestas a problemáticas presentes y futuras en el sistema estuarino en cuestión.

### 2.2 Objetivos específicos

- Definir y caracterizar forzantes principales del estuario (escenarios de caudales y de marea).
- Implementar y calibrar un modelo numérico hidrodinámico del estuario del río Maipo utilizando el software Delft 3D en 2D y 3D.

## 3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El río Maipo nace en las laderas del volcán Maipo a unos 3135 m.s.n.m en la cordillera de los Andes, recorriendo una longitud aproximada de 250 km hasta desembocar en el océano pacífico. La cuenca del río Maipo, una de las más antropizadas de Chile, cubre una superficie de 15.380 m<sup>2</sup>, la mayor parte ubicada en la región metropolitana en el centro de Chile, entre 32°55' -34°15' S y 69°46' -71°43' W. El río Maipo es el principal suministro de agua potable y riego en la región, 70% y 90%, respectivamente (Arróspide et al., 2018). Consecuentemente, el río Maipo es clave para la ciudad de Santiago, pero su estuario se ve fuertemente afectado por el alto uso del recurso hídrico y por ello es un estuario sometido a grandes presiones antrópicas (Urrutia at. 2021).

Esta investigación se centra en la desembocadura del río Maipo, sobre una zona de 4.81 km de longitud desde la costa, entre las comunas de San Antonio y Santo Domingo, Provincia de San Antonio, Región de Valparaíso, Chile (Figura 1).

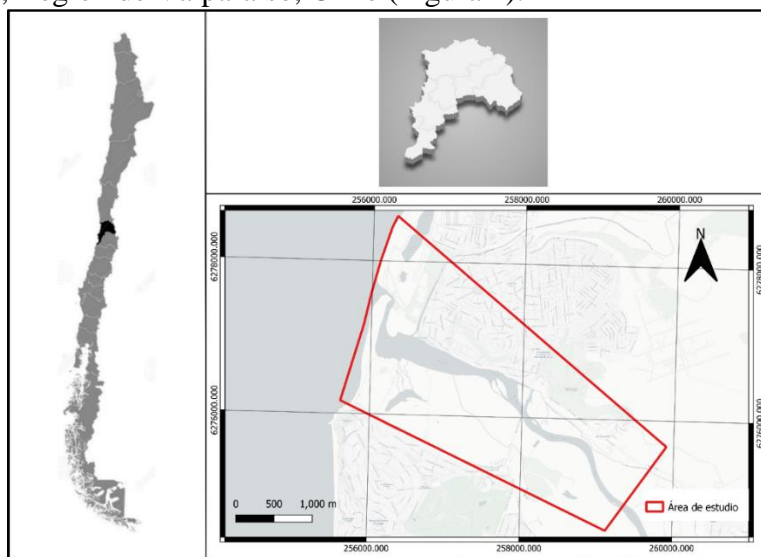


Figura 1 Zona de estudio correspondiente a la parte baja del río Maipo en su desembocadura.

La fotografía histórica obtenida de Google Earth Pro (2022) muestra la dinámica de la barra de sedimentos en la boca para distintas situaciones de caudal (Figura 2). En la barra de sedimentos se genera una leve capa de vegetación y por el costado sur del área de estudio, muy cercano a la línea de costa, se aprecia un humedal con una densa vegetación, que además deja ver como el agua se introduce en el humedal en escenarios de alto caudal como muestra las imágenes de enero 2006 y abril 2007.



Figura 2 Evolución histórica de la desembocadura del río Maipo. Fuente: Google Earth Pro.

## 4 MÉTODOS Y RESULTADOS

El presente capítulo muestra los métodos aplicados para realizar el estudio, así como los resultados obtenidos.

### 4.1 Condiciones iniciales.

Para caracterizar los escenarios de modelación hay parámetros de entrada necesarios, siendo los factores más decisivos correspondientes a las condiciones de borde. Los métodos utilizados para encontrar estos parámetros se describen en los siguientes subcapítulos.

#### 4.1.1 Análisis hidrológico

El cauce cuenta con una estación fluviométrica denominada Río Maipo en Cabimbao (Figura 3). La estación, administrada por la Dirección General de Aguas (DGA), se ubica cercana a la zona de desembocadura y cierra una cuenca que bien representa el caudal que llega a la zona de estudio (Proyecto Maipo, Comisión nacional de riego, 1981). Se extraen los datos de caudales máximos anuales para un periodo de 20 años entre 1999 y 2021, y de caudales

medios mensuales para un periodo de 30 años entre 1989 y 2020. Con lo anterior se realiza un análisis de frecuencia con distintas funciones de ajuste para determinar las probabilidades de ocurrencia de los eventos.

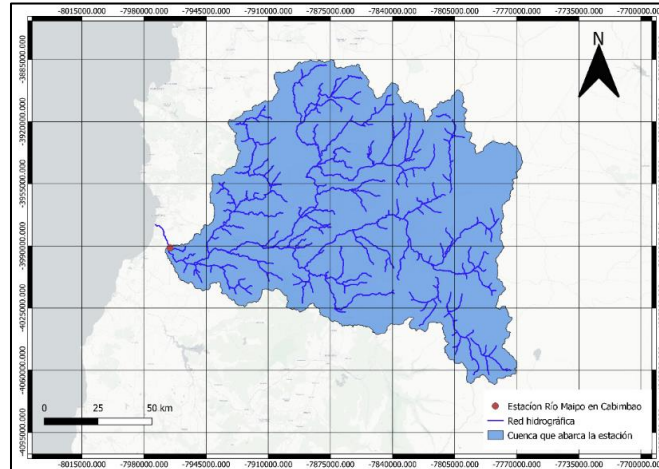


Figura 3 Cuenca de estación Río Maipo en Cabimbao. Fuente propia.

La Figura 4 indica los caudales máximos anuales, y muestra una tendencia a la sequía desde el año 1999. Esto producto de factores como el cambio climático e importante aporte de riegos a lo largo del río (Proyecto Maipo, Comisión nacional de riego, 1981).

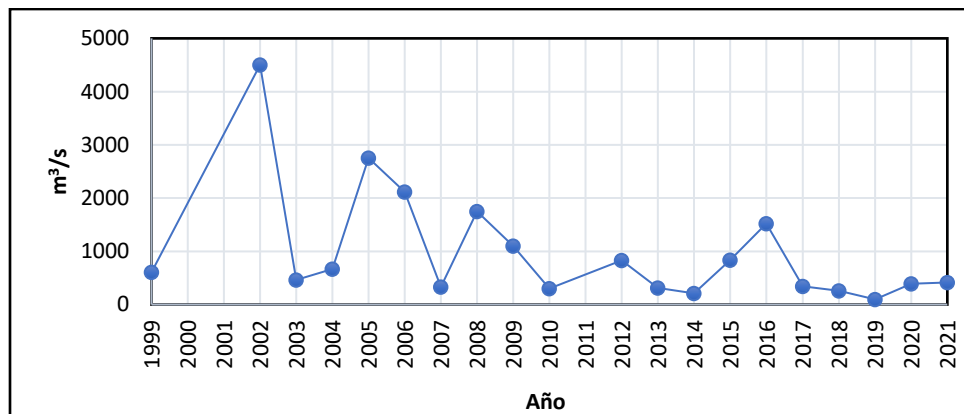


Figura 4 Hidrograma Estación río Maipo en Cabimbao. Fuente propia.

Existe una serie de métodos para realizar análisis hidrológico, que permiten determinar caudales de crecida para distintos periodos de retorno. En este Caso se utilizó un análisis de frecuencia a la serie de datos, realizando un ajuste para las distribuciones de frecuencia Normal, Log-Normal, Pearson, Gamma y Gumbel a la serie de datos confeccionada a través de la función de densidad de probabilidad Weibull.

Para validar que ajuste es el más apropiado, se realizó una prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, cuyo detalle se encuentra en el Anexo 1.

Las pruebas arrojan que el mejor ajuste para caudales máximos anuales es Gamma cuyos valores serán utilizados en los distintos escenarios de inundación (Tabla 1). Para caudales



medios mensuales el ajuste es variable en cada mes con predominancia de ajuste Gamma como muestra la

Tabla 2. Además, la Figura 5 muestra la curva de variación estacional de los caudales, que muestra una clara tendencia pluvio-nival.

Si bien los valores de caudales medios mensuales obtenidos del análisis hidrológico no se utilizarán en los escenarios de modelación, si se consideran 3 valores que son interesantes para ser representados en los modelos (Tabla 3). Estos corresponden al caudal medio mensual mínimo registrado, al caudal medio mensual promedio y al caudal registrado al momento de realizar la topografía del río dado que se utilizará como información para la validación.

*Tabla 1 Caudales máximos anuales para distintos periodos de retorno en m<sup>3</sup>/s. Fuente propia.*

<b>T</b>	<b>P.Exc.</b>	<b>P.Oc.</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Normal</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gamma</b>	<b>Pearson</b>
2	0.5	0.5	626.7	989.2	810.1	628.8	636.7
5	0.2	0.8	1410.7	1906.9	1773.7	1614.0	1626.7
10	0.1	0.9	2155.8	2386.5	2411.7	2388.8	2395.8
20	0.1	1.0	3059.9	2782.7	3023.7	3176.3	3173.4
25	0	1.0	3388.6	2898.1	3217.8	3431.7	3425.0
50	0	1.0	4538.3	3228.5	3815.8	4229.3	4209.4
100	0	1.0	5902.3	3525.8	4409.4	5031.9	4997.3

*Tabla 2 Caudales medios mensuales en m<sup>3</sup>/s. Fuente propia.*

<b>P. Exc.</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
95%	19	25	40	38	21	16	12	15	13	7	13	15
80%	37	52	70	75	54	43	32	40	39	25	25	29
60%	55	77	105	114	95	77	57	71	75	53	42	45
50%	64	89	125	134	118	97	71	89	95	70	52	53
20%	100	139	223	219	222	185	134	168	190	154	107	86
10%	122	172	301	274	295	247	178	223	258	215	157	109
5%	142	204	387	327	364	306	220	275	324	276	214	129
<b>Función</b>	<b>Pearson</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Log Normal</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gamma</b>

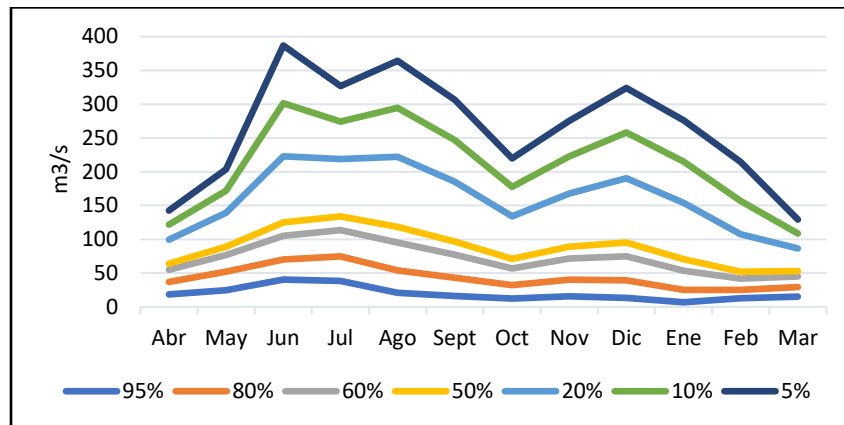


Figura 5 Curva de variación estacional. Fuente propia.

Tabla 3 Caudales medios mensuales considerados en la modelación. Fuente propia.

