UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Hidrodinámica y transportes de sedimentos en el Estuario del río Santa Cruz, provincia de Santa Cruz, Argentina

Tesis para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Gabriel Iván Danieli

Director de la tesis: **Sergio Schmidt Ph.D**

Consejero de estudios: **Dr. Walter Dragani**

Lugar de trabajo: **Ezcurra & Schmidt SA**

Fecha de la defensa: **23/10/2025**

Buenos Aires, octubre de 2025

Resumen

El presente trabajo analiza el comportamiento de las variables físicas: nivel del mar, temperatura, salinidad y concentraciones de sedimento en suspensión, en el estuario del río Santa Cruz, en base a mediciones in situ, simulaciones matemáticas y datos de sensores remotos.

La tesis tiene origen en los trabajos ambientales que ha realizado Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA) vinculados al proyecto de la construcción de las represas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic en el río Santa Cruz, de la provincia homónima, en Argentina.

La Unión Transitoria de Empresas (UTE) Represas Patagonia (dueña del proyecto) permitió el uso con fines académico/científicos de las mediciones de niveles del mar, temperatura, conductividad del agua y turbidez, realizadas en Punta Quilla, Isla Pavón y río Chico. Otros datos se obtuvieron de bases de datos y modelos globales. Además de ser analizados, estos datos alimentaron el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), con sus módulos de transporte de temperatura y salinidad (TR); y de transporte de sedimentos (MT) para establecer los campos de corrientes, niveles del mar, temperatura, salinidad y concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario bajo distintas condiciones de descarga del río Santa Cruz. La cantidad y calidad de los datos registrados ha permitido el análisis profundo del funcionamiento del estuario; así como también una calibración muy robusta del modelo numérico, permitiendo que éste simule las variables de interés, bajo condiciones hipotéticas, como la presencia de los embalses en el río Santa Cruz, con alta fiabilidad.

El análisis de los datos arrojó resultados sobre la propagación de la marea en el interior del río Santa Cruz, sobre las variaciones a largo plazo de los caudales del río coincidentes con resultados de otros trabajos, y también sobre coherencia de las temperaturas con la existencia de frentes offshore. También se consideraron 3 bases de datos de imágenes satélites: Landsat 8, el producto de MUR y el sitio GlobColour, para analizar diferentes aspectos de la pluma de estuario del río Santa Cruz. Datos in situ identifican mayores niveles de turbidez para los períodos de sicigias que para los de cuadraturas. La turbidez

basada en Rrs(λ) corrobora este hallazgo. También se probaron diferentes algoritmos para representar los mínimos y medios diarios de turbidez, en ambos casos el cociente Rrs(670)/Rrs(412) resultó ser el más eficaz.

Utilizando el modelo calibrado se realizó una comparación de los niveles del mar, temperatura, salinidad y concentración de sedimentos en suspensión, para el período de llenado de las represas y la condición sin estas, considerando 5 posibles caudales de erogación de diseño. Los sedimentos en suspensión en el interior del estuario, resultaron ser la variable más compleja para analizar. La presencia de 2 fuentes de sedimentos, variables en el tiempo de manera diferente una de otra, complejizan la descripción de los resultados. Para una mejor comprensión de estos, se realizaron simulaciones con el aporte de sedimentos de los dos ríos y con el río Santa Cruz solamente. No se ha incluido el aporte de los sedimentos por efecto del viento.

Hydrodynamics and sediment transport in the Santa Cruz River Estuary, Santa Cruz Province, Argentina

Abstract

This work analyzes the behavior of physical variables: sea level, temperature, salinity and suspended sediment concentrations, in the Santa Cruz river estuary, based on in situ measurements, mathematical simulations and remote sensing data.

The thesis has its origin in the environmental works carried out by Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA) related to the construction of the President Néstor Kirchner and Governor Jorge Cepernic dams on the Santa Cruz river, in the province of the same name, in Argentina.

UTE Represas Patagonia (owner of the project) allowed the use for academic/scientific purposes of measurements of sea levels, temperature, water conductivity, and turbidity taken at Punta Quilla, Pavón Island, and Chico River. Other data were obtained from global databases and models. In addition to being analyzed, these data fed the MIKE 3 Flow Model FM (HD), with its Temperature and Salinity Transport (TR) and Sediment Transport (MT) modules to establish the fields of currents, sea levels, temperature, salinity and suspended sediment concentrations in the estuary under different discharge conditions of the Santa Cruz River. The quantity and quality of the recorded data has allowed a deep analysis of the estuary functioning; as well as a very robust calibration of the numerical model, allowing it to simulate the variables of interest, under hypothetical conditions, such as the presence of the reservoirs in the Santa Cruz River, with high reliability.

The analysis of the data yielded results on tidal propagation in the interior of the Santa Cruz River, on the long-term variations of river flows coinciding with the results of other works, and on the coherence of temperatures with the existence of offshore fronts. Three satellite image databases were also considered: Landsat 8, the MUR product and the GlobColour site, to analyze different aspects of the Santa Cruz River estuarine plume. In situ data identify higher turbidity levels for syzygy periods than for quadrature periods.

Turbidity based on Rrs(λ) corroborates this finding. Different algorithms were also tested to represent daily minimum and mean turbidity, in both cases the Rrs(670)/Rrs(412) ratio proved to be the most effective.

Using the calibrated model, a comparison of sea levels, temperature, salinity and suspended sediment concentration was made for the period of dam filling and the condition without dams, considering 5 possible design discharge flows. Suspended sediments in the interior of the estuary proved to be the most complex variable to analyze. The presence of 2 sources of sediments, which vary differently in time from each other, makes the description of the results more complex. For a better understanding of the results, simulations were carried out with the sediment input from the two rivers and the Santa Cruz river only. The contribution of sediments due to the effect of the wind has not been included.

Agradecimientos

Agradezco al amor de mi vida, Romina, por acompañarme siempre, a mi hija Paulina, por aceptarme y a mi amigo Sergio (Schmidt) por enseñarme generosamente trabajando en este, y en otros tantos proyectos.

Agradezco también, junto mi director Sergio Schmidt, a la UTE Represas Patagonia, por la posibilidad de utilizar la información recopilada para este proyecto.

Sumo a los agradecimientos al resto de los muchachos de la oficina Horacio Ezcurra, Marcelo Gramaglia, Mariano Silva, Pablo Ezcurra y Alejandro Valdez, que participaron principalmente en la obtención de los datos utilizados en este trabajo.

También agradezco a Walter Dragani y Guadalupe Alonso que me aconsejaron con cariño.

Dedicada a estas personas y también con particular afecto a mi mamá Angélica, a mi papá Iván, a mis hermanos Adrián y Ariel, a mi sobrina Sofía, a mi familia política Cristina, Martín y Damián, y a todos mis amigos.

La Obra

El proyecto del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz presenta la construcción de dos represas: Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. Se encuentran ubicadas sobre este importante curso de agua de alta potencialidad hidroenergética, aprovechada por primera vez a partir de esta obra. Los estudios preliminares de los proyectos se remontan a 1970. Las centrales hidroeléctricas tendrán una potencia instalada de 1310 MW lo que representa el 5% del máximo consumo nacional en punta. Permitirá una generación media anual mayor a 5000 GW/h.

Río Santa Cruz a la altura de Charles Fuhr

Acantilado Represa Néstor Kirchner. Se encuentra ubicada a 130 km de la localidad de El Calafate. Tiene una potencia de 950 MW y una altura de 73 m. Está compuesta por 5 turbinas Francis con una generación anual de 3380 GW/h. La longitud del muro será de 2000 m y la superficie del embalse tendrá 250 km^2.

Represa Jorge Cepernic. Está localizada a 170 kilómetros de la ciudad de Comandante Luis Piedra Buena. Cuenta con una capacidad instalada de 360 MW y 41 m de altura. La extensión del muro es de 2445 m. La casa de máquinas está compuesta por 3 turbinas Kaplan y producirá 1903 GW/h al año. La superficie del embalse será de 200 km^2.

Contenido

1. Objetivo General de la Tesis Doctoral 1

2. Introducción 3

3. Permiso de utilización de los datos 13

4. Antecedentes y motivaciones 17

5. Objetivos específicos del trabajo 19

6. Modelos utilizados 21

7. Datos 27

7.1. Temperatura Ambiente 29
7.2. Vientos 30
7.3. Presión Atmosférica 33
7.4. Humedad Relativa 33
7.5. Claridad 35
7.6. Temperatura del Agua en Isla Pavón 35
7.7. Mediciones de Turbidez en la Isla Pavón 36
7.8. Mediciones de Conductividad (Salinidad) en la Isla Pavón 41
7.9. Mediciones del Nivel del Río en la Isla Pavón 41
7.10. Mediciones de Turbidez en Punta Quilla 46
7.11. Mediciones de Temperatura en Punta Quilla 50
7.12. Mediciones de Conductividad (Salinidad) en Punta Quilla 51
7.13. Mediciones del Nivel del Mar en Punta Quilla 52
7.14. Niveles del Mar del Modelo Global 54
7.15. Batimetría 58
7.16. Caudales del río Santa Cruz 60
7.17. Caudales y Concentración de Sedimentos en Suspensión del Río Chico 67
7.18. Relación entre Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez 69
7.19. Muestras de sedimentos del fondo del Estuario del río Santa Cruz 72

8. Implementación y calibración de los modelos 75

8.1. Introducción 75
8.2. Grilla del Modelo 77
8.3. Formulación del modelo e input utilizado 80
8.4. Niveles del mar y corrientes en Estación Mar y Estuario 2 90
8.5. Temperatura en el estuario, estación Mar y Estuario 2 109
8.6. Salinidad en Estación Mar, Estuario 2 y S6 114

8.7. Turbidez en estación Mar y Estuario 2 118
8.8. Nivel del Mar, Temperatura y Salinidad en Punta Quilla e Isla Pavón 119

9. Represas 177
9.1. Inicio y fin del llenado de los embalses 178
9.2. Caudales 178
9.3. Características de los Sedimentos en Suspensión 180
9.4. Relación Caudal – Turbidez 183
9.5. Incidencia de la marea en los niveles de Isla Pavón 184

10. Resultados 189
10.1. Volumen de agua que ingresa y egresa del estuario con la marea 189
10.2. Temperatura cerca del fondo y corrientes de marea 190
10.3. Temperatura y corrientes de marea para la Condición 6 198
10.4. Salinidad y corrientes para distintas condiciones de marea 201
10.5. Salinidad y corrientes para la Condición 6 206
10.6. Corte longitudinal de salinidad 209
10.7. Resultados para diferentes caudales estadísticos del mes de junio 212
10.8. Evento con alta turbidez en diciembre de 2016 221
10.9. Comparaciones entre las condiciones con y sin represas 225
10.9.1.1. Comparaciones entre temperaturas 229
10.9.1.2. Comparaciones entre salinidades 237
10.9.1.3. Comparaciones entre niveles del mar 247
10.9.1.4. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes del RSC y del RC 248
10.9.1.5. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes de RSC solamente 262
10.9.1.6. Análisis de las concentraciones de los sedimentos en suspensión usando Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$. Comparación entre los aportes de RSC+RC y RSC solamente 268

11. Imágenes Satelitales 272
11.1. Introducción 272
11.2. Imágenes Landsat 8 274
11.3. Imágenes MUR 276
11.4. Imágenes GlobColour 278
11.5. Metodología 281
11.6. Resultados en base a las imágenes Landsat 8 285
11.7. Resultados en base a las imágenes MUR 295
11.8. Resultados en base a las imágenes de GlobColour 302
11.9. Conclusiones del Capítulo 11 305

12. Crecimiento del NMM en la descarga del río Santa Cruz 307

13. Frentes de temperatura en la zona de la descarga del río Santa Cruz 311

14. Síntesis del trabajo y principales conclusiones..... 317

15. Referencias..... 333

16. ANEXO A. MIKE 3 Flow Model FM 339

17. ANEXO B. ESTUARIOS Y SUS CARACTERISTICAS 345

17.1. Clasificaciones 345

17.2. Comparación de Estuario del río Santa Cruz con otros estuarios 355

17.3. Algunos trabajos en el estuario del río Sena 357

17.4. La inclusión del agua de deshielo 358

17.5. Propagación de la marea hacia el interior del río 361

17.6. Mayor amplitud de marea implica mayor turbidez en las aguas 361

17.7. Referencias del ANEXO B 365

Capítulo **1**

Objetivo General de la Tesis Doctoral

Estudiar, caracterizar y comprender los aspectos hidrodinámicos y sedimentológicos del Estuario del río Santa Cruz previos a la construcción de las represas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic en el río Santa Cruz, en base al análisis de datos de campo, modelación matemática e imágenes satelitales.

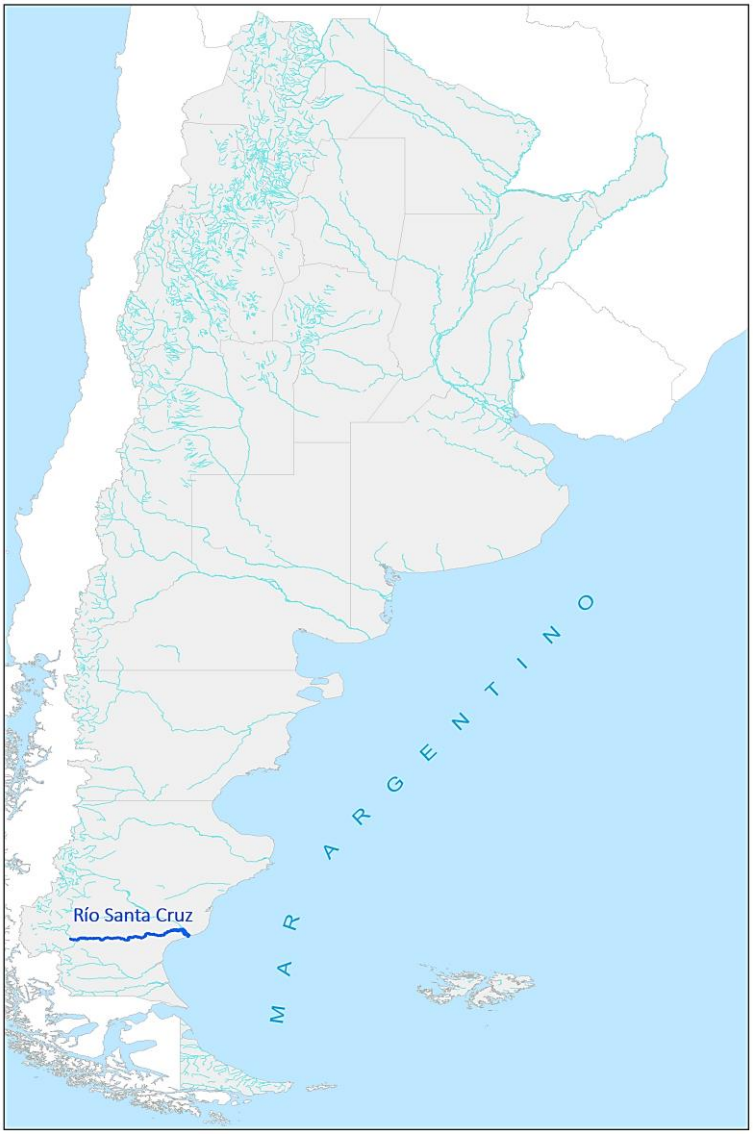
Capítulo 2

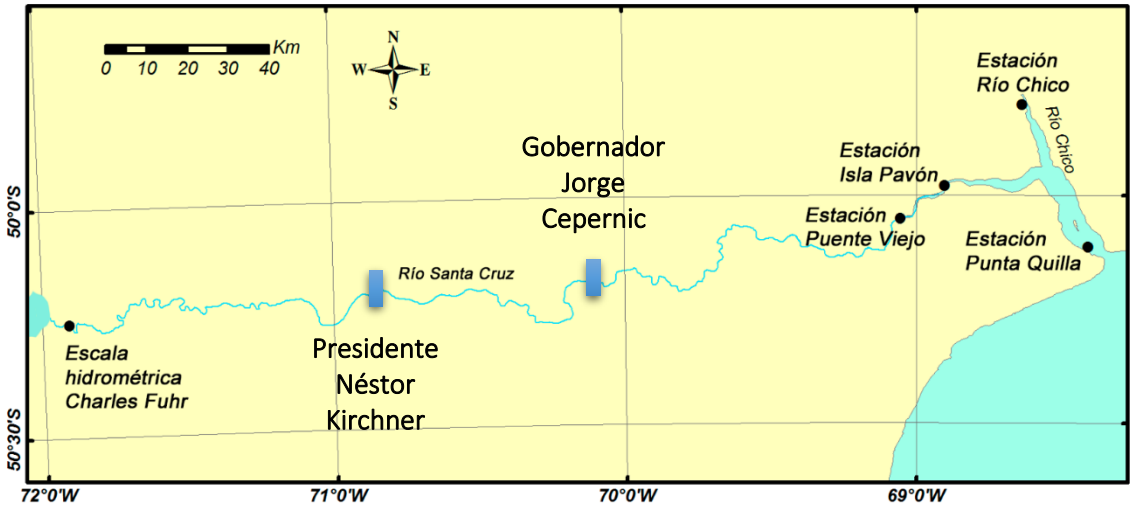
Introducción

La Empresa Ezcurra y Schmidt SA (ESSA) participó de los estudios ambientales para el proyecto de la construcción de las Represas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic, en 2 sitios del río Santa Cruz en la homónima provincia de la Argentina. La empresa dueña del proyecto es la UTE Represas Patagonia, una unión transitoria de empresas entre las argentinas ELECTROINGENIERIA SA e HIDROCUYO SA y la empresa china GEZHOUBA CHINA GROUP COMPANY Ltd. Para ese trabajo ESSA ha participado realizando estudios ambientales y monitoreos en el Estuario del río Santa Cruz, basados en mediciones de campo y modelación matemática.

Figura 2.1 Foto de la zona de trabajo en las márgenes del río Santa Cruz. Gobernador Jorge Cepernic es la represa más chica que tenía fecha de terminación estimada para septiembre de 2023. Fuente: Julián Fernández/IEASA

Figura 2.2 Posición del río Santa Cruz en la provincia de Santa Cruz (arriba). Río Santa Cruz, con la ubicación de las represas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic (abajo). Los puntos negros y sus nombre indican las estaciones donde se realizaron mediciones de utilidad para esta tesis.





El estuario del río Santa Cruz, objeto de estudio de la presente tesis, está ubicado en la provincia de Santa Cruz a lo largo de la costa atlántica patagónica. El área, cubre un total de 30000 ha e incluye tierras de jurisdicción municipal, provincial y privada. Gran parte de la margen sur del estuario se encuentra dentro del ejido municipal, incluyendo las Reservas Naturales Urbanas (RNU) Norte y Sur. Dentro del estuario se encuentra la Isla Leones, área de uso científico bajo protección especial, cuya autoridad de aplicación es la Dirección de Áreas Protegidas del Consejo Agrario Provincial. Además, el estuario posee sectores que fueron declarados Área Patrimonial Ambiental, incluyendo la costanera desde la confluencia del río Chico y el río Santa Cruz hasta su desembocadura, la Pingüinera Punta Entrada y la Isla Leones. El poder máximo sobre toda el área es la Secretaría de Estado de Ambiente (SEA) de la provincia.

Los estuarios son cuerpos de agua y sus hábitats costeros circundantes suelen encontrarse donde los ríos confluyen con el mar. Los estuarios albergan comunidades vegetales y animales únicas porque sus aguas son salobres, es decir, una mezcla de agua dulce procedente de la tierra y agua salada del mar. (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_estuaries/).

Los estuarios son algunos de los ecosistemas más productivos del mundo. Muchas especies animales dependen de los estuarios para alimentarse y como lugares para anidar y reproducirse. Las comunidades humanas también dependen de los estuarios para su alimentación, recreo y empleo. De las 32 ciudades más grandes del mundo, 22 están situadas en estuarios.

Los movimientos del agua en los estuarios transportan organismos, hacen circular nutrientes y oxígeno, y transportan sedimentos y desechos. Una o dos veces al día, las mareas altas crean corrientes de agua salada que desplazan el agua de mar hacia el interior del estuario. Las mareas bajas, también una o dos veces al día, invierten estas corrientes. En algunos estuarios, la mezcla de agua dulce de los ríos y agua salada del mar es extensa; en otros, no.

Cuando el agua dulce y el agua salada se encuentran en un estuario, no siempre se mezclan con facilidad. Como el agua dulce que entra en el estuario es menos salada, y menos densa, que el agua del océano, a menudo flota sobre el agua de mar, que es más

pesada. El grado de mezcla entre el agua dulce y el agua de mar depende de la dirección y la velocidad del viento, de la amplitud de las mareas (la diferencia entre la bajamar y la pleamar medias), de la forma del estuario y del volumen y el caudal del agua fluvial que entra en él. Estos factores son diferentes en cada estuario, y a menudo cambian estacionalmente dentro del mismo estuario.

Tradicionalmente, indica Valle-Levinson A, (2011), los estuarios pueden clasificarse en verticalmente homogéneos, débilmente estratificados o parcialmente mezclados y altamente estratificados. Esta clasificación se ha propuesto sobre la base de la competencia entre las fuerzas impuestas por las mareas y la empuje (densidad). Una forma de evaluar la importancia relativa de las marea es a través del volumen del prisma de marea, y una forma de evaluar el empuje en estuarios dominados por aportes de agua dulce, es a través del volumen descargado por el río. Prismas de marea mucho mayores que los volúmenes de agua dulce, más de un orden de magnitud mayores, darán lugar a estuarios débilmente estratificados o verticalmente homogéneos. Cuando el prisma de marea es del orden del volumen de agua dulce o ligeramente mayor, el estuario estará parcialmente mezclado. Por último, cuando el volumen de agua dulce supere al prisma de marea, en uno o varios órdenes de magnitud, se producirá una fuerte estratificación.

Como podrá verse en los datos analizados en el presente trabajo, el estuario del río Santa Cruz puede clasificarse, en base a su circulación, como un estuario verticalmente mezclado.

Un estuario verticalmente mezclado o bien mezclado se produce cuando el caudal del río es bajo y las corrientes generadas por las mareas son de moderadas a fuertes, (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_estuaries/). La salinidad del agua en un estuario verticalmente mezclado es la misma desde la superficie hasta el fondo del estuario. Las corrientes de marea fuertes eliminan la estratificación vertical del agua dulce que flota sobre el agua de mar, más densa, y la salinidad viene determinada por la fase diaria de la marea. La salinidad de este tipo de estuarios es más alta cerca del océano y disminuye a medida que asciende por el río.

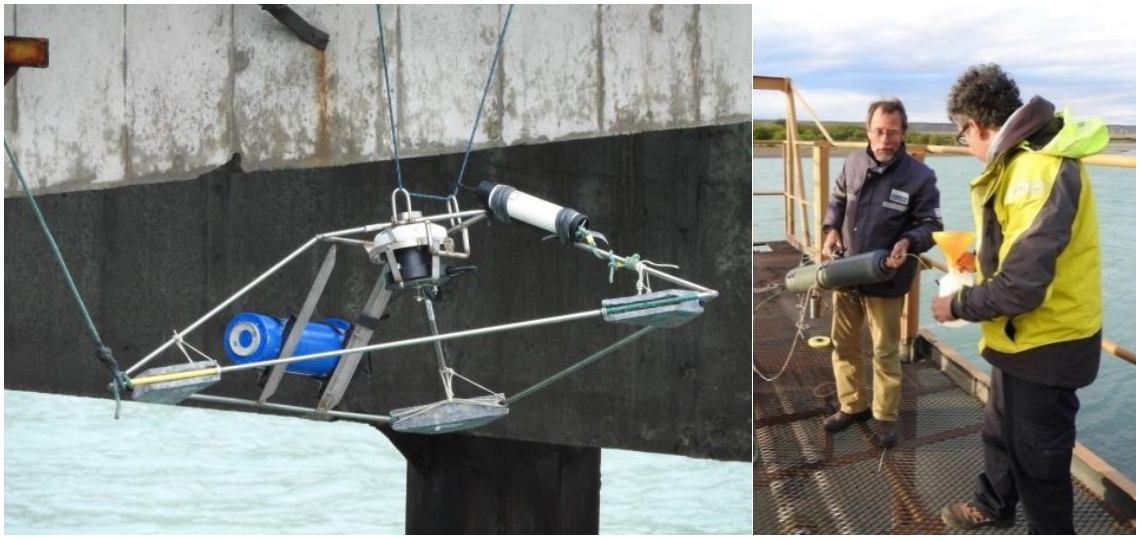
En el estuario del río Santa Cruz confluyen los ríos Santa Cruz (de mayor caudal y concentraciones de sedimentos en suspensión relativamente bajas) y Chico (de pobre

caudal y de altas concentraciones de sedimentos en suspensión). Además, el río Santa Cruz posee un muy marcado ciclo anual definido por el deshielo del Glaciar Perito Moreno. La Figura 2.1 presenta una foto de la zona de trabajo en las márgenes del río Santa Cruz. La Figura 2.2 identifica ambos ríos, el estuario y parte del Mar Argentino.

En el contexto del mencionado estudio se ha colectado una importante cantidad de datos que pertenecen a la UTE. Las mediciones son variadas y fueron realizadas en diferentes sitios de la zona de estudio. Se cuenta con registros de perfiles instantáneos de temperatura, salinidad y turbidez, colectados por instrumentos OBS-3A de Campbell Scientific, las Figuras 2.3 y 2.4 ilustran acerca de la operación de los equipos. También se cuenta con caudales del río y series de velocidades a diferentes niveles registradas con ADCP en 3 sitios (estaciones Mar, Estuario 2 y Punta Quilla). La zona de interés de la tesis se presenta en la Figura 2.5.

Gabriel Danieli es empleado de ESSA y participó en las operaciones de campo de instalación, mantenimiento y recuperación de los instrumentos. Realizó el procesamiento de los datos crudos para generar las bases de datos requeridas por el cliente. En base a mediciones de velocidades con ADCP, Gabriel ha realizado los cálculos de caudales sistemáticos en estaciones Charles Fuhr, Puente Viejo y río Chico.

Figura 2.3 Fondeo de los instrumentos ADCP y OBS 3A en Punta Quilla en marzo de 2017 (izquierda) y toma de muestras de agua con botella Niskin en Isla Pavón en noviembre de 2017 (derecha). En todas las fotos Gabriel Danieli está participando de las tareas.



Entre las estaciones disponibles, resaltan por sobre otras 2: Isla Pavón y Punta Quilla, que poseen cobertura temporal de 1.5 años (desde noviembre de 2017 hasta mayo de 2019). Estas estaciones cuentan con datos de temperatura, conductividad, profundidad y turbidez, con un dato cada 10 min. En noviembre de 2018 se agregó una estación en río Chico. La Figura 2.5 presenta la ubicación de las mencionadas estaciones de muestreo cuyos datos serán parte fundamental del trabajo a realizar en la tesis.

Figura 2.4 Maniobra de recupero de un equipo OBS-3A en Isla Pavón en abril de 2019 (izquierda). Conexión entre el instrumento una computadora para extraer los datos al cabo de 1 mes de colección de temperatura, conductividad, profundidad y turbidez en abril de 2019 (derecha). En todas las fotos Gabriel Danieli está participando de las tareas.

La cantidad y calidad de las mediciones realizadas en el Estuario del río Santa Cruz, con longitud temporal de 1.5 años, son inusuales para la Argentina. El hecho de que las mediciones hayan sido realizadas en el Estuario del río Santa Cruz los hace muy interesantes ya que el análisis permitirá observar la interacción física entre agua del deshielo y agua de mar, en un contexto de variaciones de marea de las más importantes del planeta. La Tabla 2.1 presenta un resumen de la información disponible en términos de las estaciones, los instrumentos utilizados, las variables registradas y el tiempo de colección.

En las costas de zona de interés del trabajo se encuentran las ciudades de Comandante Piedrabuena y Puerto Santa Cruz, incluyendo tomas de agua que las abastecen. También se encuentra el Puerto de Punta Quilla de enorme importancia para las actividades petroleras offshore de la Patagonia.

Figura 2.5 Zona de interés del estudio y posiciones de las estaciones de muestreo cuyos datos serán parte importante de la construcción de este trabajo. Los cuadrados rojos identifican puntos de medición de perfiles de temperatura y conductividad. En las estaciones "MAR" y "ESTUARIO 2" hubo fondeados 2 ADCP y 2 sondas OBS-3A, midiendo velocidades, nivel del mar, temperatura, conductividad y turbidez.

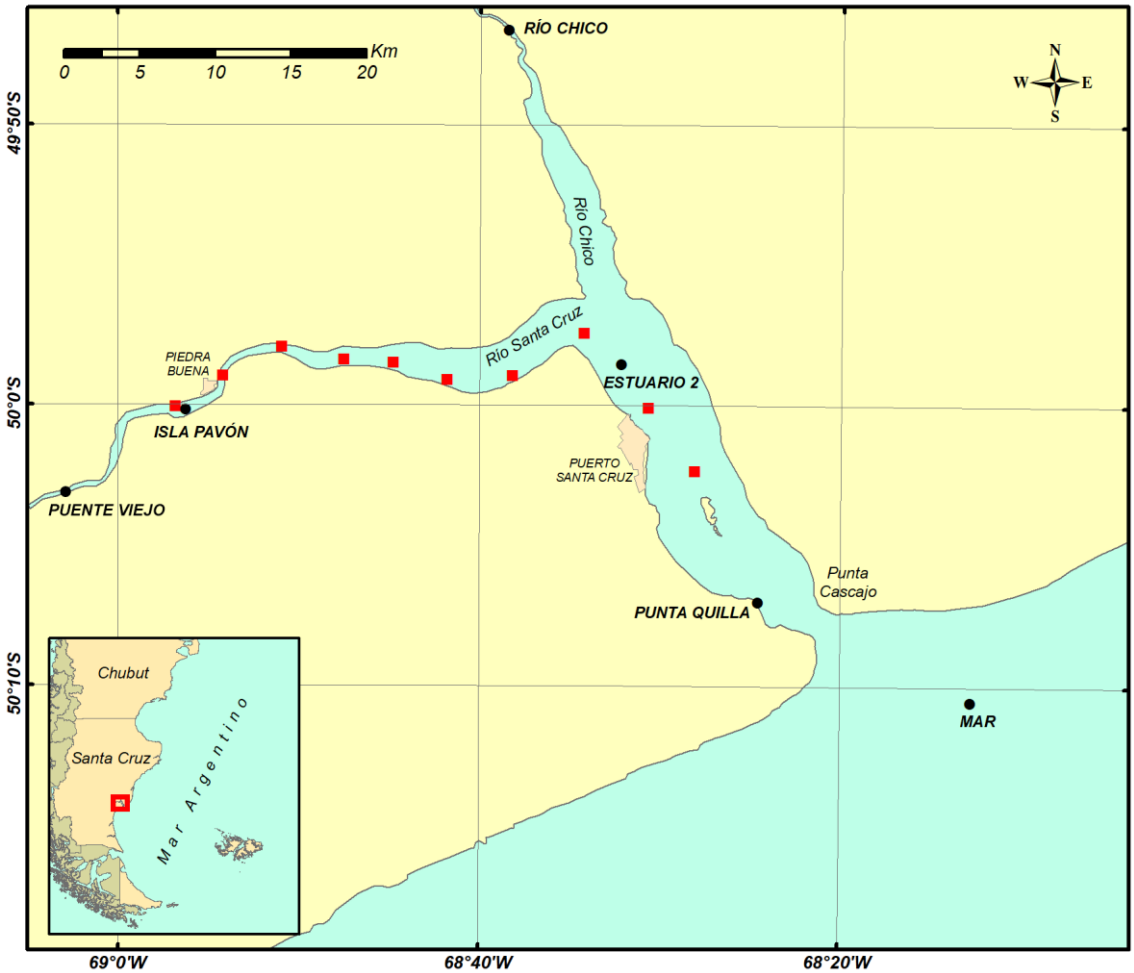


Tabla 2.1 Resumen de la información disponible registrada por ESSA para este proyecto

Estación	Instrumento OBS 3A Nivel del mar, Turbidez, Temperatura y Conductividad	Instrumento ADCP invertido o Molinete OTT Caudal	Instrumento Botella Niskin Muestras de agua	Instrumento ADCP Velocidades
Isla Pavón	1.5 años continuos cada 10 min	-	En 20 campañas	-
Puente Viejo	En 12 campañas instantáneas	En 12 campañas	En 12 campañas	Perfiles en 12 campañas
Punta Quilla	1.5 años continuos cada 10 min	-	En 20 campañas	1 mes
Charles Fuhr	En 12 campañas instantáneas	En 12 campañas	En 12 campañas	Perfiles en 12 campañas
Río Chico	6 meses continuos más en 20 campañas instantáneas	En 20 campañas	En 20 campañas	Perfiles en 20 campañas
Estuario 2	3 días	-	-	3 días
Mar	7 días	-	-	7 días
Estuario del Río San Cruz (cuadrados rojos en la Figura 4)	2 perfiles por punto. Uno en marea creciente y otro en marea bajante.	-	-	-

La información de campo se utilizó para alimentar un modelo numérico 3D hidrodinámico y de transporte de sedimentos. Los resultados del modelo permitieron explicar y extrapolar espacialmente las variables medidas a todo el estuario (y una porción del mar y río Santa Cruz).

En base a estos aspectos, el análisis de la mencionada información no sólo resultará en una interesante contribución al conocimiento, sino que además será una sólida base para potenciales proyectos de extracción de energía del mar.

El estuario del río Santa Cruz fue designado como un sitio Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras (RHRAP) o Western Hemisphere Shorebird Reserve Network (WHSRN), por la presencia de más del 1% de la población biogeográfica del Ostrero Austral (*Haematopus leucopodus*). La especie está presente en el área durante todo el año, con números altos en el invierno cuando se concentra durante la época no reproductiva. El último conteo más alto fue una bandada de 929 individuos en abril 2021, que representa el 1.47% de la población global. Teniendo en cuenta datos históricos, durante censos en 1999-2000, se estimaron entre 700 y 1200 individuos para el área, indicando que durante la época no reproductora se registran regularmente números

altos y que la zona es un importante lugar de invernada para la especie (Fuente: https://whsrn.org/es/whsrn_sites/estuario-del-rio-santa-cruz/).

En general, el sitio RHRAP ofrece hábitat a una gran diversidad de aves residentes, migratorias Patagónicas y migratorias Neárticas. También es reconocido como Área Importante para la Conservación de las Aves (AR268 – Estuario del río Santa Cruz), debido a su importancia para el Macá Tobiano (*Podiceps gallardoi*), Pingüino Patagónico (*Spheniscus magellanicus*) y varias especies de aves marinas.

Entre las preocupaciones ambientales se encuentra la respuesta del estuario al llenado de las represas, ya que esta zona es un sitio de invernada para el críticamente amenazado Macá Tobiano (*Podiceps gallardoi*), con imágenes en Figura 2.6, ave endémica de Argentina y Monumento Natural Provincial, y sobre el que se están enfocando numerosos esfuerzos de conservación por parte de organizaciones no gubernamentales, y los Estados provincial y nacional. En el área ha sido registrada hasta un 12% de la población estimada de una especie que resulta además un recurso ecoturístico reconocido, y un símbolo y emblema de la problemática ambiental santacruceña.

Figura 2.6 Macá Tobiano con pichones.

El Macá Tobiano es una especie de zambullidor que habita lagos y lagunas de las mesetas patagónicas por encima de los 700 m sobre el nivel del mar durante el período reproductivo (noviembre a marzo). Durante los meses invernales, al congelarse gran parte de los cuerpos de agua en que habita, atraviesa la estepa patagónica y se desplaza hacia la costa Atlántica de la misma provincia, en los estuarios de los ríos Santa Cruz, Coyle y Gallegos. Hoy (2025), el macá tobiano atraviesa un proceso que podría llevarlo a la extinción durante esta década. Se estima que la población no superaría los 800 individuos, lo cual significa que la población decreció más de un 80% en los últimos 25

años. Entre los principales problemas que enfrenta la especie, figura la presencia de especies invasoras y exóticas en su zona reproductiva, como el visón americano, la trucha arcoíris y la gaviota cocinera. A esto se suma el cambio climático, que se manifiesta en aumentos en la velocidad del viento y en severas sequías, que reducen su hábitat reproductivo. (Fuente: https://www.avesargentinas.org.ar/proyecto-macatobiano).

Capítulo 3

Permiso de utilización de los datos

ESSA ha solicitado el permiso para utilizar esta información en la Tesis Doctoral de Gabriel Danieli y la UTE lo ha otorgado. Se presentan a continuación las notas solicitando la información y la respuesta de la UTE Represas Patagonia.

Nota con la solicitud de permiso para utilizar la información recopilada durante las tareas ambientales de Ezcurra & Schmidt SA en estuario del río Santa Cruz.

Buenos Aires, 1 de octubre de 2018

Señores

REPRESAS PATAGONIA

China Gezhouba Group Company Limited | Electroingeniería SA | Hidrocuyo SA | UTE Nota a UTE Represes Patagonia

Atención: María Monserrat Belande

De mi mayor consideración,

Mi nombre Sergio Schmidt, soy oceanógrafo y doctor en Ingeniería de Costas de la Universidad de Florida, EE. UU. Hace más de 20 años soy el presidente de la empresa Ezcurra & Schmidt SA, que se especializa en oceanografía costera. Complementariamente, me desempeño como profesor en el Área de Oceanografía Costera de la Universidad de Buenos Aires, en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Actualmente estamos trabajando para la UTE Represes Patagonia, realizando estudios ambientales y monitoreos en el Estuario del Río Santa Cruz, basados en modelación matemática y mediciones de campo.

En el contexto de un estudio académico, cuyo objetivo es la publicación de un trabajo de tesis para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Oceanografía, solicito el permiso para utilizar los datos físicos de temperatura, conductividad, profundidad, corrientes y turbidez recopilados durante los estudios ambientales previos a la construcción de las Represas Cóndor Cliff y La Barrancosa.

El interés sobre la información solicitada es puramente académico. La cantidad y calidad de las mediciones realizadas en el Estuario del Río Santa Cruz, con longitud temporal de 1 año, son realmente inusuales para la Argentina. La posibilidad de analizar esta información resulta muy atrayente para cualquier investigación sobre el movimiento del agua en el estuario del Río Santa Cruz.

El análisis permitirá observar la interacción física entre agua del deshielo y el agua de mar, en un contexto de variaciones de marea de las más importantes del planeta. La idea principal del trabajo es poder concluir acerca de las características de la propagación de la onda de marea en el estuario y parte del Río Santa Cruz, las variaciones diarias y estacionales de la temperatura, salinidad y turbidez en los puntos de medición, y la puesta en funcionamiento para un modelo matemático 3D de la zona (Estuario y últimos 40 km del Río Santa Cruz) que generalice espacialmente los hallazgos de los puntos de medición. Estas investigaciones pueden conformar la Tesis Doctoral del Licenciado Gabriel Danieli, un joven oceanógrafo que ha participado activamente en la modelación del estuario como miembro de los profesionales de nuestra consultora.

Puntualmente, solicito a la UTE nos permita el uso de los datos recopilados por Ezcurra & Schmidt S. A. durante las siguientes campañas: diciembre de 2016, marzo de 2017 y octubre de 2017 a octubre de 2018

En base a estos aspectos, creo que la liberación de los datos será una importante contribución de la UTE al conocimiento de la oceanografía argentina. El aporte de la UTE será reconocido en la tesis resaltando el compromiso de la empresa con el conocimiento científico oceanográfico.

Sin otro motivo, los saludo muy atentamente.

Sergio Schmidt

Respuesta al pedido de permiso para utilizar la información recopilada durante las tareas ambientales de Ezcurra & Schmidt SA en estuario del río Santa Cruz.

INTEGRACIÓN ENERGÉTICA ARGENTINA S.A
LIBRO DE ÓRDENES DE SERVICIO

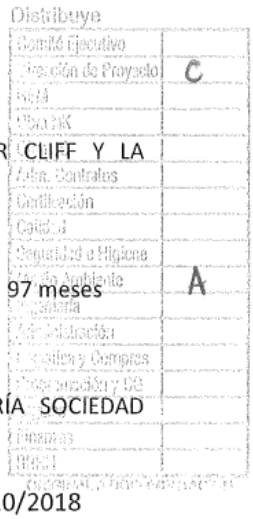
Obra: "APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ CÓNDOR CLIFF Y LA BARRANCOSA".-
Expediente: S01-0146922/2012

Acta de inicio 15 de Febrero de 2015 Plazo: 97 meses

Comitente: Integración Energética Argentina S.A

Contratista: CHINA GEZHOUBA GROUP COMPANY LIMITED – ELECTROINGENIERÍA SOCIEDAD ANÓNIMA – HIDROCUYO SOCIEDAD ANÓNIMA – U.T.E.-

Lugar: Buenos Aires Fecha: 08/10/2018



ORDEN DE SERVICIO – Nº 1513

Asunto: Respuesta a Nota de Pedido N° 1946. Solicitud de utilización de datos con fines educativos.

Señor Contratista:

Se informa a la Contratista que, habiéndose consultado al Comitente sobre la autorización para utilizar información recopilada durante los estudios ambientales realizados, siendo interés del Comitente promover la difusión de la información generada por el Proyecto, se otorga la autorización solicitada por la Consultora Ezcurra & Schmidt S.A a los fines estrictamente solicitados.

Por lo expuesto se instruye a la Contratista a verificar que, entre la información a publicar, no existan datos sensibles y/o confidenciales del Proyecto, que no deban ser divulgados.

Sin otro particular, saludo a Ud. atentamente.

CHINA GEZHOUBA GROUP COMPANY LIMITED
ELECTROINGENIERIA S.A.- HIDROCUYO S.A. UTE
08 OCT. 2018
DTO. CONTRATOS
NO IMPLICA CONFORMIDAD

Ing. SERGIO O. LISCIA
Inspector Titular
Aprovechamiento Hidroeléctrico
del Edo Santa Cruz - Presas
Cóndor Cliff - La Barrancosa

Representante técnico
Firma y Aclaración

Inspección
Firma y Aclaración

Capítulo 4

Antecedentes y motivaciones

En la zona de este proyecto existen escasos trabajos relacionados al temario de esta tesis. Entre ellos están los trabajos técnicos que han sido la base para el diseño de las represas, como el de Menéndez et al., (2017), en el que se realizó un estudio de transporte de sedimentos en el río Santa Cruz, pero sin la inclusión del estuario, y sin datos de campo. Los Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) confeccionado por Serman (2016), es otro trabajo en el que existe recopilación de información genérica de la zona de estudio. La escasa cantidad de trabajos de este tipo resulta una motivación muy interesante para llevar adelante un estudio de estas características. Otro estudio de la zona es el de Bindelli et al. (2018) que realizó una comparación de la capacidad energética de diferentes estuarios de la Argentina, incluyendo al Estuario del río Santa Cruz. De todos los estuarios de la Argentina, concluye el trabajo de Bindelli et al. (2018), el Estuario del río Santa Cruz presenta el mayor potencial disponible junto con otras características buscadas, como la presencia de puntos de consumo cercanos y profundidades adecuadas (> 20 m).

Desde el punto de vista ambiental, se reconoce a los estuarios saludables como ecosistemas que funcionan de manera efectiva para mantener la variabilidad de sus componentes (biológicos, físicos y químicos) dentro de límites naturales. También deben ser resistentes a un cierto nivel de estrés, indica Rapport et al. (1998).

Para estudiar la salud (o condición) de un ecosistema, como un estuario, es necesario de un marco que permite establecer los objetivos de la evaluación, y también permite la selección, monitoreo e informes sobre indicadores apropiados de los componentes que contribuyen a su estado general (NSW Natural Resources Monitoring, 2016). En consecuencia, toda información disponible analizada de manera correcta, y de ser posible publicada, se traducirá en una mejor calidad ambiental del Estuario del río Santa Cruz. De

manera que, caracterizar la oceanografía de la zona, que redundará en la biología del estuario y su medioambiente en general, es la principal motivación de este trabajo. Además, contar con un modelo que represente adecuadamente la hidrodinámica y transporte de sedimentos del lugar, es una novedad para la Patagonia.

Capítulo **5**

Objetivos específicos del trabajo

Es de interés de este estudio caracterizar la turbidez del estuario vinculándola con la amplitud de marea y las variables asociadas a los ríos: caudales y turbidez del río Santa Cruz y del río Chico. En el proceso de la construcción de este trabajo se prevé cumplir con los siguientes objetivos:

1. Determinar la distribución espacial y la variabilidad diaria y estacional de la temperatura, la salinidad y la turbidez en la zona de estudio en base a los datos colectados.

2. Caracterizar la propagación de la onda de marea en la región y estudiar los otros forzantes meteorológicos y oceanográficos que influirían en la distribución evaluada en el punto 1.

3. Implementar, calibrar y validar un modelo matemático hidrodinámico y de transporte de temperatura, salinidad y sedimentos 3D para la zona de estudio.

4. Utilizar imágenes satelitales para extrapolar a 2D en superficie algunas de las mediciones puntuales, como la temperatura y turbidez, de manera que sea posible estudiar la forma de la pluma obtenida por el modelo numérico regional (MIKE 3 HD y MT). Para ello se requiere de un tratamiento adecuado de las imágenes de color real de Landsat 8 de alta resolución espacial (30 m), y también de las imágenes de SST de MUR de aproximadamente de 1 km de resolución espacial.

5. Estimar, en base a las reflectancias por teledetección (Rrs(λ)), la turbidez usando diferentes algoritmos, compararla con mediciones in situ y caracterizarla para condiciones de marea en sicigias y cuadraturas.

6. A partir de los resultados de las simulaciones numéricas confirmar la distribución determinada en los puntos 1 y 4.

7. Determinar los principales forzantes que gobiernan la distribución de las variables estudiadas.

Capítulo **6**

Modelos utilizados

Para realizar la modelación de niveles del mar, corrientes, temperatura, salinidad y concentración de sedimentos en suspensión en el Estuario del río Santa Cruz se han utilizado los siguientes modelos:

- Modelo hidrodinámico 3D MIKE 3 Flow Model FM (HD) desarrollado por el DHI (un instituto danés dedicado a estudiar el agua, en particular diseñan software para dar apoyo a problemas ambientales y de ingeniería), detalles en www.dhigroup.com. El MIKE 3 Flow Model FM (HD) consiste en un paquete de programas con algoritmos matemáticos, buena parte de éstos numéricos, que calculan las velocidades y direcciones de la corriente y desplazamientos del nivel del mar, debidos a fuerzas tales como mareas y vientos. Este modelo es la base para el cálculo de niveles del mar y corrientes locales sobre la cual corren los módulos que difunden diferentes propiedades del agua de mar, como la temperatura, salinidad y concentraciones de sedimentos en suspensión. En las simulaciones, MIKE 3 Flow Model FM funcionó de modo baroclínico, incluyendo en sus cálculos el módulo de transporte de temperatura y salinidad disponible en su formulación. Esta incorporación es representada en las formulaciones del modelo como la incorporación del módulo de transporte que se nota como TR. En adelante se menciona el modelo MIKE 3 Flow Model FM, con el agregado de HD, cuando se refiere específicamente a la parte hidrodinámica (nivel del mar y corrientes) y con el agradado TR, cuando se incluye las advección y dispersión de temperatura y de salinidad.
- MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) es aceptado en aplicaciones de ingeniería y medio ambiente (evaluaciones ambientales, predicción y monitoreo) y muy generalizado su uso en todo el mundo. Es aplicable a simulaciones de hidráulica, calidad de agua y

transporte de sedimentos en ríos, lagos, estuarios, bahías, áreas costeras, mares y otros cuerpos del agua. Simula flujos no estacionarios debidos a variaciones en la densidad, la batimetría y forzantes externos como la meteorología, elevaciones de la superficie libre por marea, corrientes y otras condiciones hidrográficas. Por detalles puede consultarse la web del DHI en MIKE 3 Documentation (mikepoweredbydhi.help). Específicamente en el presente trabajo, este modelo calcula las variaciones de elevación de la superficie y el campo 3D de corrientes como consecuencia de fuerzas externas como la marea y el viento y la descarga del río. Calcula las variaciones del nivel del mar y el campo de corrientes, concentraciones de sal y temperatura, tanto en el mar y en el estuario. Algunas referencias de trabajos en las que se utiliza este modelo y se lo compara con mediciones, y se lo aplica para resolver diferentes problemas son:

- Jacobsen et al. (2011), presentan una discusión sobre la capacidad del MIKE 3 Flow Model FM para reproducir patrones de marea y corrientes.
- Günther & Madsen, (2009) realizaron un estudio de validación de la formulación de malla no estructurada en el modelo de MIKE 3 FM para aplicaciones en el Mar del Norte.
- Una aplicación en hidrodinámica costera es presentada por Rasmussen & Larsen (2010), incluyendo una evaluación detallada del performance del modelo comparando sus resultados con datos medidos.
- Un estudio de un estuario complejo es presentado por Vested & Justesen, (2008).
- Gräwe & Burchard (2012), presentan una validación del transporte de sedimentos utilizado este modelo, mientras que Kärnä & Deigaard (2010), también usan el MIKE 3 Flow Model FM para analizar transporte de sedimentos en una en una ensenada de marea danesa.
- El trabajo de Erikson & Rasmussen (2009), presenta un estudio de la descarga de una pluma de agua de refrigeración de una planta termoeléctrica.
- El trabajo de Berg & Poulsen (2012) presenta una comparación en el Mar Báltico entre los resultados del MIKE 3, GETM y MOM

- Otros detalles se pueden encontrar en los documentos técnicos oficiales del DHI, DHI (2016) y DHI (2018).

Para el tratamiento de la evolución de los sedimentos en suspensión vertidos al mar y otro tipo de material particulado (como lodos de perforación en base acuosa y recortes de perforación asociados a la industria offshore), se ha utilizado el módulo del MIKE 3 Mud Transport (MT), MIKE 21/3 Mud Transport (mikepoweredbydhi.com). Este modelo tiene capacidades especialmente diseñadas para el seguimiento de plumas derivadas de acciones de vertido de material al agua. Suministra, a partir de las características del material vertido y del campo de velocidades calculadas por el módulo hidrodinámico MIKE 3 Flow Model FM (HD), información sobre la distribución en el espacio de las concentraciones y depositación en el fondo del mar. A medida que pasa el tiempo, calcula superficies ocupadas y el espesor del material depositado en el fondo, velocidades de traslación y destinos geográficos. Específicamente en el presente trabajo, este modelo calcula el transporte de sedimentos en suspensión y resuspensión de los sedimentos para cálculo de turbidez.

Solo para caracterizar el tipo de formulaciones que utiliza el MIKE 3 Flow Model FM se presenta un punteo de algunas definiciones que pueden ser útiles en este sentido:

- El modelo se basa en la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. Pueden aplicarse tanto las ecuaciones tridimensionales completas de Navier-Stokes como las ecuaciones tridimensionales de aguas poco profundas. El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad y de momento, y se cierra utilizando un esquema para la turbulencia.
- El modelo es cerrado, por lo que no pueden modificarse las formulaciones que utiliza para resolver las ecuaciones físicas. De todas maneras, existen coeficientes y algunas opciones de formulaciones específicas (la fricción de fondo, por ejemplo) para que el operador pueda optar y modificar en busca de una calibración adecuada del modelo.
- El modelo puede correr en coordenadas planas o esféricas. En general, para regiones costeras con la escala espacial chica, como el caso de las presentes simulaciones (100 km x 100 km, aproximadamente), las coordenadas planas son adecuadas.

- La superficie libre se tiene en cuenta mediante un enfoque de transformación de coordenadas “sigma” o “z” o mezcla entre ambas.
- La discretización espacial de las ecuaciones de conservación se realiza utilizando un método de volumen finito centrado en celdas.
- La integración temporal se realiza mediante un esquema semi-implícito.
- Los términos verticales de convección y difusión se discretizan utilizando un esquema implícito para eliminar las limitaciones de estabilidad asociadas a la resolución vertical. El resto de los términos se discretizan utilizando un método de Euler de primer orden o un esquema Runge-Kutta explícito de segundo orden.
- Para las ecuaciones de Navier-Stokes se emplea el método de proyección para la presión no hidrostática. Los flujos convectivos de la interfaz se calculan mediante un método aproximado de Riemann. Este esquema permite una simulación robusta y estable de los flujos que presentan shocks o discontinuidades, como perforaciones y saltos hidráulicos.

Los modelos indicados son propiedad de ESSA licenciados por el DHI release 2016. Las características de los modelos pueden verse en (www.dhigroup.com) y en los ANEXOS.

El modelo requiere de un dominio de modelación sobre el cual realizar los cálculos. Si bien, los detalles de la grilla se presentan más adelante en este informe, en la Figura 6.1 se presenta el dominio de modelación utilizado por el MIKE, porque resulta de utilidad en la explicación de algunos aspectos a continuación. Entre ellos, la posición de los bordes del modelo y las estaciones Isla Pavón y Punta Quilla, donde se registraron datos que alimentaron los cálculos del modelo. El dominio de modelación posee 5 bordes abiertos donde deben imponerse datos de temperatura, salinidad, concentraciones de sedimentos en suspensión y niveles del mar o caudales de los ríos. Los 5 bordes abiertos que se presentan en la Figura 6.1 son:

- Borde del río Santa Cruz
- Borde del río Chico
- Borde NE
- Borde SE

- Borde SW

En los capítulos que siguen se detallan los diferentes paquetes de datos usados. Los datos registrados en las estaciones Isla Pavón y Punta Quilla fueron utilizados para calibrar el modelo. La Figura 6.2 presenta un acercamiento al rectángulo rojo de la Figura 6.1, en la que se observa un detalle de la grilla irregular de la zona, el borde del río Santa Cruz y la posición de la estación en Isla Pavón.