Caudales medios mensuales (m <sup>3</sup> /s)		
Mínimo mensual bajo (CMMB)	Caudal medio mensual de verificación (CMMV)	Caudal medio mensual promedio (CMMP)
2.35	52	108

#### 4.1.2 Análisis armónico de la marea astronómica

Describir y analizar la marea resulta relevante en estudios costeros, en especial para estudios de estuarios y desembocaduras por su constante interacción.

Para el presente estudio se utilizó la marea astronómica, que se define como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar en respuesta a interacciones gravitacionales entre el Sol, la Luna y la Tierra, con periodos cercanos a las 12 ó 24 horas (Universidad de Granada, 2014).

Los factores armónicos utilizados se pueden ver en la Tabla 4. Para obtenerlos se utilizó el software Matlab, mediante el código U\_Tide a partir de un registro de mareas de 30 días con la respectiva latitud de la estación más cercana al río Maipo, ubicada en San Antonio -33°58'S -71°61'W. Datos extraídos del [www.ioc-sealevelmonitoring.org](http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

Tabla 4 Constituyentes de mareas para la Plataforma Continental, que se encuentra al oeste de San Antonio. Fuente propia.

Constituyente de marea	Amplitud (m)	Fase (grados)
M2	0.425	63.1
S2	0.101	76.3
K1	0.193	37
O1	0.0993	359

Por otro lado, estudios recientes dicen que el nivel del mar podría subir hasta 2 metros en algunas latitudes (Khojasteh et al., 2021). Si bien, para Chile se espera que el aumento no sea tan drástico, se deben considerar posibles movimientos co-sísmicos de subsidencia que hagan descender el terreno. Dado esto, se decidió considerar un modelo que represente como afectaría la subida del mar (o baja del terreno) en la zona de estudio, al que llamaremos SLA

(Sea Level Rise). Para esto se utilizó el caudal de verificación (CMMV, 52 m<sup>3</sup>/s) aguas arriba, conservando los constituyentes y valores de fase de la marea astronómica aguas abajo, pero cambiando la amplitud para todos los casos a 0.7 m.

#### 4.1.3 Rugosidad

Para las simulaciones se consideró un Manning de 0.03 en la totalidad del modelo, cuyo valor fue decidido al consultar los Coeficientes de rugosidad de Manning. Chow V.T., 1982 y Roughness Characteristics of natural Channels, 1967.

A pesar de que la rugosidad es claramente variable en la zona de estudio, lo que se puede deducir en la fotografía satelital por las visibles diferencias de vegetación. Se decidió utilizar un factor constante de rugosidad, dado que no se cuenta con los datos suficientes para caracterizar cada tramo.

#### 4.1.4 Temperatura, viscosidad, difusividad, densidad y salinidad

Hay que considerar que no se cuenta con datos de temperatura, viscosidad, difusividad, densidad y salinidad de la zona de estudio. Dado esto, tanto para temperatura, viscosidad, difusividad y densidad se utilizaron los valores sugeridos por defecto en el software (Tabla 5). En tanto, para salinidad se consideró el valor medio de salinidad del océano pacifico (Temperature and salinity, Ocean Pacific, Britannica) en la condición de borde aguas abajo, cuyas fórmulas de transporte utilizadas por el software se describen en el apartado d) del capítulo 4.4.2.

Dado que no se cuenta con mediciones se debe tener presente un grado de incertidumbre del modelo.

*Tabla 5 Variables utilizadas en el módulo FLOW. Fuente propia.*

Temperatura (°C)	Salinidad aguas abajo (ppt)	Salinidad aguas arriba (ppt)	Viscosidad (m <sup>2</sup> /s)	Difusividad (m <sup>2</sup> /s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
15	35	0	1	10	1000

#### 4.1.5 Altura de agua inicial

Los escenarios parten con un nivel de agua de 1 m con la finalidad de omitir el proceso de llenado de agua del estuario, que se traduce en menores tiempos de warm up y simulación. Sin embargo, la altura inicial de agua para el escenario con el menor caudal medio mensual registrado (CMMB) parte de los 0 m con el fin de representar zonas que no se cubren de agua bajo estas condiciones.

## 4.2 Topo-batimetría de la zona de estudio

En 2021 se llevó a cabo un levantamiento geodésico realizado por instituto Milenio SECOS que contempló:

- *Línea de bajamar*

- *Línea de pleamar*
- *Topográfica de detalle*
- *Topo-batimetría*

El levantamiento se realizó a partir de tres vértices geodésicos en periodos de marea baja. Esta topografía corresponde a la utilizada en el desarrollo de la investigación, que además se complementó con un relleno de datos en las zonas en que no se tiene información topográfica realizada en terreno (boca del río y zonas de inundación) y es relevante para la modelación del estuario con fines de obtener una mejor calibración y representación de la hidrodinámica del río. La Figura 6 muestra la zona de estudio con las áreas correspondientes al relleno de datos y topografía existente.

El relleno de datos en las zonas de inundación contempla un área de 5.77 km<sup>2</sup> y se realizó utilizando los datos del software Global Mapper 2.0, a los cuales se les aplicó una compensación de 1.75 m, la cual resultó de comparar los datos tomados en terreno mediante GPS con los entregados por el software.

El relleno de datos en la boca tiene una longitud de 0.57 km y se realizó siguiendo la misma tendencia de alturas que trae el río hasta llegar a alturas bajo el nivel del mar. Para confeccionar el relleno de datos se utilizó el software Autodesk Civil 3D 2022 y el módulo QUICKIN de Delft 3D. Que resulto de generar un perfil longitudinal con la topografía existente, el que se tomó como referencia para realizar el relleno, siguiendo la tendencia de profundidades del perfil en esta zona (Anexo 2).

Una de las características del estuario es la rápida dinámica morfológica de la barra de sedimentos frente a cambios estacionales (Figura 2). Que, tiende a aumentar su ancho en condiciones de mayor caudal. Por lo que se debe tomar en cuenta que la topografía existente en la línea de costa no llega hasta el nivel del mar (Figura 7), lo que limita la interacción del mar con el agua proveniente del río. Dado esto, se realizó un relleno de puntos en esta área, con profundidades que van bajo el nivel del mar, con el fin de dar representación a condiciones de gran caudal que pueden tener interacción a lo largo de la barra de sedimentos. Dado que el relleno de la zona de inundación del estuario se realizó utilizando software (Global Mapper 2.0) al igual que en el relleno de la boca (Autodesk Civil 3D 2022 y Delft 3D-QUICKIN), es que se considera un grado de incertidumbre en estos datos topo batimétricos, que deben ser corregidos para una mejor predicción del modelo.

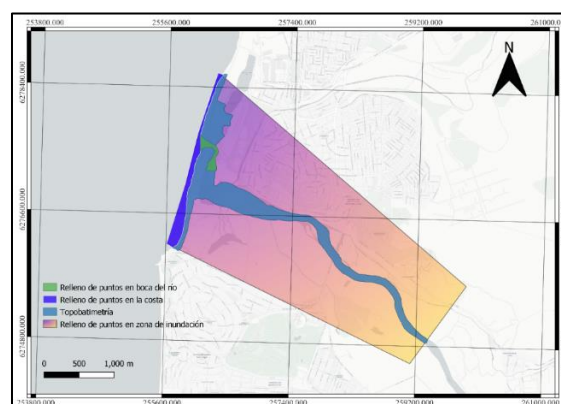


Figura 6 Representación de topografía y relleno de puntos. Fuente propia.

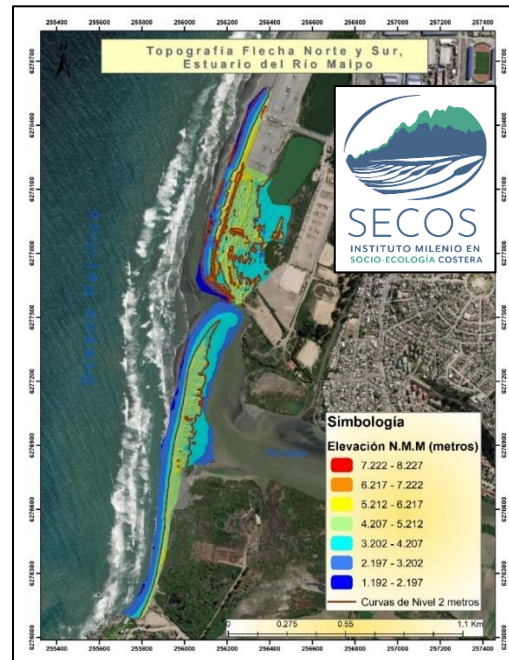


Figura 7 Topografía de línea de costa en río Maipo. Fuente: Instituto Milenio SECOS.

### 4.3 Confección de malla

Delft 3D es una herramienta de modelación numérica en dos y tres dimensiones con enfoque en hidrodinámica, morfología, transporte de sedimentos y calidad de agua. Contiene los módulos FLOW, Waves y MOR los que pueden ser utilizados en forma conjunta o independiente. La presente investigación utiliza el módulo FLOW (Deltares, 2022).

#### 4.3.1 Malla – Método numérico y estabilidad.

La malla se generó en el módulo GRID-RGFGRID y considera la totalidad de la zona de estudio vista en el capítulo anterior. Los factores que se consideraron al confeccionar la malla están ligados a la buena calidad de resultados y estabilidad de la solución del modelo para el menor gasto computacional posible. Para esto existen dos medidas dentro del software que permiten visualizar la calidad de la malla. El primer valor a verificar es la ortogonalidad (modelo RGFGRID), cuyo valor se puede cuantificar midiendo el ángulo formado entre los lados de cada elemento de la malla. Su valor recomendado no debe exceder de  $\cos(\theta) < 0.002$  en zonas de interés (Deltares a), 2014). El siguiente valor tiene relación con el paso de tiempo (time step), el cual se debe definir acorde al espaciamiento utilizado en la discretización espacial (malla). La solución numérica utilizada por el software no es exacta, presenta variaciones en el tiempo, por lo que se condiciona el modelo por el número de Courant, el cual nos entrega un criterio de estabilidad en el modelo (1).

$$C = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad 1$$

Donde;

$\Delta t$  = Paso de tiempo (s).

$g$  = Aceleración de gravedad ( $m/s^2$ ).

$H$  = Profundidad total del agua (m).

$\{\Delta x, \Delta y\}$  = Valor característico del espaciado de la cuadrícula en cualquier dirección (m).

El criterio nos dice que el Courant no debe exceder el valor en 11 para zonas de interés del modelo (Deltares b), 2016). Este valor se puede verificar en el módulo QUICKIN, luego de triangular los puntos de elevación que se encuentren en la malla y puede variar con el paso del tiempo que se utilice para modelar, donde menor paso de tiempo entrega mayor detalle a cambio de mayor costo computacional. Siendo un paso de tiempo de 6 segundos el que mejor se ajusta en todos los escenarios.

Bajo este contexto, se consideraron mallas con distintas formas, tamaños y pasos del tiempo con las que se realizó un ajuste de sensibilidad, comparando las soluciones que entrega cada malla (con distintos pasos del tiempo) en tamaños decrecientes hasta llegar al criterio establecido, es decir, que no exista una diferencia significativa en la solución y respetando la estabilidad de la misma.

La malla utilizada (Figura 8) se escogió dado se cumple con todas las características descritas. Además, al ser una malla rectangular, permite abarcar un mayor perímetro sin disminuir la calidad de los valores de ortogonalidad y Courant, asimismo facilita la implementación de las condiciones de contorno. En el mismo modulo se agregaron 5 puntos de observación, donde el punto 1 está ubicado en la boca y será utilizado como punto de comparación para ver la influencia de la marea a lo largo de la zona de estudio. El punto de observación 2 se ubica en el angostamiento, observación 3 antes del angostamiento, observación 4 a 0.65 km de la boca y el punto de observación 5 a aguas arriba del modelo.