Figura 6.1 Dominio de modelación, posición de las estaciones de medición Isla Pavón y Punta Quilla. Este dominio posee 5 bordes abiertos

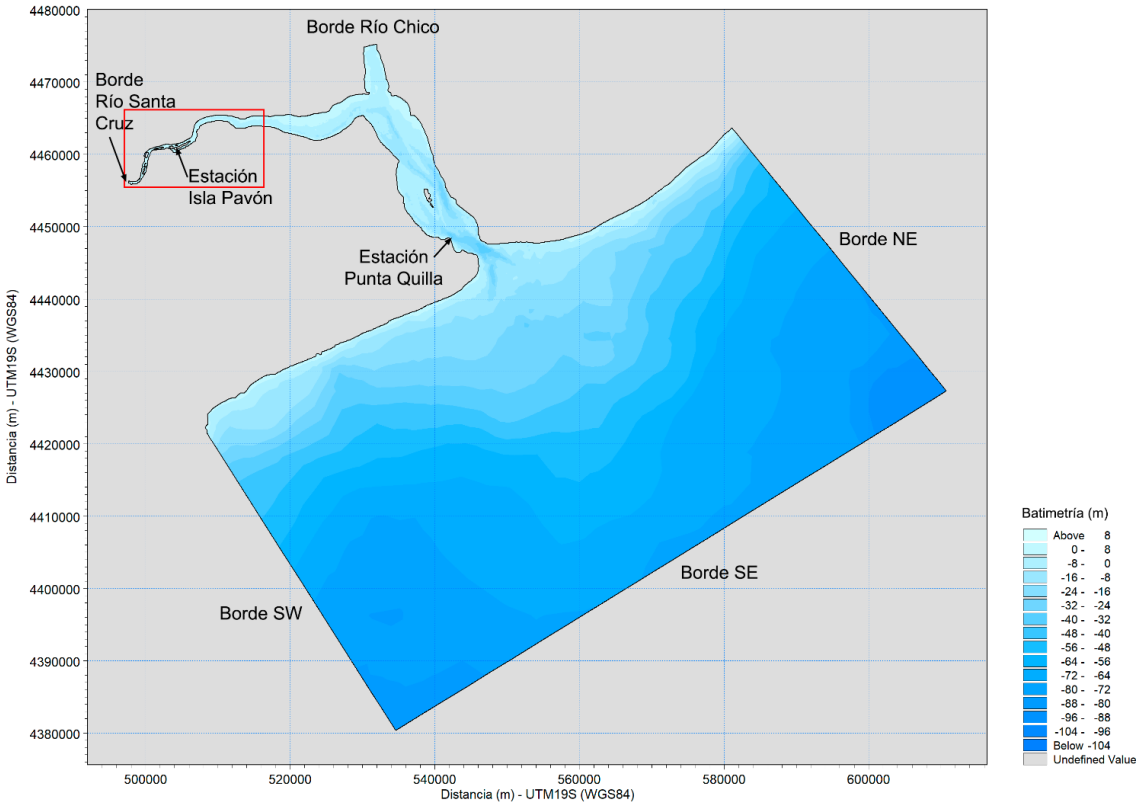
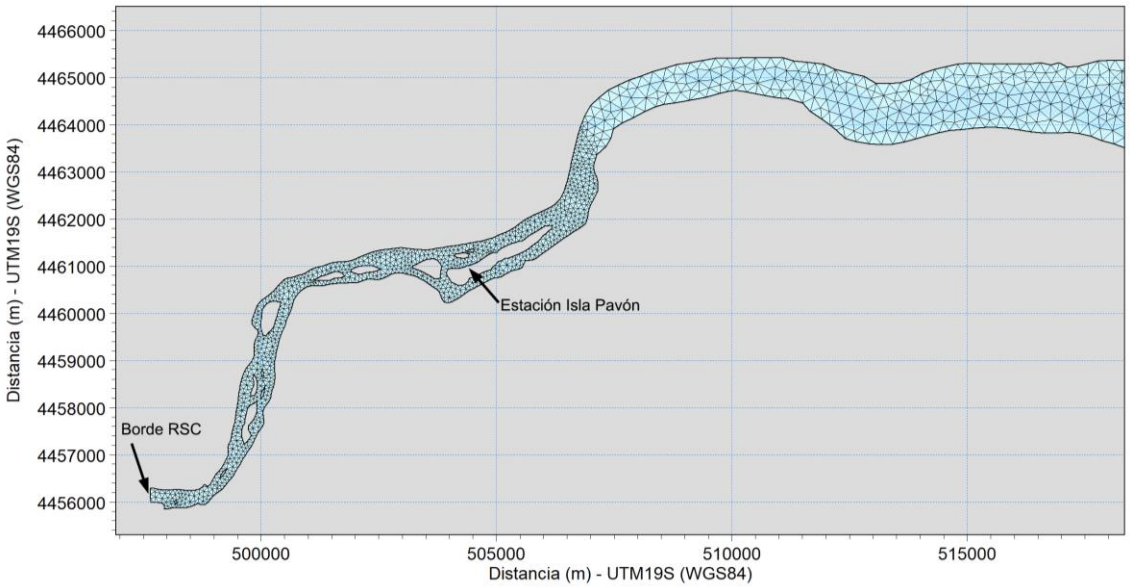


Figura 6.2 Acercamiento al rectángulo rojo de la Figura 6.1.

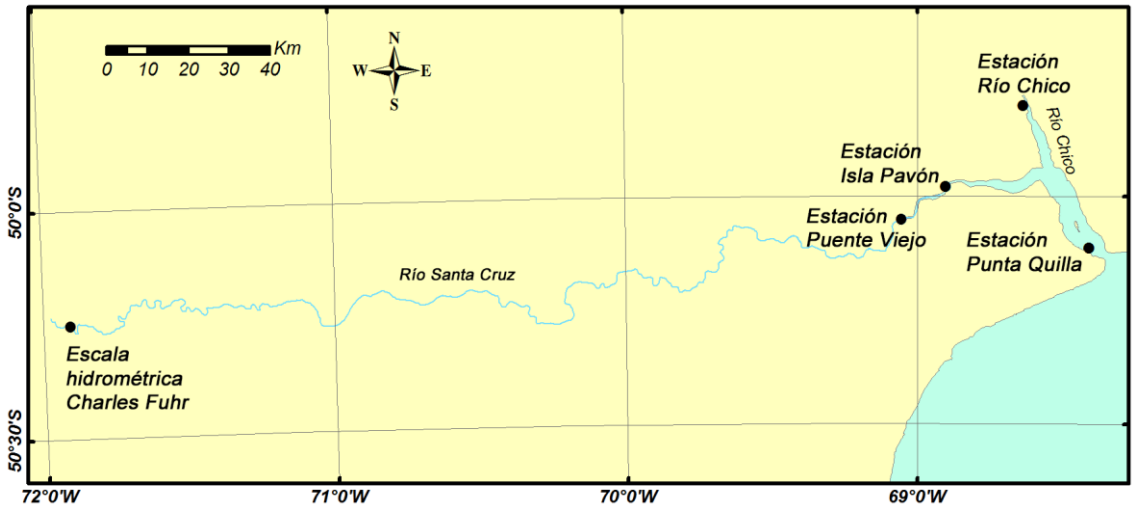


Capítulo 7

Datos

Los modelos numéricos resuelven ecuaciones iterando en el tiempo y en espacio con el objetivo de simular la realidad, pero requieren datos de 2 maneras: una para ser alimentados (condiciones iniciales y de bordes); y otra para que sus resultados sean contrastados permitiendo ajustar parámetros de las ecuaciones en un proceso denominado calibración del modelo. Por lo tanto, los modelos requieren de datos medidos, y cuanta mayor sea la cantidad de información utilizada (en tiempo y espacio) mejores serán los resultados que proveerá el modelo utilizado. Para este estudio se utilizaron mediciones realizadas durante monitoreos mensuales. Se procesaron los datos de campo en el período 27 de octubre de 2017 y el 28 de mayo de 2019, compuestos por diferentes variables que se midieron de manera continua (1 dato cada 10 min) y otras de manera esporádica (1 vez por mes), recopilados durante 20 campañas.

Figura 7.1 Puntos de medición y muestreo (temperatura, salinidad, caudales, turbidez y muestreos de agua)



El enorme volumen de información utilizado en el presente estudio resulta inusual en trabajos de modelación. La cantidad y calidad de los datos registrados ha permitido calibrar al modelo numérico para que este prediga con escaso error las diferentes variables hidrodinámicas.

Específicamente, se cuenta con 19 meses (entre el 27 de octubre de 2017 y el 28 de mayo de 2019) de datos de temperatura, salinidad, nivel del mar y turbidez en 2 estaciones fijas Isla Pavón y Punta Quilla. Además, durante los últimos 7 meses (entre el 31 de octubre de 2018 y el 28 de mayo de 2019) se registraron estas variables en río Chico. También se utilizaron datos de niveles del río Santa Cruz (registrados en Charles Furh) que fueron transformados a caudal del río, luego ajustados a las mediciones de caudal realizadas por ESSA en la estación Puente Viejo. La Figura 7.1 presenta la ubicación de las diferentes estaciones.

El período de modelación solicitado por la UTE corresponde entre el 15 de noviembre al 1 de junio, asociado al período estimado para el llenado de las represas. Sin embargo, dado que los modelos requieren cierto período de estabilización numérico y físico, por lo que las simulaciones inician el 1 de noviembre.

Para calibrar el modelo (detalles se presentan más adelante en este documento), se dispuso de las mediciones de niveles del agua, salinidad, temperatura y turbidez para Isla Pavón y Punta Quilla, entre el 27 de octubre de 2017 al 28 de mayo de 2019 (19 meses).

Para realizar cálculos de la transferencia de calor con la atmósfera el MIKE 3 Flow Model FM (HD) requiere de información meteorológica. Respecto de estos datos (temperatura ambiente, vientos, humedad y claridad) se usaron datos del Servicio Meteorológico Nacional de la Argentina (SMN - https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos) en Puerto Santa Cruz y Puerto San Julián y del NCEP-DOE (www.esrl.noaa.gov), según correspondiera. Los datos del SMN están disponible a partir del 27 de noviembre de 2017. Para completar los datos desde el 1 de noviembre, se utilizaron diferentes técnicas de relleno dependiendo de la variable, como se verá en cada caso más adelante en esta parte.

7.1. Temperatura Ambiente

Para alimentar al modelo con datos de temperatura ambiente se utilizaron mediciones de temperatura ambiente disponibles en Puerto San Julián (SMN). La Figura 7.1.1 presenta la serie tiempo de los datos utilizados como forzante del MIKE 3 Flow Model FM. Para construir esta serie hubo que utilizar dos paquetes de datos ya que el SMN comenzó a entregar la información horaria a partir del 27 de noviembre de 2019. Previamente solo están disponibles los máximos y mínimos diarios. Entonces:

- Desde el 1 al 27 de noviembre de 2017, se utilizaron datos de mínimos y máximos diarios. Para rellenar temporalmente la serie y cubrir a partir del 1 de noviembre (inicio de simulaciones) se realizó una interpolación cúbica a trozos que preserva la forma utilizando 4 puntos de la serie para el ajuste. En la Figura 7.1.2 se presenta un tramo donde se superponen los datos horarios (línea roja) con la serie rellenada en base a máximas y mínimas (línea negra). Las temperaturas en ese tramo comparan bien. El error cuadrático medio que resulta entre ambas series (la medida y la generada en base a máximos y mínimos diarios) es de 3.1ºC para el período de superposición de la Figura 7.2.1.
- Desde el 27 de noviembre de 2017 al 30 de mayo de 2019 se utilizaron datos horarios de San Julián.

Figura 7.1.1 Datos de temperatura ambiente en Puerto San Julián, para ser utilizada en la modelación.

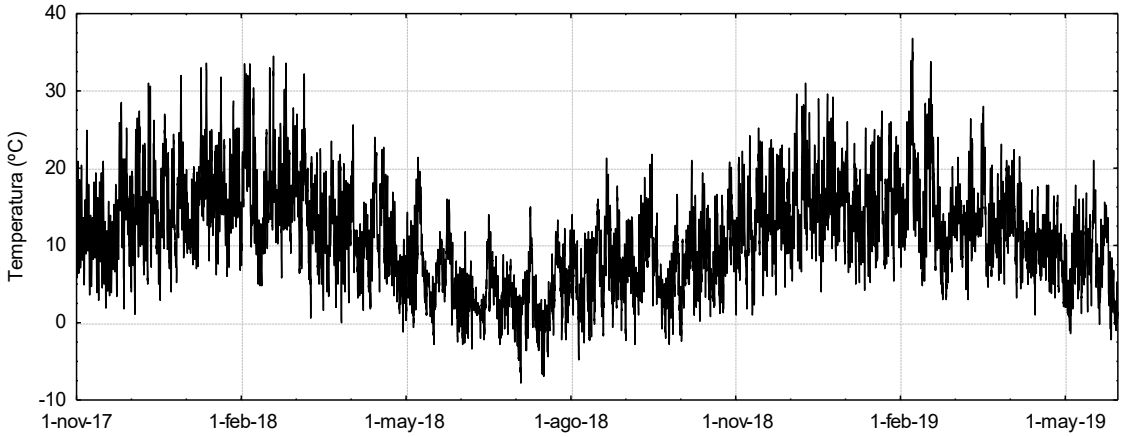
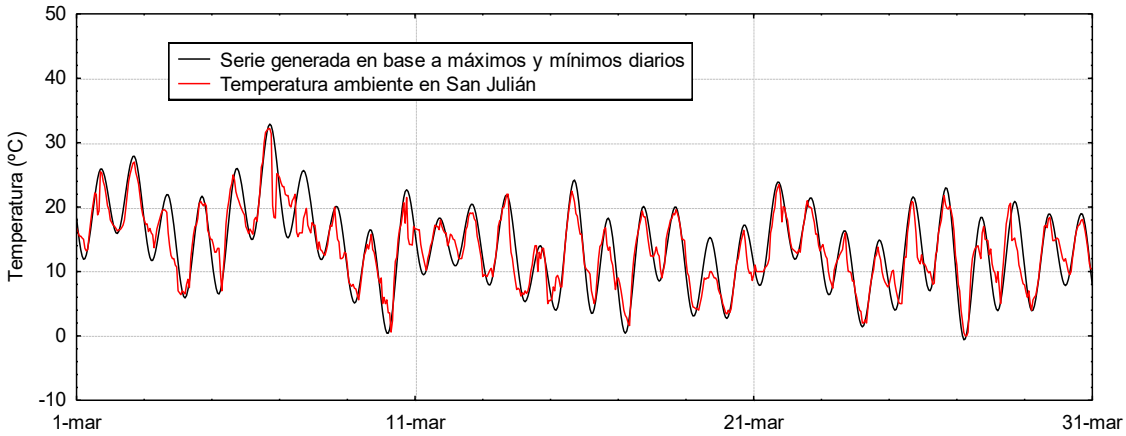


Figura 7.1.2 Comparación entre las series de temperatura ambiente registrada en Puerto San Julián y la generada en base a mínimos y máximos diarios. Detalle para el mes de marzo.

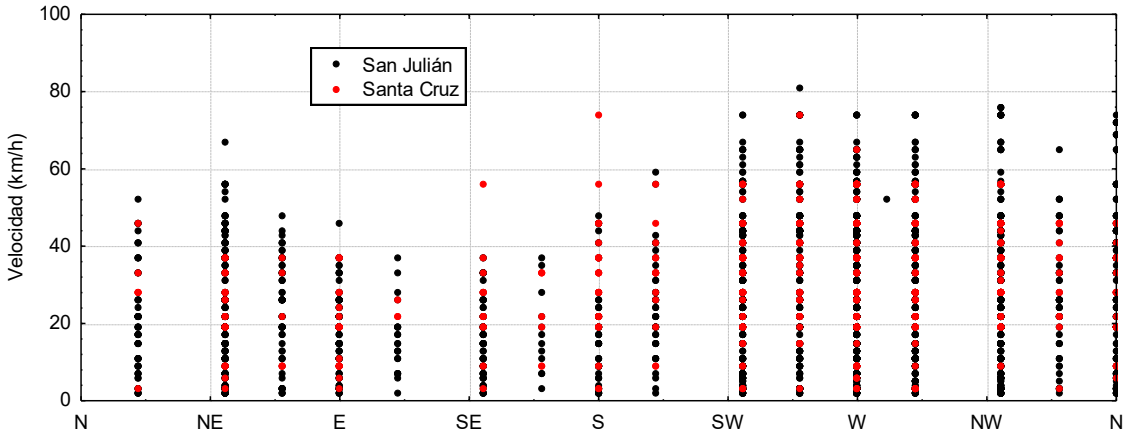


7.2. Vientos

Para generar la serie de vientos, se utilizaron las mediciones disponibles a partir del 26 de noviembre de 2017 en Puerto Santa Cruz y en Puerto San Julián y NCEP-DOE.

Los datos de San Julián presentan mayor discriminación temporal (1h) y diferencias relativamente pobres con los datos de Santa Cruz. La Figura 7.2.1 presenta un diagrama de dispersión entre la velocidad y la dirección del viento para los registros en Puerto Santa Cruz y Puerto San Julián.

Figura 7.2.1 Diagrama de dispersión entre velocidad y dirección del viento para los registros en Puerto Santa Cruz (9, 12, 15 y 21 h) y Puerto San Julián (horario).

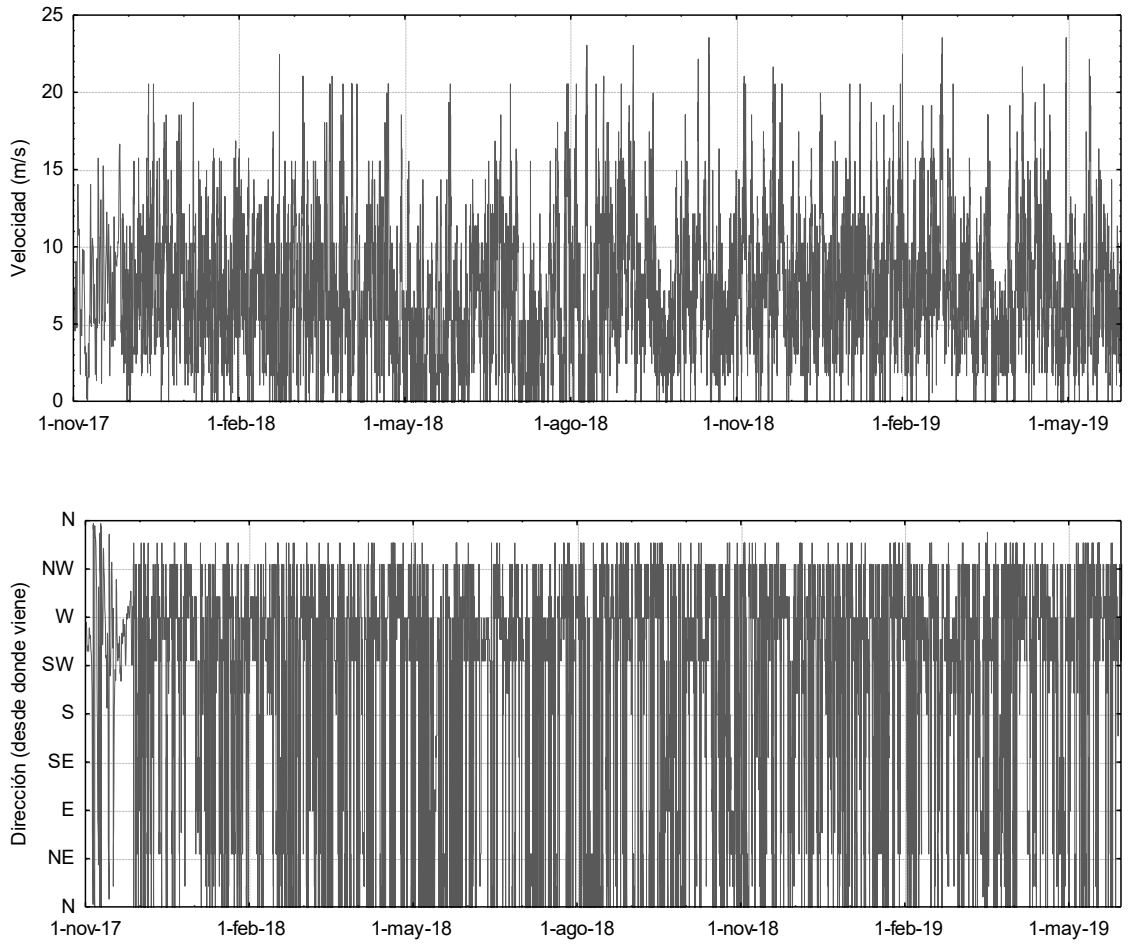


El procedimiento fue el siguiente:

- Desde el 1 al 27 de noviembre de 2017 se utilizaron datos del NCEP-DOE.
- Desde el 27 de noviembre de 2017 al 31 de mayo de 2019 se utilizaron datos de vientos horarios de Puerto San Julián

La Figura 7.2.2 presenta la serie de la velocidad y dirección del viento resultante del procedimiento indicado.

Figura 7.2.2 Velocidad (arriba) y dirección (abajo) del viento con datos del NCEP-DOE, Puerto San Julián (SMN) y datos del año 2017 para el mismo período.



Previamente, en diciembre de 2016 como parte de la operaciones ESSA instaló, en el aeropuerto de Santa Cruz, una estación meteorológica automática, con anemómetro a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, Davis Instruments 6250 Vantage Vue Wireless Weather Station, con data logger inalámbrico, programada para medir y registrar datos cada media hora. La estación midió dirección y velocidad del viento, presión, humedad relativa, y precipitaciones. El sensor de viento se orientó al norte verdadero, usando un punto de enfilación determinado con equipo GPS a una distancia de 400 m. Las Figuras 7.2.3 y 7.2.4 ilustran sobre la instalación del instrumento. Los datos de la estación fueron entregados a las represas y sirvieron para validar los vientos de Puerto San Julián y NCEP-DOE. No se presenta una comparación en este documento. Las Figuras 7.2.5 y 7.2.6 presentan una comparación entre los vientos medidos y los computados por NCEP-DOE.

Figura 7.2.3 Parando la torre de aluminio de la estación meteorológica automática DAVIS, modelo Vantage Vue 6250, en el Aeródromo de Puerto Santa Cruz, diciembre de 2016.

Figura 7.2.4 La unidad de sensores, en el tope de la torre, y la unidad de registro (izquierda). La estación funcionando, en su torre (derecha).

Figura 7.2.5 Comparación entre la serie de direcciones de vientos medidas por las estación Davis y los datos computados por NCEP-DOE.

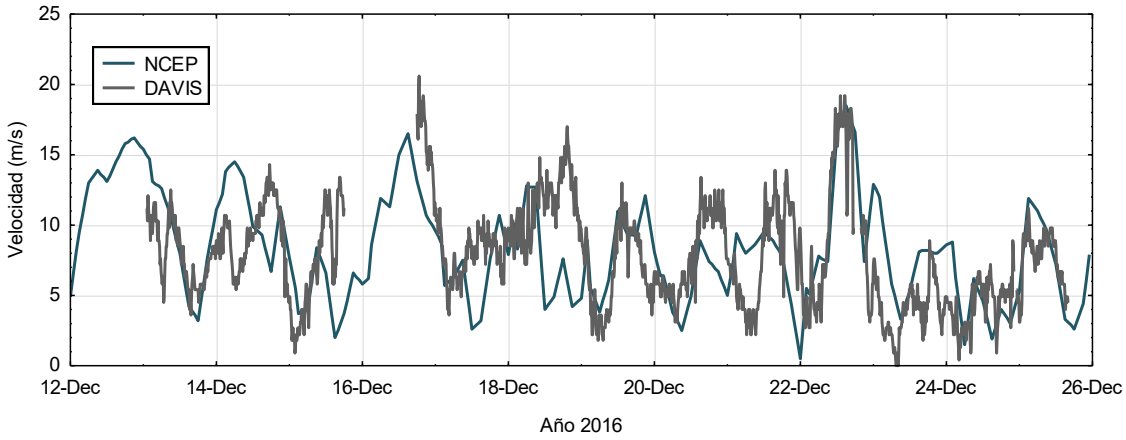
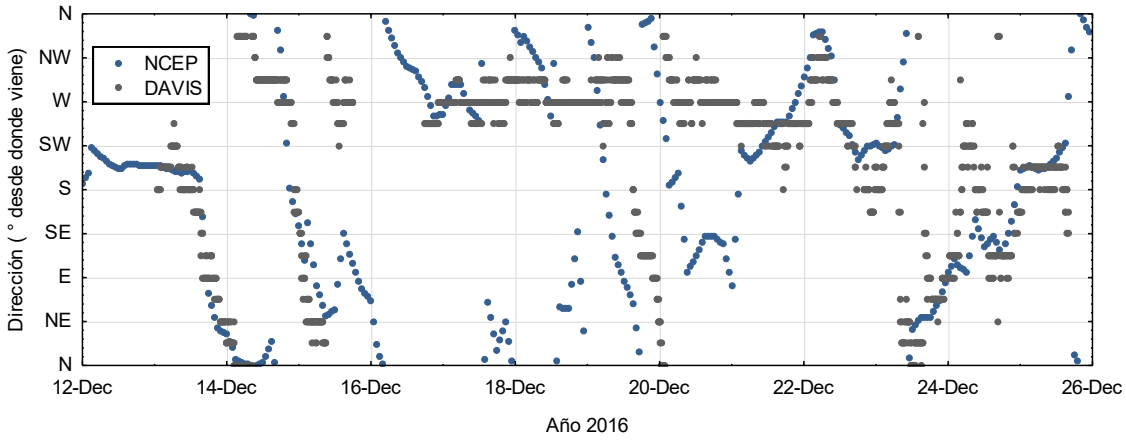


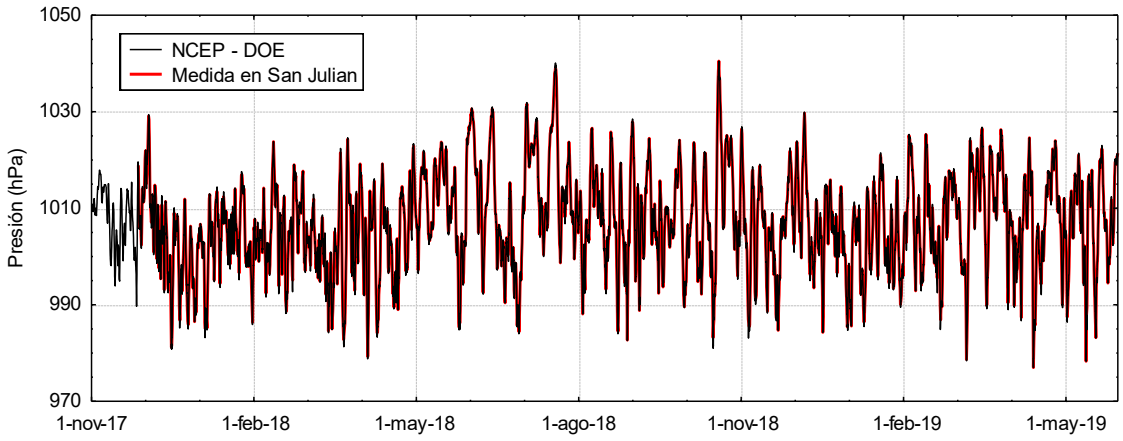
Figura 7.2.6 Comparación entre la serie de direcciones de vientos medidas por las estación Davis y los datos computados por NCEP-DOE.



7.3. Presión Atmosférica

Los instrumentos que registraron los niveles del mar y del río Santa Cruz, utilizan sensores de presión. Por lo tanto, las variaciones de la presión atmosférica son registradas por los instrumentos y deben filtrarse para poder analizar el registro de niveles de manera adecuada. Para poder extraer las variaciones asociadas a la presión atmosférica se utilizaron los datos en Puerto San Julián (SMN) y NCEP-DOE para rellenar noviembre de 2017. La Figura 7.3.1 presenta ambas series y puede verse que, por su similitud, que es indistinto utilizar cualquiera de ellas.

Figura 7.3.1 Presión atmosférica registrada en Puerto San Julián (SMN) y del NCEP-DOE.



7.4. Humedad Relativa

Otra variable requerida por el modelo es la humedad relativa. Para armar la serie entre el 1 de noviembre y el 1 de junio de 2019, se procedió de la siguiente manera:

- Desde el 27 de noviembre de 2017 al 1 de junio de 2019 se utilizaron datos de humedad de San Julián (SMN)
- Desde el 1 al 27 de noviembre de 2017 los datos de humedad se obtuvieron por medio de un método práctico derivado de la observación de la relación entre la humedad y la temperatura ambiente (ver Figura 7.4.1).
- La serie de tiempo de humedad relativa utilizada en las simulaciones se presenta en la Figura 7.4.2.

Figura 7.4.1 Diagrama de dispersión entre la humedad relativa y la temperatura ambiente registradas en Puerto San Julián (SMN). Nota: HR: humedad relativa, T: temperatura ambiente

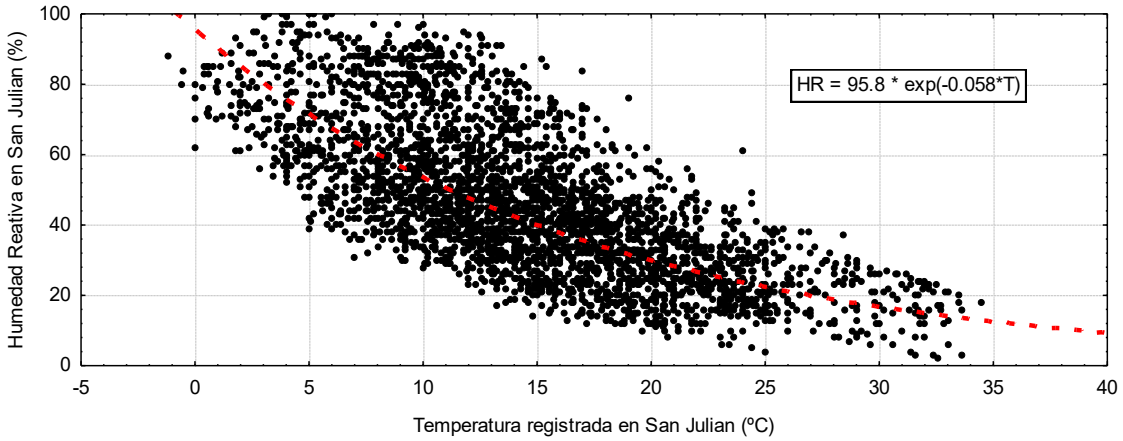
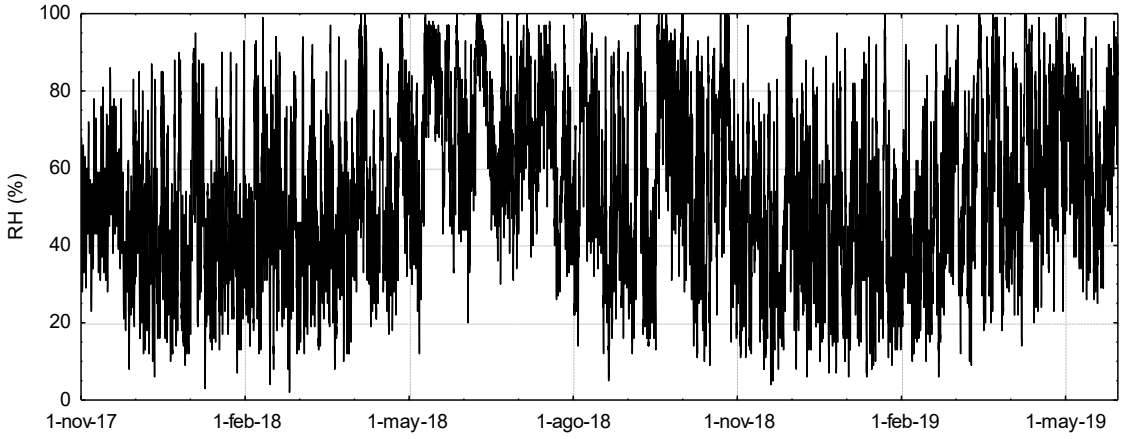


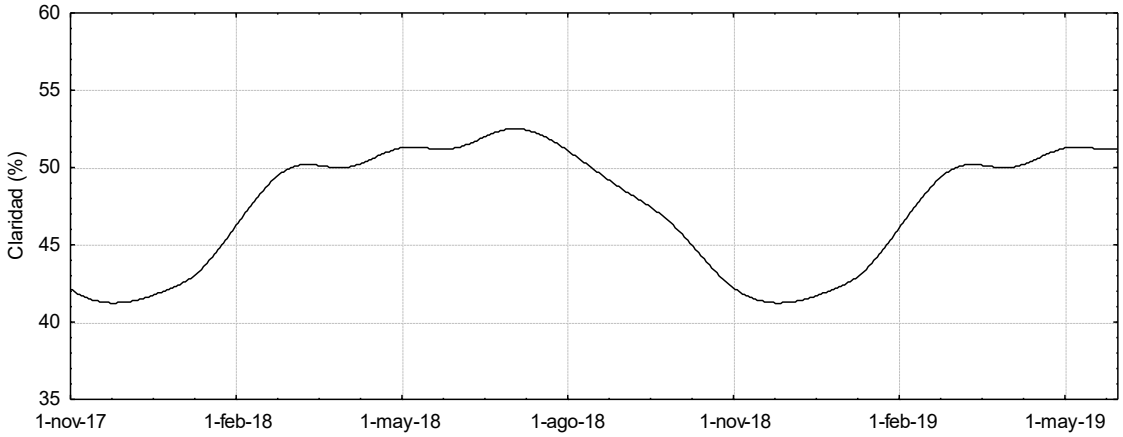
Figura 7.4.2 Serie de tiempo de la humedad relativa utilizada en las simulaciones.



7.5. Claridad

Otra variable requerida por el modelo es la claridad porcentual, definida como el porcentaje de cielo no cubierto. Una claridad de 100% corresponde a un cielo totalmente claro y 0% representa un cielo totalmente cubierto. Este dato fue generado en base a las estadísticas climatológicas normales del SMN para el período 1981-2010. En base a estos datos se generó un año promedio variable de claridad usando la interpolación con el método de "spline". La Figura 7.5.1 presenta la serie generada.

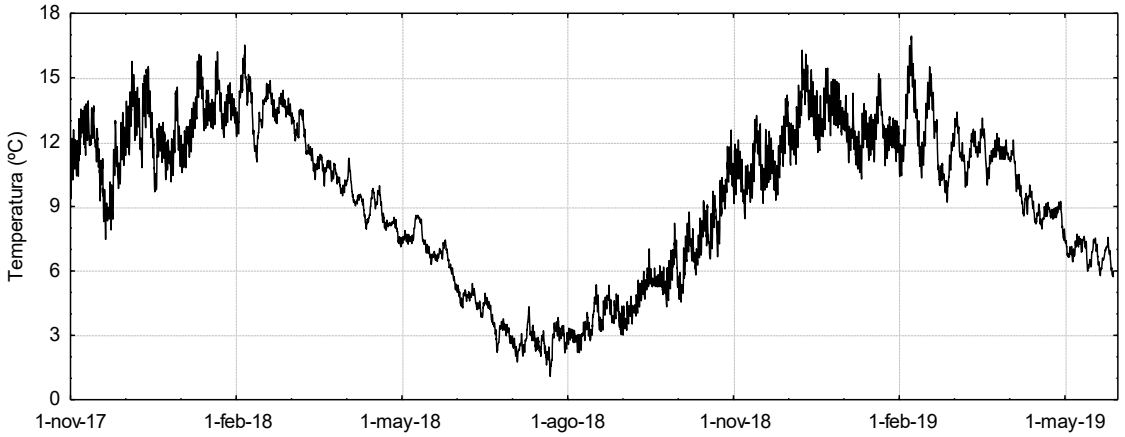
Figura 7.5.1 Claridad en base a las estadísticas climatológicas normales del SMN para el período 1981-2010. Datos mensuales.



7.6. Temperatura del Agua en Isla Pavón

Se cuentan con datos de temperatura del río Santa Cruz registrados en Isla Pavón entre el 27 de octubre de 2017 y el 27 de mayo de 2019, con un intervalo de muestreo de 10 min. Las mediciones de temperatura se hicieron con el instrumento OBS – 3A que resultaron en valores de buena calidad.

Figura 7.6.1 Temperatura del agua del río Santa Cruz registrada en Isla Pavón.



7.7. Mediciones de Turbidez en la Isla Pavón

A partir del 27 de octubre de 2017 hasta el 27 de mayo de 2019, se han realizado mediciones de la altura de la columna de agua, temperatura, salinidad y turbidez, con un intervalo de muestreo de 10 min. Algunas características de las mediciones de turbidez se muestran a continuación.

Durante las campañas de mediciones 2017-2018 se observó la presencia de algas en la maniobra de fondeo del OBS – 3A que mide la turbidez en la Isla Pavón. En las campañas 3 (diciembre, 2017), 4 (enero, 2018), 5 (febrero, 2018) y 7 (abril, 2018) se documentó la presencia de algas en el fondeo del instrumento como muestran las Figuras 7.7.1 a 7.7.4.

La sonda OBS-3A para medir la turbidez del lugar utiliza un sensor óptico orientado lateralmente (para evitar obstrucciones por encima y por debajo de la sonda) que emite luz en el infrarrojo, y luego recibe y mide la cantidad que devuelven las partículas en suspensión del agua. Si hay una obstrucción en el rango de la luz emitida, la luz se dispersará y la lectura de turbidez será demasiado alta. Si bien la presencia de algas enredadas en la línea de fondeo no necesariamente asegura mediciones de mala calidad, ya que es posible que las algas no interfieran con el sensor del instrumento, hubo periodos en los que la turbidez alcanzó valores ridículamente grades, muy probablemente por obstrucciones de las algas, como puede verse en la Figura 7.7.7, por lo que fue necesario eliminar ciertos tramos de serie.

La serie de turbidez sufrió la siguiente metodología de filtrado, relleno y extrapolación. La serie original posee un dato cada 10 min y se la llevó a 1 dato por hora, obteniendo el valor mínimo de turbidez de los 6 de cada hora. Luego se computó la FFT (transformada rápida de Fourier) para encontrar las principales componentes armónicas. De las componentes halladas se seleccionaron, arbitrariamente, las 75 que explican mayor varianza y se reconstruyó la serie eliminando el resto. La selección de este número de componentes se basó en la adecuada representación de la variabilidad de turbidez. La Figura 7.7.6 presenta una comparación entre la serie original sin los periodos de mediciones espurias y la filtrada, en la que puede verse un buen acuerdo entre ambas. El método permite, además de filtrar el ruido de la serie, rellenar los tramos sin datos y extrapolarla para cubrir el período requerido.

Figura 7.7.1 Momento del recupero del OBS-3A (diciembre 2017)

La Figura 7.7.6 muestra la serie de datos crudos de turbidez medidos en Isla Pavón, y la filtrada, rellenada y extrapolada habiendo utilizado las 75 componentes de la FFT. La Figura 7.7.7 muestra la serie original y la tratada. La Figura 7.7.8 muestra la serie de datos de turbidez en Isla Pavón filtrada, rellenada y extrapolada y la Figura 7.7.9 la muestra superpuesta al caudal del río Santa Cruz, para observar alguna relación entre ambas variables.

Figura 7.7.2 Momento del recupero del OBS-3A (enero 2018)

Figura 7.7.3 Momento del recupero del OBS-3A (febrero 2018)

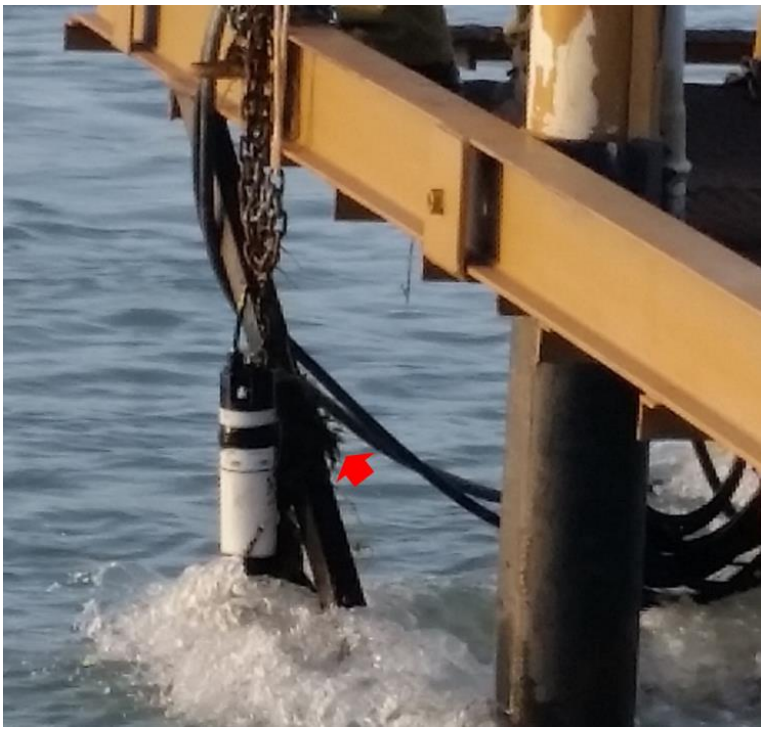


Figura 7.7.4 Momento del recupero del OBS-3A (abril 2018). El equipo fue encontrado con su línea cortada, sin el muerto de plomo.

Figura 7.7.5 Momento del recupero del OBS-3A, noviembre 2018 (izquierda) y enero 2019 (derecha).

Figura 7.7.6 Mediciones de turbidez en Isla Pavón, serie horaria y serie reconstruida en base a las 75 componentes más importantes de los resultados FFT.

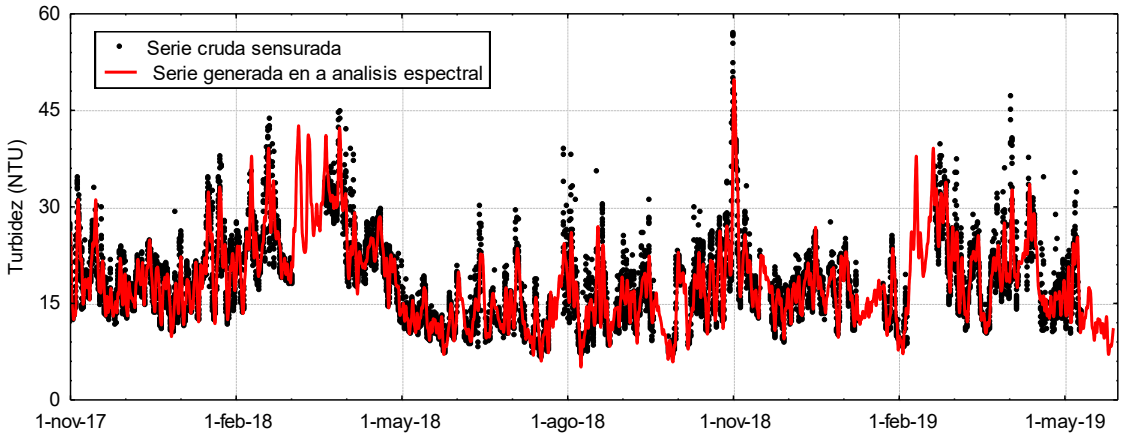


Figura 7.7.7 Mediciones crudas de turbidez en Isla Pavón. La línea roja muestra la serie filtrada, rellenada y extrapolada.

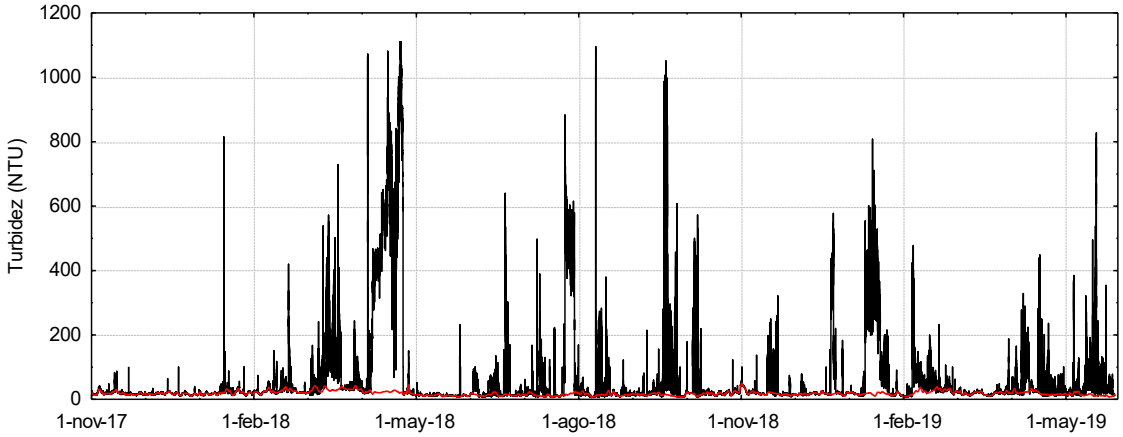


Figura 7.7.8 Datos de turbidez filtrados, rellenados y extrapolados.

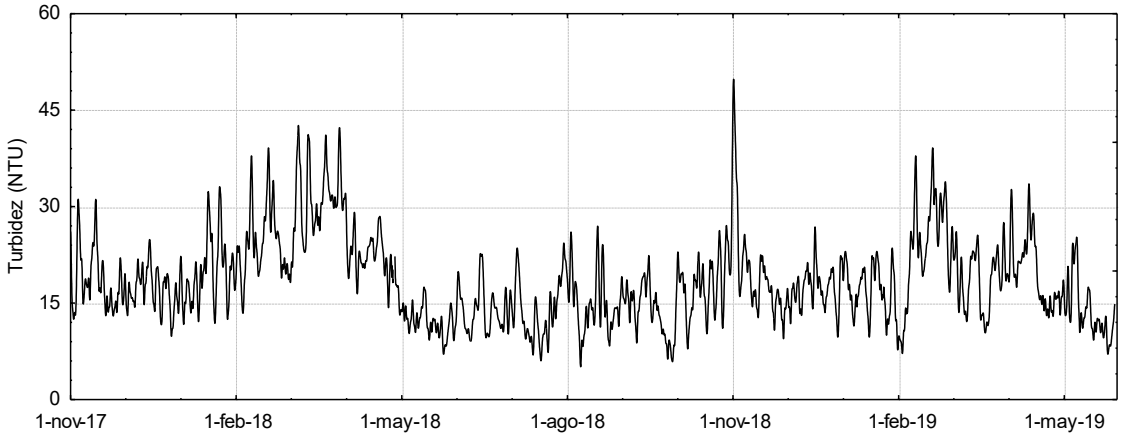
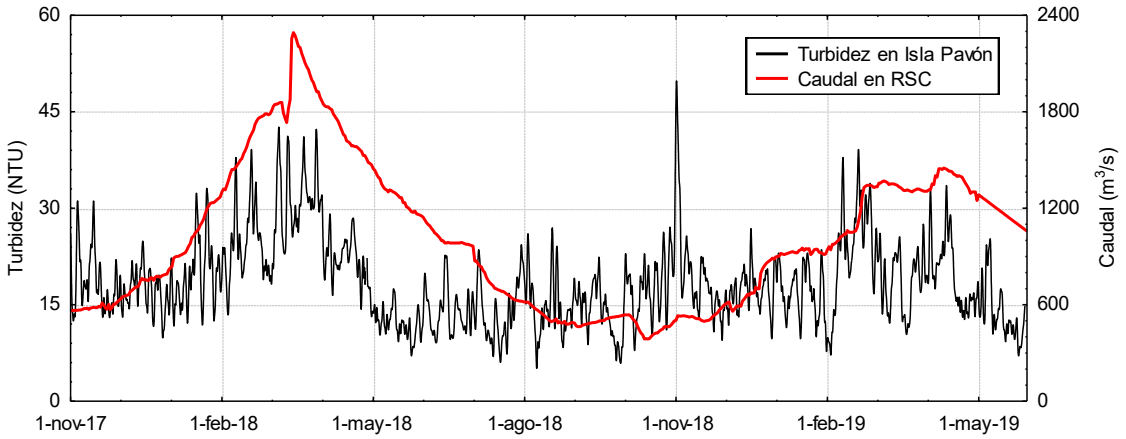


Figura 7.7.9 Datos de turbidez y curva de caudal del río Santa Cruz



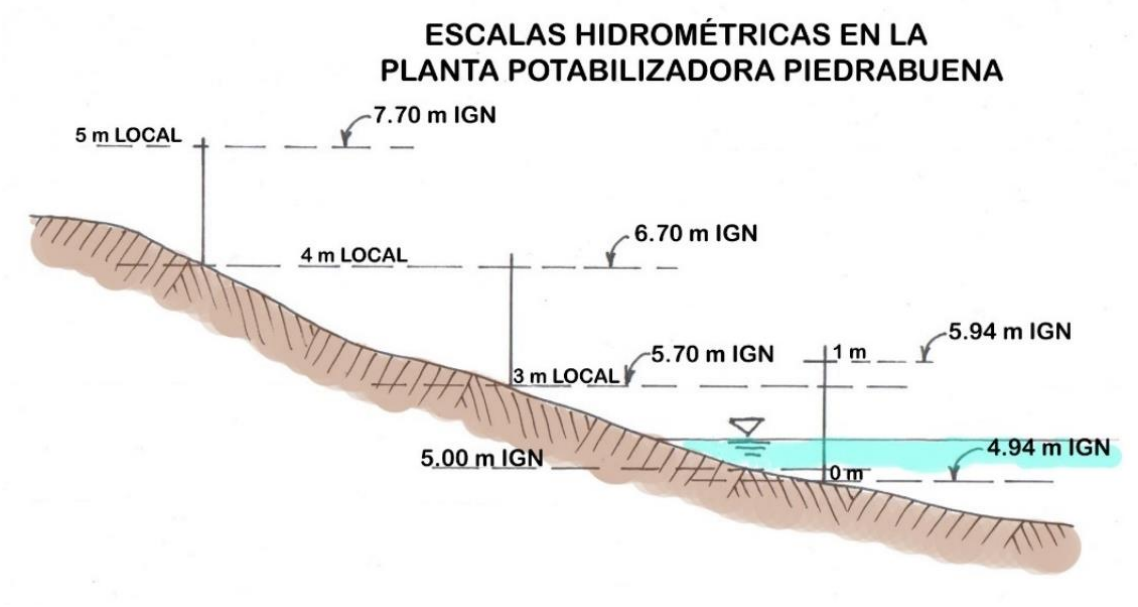
7.8. Mediciones de Conductividad (Salinidad) en la Isla Pavón

Se hicieron mediciones de conductividad con el OBS – 3A, pero no se encontraron valores de conductividad que indiquen valores de salinidad con algún significado. Cómo se preveía, el agua de mar no alcanza la zona de Isla Pavón, pero es interesante pensar que esta zona si tiene una fuerte influencia de la marea que propaga desde el mar, como se presenta a continuación. Isla Pavón se encuentra a unos 50 km de la desembocadura en el mar y evidencia cómo se propaga la energía del mar, pero no la masa.

7.9. Mediciones del Nivel del Río en la Isla Pavón

Las mediciones del nivel del río con el OBS – 3A resultaron en valores de muy buena calidad. Los datos de niveles están referenciados al cero del IGN que se encuentra a 0.162 m por debajo del NMM en Punta Quilla. Esta diferencia se analiza en el informe de la Inspección de obra Jorge Cepernic (2016), donde indican que el plano de reducción de mareas está a 6.038 m por debajo del cero IGN. La Figura 7.9.1 presenta un croquis de la referencias de los niveles en la zona de medición de niveles.

Figura 7.9.1 Croquis con indicaciones de referencia al cero IGN, escala hidrométrica en Toma de Agua Piedra Buena.



El sensor en Isla Pavón registra la presión ejercida por la columna de agua más la atmosférica, que debe eliminarse para obtener el nivel del agua. La serie de presión atmosférica presentada en la Figura 7.3.1 es transformada a nivel del río usando la relación hidrostática. La Figura 7.9.2 presenta un tramo de niveles crudos y los generados por la presión atmosférica, en el que se observa el muy buen acuerdo entre los mínimos de nivel del río Santa Cruz y la serie asociada a presión atmosférica, confirmando la adecuada transformación. Para eliminar este efecto espurio a la serie de niveles crudos del río Santa Cruz, se le resta la serie debida a la presión atmosférica.

La Figura 7.9.3 muestra la serie de valores del nivel del río sin el efecto de la presión atmosférica para el mismo período de la figura anterior y la Figura 7.9.4 para todo el registro. La serie presenta una marcada onda anual vinculada a la variación del caudal del río y la presencia de los efectos de la marea astronómica que propaga desde el mar.