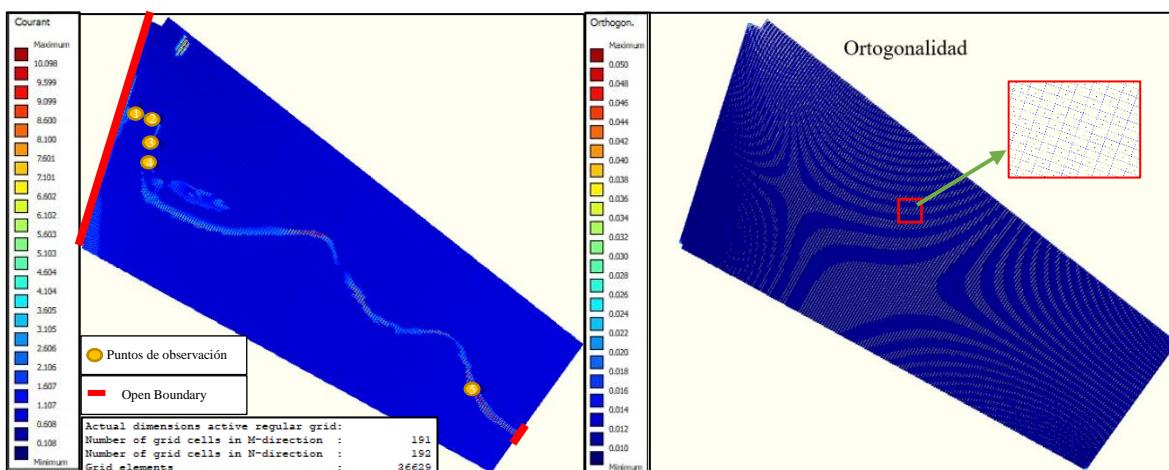


Figura 8 Malla utilizada en los modelos con sus valores de Courant y Ortogonalidad. Fuente propia.

#### 4.4 Modulo FLOW - Método numérico y aplicación

El módulo FLOW es el eje principal de Delft 3D, permite modelar de manera bidimensional o tridimensional para simular la hidrodinámica producto de fenómenos de transporte que

resulta de las mareas y variables meteorológicas. Se puede utilizar en predicción de flujos de aguas poco profundas, como ríos, estuarios y lagos.

Tabla 6 Lista de simbología utilizada en métodos numéricos.

Simbología	Unidad	Definición
$\zeta$	m	Nivel de agua arriba de algún plano de referencia horizontal (datum)
t	s	Tiempo
d	m	Profundidad debajo de algún plano de referencia horizontal (datum)
	-	Coordenadas curvilíneas horizontales
U	m/s	Velocidad promedio en la dirección $\xi$
V	m/s	Velocidad promedio en la dirección $y$ o $\eta$
$\sqrt{G\eta\eta}$	m	Coficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares
$\sqrt{G\xi\xi}$	m	Coficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares
u	m/s	Velocidad del flujo en la dirección $x$ o $\xi$
v	m/s	Velocidad del flujo en la dirección $y$ o $\eta$
$\omega$	m/s	Velocidad en la dirección $\sigma$ (sistema de coordenadas)
w	m/s	Velocidad del flujo en la dirección $z$
$fv$	1/s	Parámetro de Coriolis
$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	Densidad de referencia del agua
$\sigma$	-	Escala de la coordenada vertical
H	m	Profundidad total del agua ( $H=d+\zeta$ )

#### 4.4.1 Sistema de coordenadas $\sigma$

En la dirección vertical, para modelos tridimensionales Delft-3D Flow usa dos sistemas diferentes de malla (Figura 9). El sistema de coordenadas  $\sigma$  ( $\sigma$  model) definido en la ecuación 2 y sistema de coordenadas cartesiano Z (Z model). Para el presente estudio se utilizó el  $\sigma$  model, considerando 10 capas.

En consecuencia, las ecuaciones hidrodinámicas descritas en el presente capítulo son válidas para el sistema de coordenadas  $\sigma$  promediado en la vertical en cada una de las capas estudiadas (Deltares c), 2016).

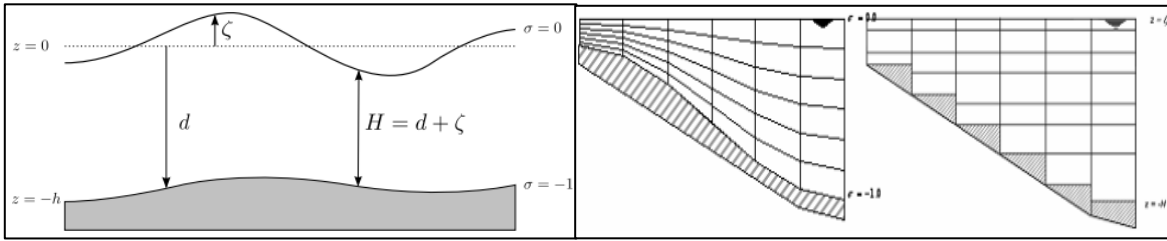


Figura 9 Definición de Altura de agua, profundidad, profundidad total y sistema de coordenadas  $\sigma$  y  $Z$ .

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad 2$$

#### 4.4.2 Ecuaciones hidrodinámicas

Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible, bajo las suposiciones de aguas poco profundas y de Boussinesq. En la ecuación de cantidad de movimiento vertical las aceleraciones verticales son despreciadas, lo que conduce a la ecuación de la presión hidrostática. En modelos 3D las velocidades verticales son calculadas desde la ecuación de continuidad. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando las ecuaciones RANS para caracterizar el sistema (Deltares c), 2016).

##### a) Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad promediada en profundidad se deriva integrando la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles ( $\nabla \cdot \bar{u} = 0$ ) sobre la profundidad total, teniendo en cuenta la cinemática. Donde las condiciones de contorno en la superficie del agua y al nivel del lecho está dada por la ecuación 3 (Deltares c), 2016):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G\eta\eta}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G\xi\xi}]}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad 3$$

Donde U y V es la velocidad promediada en profundidad.

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_a^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad 4$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_a^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad 5$$

Donde  $Q$  es la representación de los aportes por unidad de área debido a la descarga o extracción de agua, precipitación y evaporación:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad 6$$

Con  $q_{in}$  y  $q_{out}$  las fuentes y sumideros locales de agua por unidad de volumen (l/s), respectivamente,  $P$  el termino de fuente no local de precipitación y  $E$  termino de sumidero no local debido a la evaporación (Deltares c), 2016).

b) Ecuación de cantidad de movimiento en el plano horizontal

Las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$  están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ - f_v = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} p_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (vV \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + M_{\xi} \end{aligned} \quad 7$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_u \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} p_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (vV \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_{\eta} \end{aligned} \quad 8$$

Las variaciones de densidad son despreciables, excepto en los términos de la presión  $P_{\xi}$  y  $P_{\eta}$ . Las fuerzas  $F_{\xi}$  y  $F_{\eta}$  representan el balance de las tensiones de Reynolds horizontales.  $M_{\xi}$  y  $M_{\eta}$  representan la contribución debido a las fuentes o sumideros externos de cantidad de movimiento. Las tensiones de Reynolds son modeladas usando el concepto de viscosidad turbulenta (Deltares c), 2016).

c) Velocidad vertical

La velocidad vertical  $\omega$  en el sistema de coordenadas  $\sigma$  adaptable, se calcula a partir de la ecuación de continuidad (9):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \\ = (d + \zeta)(q_{in} - q_{out}) \end{aligned} \quad 9$$

d) Ecuaciones de transporte para modelo  $\sigma$

Los caudales de los ríos, estuarios y mares costeros suelen transportar sustancias disueltas, salinidad y/o calor. En Delft3D-FLOW, el transporte de materia y calor se modela mediante una ecuación de advección-difusión en tres direcciones. Los términos fuente y sumidero se incluyen para simular descargas y retiros. También se puede tener en cuenta los procesos de descomposición de primer orden. Un proceso de decaimiento de primer orden corresponde a una solución numérica que es exponencialmente decreciente

La ecuación de transporte se formula en forma conservativa en coordenadas curvilíneas ortogonales en dirección horizontal y coordenadas  $\sigma$  en la dirección vertical (Deltares c, 2016).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(d + \zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left( \frac{\partial[\sqrt{G\eta\eta}(d + \zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G\xi\xi}(d + \zeta)vc]}{\partial \eta} \right) & \quad 10 \\ + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} \\ = \frac{d + \zeta}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ DH \frac{\sqrt{G\eta\eta}}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ DH \frac{\sqrt{G\xi\xi}}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right) \\ + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( DV \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d (d + \zeta) c + S \end{aligned}$$

Donde DH es el coeficiente de difusión horizontal, DV el coeficiente de difusión vertical,  $\lambda_d$  representa el proceso de descomposición de primer orden y S los términos fuentes y sumidero por unidad de área debido a la descarga  $q_{in}$  o extracción  $q_{out}$  de agua y/o el intercambio de calor a través de la superficie libre  $Q_{tot}$  (Deltares c, 2016).

#### 4.4.3 Modelos

La investigación se agrupo en tres tópicos para modelar los distintos escenarios. Los modelos comparten parámetros de paso de tiempo, ubicación de fronteras abiertas/cerradas en la malla, rugosidad, viscosidad, temperatura, difusividad, densidad y salinidad (si corresponde) descritos en capítulos anteriores (4.1) y resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores comunes en los modelos para modulo FLOW. Fuente propia.

Temperatura	°C	15
Gravedad	m <sup>2</sup> /s	9.81
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000
Roughness   Manning	-	0.03
Viscosidad	m <sup>2</sup> /s	1
Difusividad	m <sup>2</sup> /s	10
Intervalo	minutos	10
Capas (modelos 3D)	Cantidad	10
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000
Time Step	Minutos	0.1
Salinidad aguas abajo (Modelos 3D)	ppt	35

Salinidad aguas arriba (Modelos 3D)	ppt	0
--	-----	---

Las condiciones de borde (4.1.1 y 4.1.2), periodos de simulación y estabilización (warm up), varían para cada escenario y son resumidos en la Tabla 8 junto a la nomenclatura utilizada para cada uno. En particular el tiempo de simulación y warm up ronda las 9 horas en todos los modelos, a diferencia del modelo con el menor caudal registrado (CMMB) que necesita mayor tiempo, dado que este toma periodos mayores para cubrir la superficie de agua dado su bajo caudal. A medida que el caudal es mayor el modelo se estabiliza en un menor tiempo, y los lapsos de simulación y warm up pueden ser menores.

Tabla 8 Resumen de datos ingresados al módulo FLOW para cada escenario. Fuente propia.