Figura 7.9.2 Un tramo de los niveles crudos registrados por el OBS – 3A y los generados por la presión atmosférica. Puede verse el acuerdo entre los mínimos de nivel del río Santa Cruz y la serie asociada a presión atmosférica

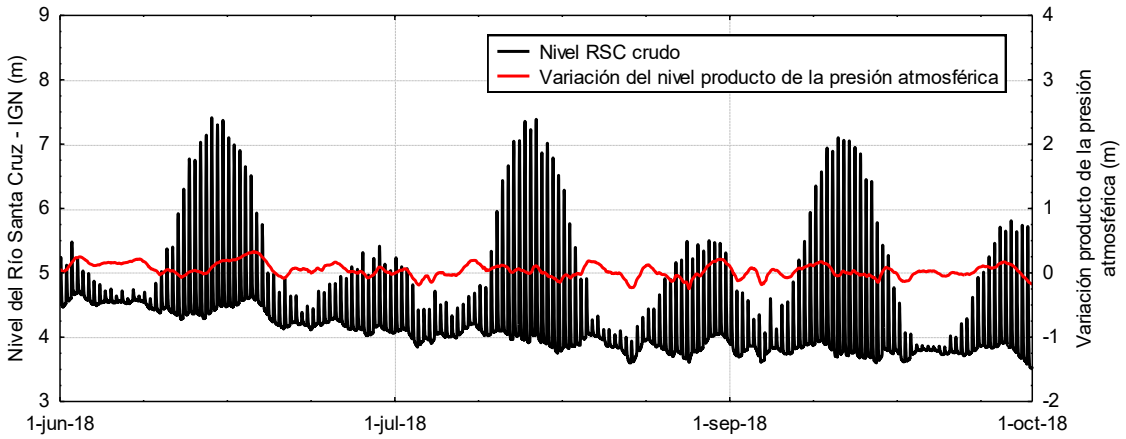


Figura 7.9.3 Un tramo de los niveles registrados por el OBS – 3A corregidos por presión atmosférica y los generados por la presión atmosférica.

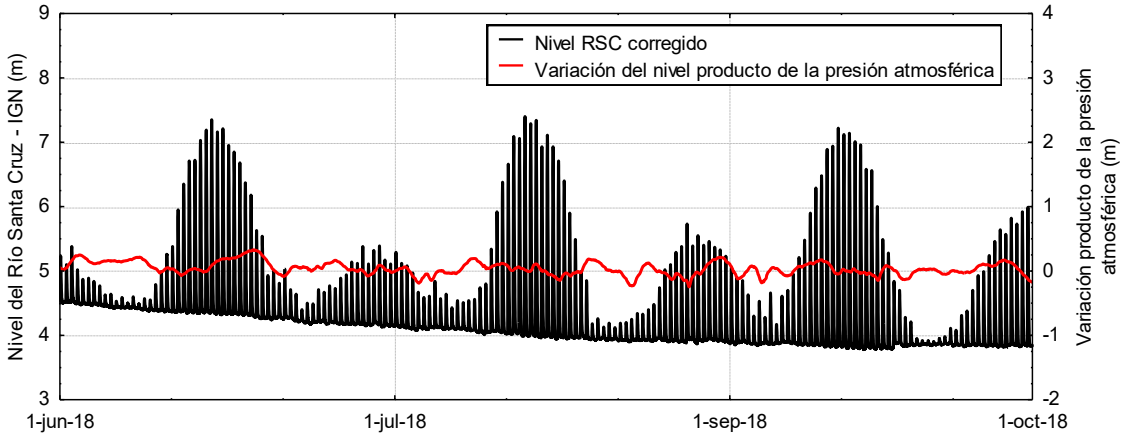
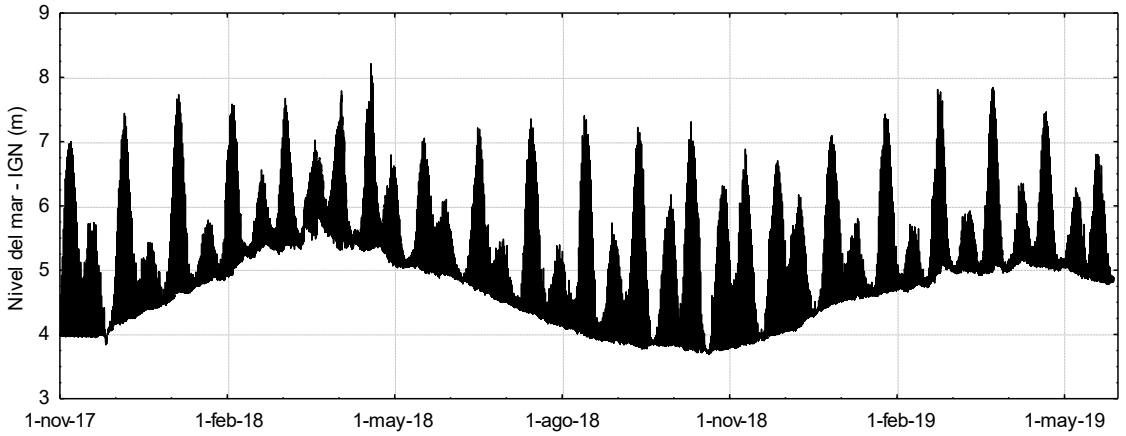


Figura 7.9.4 Serie de valores del nivel del río en Isla Pavón



Los niveles del río Santa Cruz a la altura de Isla Pavón muestran que, en sicigias, existen pleamares, pero no bajamares y, en algunas cuadraturas, no hay pleamares ni bajamares. A continuación, se presentan algunos factores para comprender este fenómeno:

- La marea astronómica propaga desde el mar hacia el interior del estuario y de este hacia el interior del río Santa Cruz.
- El efecto de la marea va disminuyendo hacia el interior del río Santa Cruz con la distancia a la desembocadura (hacia aguas arriba). A la altura de Puente Viejo (ver Figura 7.1) el efecto de la marea ya no es observable. Allí el río tiene suficiente nivel del cauce como para que las variaciones de nivel de agua asociadas a la marea no contribuyan.
- El río posee un nivel natural impuesto por la pendiente hidráulica sin efecto de la marea. Cuando ocurre una pleamar en el mar (o en el estuario o en Punta Quilla donde existen mediciones) la cresta de esta onda es observada como una pleamar en Isla Pavón cierto tiempo después, porque la altura del mar está variando en un rango capaz de perturbar el nivel del río allí. También existen variaciones del nivel del mar durante las bajamares o incluso en pleamares de cuadraturas (cuando los máximos de nivel son relativamente pequeños) en las que la marea no tiene capacidad de modificar la altura en Isla Pavón. En estos casos el nivel del río no puede caer por debajo de su nivel hidráulico natural. Esto indica que en Isla Pavón no siempre hay pleamares.
- En base a las observaciones, puede verse que la altura del cauce del RSC define la posición, aguas arriba, hasta la cual se observa alguna incidencia de la marea astronómica en los niveles río Santa Cruz. Las pleamares en Isla Pavón y en el resto del río (hasta donde se observa alguna influencia de la marea astronómica) parecen depender de la altura del lecho, porque hasta esa altura es donde existe fluido que puede ser perturbado. La Figura 7.9.5 ilustra acerca de esta posibilidad. Este resultado se apoya en lo observado en la Figura 7.13.2 (que se presenta más adelante en este documento porque incluye otras mediciones), donde independientemente del nivel del río las alturas de las pleamares mantienen sus niveles. En esta figura también puede verse que cuando los niveles de las pleamares en Punta Quilla están por debajo de 3 m referidos al cero IGN, no se observan pleamares en Isla Pavón. En Isla Pavón

la profundidad del cauce es variable pero en promedio está entre 2 y 4 m por sobre el cero IGN. La Figura 7.9.6 presenta la batimetría de parte del estuario y de la parte final del río Santa Cruz.

Figura 7.9.5 Esquema que ilustra acerca de la incidencia de la marea en los niveles del río

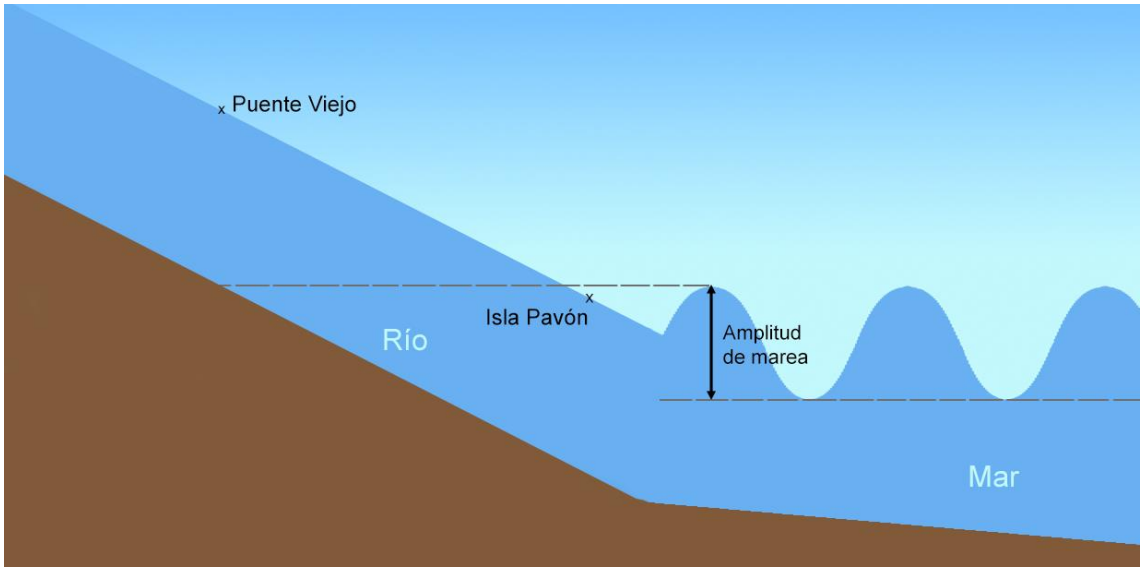
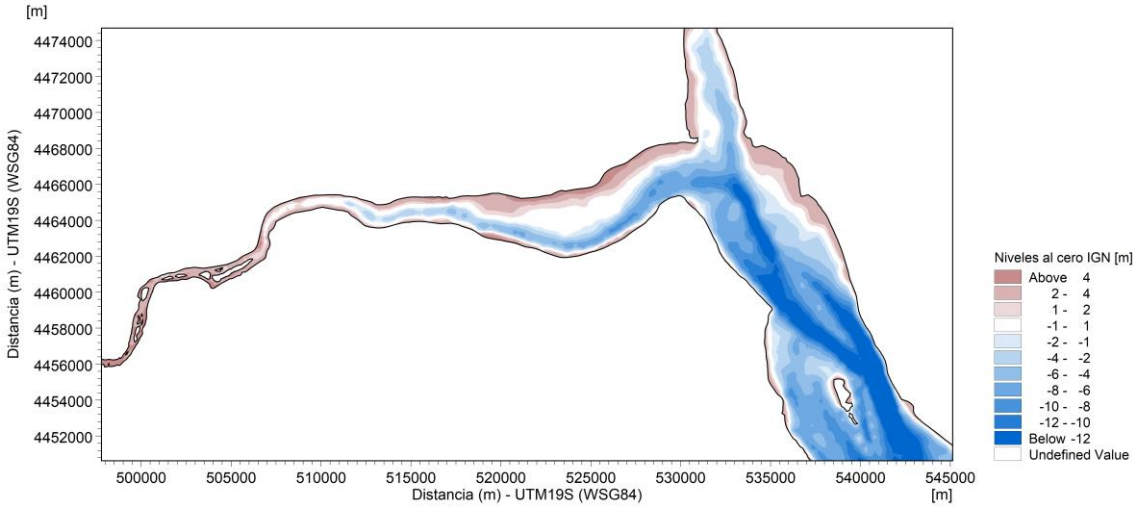


Figura 7.9.6 presenta los niveles batimétricos de parte del estuario y el río Santa Cruz.



Para estudiar la influencia de la marea en la zona de Isla Pavón y aguas arriba se utilizó el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) forzado solamente con marea astronómica desde el mar, sin imponer condición de contorno en Puente Viejo (solo existe el cauce del RSC, pero sin agua) por lo que es posible observar cómo con cada pleamar el agua viaja a la zona de Isla Pavón, básicamente porque el cauce le permite alcanzar la zona. Detalles del procedimiento y de los resultados se presentan más adelante en este documento, pero se puede indicar que la marea por lo menos tiene incidencia hasta la altura que el lecho permita.

- Otro efecto para resaltar es que en Isla Pavón no se observa una inversión de la corriente durante la creciente asociada a la marea (cómo ocurre en todo el estuario), es suficiente una reducción en la intensidad del flujo para que el agua se acumule en la zona y genere un máximo de nivel. Durante la creciente se está yendo menos agua de la que está llegando. Más detalles se presentan a continuación en el punto 7.13, con la presentación de las mediciones de nivel del mar en Punta Quilla.

7.10. Mediciones de Turbidez en Punta Quilla

Las mediciones de turbidez en Punta Quilla muestran patrones complejos que se han tratado de dilucidar en esta parte.

Presencia de algas

La sonda OBS-3A para medir la turbidez del lugar utiliza un sensor óptico orientado lateralmente (para evitar obstrucciones por encima y por debajo de la sonda) que emite luz en el infrarrojo, y luego recibe y mide la cantidad que devuelven las partículas en suspensión del agua. Si hay una obstrucción en el rango de la luz emitida, la luz se dispersará y la lectura de turbidez será demasiado alta.

Al igual que para las mediciones de turbidez en Isla Pavón, se dispone de evidencias de la presencia de algas enredadas en las maniobras de fondeo y el propio instrumento (OBS-3A), no habiendo sido posible establecer el tiempo que las algas estuvieron sobre el instrumento.

El registro de turbidez en la estación de Punta Quilla muestra períodos en los cuales se puede deducir que el equipo estuvo obstruido. Sin embargo la turbidez mínima es un buen dato, ya que las obstrucciones del sensor solo pueden aumentar la turbidez registrada. Las Figuras 7.10.1 y 7.10.2 muestran algas en el equipo para distintas campañas.

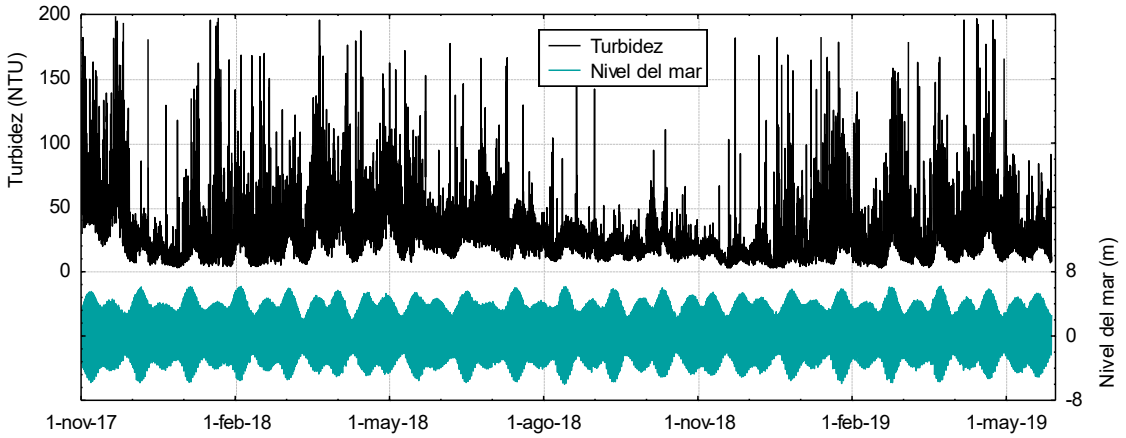
Figura 7.10.1 Recuperando el implante con los equipos ADCP y el OBS 3A, se observan algas enredados en los implantes. Campaña 2, noviembre 2017(izquierda) Campaña 16, enero de 2019 (derecha).

Figura 7.10.2 Recuperación final del equipo ADCP y el OBS 3A. El implante, que estuvo durante sólo 6 días en el fondo, salió con cachiyuyos enredados (Campaña 2, parte 2, noviembre 2017)

La relación de la turbidez con la marea

Las mediciones de turbidez en el período noviembre 2017 – mayo 2019 muestran tramos de registro de variada calidad, pero se observa evidencia de que, al menos los mínimos de turbidez poseen periodicidades asociadas a la marea. La Figura 7.10.3 presenta la variación del nivel del mar y la turbidez en Punta Quilla.

Figura 7.10.3 Nivel del mar (línea celeste) y turbidez (línea negra) en Punta Quilla.



Las Figura 7.10.4 y 7.10.5 presentan dos segmentos de la serie de turbidez cruda (negro), otra promediada a intervalos horarios (roja) que le quita “ruido” al registro.

Figura 7.10.4 Tramo (1 a 6 diciembre) de la serie de turbidez cruda (negro), otra promediada a 1 hora (6 valores de turbidez) (roja) y los niveles del mar (verde).

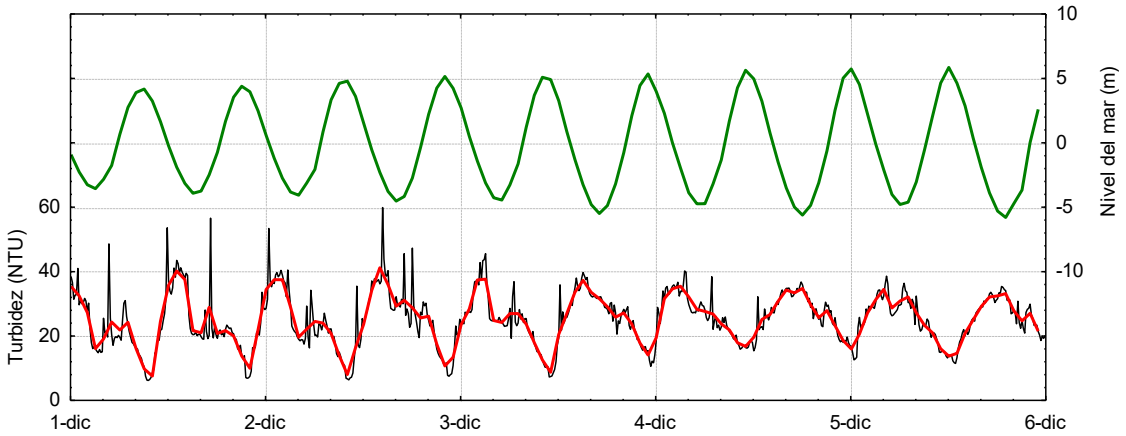
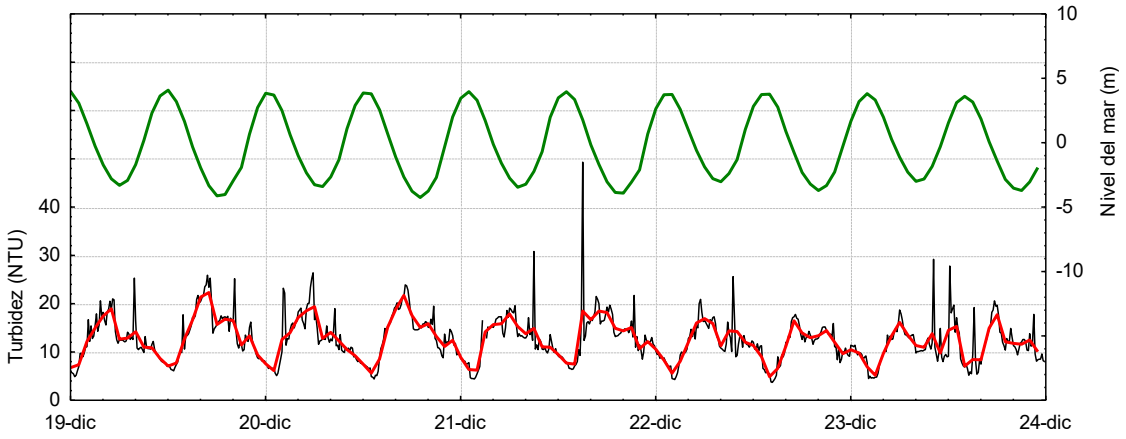
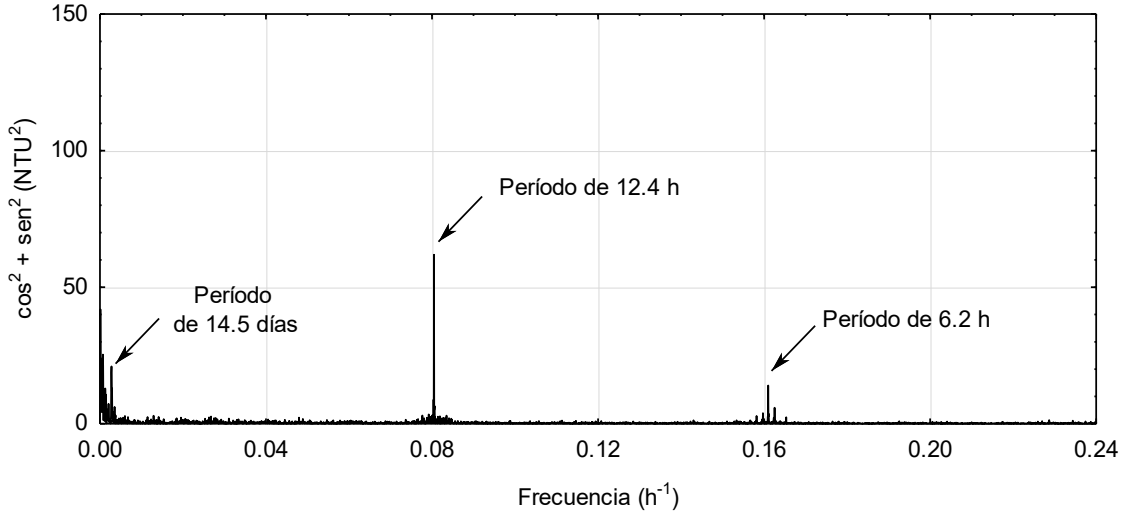


Figura 7.10.5 Tramo (19 a 24 diciembre) de la serie de turbidez cruda (negro), otra promediada a 1 hora (roja) y los niveles del mar (verde).



Para establecer la relación de la marea con la turbidez, se realizó un análisis armónico de la serie de turbidez promediada sobre 1 h (6 valores de turbidez). Los resultados de las componentes más importantes se presentan en la forma de periodograma en la Figura 7.10.6.

Figura 7.10.6 Periodograma de la serie de turbidez promediada a 1 h.



Los resultados indican que las contribuciones más importantes a la turbidez total pueden dividirse en períodos de días (más de 14) y en horas (12.4 h y 6.2 h). Las componentes de varios días están asociadas a las variaciones de sicigias y cuadraturas, y a variaciones posiblemente relacionadas a cambios anuales, como por ejemplo la onda anual que presenta el caudal del río.

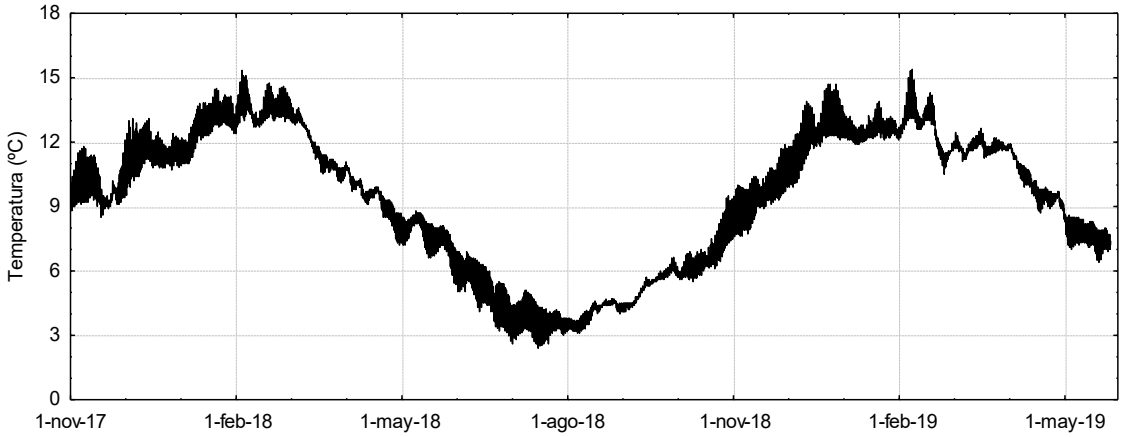
Las componentes con períodos de horas son las de 12.4 h (marea) y 6.2 h (módulo de las corrientes de marea) que pueden asociase a dos procesos diferentes que aportan turbidez en Punta Quilla. La información granulométrica, presentada en el punto 7.19 del presente documento, indica presencia de arenas finas y hasta limos en las zonas intermareales. En base a esta información la forma de las series de turbidez en Punta Quilla podría explicarse de la siguiente manera:

- Cuando las corrientes de marea se dirigen al mar (bajante), las velocidades de las corrientes de marea (principalmente) remueven sedimentos de los bancos y los ponen en suspensión. Además, con la bajante el agua que arriba a Punta Quilla es la de los ríos (Santa Cruz y Chico) que traen sedimentos en suspensión. Se genera entonces un máximo relativo de turbidez.
- Cuando las corrientes de marea tienen velocidades cercanas a cero en la estoa de bajamar, hay una caída en los valores de turbidez producto de la pérdida de material que las velocidades más pobres no logran mantener en suspensión.
- En la creciente, las corrientes que traen menos sedimentos en suspensión porque el agua desde el mar posee baja turbidez, y la turbidez registrada disminuye, pero la velocidad de creciente tiene capacidad de poner sedimentos en suspensión y de esta manera se genera otro máximo, aunque de menor magnitud que el de bajante.
- Cerca de la estoa de la pleamar ocurre el mínimo más importante ya que hay mucha agua de mar (con pocos sedimentos en suspensión) y las velocidades pobres, asociadas a ese estado de la marea, no remueven sedimentos del fondo.
- Además, la turbidez es afectada por los estados de la marea tales como las sicigias y cuadraturas, cambios que tienen que ver con otras escalas de tiempo más largas que un ciclo semidiurno de la marea.

7.11. Mediciones de Temperatura en Punta Quilla

Se hicieron mediciones de temperatura con el OBS – 3A, que resultaron en valores de poco ruidosos, con variaciones dentro de las esperadas producto de los flujos del sitio de medición. La Figura 7.11.1 muestra la serie de valores temperatura en Punta Quilla.