Datos de entrada		Unidad	Caudales medios mensuales			Sea elevation rise (Escenario proyectado)	Caudales de inundación					
			CMMV	CMMB	CMMP		SLR	T=2	T=10	T=25	T=50	T=100
Dimensión	2D/3D		3D	3D	3D	3D	2D	2D	2D	2D	2D	
Tiempo de simulación	Días		5	2	2	2	2	2	2	2	2	
Constituents (salinity)	Ppt		35	35	35	35	-	-	-	-	-	
Water level	Metros		0	1	1	1	1	1	1	1	1	
Warm up	Horas		9	48	9	9	8	8	8	7	4	
Fronteras abiertas	Aguas arriba (Total discharge - Time series)	m <sup>3</sup> /s		2.35	52	108	52	628.8	2388.8	3431.7	4229.2	5031.898
			Amplitud (m)	M2	0.425	0.425	0.425	0.7	0.425	0.425	0.425	0.425
	Aguas abajo (Water level- Astronomic)	Fase (grados)	S2	0.101	0.101	0.101	0.7	0.101	0.101	0.101	0.101	0.101
			K1	0.193	0.193	0.193	0.7	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193
			O1	0.0993	0.0993	0.0993	0.7	0.0993	0.0993	0.0993	0.0993	0.0993
			M2	63.1	63.1	63.1	63.1	63.1	63.1	63.1	63.1	63.1
			S2	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3
			K1	37	37	37	37	37	37	37	37	37
			O1	359	359	359	359	359	359	359	359	359

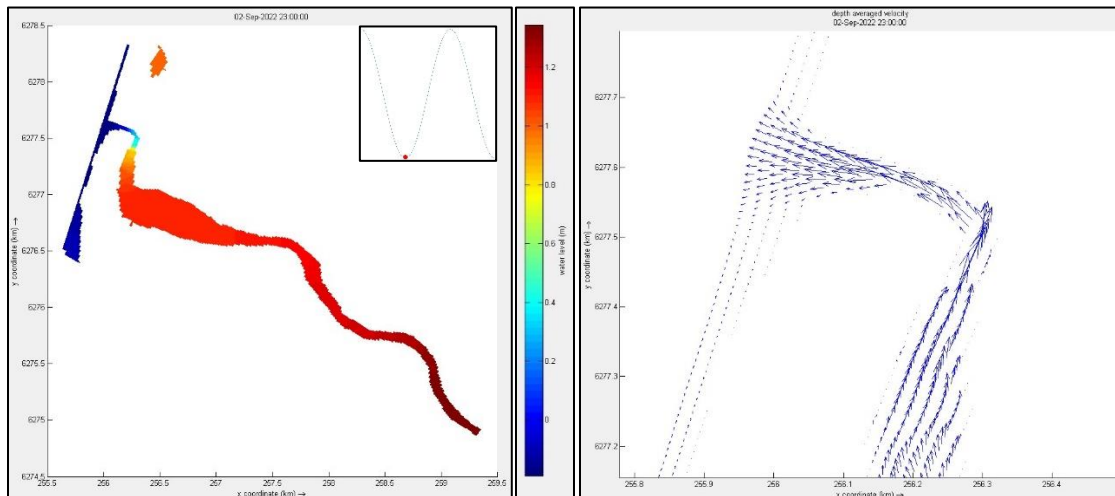
a) Caso CMMV

El escenario con el caudal de verificación corresponde al caudal medio mensual registrado el mes que se realizó la topografía (52 m<sup>3</sup>/s). Es importante para verificar si la modelación tiene un ajuste apropiado, vale decir, que represente el cauce en su condición original. Para esto se utilizó una fotografía satelital histórica de aquel mes (Google Earth Pro, 2022), en la que se superpuso a los resultados de altura de agua obtenidos por el software (Figura 10). Al comparar estos resultados gráficos se obtiene un ajuste adecuado a lo largo del río, esto se concluye al comparar las zonas que visiblemente tienen agua en la fotografía satelital, con los resultados entregados por software.



Figura 10 Superposición del nivel de agua modelado por el software en imagen satelital, agosto 2021. Fuente propia.

Al ver los resultados de alturas de agua y velocidad en marea alta/baja (Figura 11) obtenidos para el presente escenario, se puede notar que en ambos casos la altura de agua promedio los 1.2 m bajando gradualmente hasta el nivel del mar al aproximarse a la boca.



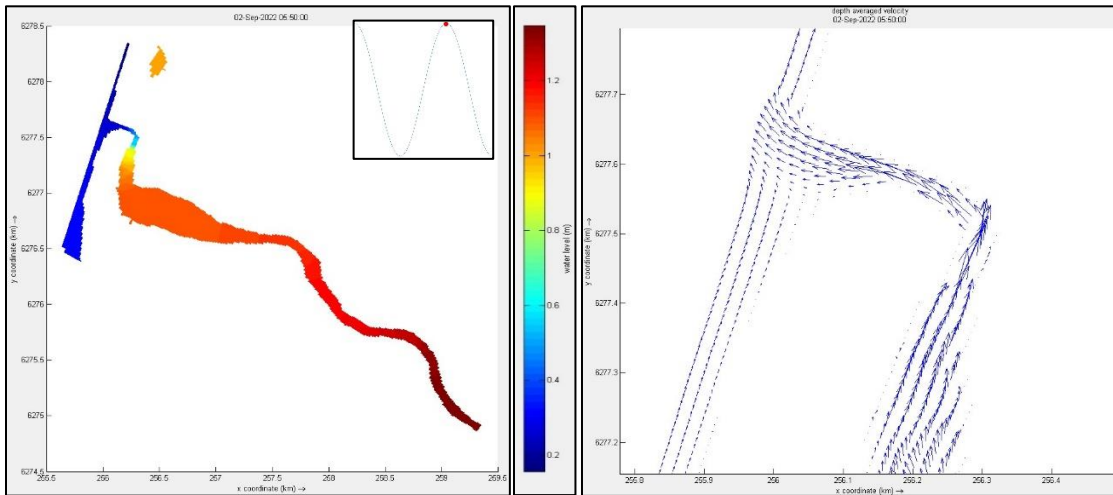


Figura 11 Caudal medio mensual registrado al momento de realizar la topografía. Fuente propia.

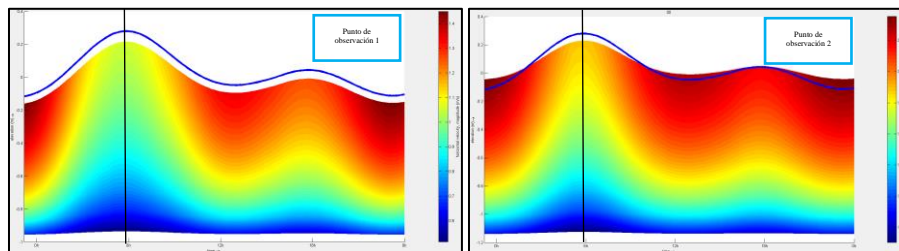
Esto se refleja en las velocidades horizontales, donde la máxima en el punto de observación 1 es de 1.4 m/s, observación 2 de 2.2 m/s, observación 3 de 0.9 m/s, observación 4 de 0.7 m/s y observación 5 de 0.24 m/s (Figura 12).

La velocidad sube considerablemente en el punto de observación 2 (36.3%), esto producto del angostamiento y los grandes aportes de caudal aguas arriba. Sin embargo, estas disminuyen a medida que los puntos de observación entran en el estuario (59% entre punto de observación 2 y 3) dado el aumento del área de escurrimiento.

Por otro lado, la Figura 12 nos muestra la superposición de la señal de marea de la boca en los puntos de observación, el que arrojó un desfase desde el punto 3 y se extiende hasta el punto de observación 5 (Tabla 9).

Tabla 9 Desfase de señal de marea respecto a velocidad horizontal. Fuente propia.

Punto de observación	Hora de señal de marea (marea alta)	Hora de velocidad horizontal mínima (marea alta)	Desfase (min)
1	5:50	5:50	0
2	5:50	5:50	0
3	5:50	6:20	30
4	5:50	6:30	40
5	5:50	7:40	100



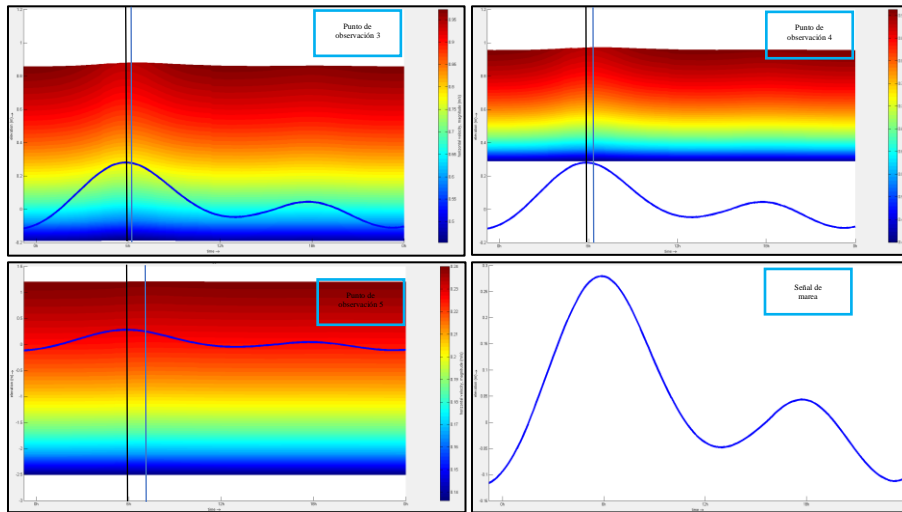


Figura 12 Velocidad horizontal vs señal de marea en puntos de observación para CMMV. Fuente propia.

La intrusión salina se desarrolla solo en los primeros metros del perfil longitudinal de la Figura 13, donde esta solo logra entrar al río en los primeros 150 m cuando la marea es alta.

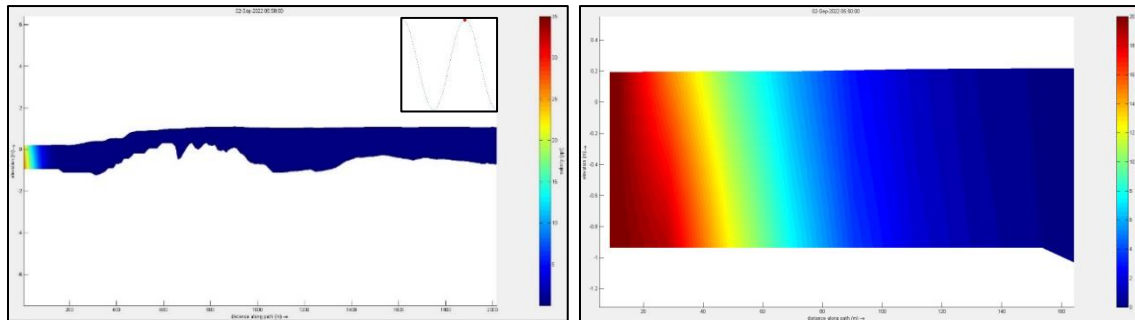


Figura 13 Intrusión salina para caudal de calibración, perfil longitudinal desde la boca del río Maipo. Fuente propia.

b) Caso CMMB

Los resultados del escenario correspondiente al caudal medio mensual más bajo registrado ( $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figura 14) entrega una altura de agua permanente de 0.5 m (58% menor al caso CMMV) que decrece hasta el nivel del mar al llegar a la boca. Esta altura es más bien constante a lo largo del río en periodos de marea alta y baja, viendo solo cambios notorios en la boca del río producto de la influencia de la marea.

Por otro lado, los vectores de velocidad de la Figura 14 muestran como entran por la parte sur de la boca en periodos de marea alta y por el sector norte en marea baja, siendo notoria la intrusión de la marea al estuario en periodos de marea alta, cuyos vectores entran hasta el punto de observación 1 y luego se ven frenados por el caudal de salida del estuario. Esto, dado que, a diferencia de la marea proveniente del norte, la barra de sedimentos no bloquea el paso directo del flujo.

La velocidad horizontal en la superficie en el punto de observación 1 es de 0.25 m/s, observación 2 de 0.23 m/s, observación 3 de 0.15 m/s, el punto de observación 4 no tiene

datos de velocidad por estar seco y el punto de observación 5 tiene una velocidad de 0.02 m/s (Anexo 3).