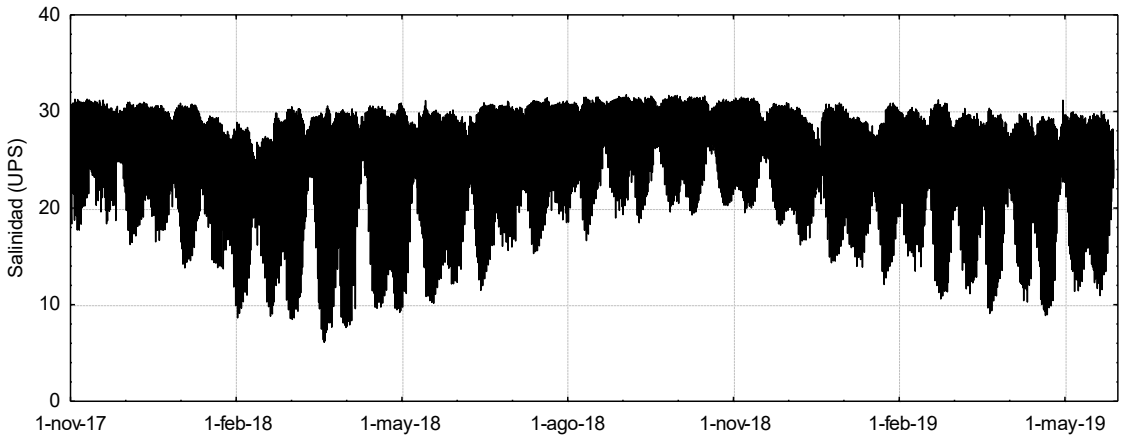
Figura 7.11.1 Serie de valores temperatura en Punta Quilla



7.12. Mediciones de Conductividad (Salinidad) en Punta Quilla

Se hicieron mediciones de conductividad con el OBS – 3A, que resultaron en valores de salinidad de buena calidad. La Figura 7.12.1 muestra la serie de valores salinidad en Punta Quilla. La serie temporal presenta una forma algo particular, el aspecto que más resalta es su variabilidad temporal definida por la marea. Se observan las variaciones que genera la componente semidiurna con cambios de hasta 20 puntos de salinidad en 6 h. En Punta Quilla el agua de mar (salina) es ingresada al estuario con las crecientes y el agua con poca salinidad es llevada desde el interior del estuario hacia la estación de Punta Quilla con cada bajante. Estas variaciones son moduladas por los ciclos lunares. En cuadraturas, cuando las amplitudes de nivel del mar son relativamente pobres, las variaciones de salinidad son mínimas y sicigias cuando las amplitudes de nivel del mar son relativamente grandes, las variaciones de salinidad son máximas. Además, se observa una onda anual regida por el caudal del río Santa Cruz.

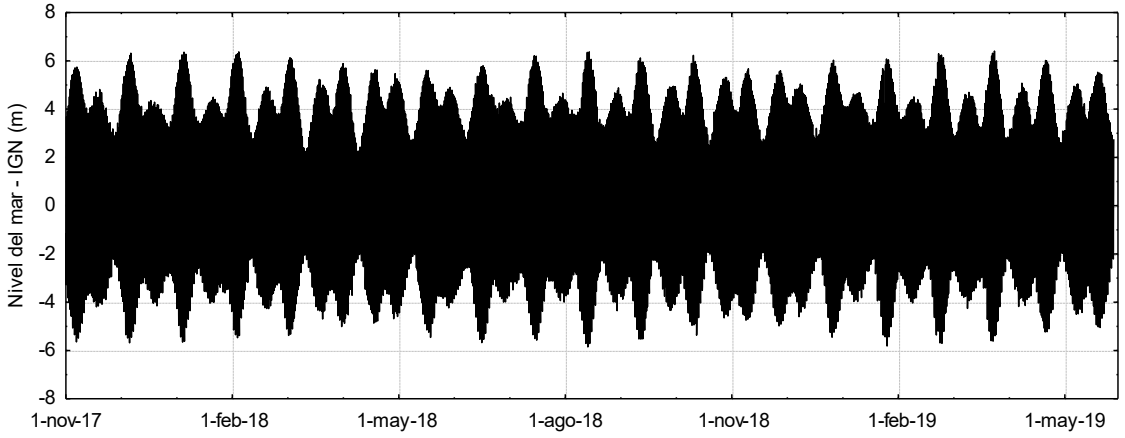
Figura 7.12.1 Serie de valores salinidad en Punta Quilla



7.13. Mediciones del Nivel del Mar en Punta Quilla

Se realizaron mediciones del nivel del mar con el OBS – 3A que resultaron en valores de buena calidad. La Figura 7.13.1 muestra la serie de valores del nivel del río registrada en Punta Quilla referida al cero IGN.

Figura 7.13.1 Serie de valores del nivel del mar en Punta Quilla referidos al cero del IGN.

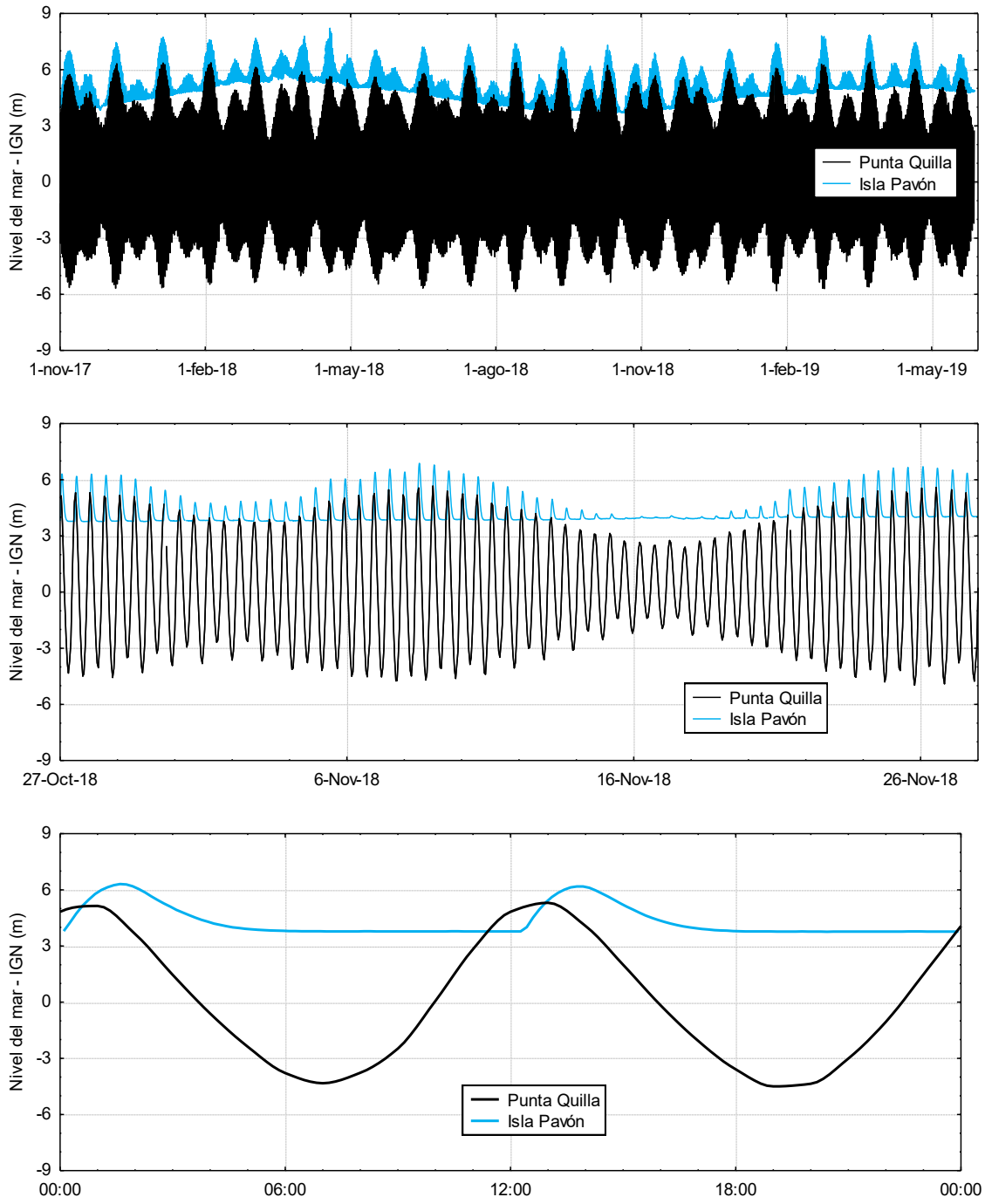


Como fue mencionado en el punto 7.9 (Mediciones del Nivel del Río en la Isla Pavón) donde se explicaron los niveles del río Santa Cruz en Isla Pavón, es posible analizar la relación entre estos niveles y los ocurridos en Punta Quilla. La Figura 7.13.2 presenta los niveles en Punta Quilla e Isla Pavón ambos referidos al cero IGN, para todo el período analizado, para un mes y para un día.

Habiendo referenciado todos los niveles al cero del IGN, puede verse que las pleamares en Isla Pavón siempre son mayores a las que se alcanzan en Punta Quilla. Las máximas diferencias entre el nivel en Punta Quilla e Isla Pavón ocurren en los periodos de caudales máximos y puede ser de hasta 2.7 m.

La cobertura temporal de la Figura 7.13.2 permite analizar de qué manera varían los niveles en ambos puntos. La forma que toma el nivel del río en Isla Pavón es particular, allí la marea ocurre aproximadamente 1 h después que en Punta Quilla y cuando comienza a crecer el nivel lo hace de forma abrupta, mientras que luego al descender lo hace en forma más suave. Este efecto puede explicase por la existencia de una corriente que fluye en dirección contraria a la marea creciente y a favor de la marea bajante (la corriente impuesta por la pendiente hidráulica natural del río). Este efecto es observado por la Inspección de obra Jorge Cepernic (2016).

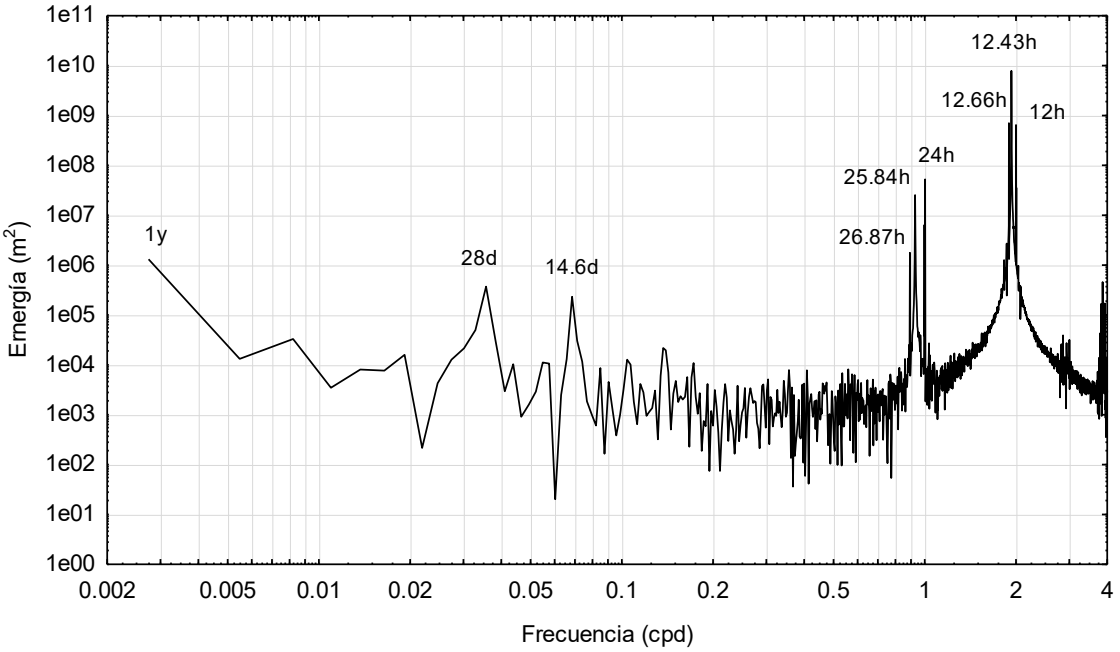
Figura 7.13.2 Serie de valores del nivel del mar en Punta Quilla e Isla Pavón referidos al cero del IGN para todo el periodo de medición (arriba), para un mes entre 27 de octubre y 28 de noviembre de 2018 (medio) y el día 27 de octubre de 2018 (abajo).



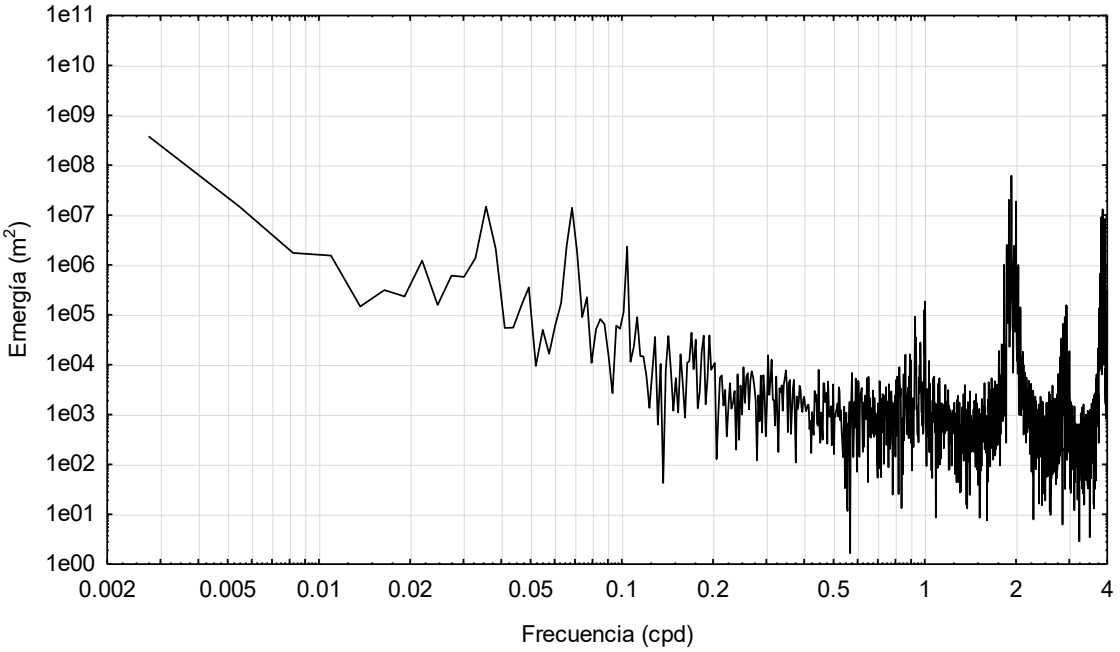
En las Figuras 7.13.3 y 7.13.4 se presentan los espectros de los niveles en Punta Quilla e Isla Pavón, en las que se observan los picos de energía asociados a la componente de la marea: Q1 (26.87 h), O1 (25.82 h), S1 (24 h), N2 (12.66 h), M2 (12.42 h) y S2 (12 h). En el espectro de Isla Pavón se observan los mismos picos con menor energía y algo más dispersa (con la presencia de sub harmónicas), indicando que la propagación por el RSC perturba la pureza de las ondas astronómicas. También en el espectro de los niveles en

Isla Pavón el ciclo anual inducido por la variación de caudal se manifiesta se manifiesta más intenso que en Punta Quilla.

Figuras 7.13.3 Espectro de energía de los niveles del agua en Punta Quilla donde se observan los picos de asociados a las componentes de la marea: Q1 (26.87 h), O1 (25.82 h), S1 (24 h), N2 (12.66 h), M2 (12.42 h) y S2 (12 h).



Figuras 7.13.4 Espectro de energía de los niveles de agua en Isla Pavón.



7.14. Niveles del Mar del Modelo Global

Todos los modelos hidrodinámicos con bordes abiertos requieren de condiciones en los contornos o bordes del dominio de cómputo. Para el caso de simulaciones con forzantes

mareológicos, siempre se requiere de un tratamiento particular ya que rara vez se dispone de mediciones directas de niveles del mar en aguas abiertas. Para los modelos regionales, los resultados de otros modelos de escala mayor son de utilidad para representar adecuadamente las variaciones espaciotemporales de los niveles del agua en los bordes del dominio.

El modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) usa condiciones específicas de niveles del mar o de flujo de agua a través de todos los nodos correspondientes a los bordes abiertos del recinto estudiado, en función del tiempo.

El modelo global de mareas utilizado para la predicción de los niveles del mar en los bordes de la grilla es el *MIKE 21 Global Tide Model* que genera la predicción de niveles de agua de las mareas. La versión mejorada de este modelo está disponible en una resolución de 0.125° x 0.125°. El modelo se ha actualizado con 4 años adicionales de mediciones de satélites de radar y se han añadido 2 constituyentes adicionales que proporcionan mejores predicciones de los niveles de agua en aguas poco profundas. El modelo actualizado incluye los siguientes 10 constituyentes Semidiurno: M2, S2, K2, N2 - Diurno: S1, K1, O1, P1, Q1 - Aguas poco profundas: M4. El modelo global de mareas ha sido desarrollado por DTU Space. Puede verse DTU10 global ocean tide model para obtener más información. Las Figuras 7.14.1 y 7.14.2 presentan las líneas cotidales de las componentes M2 y K1 calculadas por el MIKE 21 Global Tide Model. La Figura 7.14.3 presenta la grilla del modelo con los códigos para los bordes: código 1 es la costa, los códigos 2, 3 y 6 son los niveles del mar generados por el Global Tide Model del MIKE, código 4 caudales en el río Chico y código 5 caudal en el río Santa Cruz.

Figura 7.14.1 Carta de las cotidales para la componente M2 calculadas por el MIKE 21 Global Tide Model para todo el planeta.

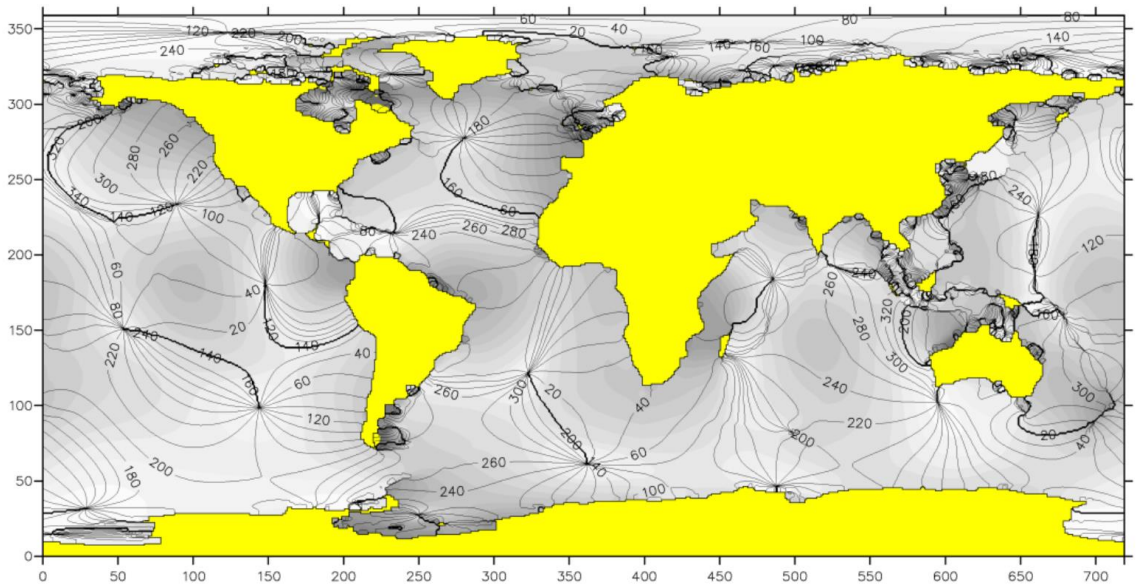


Figura 7.14.2 Carta de las cotidales para la componente K1 calculadas por el MIKE 21 Global Tide Model para todo el planeta.

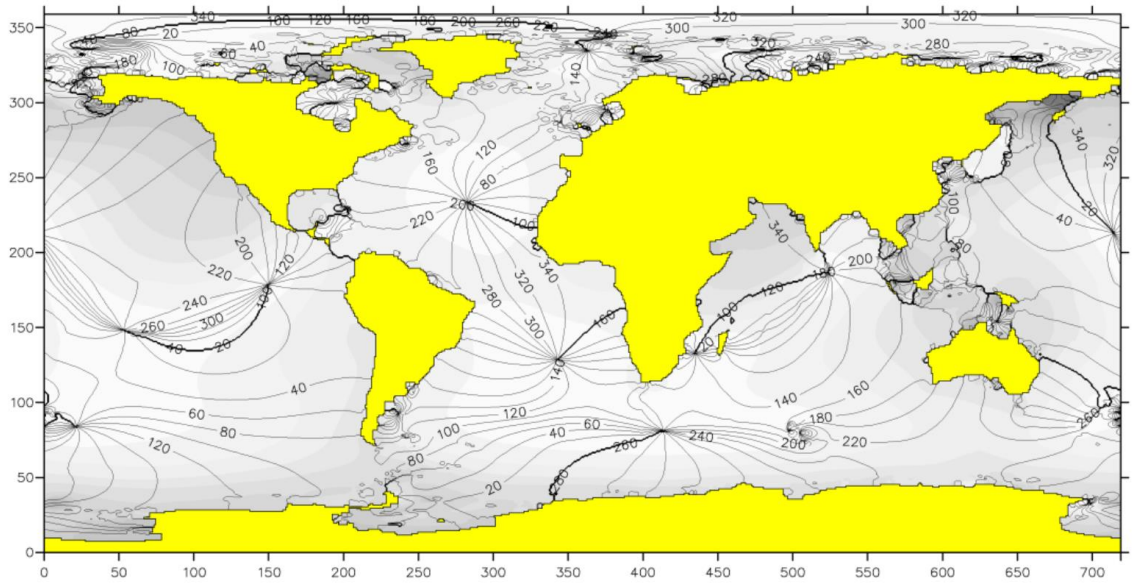
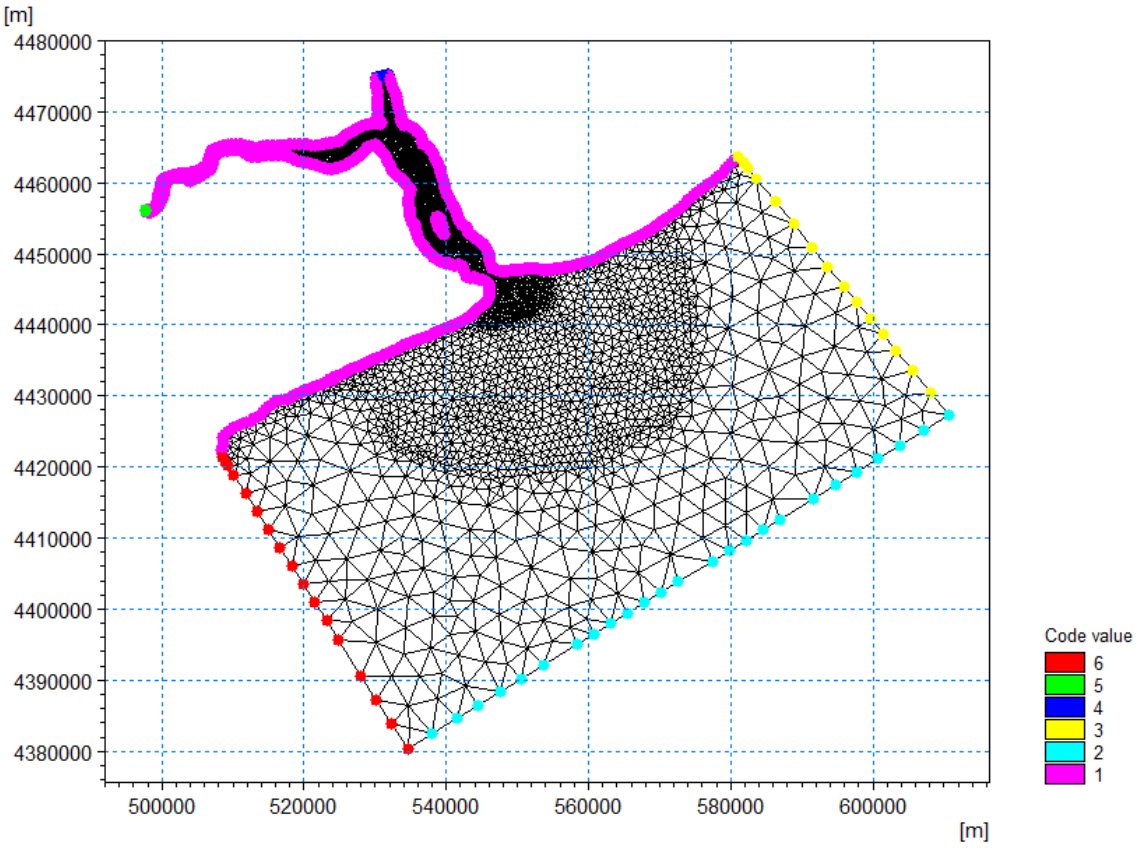
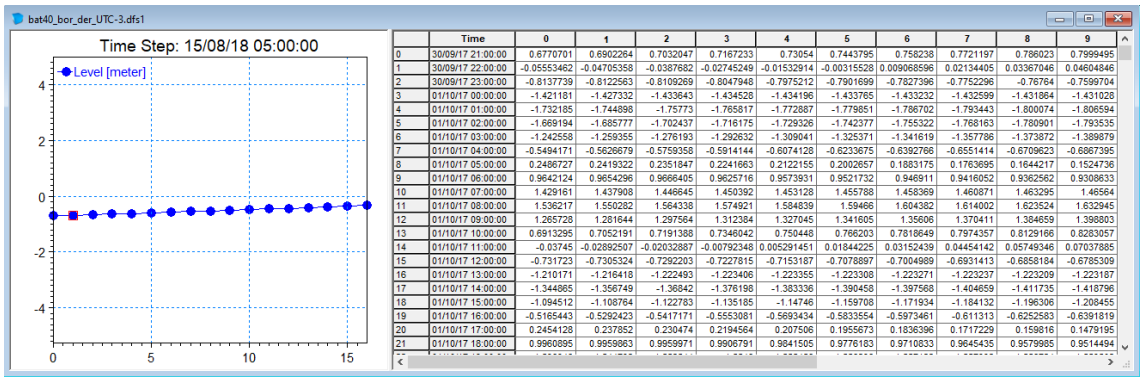


Figura 7.14.3 Grilla del modelo. Con los códigos asociados a cada borde.

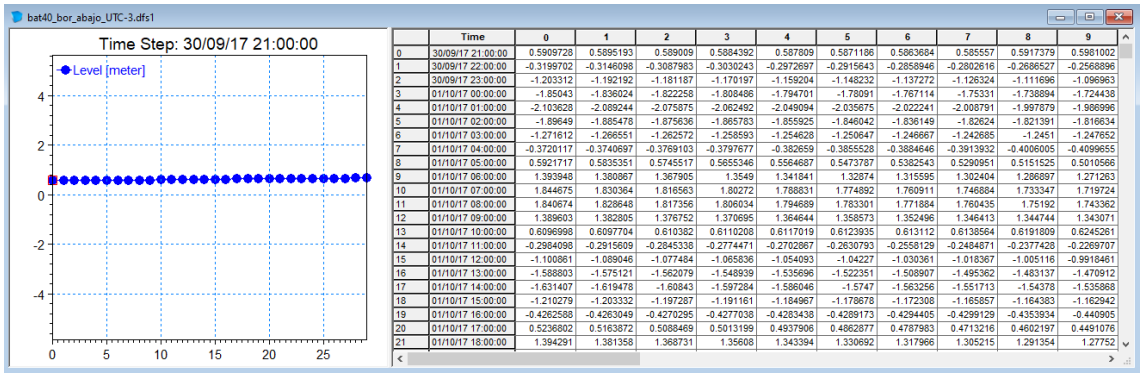


En la Figura 7.14.4 se presentan unas impresiones de pantalla con la manera en que lucen los archivos variables en tiempo y espacio en los bordes de los modelos. En cada imagen se presentan el borde norte y el borde este de la grilla utilizada para las simulaciones.

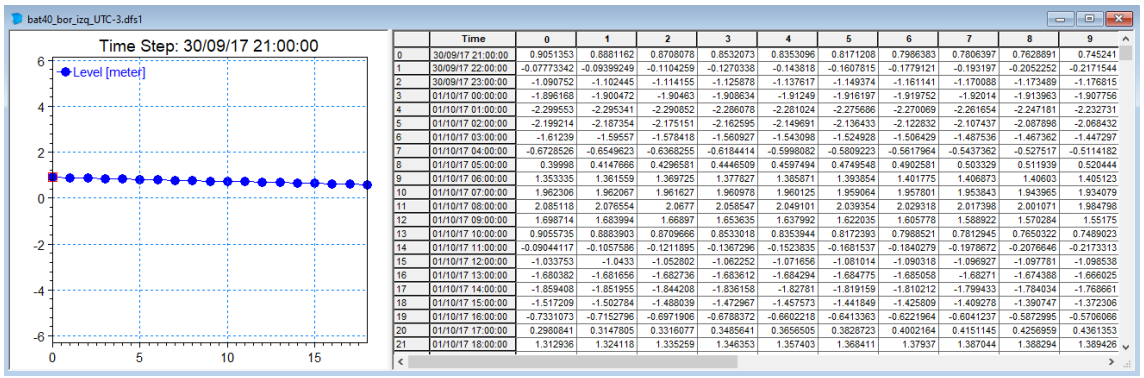
Figura 7.14.4 Imágenes de los archivos que resultan input de los niveles del mar en los bordes con códigos: 6 (borde oeste o derecha), 2 (borde sur o abajo) y 3 (borde este o izquierda)



	Time	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	30/09/17 21:00:00	0.6770701	0.6902264	0.7032047	0.7167233	0.73054	0.7443795	0.758238	0.7721197	0.786023	0.7999495
1	30/09/17 22:00:00	-0.05553462	-0.04705358	-0.0387682	-0.02745249	-0.01532914	-0.00315528	0.009068596	0.02134405	0.03367046	0.04604846
2	30/09/17 23:00:00	-0.8137739	-0.8122563	-0.8109269	-0.8047948	-0.7975212	-0.7901699	-0.7827396	-0.7752296	-0.76764	-0.7599704
3	01/10/17 00:00:00	-1.421181	-1.427332	-1.433643	-1.434528	-1.434196	-1.433765	-1.433232	-1.432599	-1.431864	-1.431028
4	01/10/17 01:00:00	-1.732185	-1.744898	-1.75773	-1.765817	-1.772887	-1.779851	-1.786702	-1.793443	-1.800074	-1.806594
5	01/10/17 02:00:00	-1.669194	-1.685777	-1.702437	-1.716175	-1.729326	-1.742377	-1.755322	-1.768163	-1.780901	-1.793535
6	01/10/17 03:00:00	-1.242558	-1.259355	-1.276193	-1.292632	-1.309041	-1.325371	-1.341619	-1.357786	-1.373872	-1.389879
7	01/10/17 04:00:00	-0.5494171	-0.5626879	-0.5759358	-0.5914144	-0.6074128	-0.6233675	-0.6392766	-0.6551414	-0.6709623	-0.6867395
8	01/10/17 05:00:00	0.2486727	0.2419322	0.2351847	0.2241663	0.2122155	0.2002657	0.1883175	0.1763695	0.1644217	0.1524736
9	01/10/17 06:00:00	0.9642124	0.9654296	0.9666405	0.9625716	0.9573931	0.9521732	0.946911	0.9416052	0.9362562	0.9308633
10	01/10/17 07:00:00	1.429161	1.437908	1.446645	1.450392	1.453128	1.455788	1.458369	1.460871	1.463295	1.46564
11	01/10/17 08:00:00	1.536217	1.550282	1.564338	1.574921	1.584839	1.59466	1.604382	1.614002	1.623524	1.632945
12	01/10/17 09:00:00	1.265728	1.281644	1.297564	1.312384	1.327045	1.341605	1.35606	1.370411	1.384659	1.398803
13	01/10/17 10:00:00	0.6913295	0.7052191	0.7191388	0.7346042	0.750448	0.766203	0.7818649	0.7974357	0.8129166	0.8283057
14	01/10/17 11:00:00	-0.03745	-0.02892507	-0.02032887	-0.00792348	0.005291451	0.01844225	0.03152439	0.04454142	0.05749346	0.07037885
15	01/10/17 12:00:00	-0.731723	-0.7305324	-0.7292203	-0.7227815	-0.7153187	-0.7078897	-0.7004989	-0.6931413	-0.6858184	-0.6785309
16	01/10/17 13:00:00	-1.210171	-1.216418	-1.222493	-1.223406	-1.223355	-1.223308	-1.223271	-1.223237	-1.223209	-1.223187
17	01/10/17 14:00:00	-1.344865	-1.356749	-1.36842	-1.376198	-1.383336	-1.390458	-1.397568	-1.404659	-1.411735	-1.418796
18	01/10/17 15:00:00	-1.094512	-1.108764	-1.122783	-1.135185	-1.14746	-1.159708	-1.171934	-1.184132	-1.196306	-1.208455
19	01/10/17 16:00:00	-0.5165443	-0.5292423	-0.5417171	-0.5553081	-0.5693434	-0.5833554	-0.5973461	-0.611313	-0.6252583	-0.6391819
20	01/10/17 17:00:00	0.2454128	0.237852	0.230474	0.2194564	0.207506	0.1955673	0.1836396	0.1717229	0.159816	0.1479195
21	01/10/17 18:00:00	0.9960895	0.9959863	0.9959971	0.9906791	0.9841505	0.9776183	0.9710833	0.9645435	0.9579985	0.9514494



	Time	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	30/09/17 21:00:00	0.5909728	0.5895193	0.589009	0.5884392	0.587809	0.5871186	0.5863684	0.585557	0.5917379	0.5981002
1	30/09/17 22:00:00	-0.3199702	-0.3146098	-0.3087983	-0.3030243	-0.2972697	-0.2915643	-0.2858946	-0.2802616	-0.2686527	-0.2568896
2	30/09/17 23:00:00	-1.203312	-1.192192	-1.181187	-1.170197	-1.159204	-1.148232	-1.137272	-1.126324	-1.111696	-1.096963
3	01/10/17 00:00:00	-1.85043	-1.836024	-1.822258	-1.808486	-1.794701	-1.78091	-1.767114	-1.75331	-1.738894	-1.724438
4	01/10/17 01:00:00	-2.103628	-2.089244	-2.075875	-2.062492	-2.049094	-2.035675	-2.022241	-2.008791	-1.997879	-1.986996
5	01/10/17 02:00:00	-1.89649	-1.885478	-1.875636	-1.865783	-1.855925	-1.846042	-1.836149	-1.82624	-1.821391	-1.816634
6	01/10/17 03:00:00	-1.271612	-1.266551	-1.262572	-1.258593	-1.254628	-1.250647	-1.246667	-1.242685	-1.2451	-1.247652
7	01/10/17 04:00:00	-0.3720117	-0.3740697	-0.3769103	-0.3797677	-0.382659	-0.3855528	-0.3884646	-0.3913932	-0.4006005	-0.4099655
8	01/10/17 05:00:00	0.5921717	0.5835351	0.5745517	0.5655346	0.5564687	0.5473787	0.5382543	0.5290951	0.5151525	0.5010566
9	01/10/17 06:00:00	1.393948	1.380867	1.367905	1.3549	1.341841	1.32874	1.315595	1.302404	1.286897	1.271263
10	01/10/17 07:00:00	1.844675	1.830364	1.816563	1.80272	1.788831	1.774892	1.760911	1.746884	1.733347	1.719724
11	01/10/17 08:00:00	1.840674	1.828648	1.817356	1.806034	1.794689	1.783301	1.771884	1.760435	1.75192	1.743362
12	01/10/17 09:00:00	1.389603	1.382805	1.376752	1.370695	1.364644	1.358573	1.352496	1.346413	1.344744	1.343071
13	01/10/17 10:00:00	0.6096998	0.6097704	0.610382	0.6110208	0.6117019	0.6123935	0.613112	0.6138564	0.6191809	0.6245261
14	01/10/17 11:00:00	-0.2984098	-0.2915609	-0.2845338	-0.2774471	-0.2702867	-0.2630793	-0.2558129	-0.2484871	-0.2377428	-0.2269707
15	01/10/17 12:00:00	-1.100861	-1.089046	-1.077484	-1.065836	-1.054093	-1.04227	-1.030361	-1.018367	-1.005116	-0.9918461
16	01/10/17 13:00:00	-1.588803	-1.575121	-1.562079	-1.548939	-1.535696	-1.522351	-1.508907	-1.495362	-1.483137	-1.470912
17	01/10/17 14:00:00	-1.631407	-1.619478	-1.60843	-1.597284	-1.586046	-1.5747	-1.563256	-1.551713	-1.54378	-1.535868
18	01/10/17 15:00:00	-1.210279	-1.203332	-1.197287	-1.191161	-1.184967	-1.178678	-1.172308	-1.165857	-1.164383	-1.162942
19	01/10/17 16:00:00	-0.4262588	-0.4263049	-0.4270295	-0.4277038	-0.4283438	-0.4289173	-0.4294405	-0.4299129	-0.4353934	-0.440905
20	01/10/17 17:00:00	0.5236802	0.5163872	0.5088469	0.5013199	0.4937906	0.4862877	0.4787983	0.4713216	0.4602197	0.4491076
21	01/10/17 18:00:00	1.394291	1.381358	1.368731	1.35608	1.343394	1.330692	1.317966	1.305215	1.291354	1.27752



	Time	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	30/09/17 21:00:00	0.9051353	0.8881162	0.8708078	0.8532073	0.8353096	0.8171208	0.7986383	0.7806397	0.7628891	0.745241
1	30/09/17 22:00:00	-0.07773342	-0.09399249	-0.1104259	-0.1270338	-0.143818	-0.1607815	-0.1779121	-0.193197	-0.2052252	-0.2171544
2	30/09/17 23:00:00	-1.090752	-1.102445	-1.114155	-1.125878	-1.137617	-1.149374	-1.161141	-1.170088	-1.173489	-1.176815
3	01/10/17 00:00:00	-1.896168	-1.900472	-1.90463	-1.908634	-1.91249	-1.916197	-1.919752	-1.92014	-1.913963	-1.907756
4	01/10/17 01:00:00	-2.299553	-2.295341	-2.290852	-2.286078	-2.281024	-2.275686	-2.270069	-2.261654	-2.247181	-2.232731
5	01/10/17 02:00:00	-2.199214	-2.187354	-2.175151	-2.162595	-2.149691	-2.136433	-2.122832	-2.107437	-2.087898	-2.068432
6	01/10/17 03:00:00	-1.61239	-1.59657	-1.579418	-1.560927	-1.543098	-1.524928	-1.506429	-1.487536	-1.467362	-1.447297
7	01/10/17 04:00:00	-0.6728526	-0.6549623	-0.6368255	-0.6184414	-0.5998082	-0.5809223	-0.5617964	-0.5437362	-0.527517	-0.5114182
8	01/10/17 05:00:00	0.39998	0.4147666	0.4296581	0.4446509	0.4597494	0.4749548	0.4902581	0.503329	0.511939	0.520444
9	01/10/17 06:00:00	1.353335	1.361559	1.369725	1.377827	1.385871	1.393854	1.401775	1.406873	1.40603	1.405123
10	01/10/17 07:00:00	1.962306	1.962067	1.961627	1.960978	1.960125	1.959064	1.957801	1.953843	1.943965	1.934079
11	01/10/17 08:00:00	2.085118	2.076554	2.0677	2.058547	2.049101	2.039354	2.029318	2.017398	2.001071	1.984798
12	01/10/17 09:00:00	1.698714	1.683994	1.66897	1.653635	1.637992	1.622035	1.605778	1.588922	1.570284	1.55175
13	01/10/17 10:00:00	0.9055735	0.8883903	0.8709666	0.8533018	0.8353944	0.8172393	0.7988521	0.7812945	0.7650322	0.7489023
14	01/10/17 11:00:00	-0.09044117	-0.1057586	-0.1211895	-0.1367296	-0.1523835	-0.1681537	-0.1840279	-0.1978672	-0.2076646	-0.2173313
15	01/10/17 12:00:00	-1.033753	-1.0433	-1.052802	-1.062252	-1.071656	-1.081014	-1.090318	-1.096927	-1.097781	-1.098538
16	01/10/17 13:00:00	-1.680382	-1.681656	-1.682736	-1.683612	-1.684294	-1.684775	-1.685058	-1.68271	-1.674388	-1.666025
17	01/10/17 14:00:00	-1.859408	-1.851955	-1.844208	-1.836158	-1.82781	-1.819159	-1.810212	-1.799433	-1.784034	-1.768661
18	01/10/17 15:00:00	-1.517209	-1.502784	-1.488039	-1.472967	-1.457573	-1.441849	-1.425809	-1.409278	-1.390747	-1.372306
19	01/10/17 16:00:00	-0.7331073	-0.7152796	-0.6971906	-0.6788372	-0.6602218	-0.6413363	-0.6221964	-0.6041237	-0.5872995	-0.5706066
20	01/10/17 17:00:00	0.2980841	0.3147805	0.3316077	0.3485641	0.3656505	0.3828723	0.4002164	0.4151145	0.4256959	0.4361353
21	01/10/17 18:00:00	1.312936	1.324118	1.335259	1.346353	1.357403	1.368411	1.37937	1.387044	1.388294	1.389426

Figura 7.14.5 Alturas horarias de marea para los meses de noviembre y diciembre de 2017 para un punto del borde este calculado por el MIKE 21 Tide Global Model en el borde de código 6 (borde oeste o derecha).

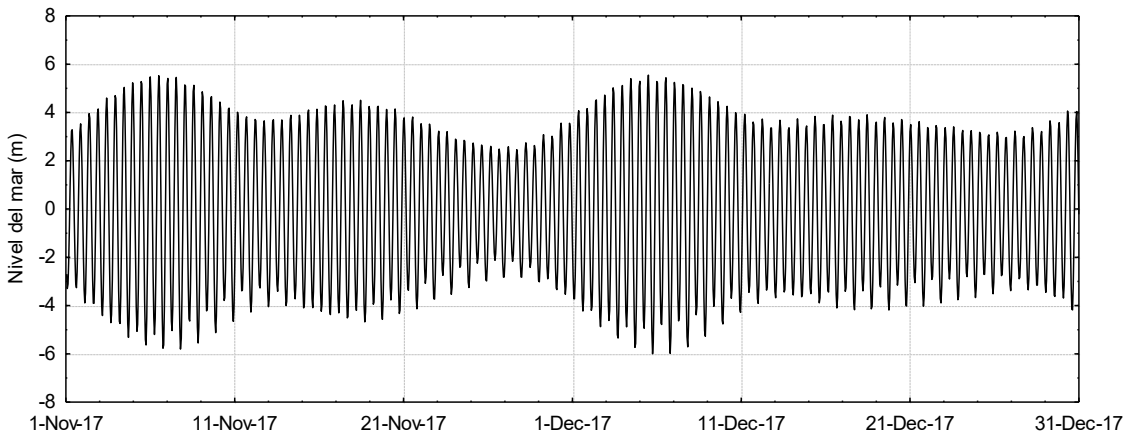


Figura 7.14.6 Alturas horarias de marea para los meses de octubre y noviembre de 2008 para un punto del borde norte calculado por el MIKE 21 Tide Global Model en el borde de código 2 (borde sur o abajo).

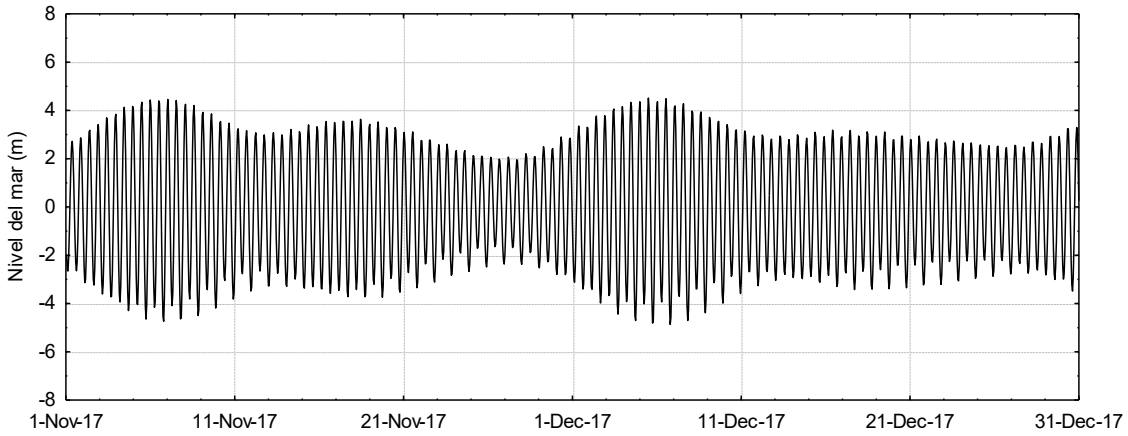
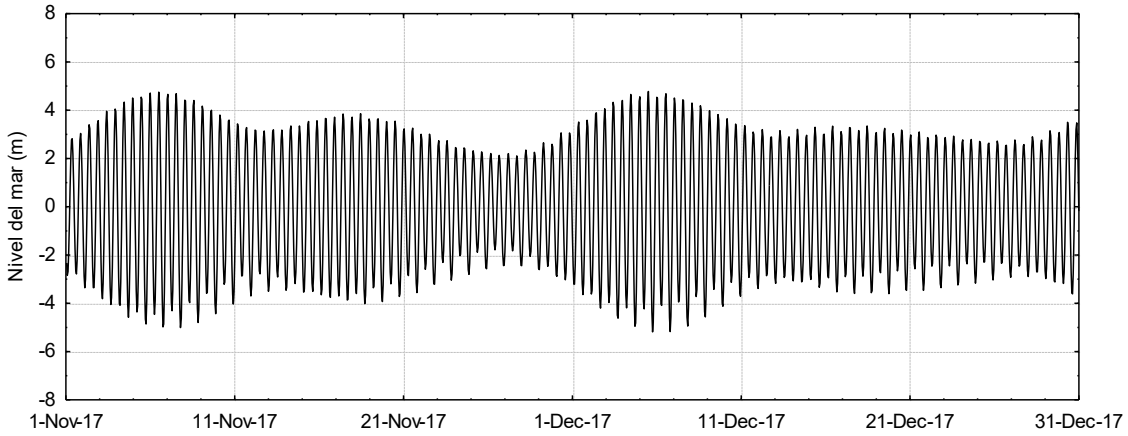


Figura 7.14.6 Alturas horarias de marea para los meses de octubre y noviembre de 2008 para un punto del borde norte calculado por el MIKE 21 Tide Global Model en el borde de código 3 (borde este o izquierda)

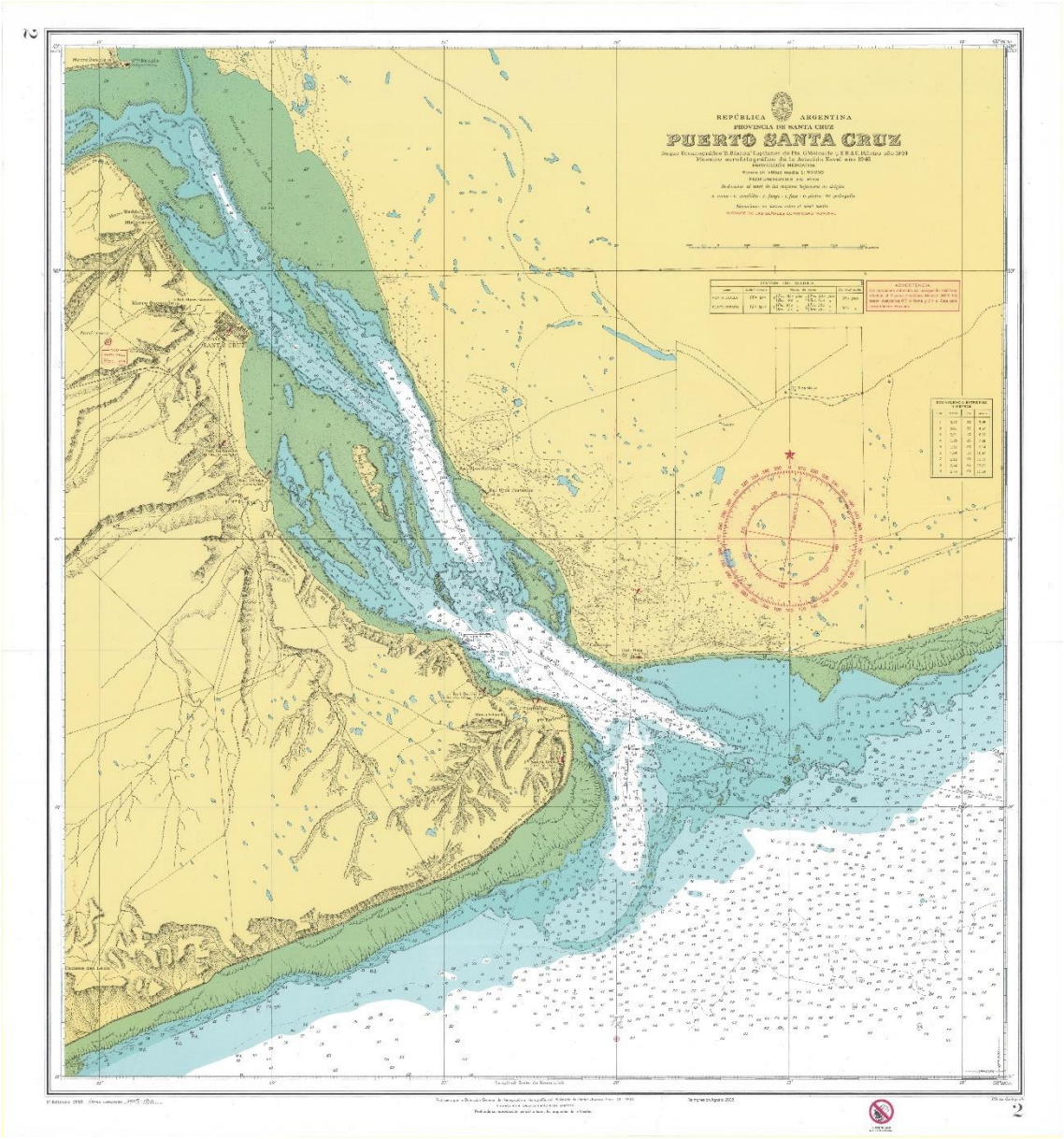


7.15. Batimetría

La batimetría para la grilla de modelo se ha construido a partir de varias fuentes:

- Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Carta náutica H413 “De Puerto San Julián a Río Gallegos", Carta náutica 2 “Puerto Santa Cruz”, Carta náutica H367 “Punta Quilla”. La Figura 7.15.1 presenta la Carta Náutica 2 de Puerto Santa Cruz.

Figura 7.15.1 Carta Náutica del SHN de Puerto Santa Cruz.



- ESSA (diciembre de 2016). ESSA realizó un relevamiento complementario con 40 km de perfiles: 5 perfiles en río Chico, 6 perfiles en el río Santa Cruz, 6 perfiles en la zona del estuario
- Batimetría entregada por la UTE Represas Patagonia. Consta de 20 Perfiles en el río Santa Cruz entre Piedra Buena y el estuario y 3 Perfiles en la zona del estuario.

7.16. Caudales del río Santa Cruz

Para los bordes abiertos de la grilla del modelo asociados a los ríos Santa Cruz y Chico (códigos 4 y 5 de la Figura 7.14.3) se requiere información para que el modelo funcione adecuadamente. En este caso se utilizaron datos de caudales en los bordes, aunque es posible forzar el modelo con niveles o velocidades de la corriente. La serie de caudales para el río Santa Cruz ha sido construida en base a datos de niveles del río y aforos en Charles Fuhr. Detalles del ajuste entre las variables se presenta en Lara (2016). Este trabajo indica que el ajuste se basó en más de 900 aforos, con caudales comprendidos entre 180 m^3/s (25% del módulo) y 1700 m^3/s (2.5 veces el módulo), lo que garantiza que se dispone de un conocimiento fiable de la curva-clave CHF (Charles Fuhr). El estudio Lara (2016) presenta la curva HQ (nivel-caudal) basada en la información disponible y adecuada:

$$Q(m^3) = 14.3(h + 2.6)^{2.36}$$

con “Q” y “h” representando el caudal y la lectura de escala respectivamente. Se han obtenido datos de caudales del río Santa Cruz para la modelación entre 1 noviembre de 2017 y 1 de julio de 2019, basados en las alturas del río Santa Cruz registradas Charles Furh, http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/MuestraDatos.aspx?Estacion=12802, y la curva HQ (Lara, 2016). La Figura 7.16.1 identifica la posición de la escala hidrométrica. Por otro lado, durante 12 de las 20 campañas realizadas en la zona, ESSA ha registrado 12 caudales entre el 27 de octubre de 2017 y el 25 de septiembre de 2018, en la estación Puente Viejo, la Figura 7.16.1 identifica la posición de dicha estación. Los caudales requeridos como condición de contorno por el modelo son los registrados en Puente Viejo.

La Figura 7.16.2 presenta los caudales basados en las alturas del río Santa Cruz en Charles Furh, los calculados por ESSA en Puente Viejo. El acuerdo entre ambos verifica la Curva HQ y las mediciones realizadas por ESSA, en un sistema sin tributarios y en un área con escasa cantidad de lluvias. Como fue mencionado, ESSA ha registrado 12 caudales entre el 27 de octubre de 2017 y el 25 de septiembre de 2018. La Tabla 7.16.1 presenta los caudales registrados.