Esto nos da un indicativo de la alta influencia de la marea en condiciones de caudal bajo, donde las velocidades son más bien semejantes en la boca y se aceleran levemente producto del angostamiento, a diferencia del modelo CMMV, en el que la velocidad aumenta considerablemente producto de los aportes aguas arriba. Además, los vectores de velocidad indican un alto cambio en la direccionalidad del caudal de salida del río.

Otro indicativo de la influencia de la marea en el estuario es la intrusión salina como muestra el perfil longitudinal de la Figura 15, donde se ve como la salinidad del mar se introduce hasta los 2 km cuando la marea es alta a diferencia de los 150 m del CMMV.

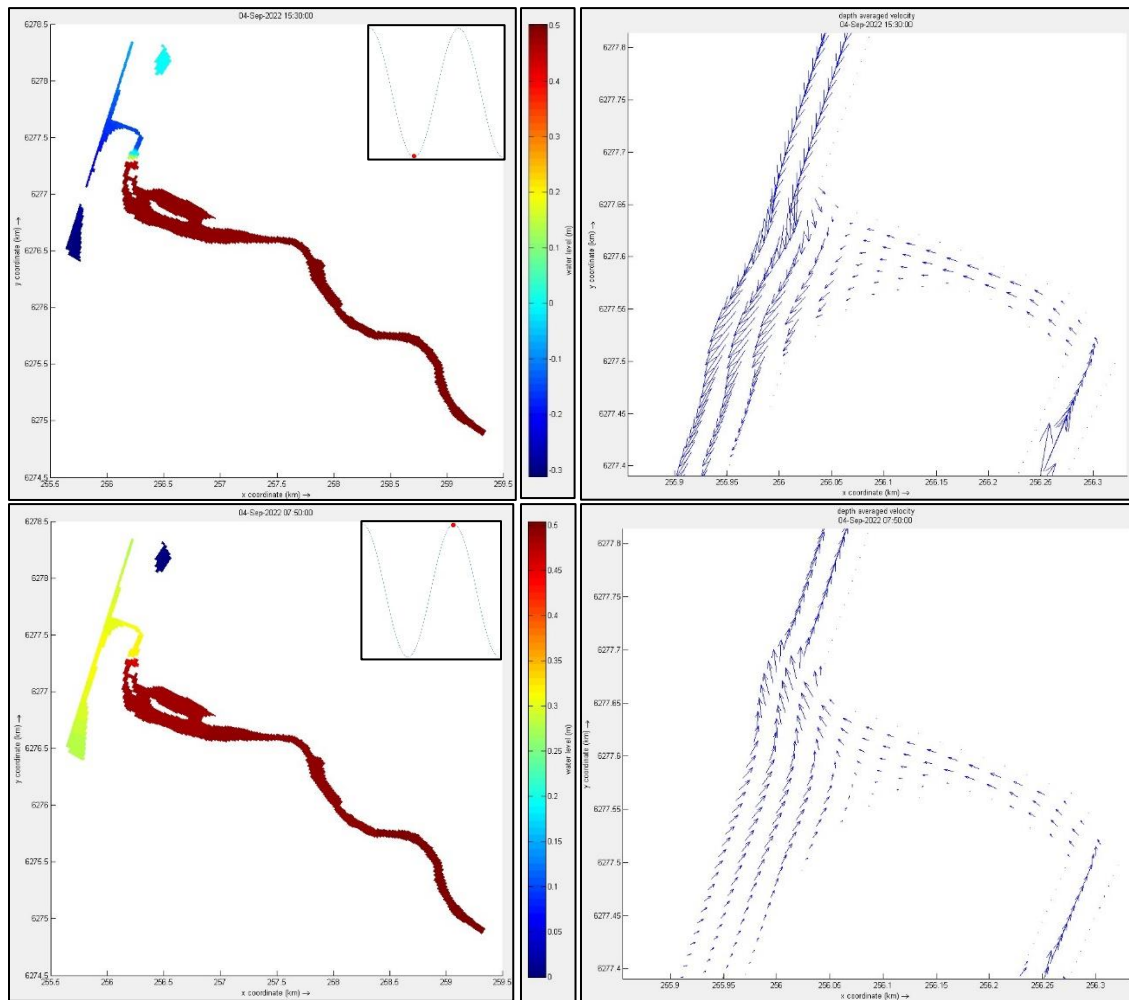


Figura 14 Caudal medio mensual mínimo registrado, altura de agua y vectores de velocidad en la boca.  
 Fuente propia.

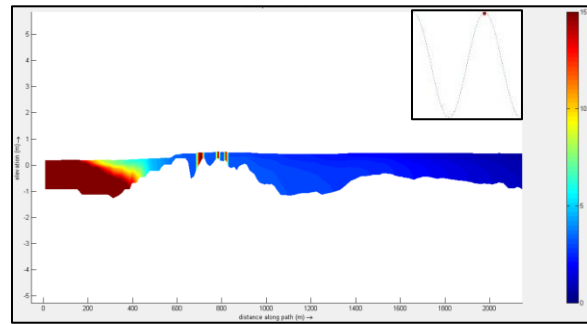


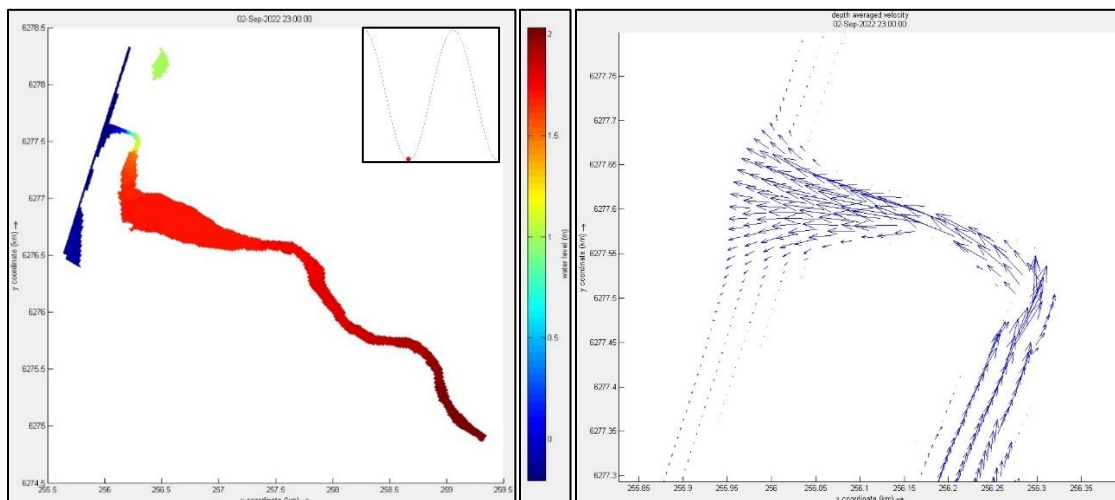
Figura 15 Intrusión salina para caudal bajo, perfil longitudinal desde la boca del río Maipo. Fuente propia.

c) Caso CMMP

El escenario con el caudal medio mensual promedio del río ( $108 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sigue la tendencia del modelo CMMV, la influencia del aumento de caudal aguas arriba es tan grande que solo se aprecia un pequeño efecto de la marea en condiciones de marea alta, por consecuencia, el efecto de la marea es mínimo a lo largo del estuario.

La velocidad horizontal en la superficie para el punto de observación 1 es de 2.5 m/s, observación 2 de 3.5 m/s, observación 3 de 1.2 s, observación 4 de 0.8 m/s y observación 5 de 0.4 m/s (Anexo 4). Es decir, se genera el mismo efecto que en el escenario a) pero intensificado.

Este efecto es aún más notorio al ver la intrusión salina, como muestra el perfil longitudinal de la Figura 17, donde la salinidad solo logra entrar al río en los primeros 87 m cuando la marea es alta, efecto que se ve minimizado respecto a los escenarios anteriores.



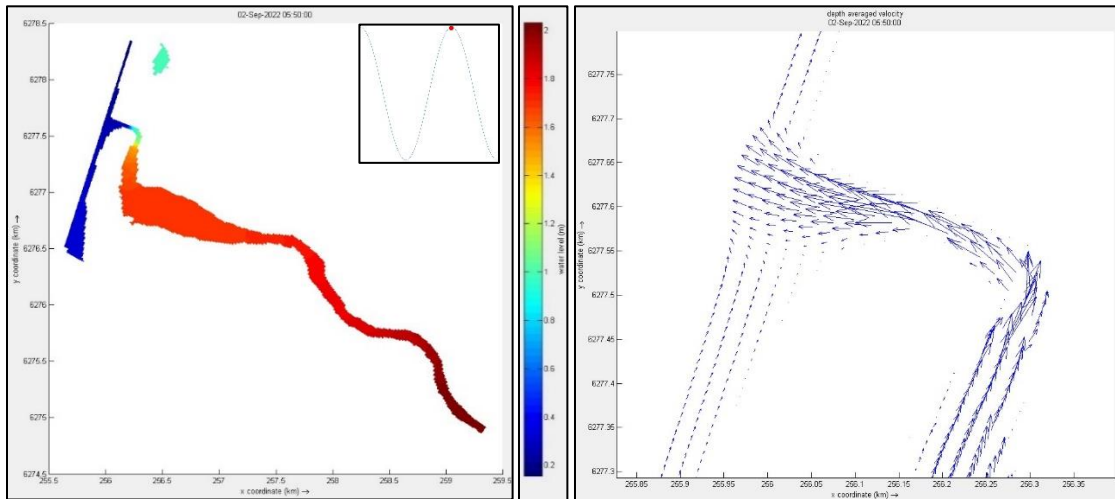


Figura 16 Caudal medio mensual promedio registrado. Fuente propia.

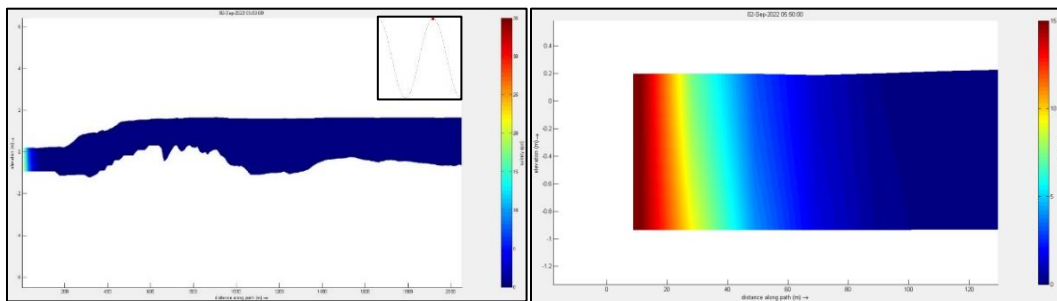


Figura 17 Intrusión salina para caudal promedio del río Maipo, perfil longitudinal desde la boca del río. Fuente propia.

#### d) Casos caudales de inundación

Los caudales de inundación ilustran las zonas propensas a ser inundadas y muestran como la boca del río se expande a medida que el caudal aumenta (Figura 18), lo cual es concordante con lo ya visto en la fotografía histórica (Figura 2).

De los escenarios de inundación el periodo de retorno  $T=2$  años muestra un ajuste representativo, donde se ve como la barra de sedimentos tiende a abrirse y se introduce agua por la zona del humedal (indicado como Buen ajuste), tal como muestra la fotografía satelital en enero 2006 y abril 2007 (Figura 2).

Los demás escenarios modelados ( $T=10$  años,  $T=25$  años,  $T=50$  años y  $T=100$  años) tienen el mismo efecto que  $T=2$  pero aumentado. A medida que crece el caudal, la barra de sedimentos es lavada de la desembocadura y el río tiene una boca más ancha. Sin embargo, se producen embancamientos de agua en ciertos sectores (indicados como “Mal ajuste”), dado que el agua se peralta cuando se encuentra con los límites de la malla que se encuentran cerrados.

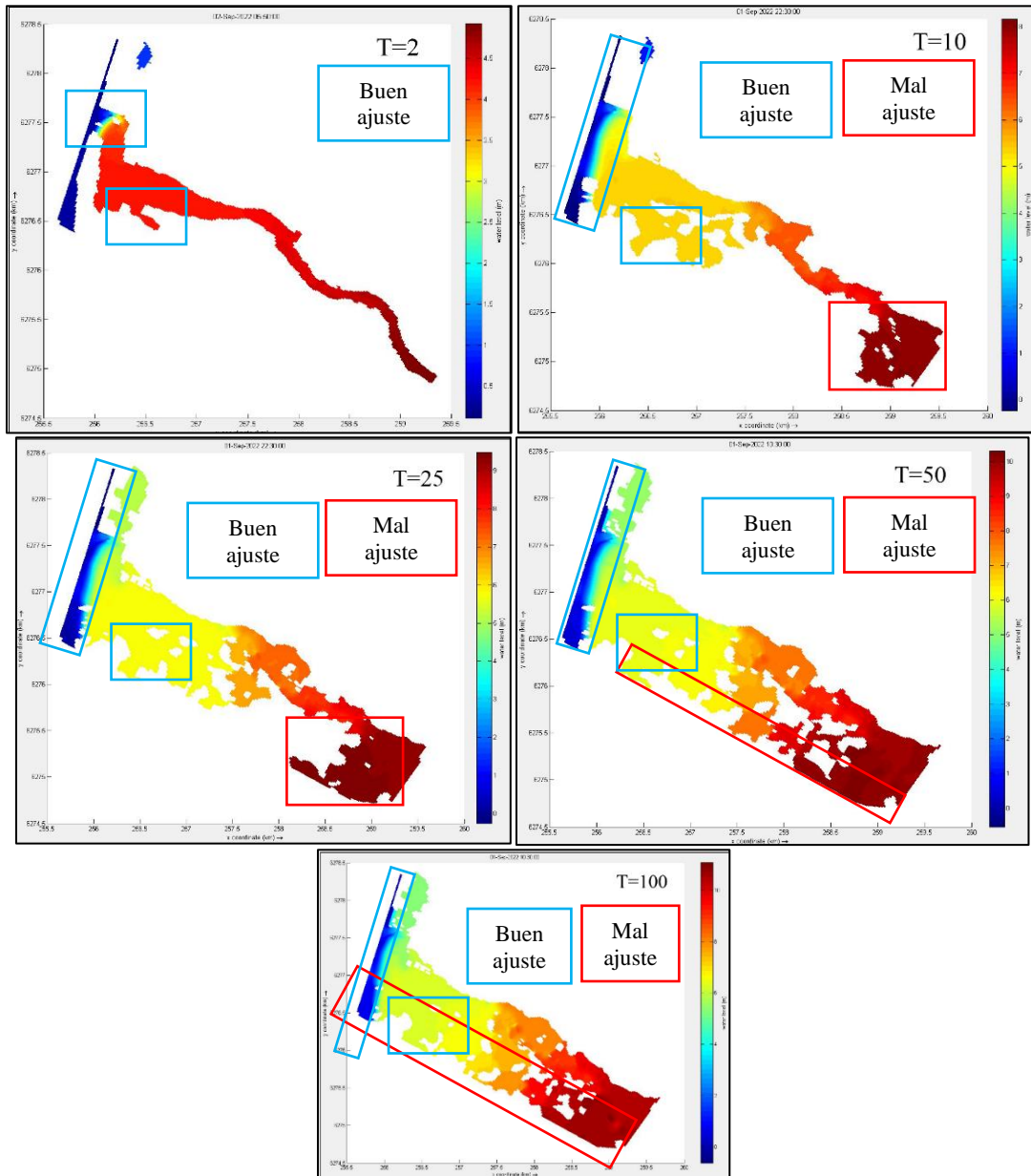


Figura 18 Altura de agua en la desembocadura del río Maipo para los distintos periodos de retorno. Fuente propia.

e) Sea leve lise SLR (modelación 3D)

El modelo SLR correspondiente a la elevación del nivel del mar (o baja del terreno), nos sirve para proyectar los efectos de esta alza a lo largo del estuario. Hay que considerar que para el modelo de SLR se utilizó como base el modelo de caudal medio mensual de verificación (a) sólo que cambiando la amplitud de los constituyentes de marea. Se optó por dicho modelo al ser el que mejor representa la situación actual, por lo cual, los resultados obtenidos en el modelado SLR serán comparados con dicho modelo para ver las diferencias de la situación actual con la proyectada.

La Figura 19 refleja el notorio aumento del nivel del mar entre el modelo SLR y CMMV, donde es evidente el significativo cambio de la cota de agua para la condición de SLR. La marea en el modelo CMMV muestra una baja incidencia a lo largo del estuario, lo que se ve reflejado en como esta apenas muestra una altura de agua de 0.01 m para marea alta en el punto de observación 4. En cambio, este valor aumenta hasta 0.09 m para el caso SLR en el mismo punto de observación. Este efecto se produce en menor medida incluso en el punto de observación 5 que se encuentra a casi 4.7 km de la boca, donde la influencia de la marea para el modelo CMMV es muy bajo.

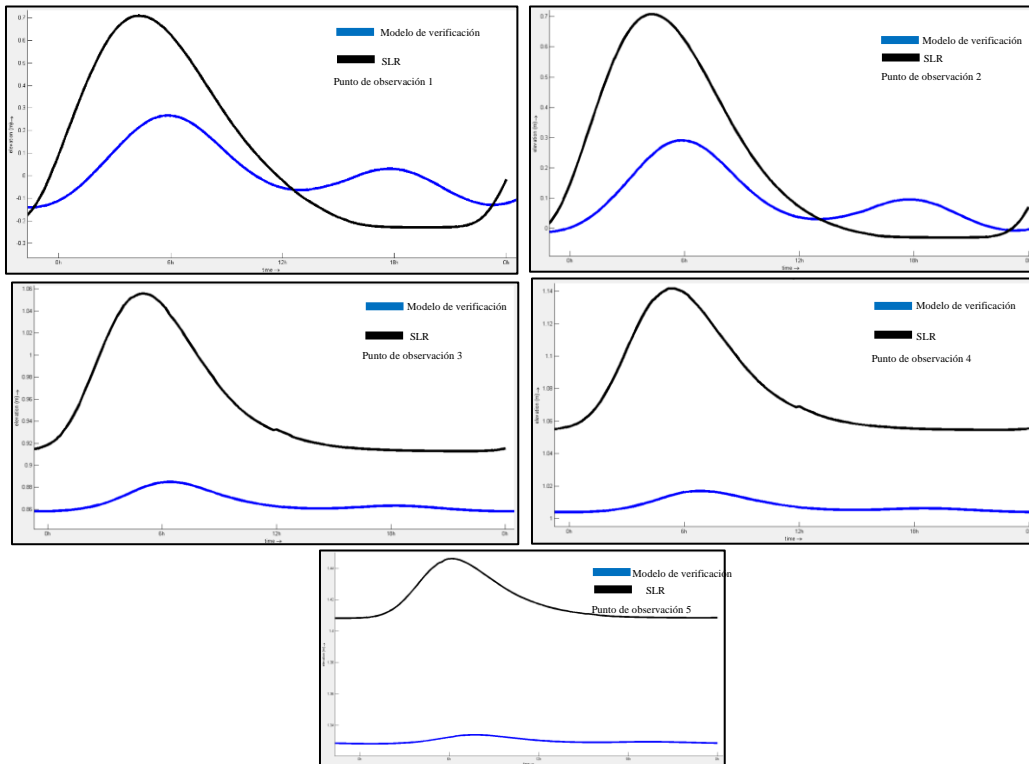


Figura 19 Altura de agua en puntos de observación para simulación SLR y Caudal de verificación. Fuente propia.

Este efecto del SLR se ve reflejado en la intrusión salina de la Figura 20, que muestra como la salinidad del mar penetra hasta los 185 m, respecto a los 150 m del modelo CMMV.

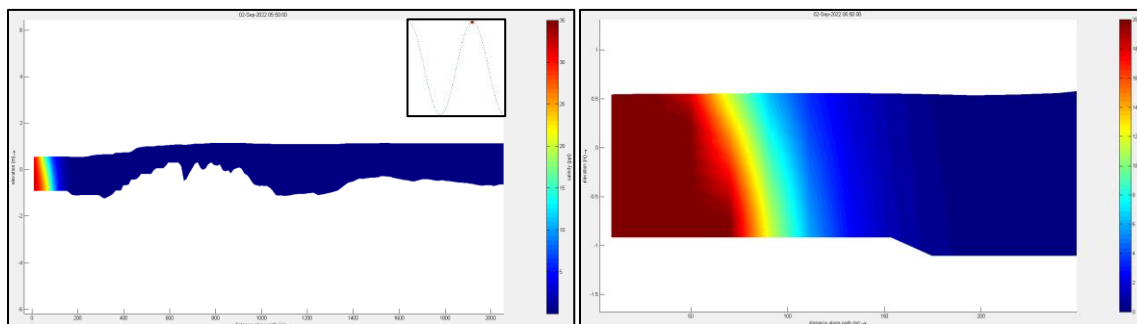


Figura 20 Intrusión salina para proyección SLR, río Maipo, perfil longitudinal desde la boca del río. Fuente propia.

## 5 DISCUSIÓN

Es importante tener en consideración que para caudales bajos (común en verano), el río no logra cubrir de agua toda la superficie del estuario, dejando zonas secas. Esto puede generar que en dichos lugares proliferen la vegetación, aumentando la rugosidad en estas áreas. Bajo esta línea, se debe considerar que los modelos utilizados tienen un valor de Manning constante de 0.03 en toda su superficie. Por lo que, se hace atractivo verificar modelos con Manning variables en las superficies secas que se generan en el modelo CMMB (Figura 14) y en la zona de humedal en futuros trabajos.

El efecto de los vectores de velocidad sigue la misma tendencia en todas las simulaciones. Esto se puede ver en los vectores de velocidad de la boca, donde la marea entra por el costado norte en marea baja y costado sur en marea alta (Figura 11, Figura 14 y Figura 16), siendo evidente el cambio de dirección provocado por la marea alta diferencia de la marea baja que es prácticamente nulo. Este cambio de dirección se atenúa cuando los aportes de caudal de parte del río son mayores, lo que es claro al comparar los vectores de velocidad del caso CMMV (Figura 11) y CMMP (Figura 16).

Los modelos CMMB y SLR muestran que la marea aumenta significativamente su influencia en el estuario. Bajo estas condiciones, trabajar la calibración de la intrusión salina es fundamental para estudiar el desarrollo de posibles situaciones proyectadas, con mejores ajustes en valores de salinidad, viscosidad, difusividad, temperatura y ajuste de las capas en el modelo 3D, donde estas pueden variar en función del análisis que se requiera. Bajo este contexto, y sabiendo que la zona de la boca es sensible a cambios en la hidrodinámica en respuesta a cambios en el estuario, es importante para futuras trabajos de investigación complementar la topo-batimetría existente con datos topográficos de mayor precisión en la boca del estuario (Figura 6).

Los caudales de inundación muestran un ajuste adecuado, sin embargo, para caudales superiores a 2 años de periodo de retorno (Figura 18) se producen peraltes, dado que la extensión de la malla no abarca la suficiente superficie para cubrir las zonas de inundación en estos escenarios. En este contexto, hay que considerar que para los escenarios de inundación la boca del estuario tiende a aumentar su ancho a medida que aumenta el caudal, cubriendo la barra de sedimentos con agua, lo que se respalda con el registro de fotografía satelital (Figura 2). Dada esta dinámica se hace interesante para futuras líneas de investigación incluir en los modelos movimiento de sedimentos y cambios morfológicos en la barra de sedimentos de la costa.

## 6 CONCLUSIONES

Luego de modelar los distintos escenarios y analizar su hidrodinámica, se define que:

El análisis hidrológico muestra clara tendencia a la disminución del caudal en el estuario (Figura 4), factor que es decidor para la hidrodinámica, dado que esta muestra dos tipos de comportamiento en consecuencia de los aportes de caudal del río.

En condiciones de bajo caudal se generan zonas secas a lo largo del río (Figura 14) y una tendencia a disminuir el ancho de la boca, lo que aporta a la generación de vegetación y como consecuencia un aumento en la rugosidad de estas zonas. Así mismo, la tendencia a la baja en el caudal en el río que muestra aumentos en la intrusión salina superiores a los 2 km

(Figura 15), tiene dinámica con el pronóstico de aumento del nivel del mar o posibles movimientos co-sísmicos de subsidencia que hagan descender el terreno, donde el modelo SLR muestra un aumento significativo de la incidencia de la marea, con efectos hasta los 4.7 km en las alturas de agua por la baja de velocidad en marea alta (Figura 19). Estos fenómenos son preocupantes para los ecosistemas del estuario, puesto que los modelos muestran en ambos casos como la intrusión salina se potencia. Esta, afecta directamente a los ecosistemas del estuario, aún más si consideramos la presencia del humedal, sector de gran biodiversidad. Los modelos de inundación (d) y de caudales medios mensuales (a), b) y c)) muestran la baja incidencia que tiene la marea bajo condiciones de gran caudal. La intrusión salina se limita a la boca del río para el modelo CMMV (no supera los 150 metros, Figura 13) y la marea muestra una baja incidencia, donde las alturas de agua son más bien permanentes y no muestran variaciones significativas en condiciones de marea alta/baja. Ambos efectos se amplifican a medida que el caudal es mayor en los modelos.

Por otro lado, los escenarios de inundación (d) nos entregan un indicativo de las áreas que son propensas a ser inundadas y sujetas a cambios, mostrando un buen ajuste respecto a la fotografía histórica satelital (Figura 2), cubriendo de agua la barra de sedimentos de la boca y la intrusión de agua por el sector del humedal.

Finalmente, la zona de estudio de mayor complejidad se encuentra en la boca del estuario, lugar que carece de topografía y fue estudiada con un relleno de puntos. Si bien los diferentes modelos muestran un buen ajuste al relleno realizado, los cambios en el estuario son sensibles a la batimetría y el relleno batimétrico empleado, por lo que se sugiere levantar en terreno la información faltante.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

1. **Gabriel Betancur, Francisco Toro, Andrés Gómez, (2015).** “Análisis de los efectos de la descarga del canal del dique sobre la estratificación salina de su desembocadura a la bahía de Cartagena”.
2. **Jessica Álvarez, Cesar Tabio, (2018).** “Methodology for hydrodynamic model selection. Case study: spatial variability of the thermal structure in the Riogrande II tropical reservoir, Colombia”.
3. **Salvador F. Farreras, (2006).** “Hidrodinámica de lagunas costeras”.
4. **Rutllant, J., R. Muñoz, R. Garreaud, (2013).** “Meteorological observations on the northern Chilean coast during. Atmospheric Chemistry and Physics”.
5. **Universidad de Granada, Ingeniería marítima, (2012).** “Oscilaciones de periodo largo: Marea astronómica”. Sección 3.
6. **Daniel L. (2011).** Codiga. “Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions”



7. **UNESCO/IOC. (2012).** “Sea Level Monitoring Facility”, available at <http://www.iocsealevelmonitoring.org/station.php?code=crnl>.
8. **Barnes, H. (1967).** “Roughness Characteristics of Natural Channels”, Washington. U.S. Geological survey water Supply paper 1849.
9. **Chow, V. (1959).** “Open-Channel Hydraulics”. McGraw-Hill, New York.
10. **Paulo Urrutia, Juan Orrego, Mitzi Salinas, (2021).** “Usos y abusos, Humanidad en las cuencas, Cuenca del Río Maipo”, *Ecosistemas*.
11. **Deltares, (2016).** “Delft3D” available at <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>
12. **Deltares (2022).** “Delft3D” available at <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-4-suite/>
13. **Deltares a), (2016).** “Delft3D-RGFGRID User Manual”.
14. **Deltares b), (2016).** “Delft3D-QUICKIN User Manual”.
15. **Deltares c), (2016).** “Delft3D-Flow User Manual”.
16. **Deltares d), (2016).** “Delft3D-QUICKPLOT User Manual”.
17. **Comisión nacional de riego (1981).** “Proyecto Maipo, Estudio hidrológico e hidrogeológico, Escorrentía superficial”
18. **BriTanica, 2022.** “Temperature and salinity, Ocean Pacific” available at <https://www.britannica.com/place/Pacific-Ocean/Temperature-and-salinity>
19. **Danial Khojasteh, William Glamore, Valentin Heimhuber, Stefan Felder, (2021).** “Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review”
20. **Direction general de aguas, (2022).** “Información Oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas en Chile” available at <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
21. **Felipe Arróspide, Luca Maoc, Cristián Escauriaza, (2018).** “Morphological evolution of the Maipo River in central Chile: Influence of instream gravel mining”, *Geomorphology*.
22. **Herrera, I. y Ramírez, H. (2013).** “Hidrodinámica y transporte de sedimentos en la desembocadura del río Grijalva”.



23. *Ministerio de obras públicas, (2015). “Actualización de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del Río Maipo”, SDT N°369.*

## **8 AGRADECIMIENTOS**

- *Proyecto Fondef 1200306: EVOLUCIÓN COSTERA Y FACTORES DE CAMBIO EN CHILE: CRITERIOS PARA LA ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LA ZONA COSTERA.*
- *Instituto Milenio en socio-ecología costera (SECOS) SSE Desarrollo Costero.*

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo 1

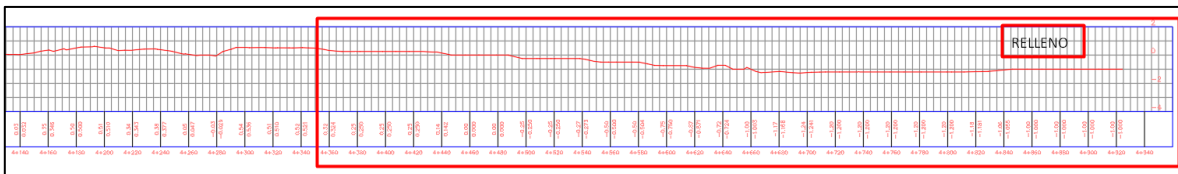
F0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0
	N		LN 2		P III		Gamma		G	
0.05	0.21	0.16	0.03	0.02	0.14	0.10	0.13	0.08	0.20	0.15
0.10	0.24	0.14	0.13	0.03	0.24	0.14	0.23	0.14	0.24	0.15
0.14	0.25	0.11	0.18	0.04	0.28	0.14	0.28	0.13	0.27	0.12
0.19	0.26	0.07	0.22	0.03	0.31	0.12	0.30	0.11	0.28	0.09
0.24	0.27	0.03	0.24	0.00	0.32	0.08	0.32	0.08	0.29	0.05
0.29	0.27	0.01	0.25	0.03	0.33	0.04	0.33	0.04	0.29	0.01
0.33	0.28	0.06	0.26	0.07	0.33	0.00	0.33	0.00	0.30	0.03
0.38	0.29	0.09	0.31	0.07	0.36	0.02	0.36	0.02	0.32	0.06
0.43	0.30	0.13	0.33	0.09	0.38	0.05	0.38	0.05	0.33	0.10
0.48	0.31	0.16	0.37	0.10	0.41	0.07	0.41	0.07	0.35	0.12
0.52	0.36	0.16	0.48	0.04	0.48	0.04	0.49	0.04	0.41	0.11
0.57	0.38	0.19	0.53	0.05	0.51	0.06	0.52	0.05	0.44	0.13
0.62	0.44	0.18	0.61	0.00	0.58	0.04	0.59	0.03	0.51	0.11
0.67	0.44	0.22	0.62	0.05	0.59	0.08	0.59	0.08	0.51	0.16
0.71	0.54	0.17	0.72	0.01	0.68	0.04	0.68	0.03	0.61	0.10
0.76	0.69	0.08	0.82	0.06	0.78	0.02	0.78	0.02	0.74	0.02
0.81	0.76	0.05	0.86	0.05	0.82	0.01	0.82	0.01	0.79	0.02
0.86	0.85	0.01	0.90	0.04	0.87	0.01	0.87	0.02	0.86	0.00
0.90	0.95	0.04	0.94	0.03	0.93	0.02	0.93	0.02	0.93	0.03
0.95	1.00	0.05	0.98	0.03	0.98	0.03	0.98	0.03	0.99	0.04
D		0.22		0.10		0.14		0.14		0.16
F0	$\alpha$	0.05	P0	0.05	P0	0.05	P0	0.05	P0	0.05
	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24
	N	0.22	LN 2	0.10	P III	0.14	LP III	0.14	G	0.16
		cumple		cumple		cumple		cumple		cumple

Figura 21 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales máximos anuales, Río Maipo. Fuente propia.

F0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0	P0	F0-P0
	N		LN 2		P III		Gamma		G	
0.03	0.14	0.11	0.00	0.03	0.09	0.06	0.00	0.03	0.11	0.08
0.06	0.15	0.08	0.01	0.05	0.11	0.04	0.02	0.05	0.12	0.05
0.10	0.15	0.06	0.04	0.05	0.12	0.02	0.04	0.06	0.13	0.03
0.13	0.18	0.05	0.17	0.04	0.16	0.03	0.11	0.02	0.16	0.03
0.16	0.19	0.03	0.20	0.04	0.18	0.01	0.13	0.03	0.17	0.01
0.19	0.20	0.01	0.24	0.05	0.20	0.00	0.16	0.03	0.19	0.00
0.23	0.22	0.00	0.31	0.09	0.23	0.01	0.22	0.01	0.22	0.00
0.26	0.23	0.03	0.33	0.08	0.25	0.01	0.23	0.02	0.23	0.03
0.29	0.23	0.06	0.35	0.06	0.25	0.04	0.25	0.05	0.24	0.05
0.32	0.27	0.05	0.43	0.11	0.31	0.01	0.32	0.00	0.29	0.03
0.35	0.27	0.08	0.43	0.08	0.32	0.04	0.33	0.03	0.30	0.06
0.39	0.29	0.10	0.46	0.08	0.34	0.05	0.36	0.03	0.32	0.07
0.42	0.31	0.11	0.49	0.07	0.37	0.05	0.39	0.03	0.35	0.07
0.45	0.31	0.14	0.49	0.04	0.37	0.08	0.39	0.06	0.35	0.10
0.48	0.36	0.13	0.55	0.07	0.43	0.05	0.46	0.02	0.41	0.08
0.52	0.41	0.11	0.60	0.09	0.49	0.02	0.53	0.01	0.47	0.04
0.55	0.49	0.06	0.66	0.11	0.58	0.03	0.61	0.06	0.56	0.01
0.58	0.50	0.08	0.67	0.09	0.59	0.01	0.63	0.04	0.57	0.01
0.61	0.52	0.09	0.68	0.07	0.61	0.01	0.64	0.03	0.59	0.02
0.65	0.56	0.09	0.70	0.06	0.64	0.00	0.68	0.03	0.63	0.02
0.68	0.59	0.09	0.71	0.04	0.67	0.01	0.70	0.02	0.65	0.02
0.71	0.61	0.10	0.73	0.02	0.69	0.02	0.72	0.01	0.68	0.03
0.74	0.67	0.08	0.75	0.01	0.73	0.01	0.75	0.01	0.72	0.02
0.77	0.71	0.06	0.77	0.01	0.76	0.01	0.78	0.01	0.76	0.02
0.81	0.74	0.07	0.78	0.03	0.78	0.02	0.80	0.01	0.78	0.03
0.84	0.81	0.03	0.81	0.03	0.83	0.01	0.85	0.01	0.83	0.00
0.87	0.86	0.01	0.83	0.04	0.87	0.00	0.88	0.00	0.87	0.00
0.90	0.98	0.07	0.88	0.02	0.95	0.05	0.95	0.05	0.96	0.05
0.94	0.99	0.06	0.91	0.03	0.98	0.04	0.97	0.04	0.98	0.04
0.97	0.99	0.03	0.91	0.06	0.98	0.01	0.97	0.00	0.98	0.01
D		0.14		0.11		0.08		0.06		0.10
F0	$\alpha$	0.05	P0	0.05	P0	0.05	P0	0.05	P0	0.05
	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24	F0	0.24
	N	0.14	LN 2	0.11	P III	0.08	LP III	0.06	G	0.10
		cumple		cumple		cumple		cumple		cumple

Figura 22 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales medios mensuales de enero, Río Maipo. Fuente propia.

### 9.2 Anexo 2



### 9.3 Anexo 3

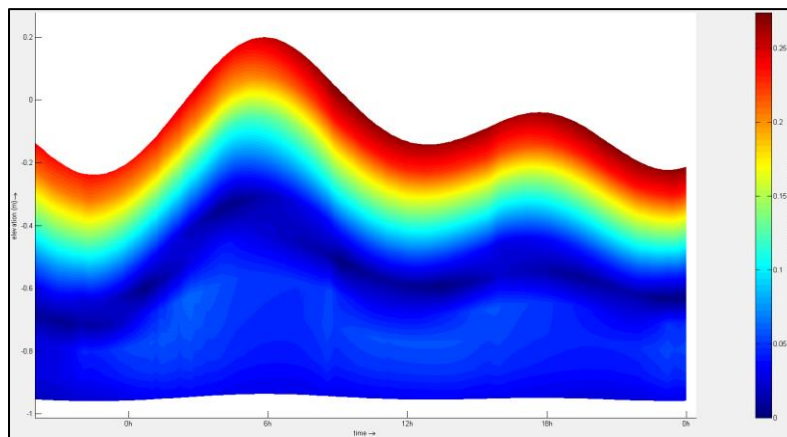


Figura 23 Velocidad horizontal, punto de observación para condición de caudal bajo. Fuente propia.

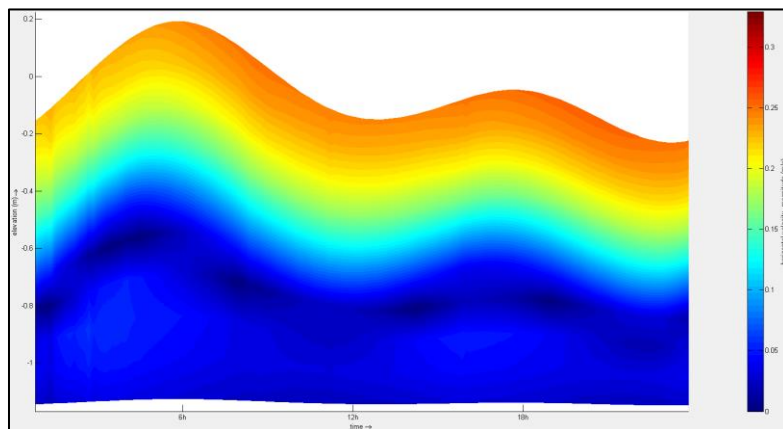


Figura 24 Velocidad horizontal, punto de observación 2 para condición de caudal bajo. Fuente propia.

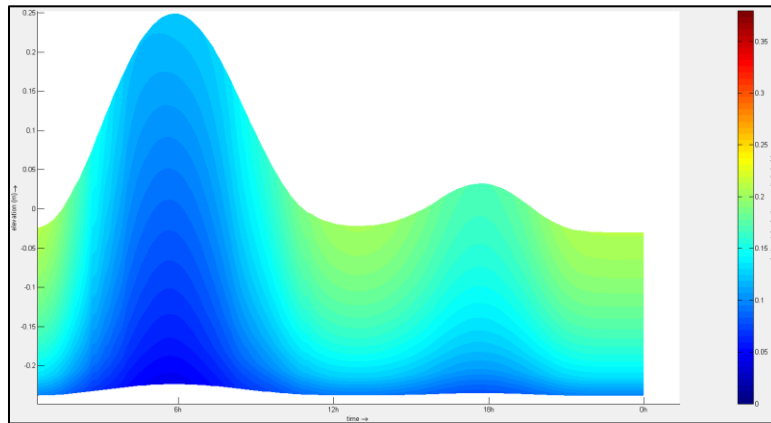


Figura 25 Velocidad horizontal, punto de observación 3 para condición de caudal bajo. Fuente propia.

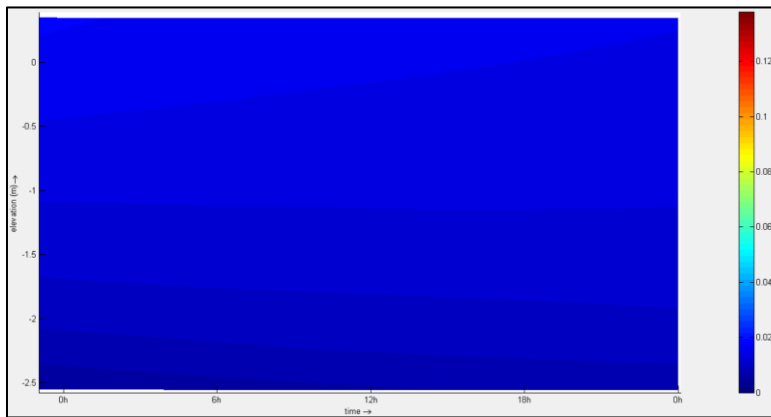


Figura 26 Velocidad horizontal, punto de observación 5 para condición de caudal bajo. Fuente propia.

#### 9.4 Anexo 4

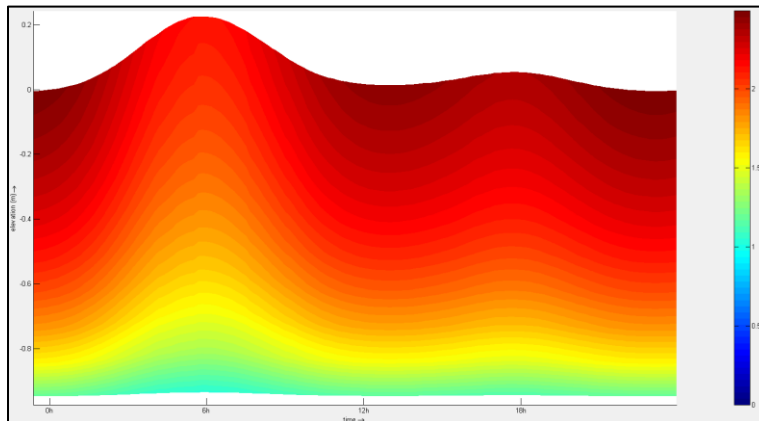


Figura 27 Velocidad horizontal, punto de observación 1 condición de caudal de  $108 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fuente propia.

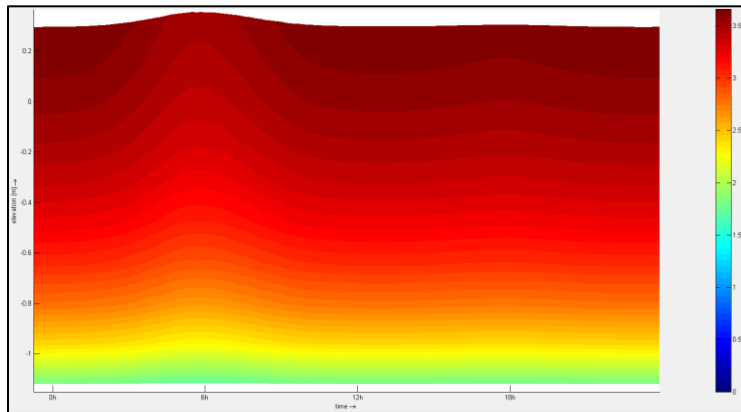


Figura 28 Velocidad horizontal, punto de observación 2 condición de caudal de  $108 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fuente propia.

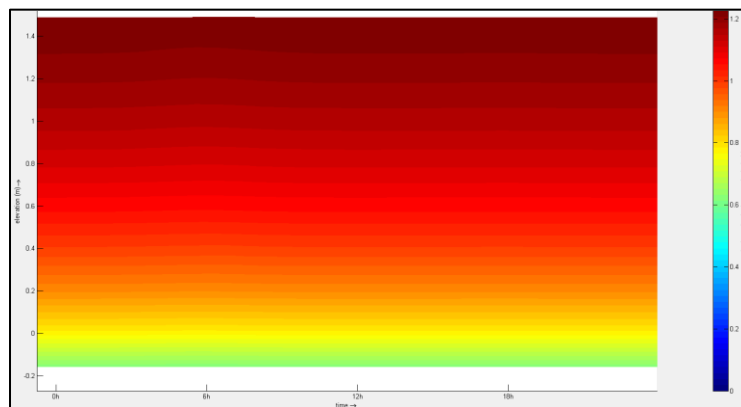


Figura 29 Velocidad horizontal, punto de observación 3 condición de caudal de  $108 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fuente propia.

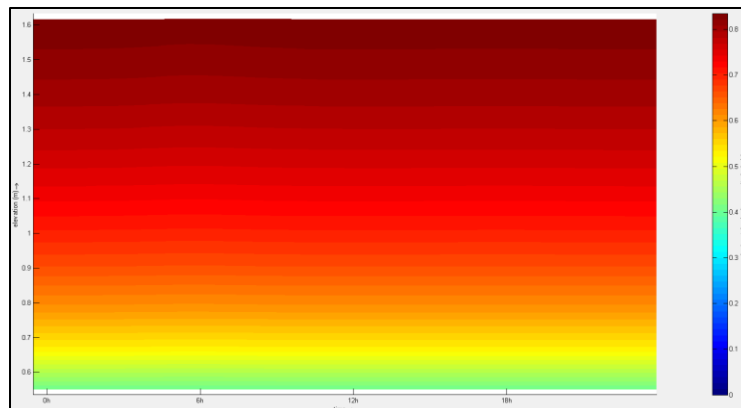


Figura 30 Velocidad horizontal, punto de observación 4 condición de caudal de  $108 \text{ m}^3/\text{s}$ . Fuente propia.