Figura 7.16.1 Puntos de medición y muestreo (temperatura, salinidad, caudales, turbidez y muestreos de agua)

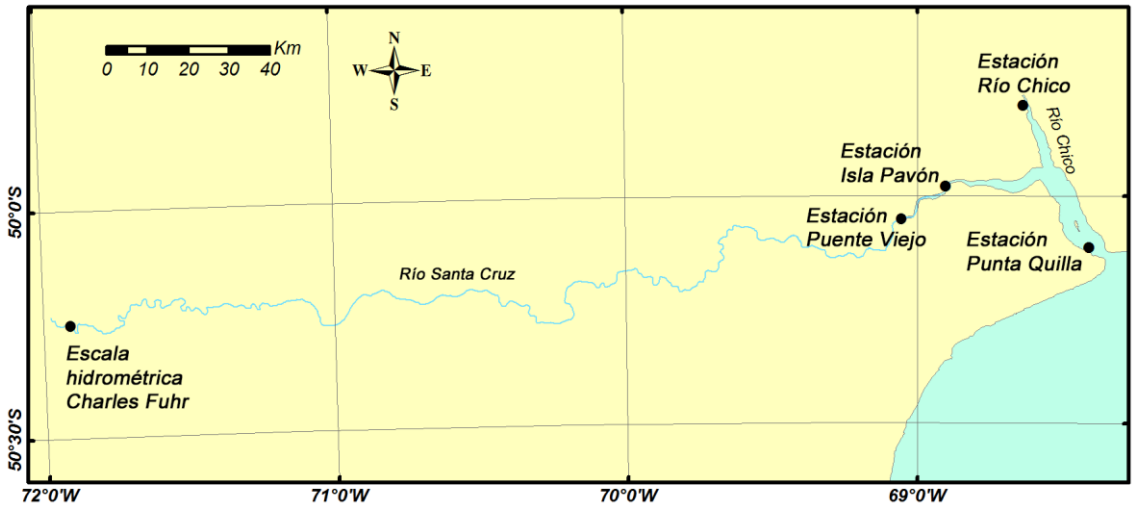
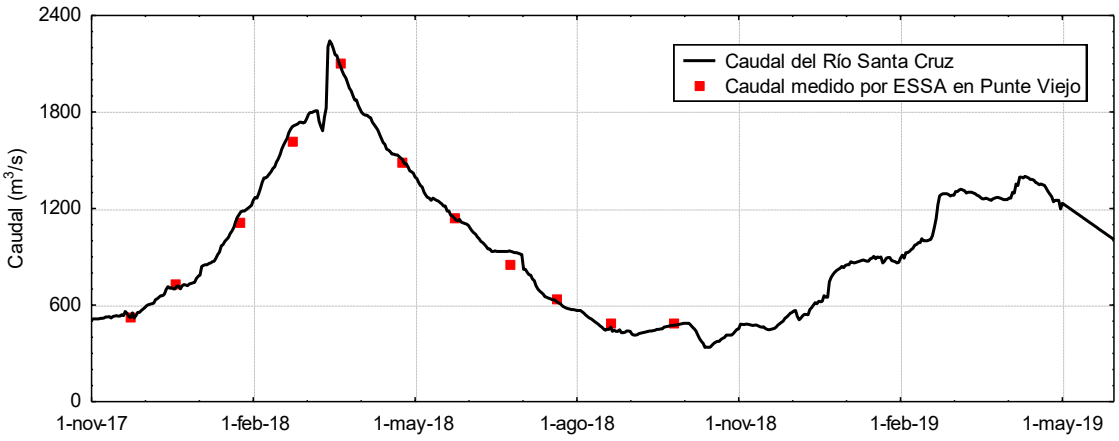


Tabla 7.16.1 Caudales registrados por ESSA en la estación Puente Viejo.

Fecha	Caudal (m^3/s)	Fecha	Caudal (m^3/s)
27/10/2017	500	25/4/2018	1486
23/11/2017	522	24/5/2018	1141
18/12/2017	728	25/6/2018	852
24/1/2018	1109	21/7/2018	633
22/2/2018	1614	20/8/2018	491
21/3/2018	2103	25/9/2018	483

Figura 7.16.2 Caudal del río Santa Cruz utilizado en las corridas de calibración



Para ilustrar acerca del cálculo de caudal en Puente Viejo, se presentan a continuación las figuras con la información utilizada en el proceso de cálculo. La Figura 7.16.3 presenta la sección batimétrica, las velocidades perpendiculares a la sección y la curva de caudal por unidad de distancia a lo largo de la sección. Las Figuras 7.16.4 a 7.16.7 presentan los

perfiles de velocidades utilizados para el cálculo del caudal en Puente Viejo, registrados en la Campaña 1 (octubre de 2017), con un caudal de 500 m^3/s. Las Figuras 7.16.8 a 7.16.14 presentan los perfiles de velocidades utilizados para el cálculo del caudal en Puente Viejo, registrados en la campaña 7 (abril de 2018), con un caudal de 1486 m^3/s. Los asteriscos azules indican los valores registrados durante la campaña, y las curvas negras la interpolación utilizada en el cálculo. Las estaciones de 1 a 16 (octubre de 2017) y 1 a 23 (abril de 2018) corresponden a las posiciones desde la margen izquierda cada 10 m.

Figura 7.16.3 Sección batimétrica, en Puente Viejo, sobre la que se calculó el caudal (arriba). Velocidades registradas por el ADCP Nortek AWAC 1 MHz en la sección elegida (medio). Caudal por unidad de distancia a lo largo de la sección (abajo).

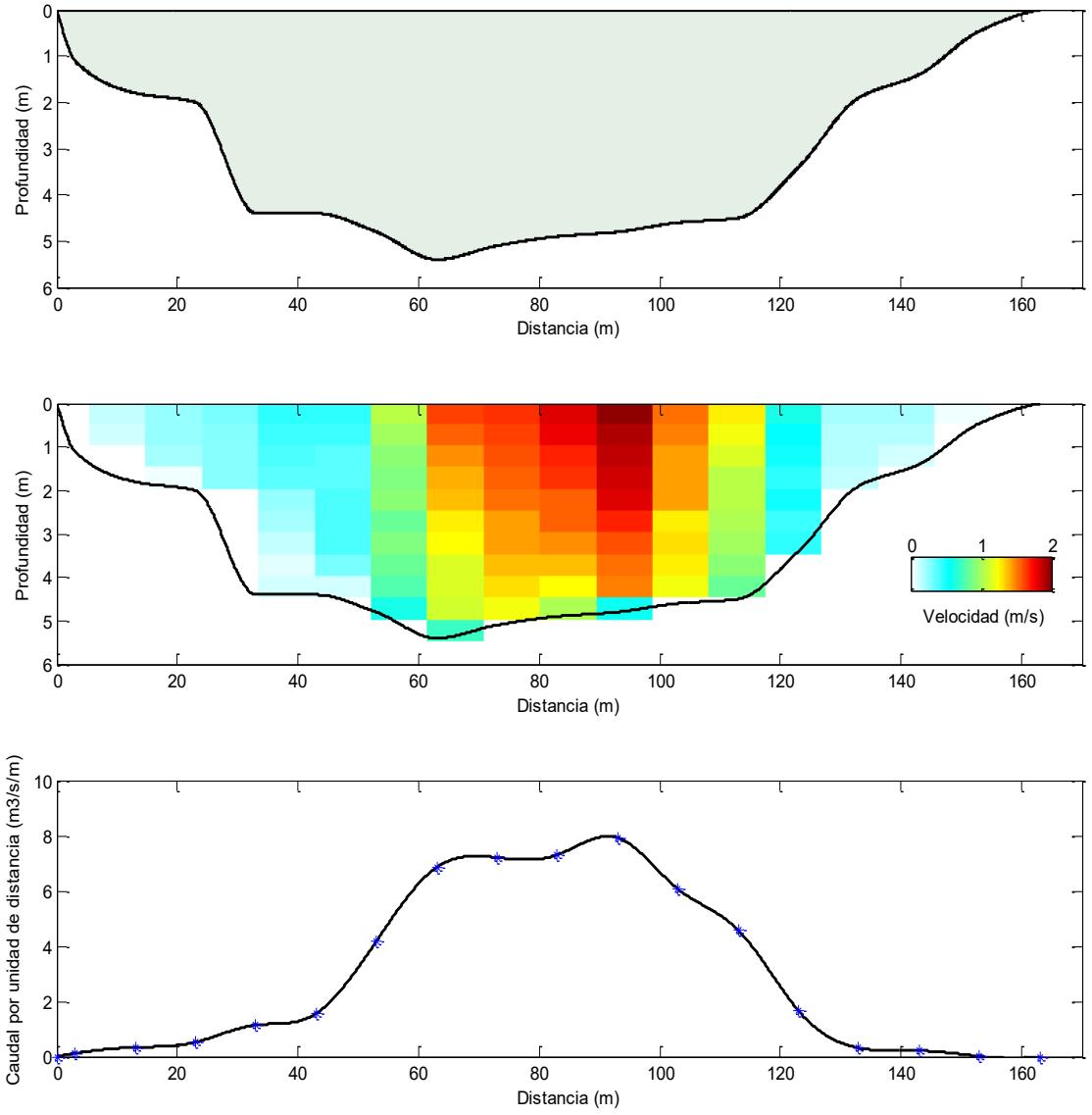


Figura 7.16.4 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 1 a 4

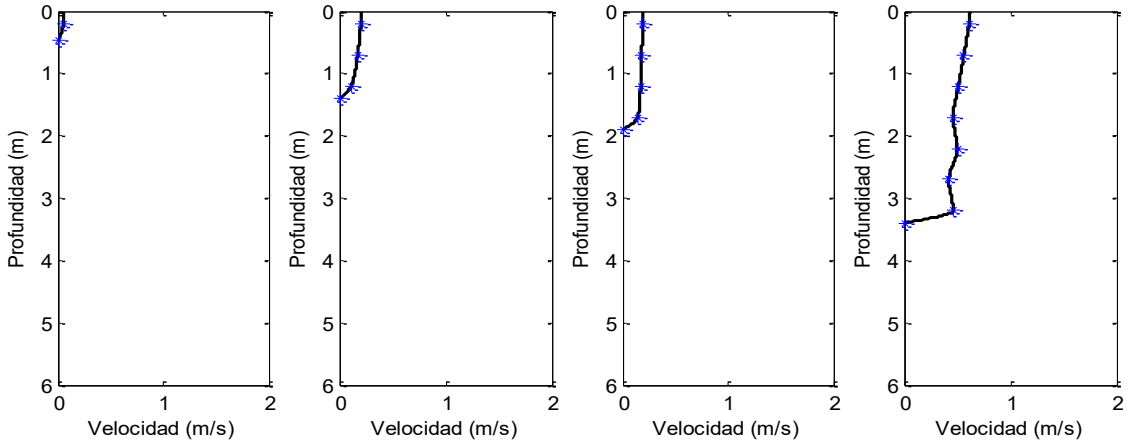


Figura 7.16.5 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 5 a 8

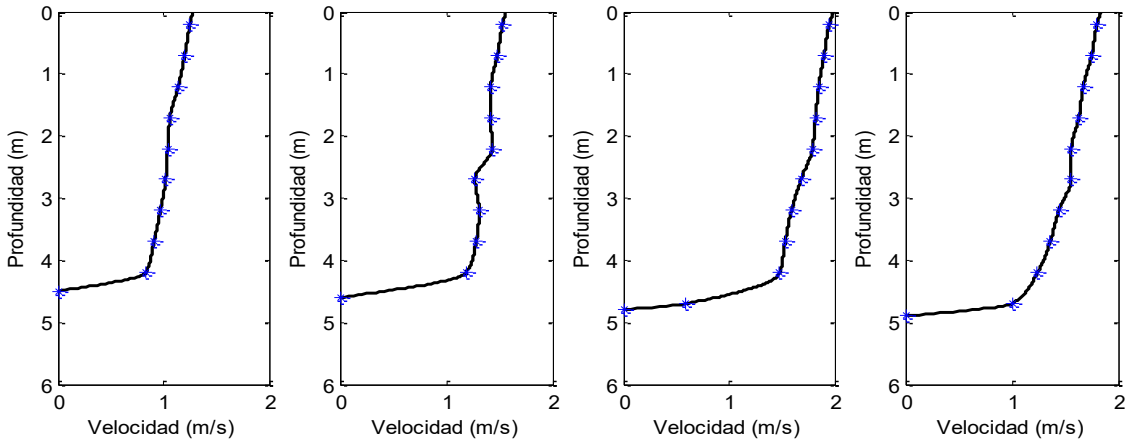


Figura 7.16.6 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 9 a 12

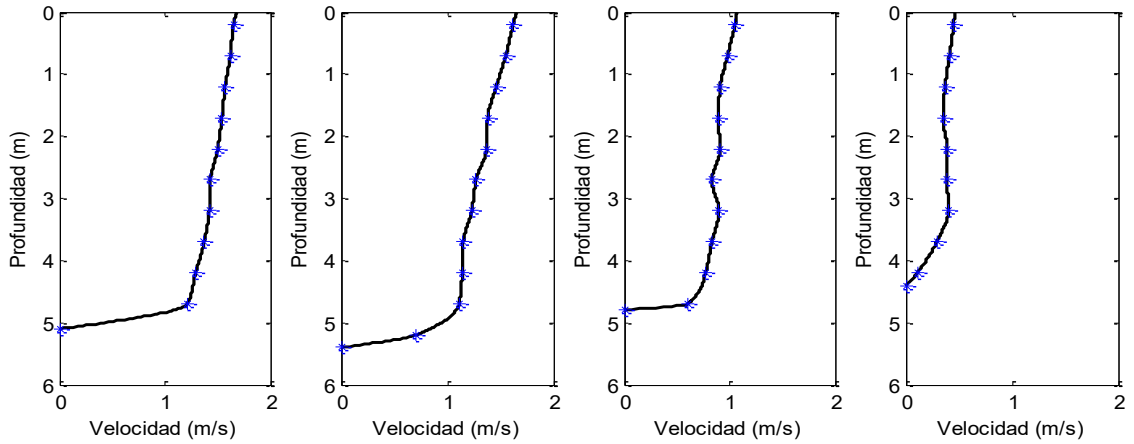


Figura 7.16.7 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 13 a 16

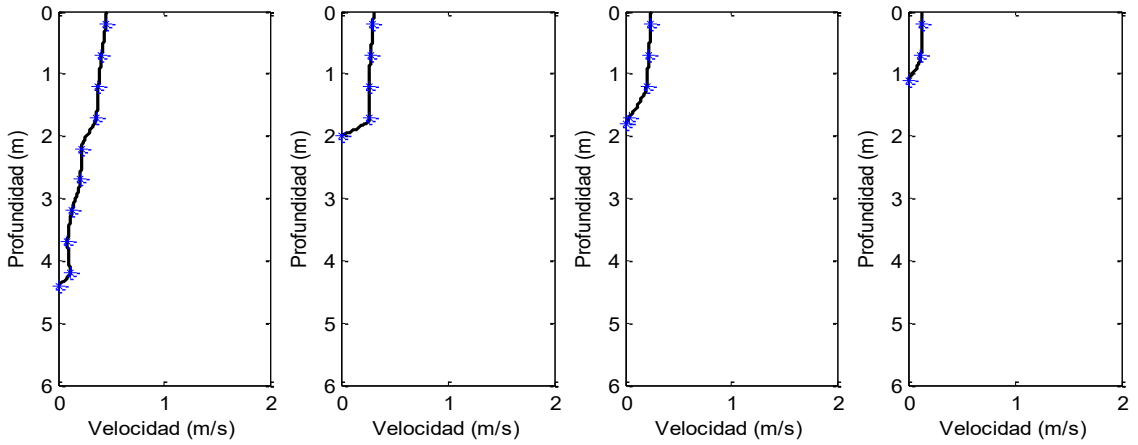


Figura 7.16.8 Sección batimétrica sobre la que se calculó el caudal (arriba). Velocidades registradas por el ADCP Nortek AWAC 1 MHz en la sección elegida (medio). Caudal por unidad de distancia a lo largo de la sección (abajo).

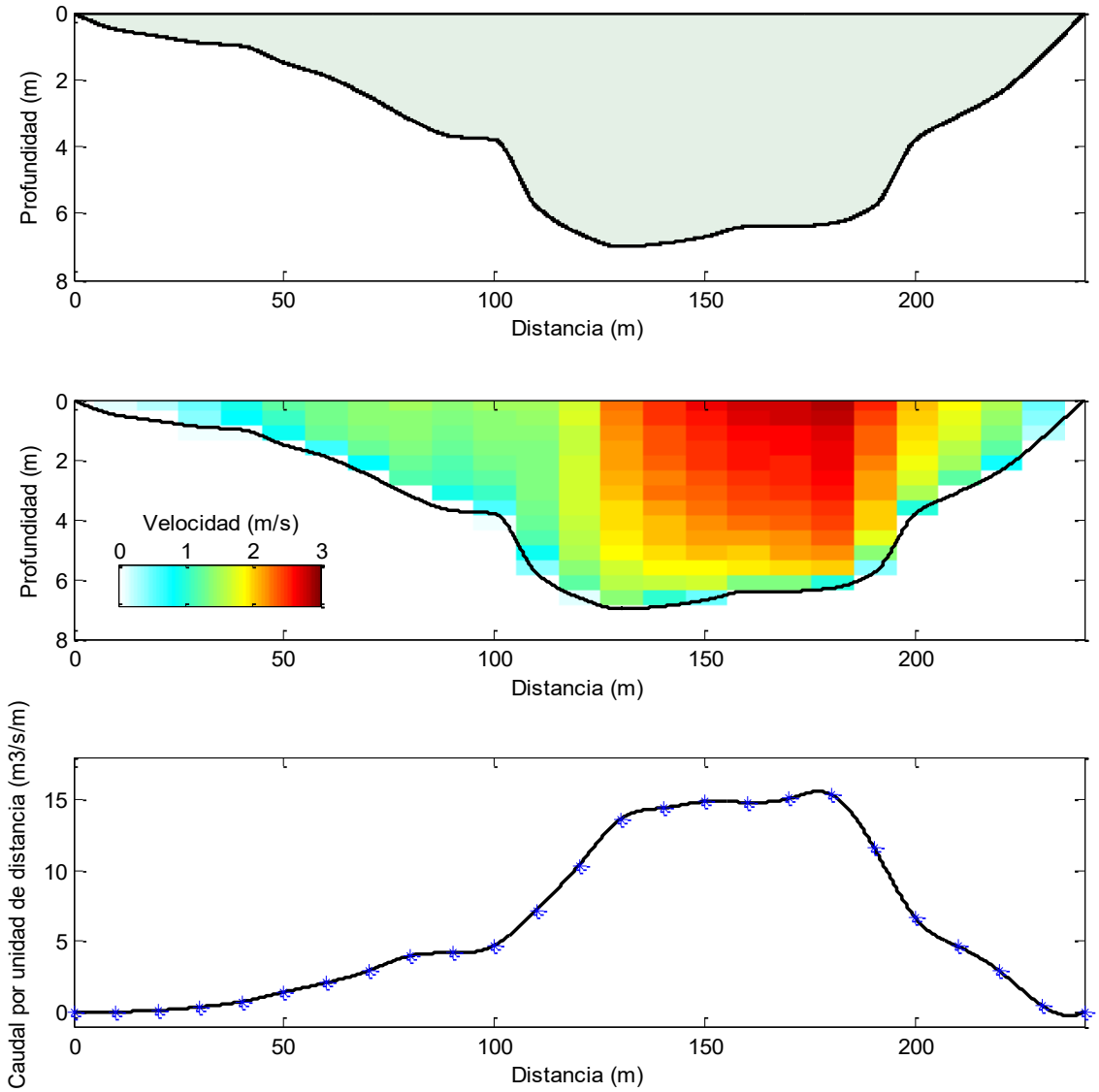


Figura 7.16.9 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 1 a 4

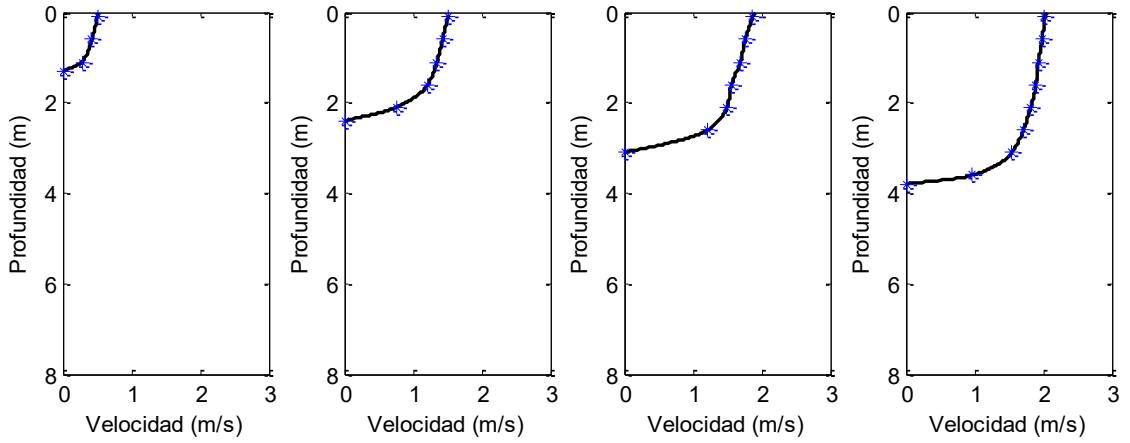


Figura 7.16.10 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 5 a 8

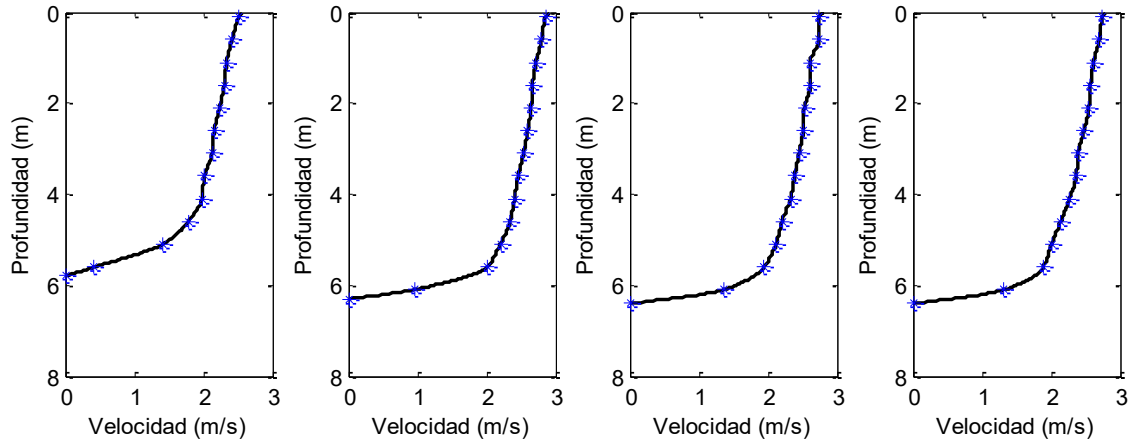


Figura 7.16.11 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 9 a 12

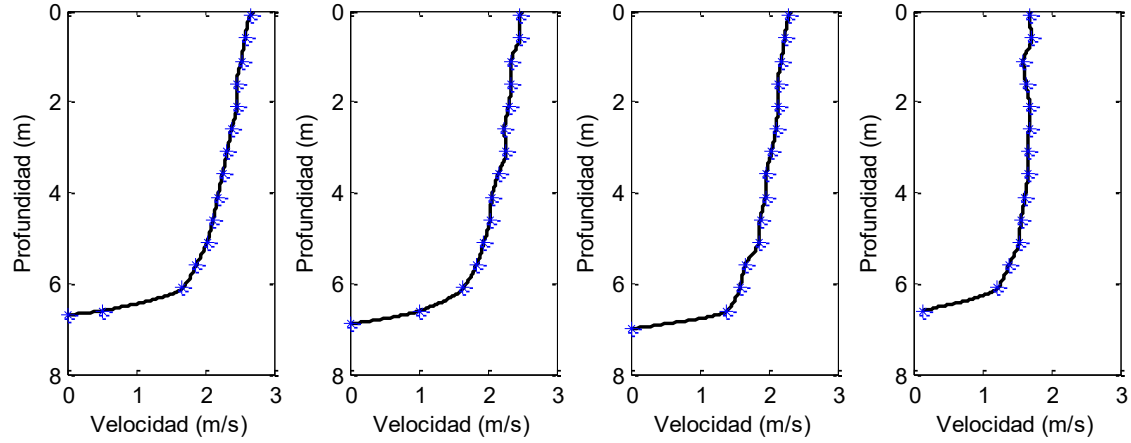


Figura 7.16.12 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 13 a 16

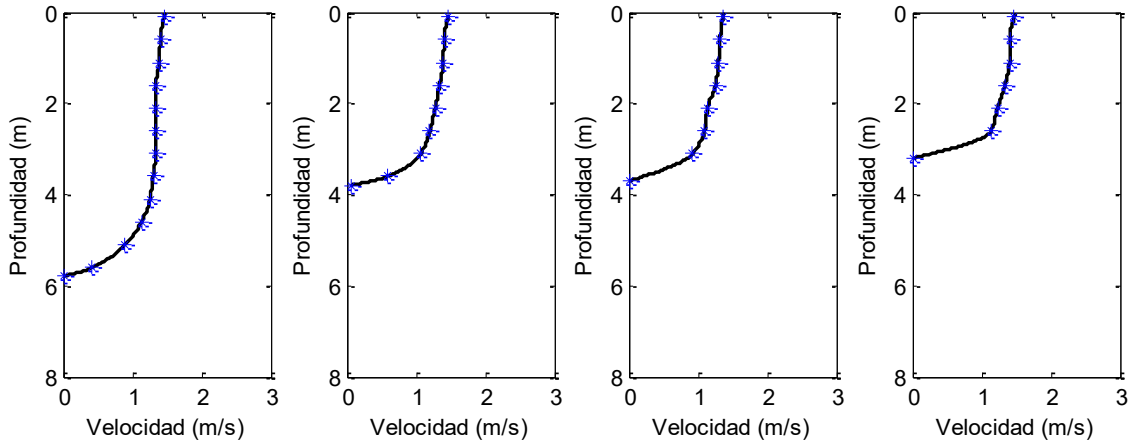


Figura 7.16.13 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 17 a 20

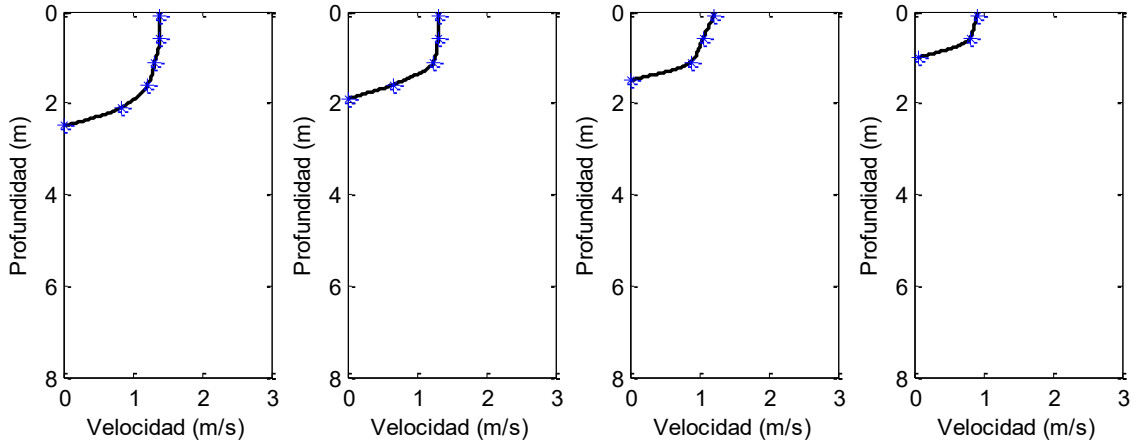
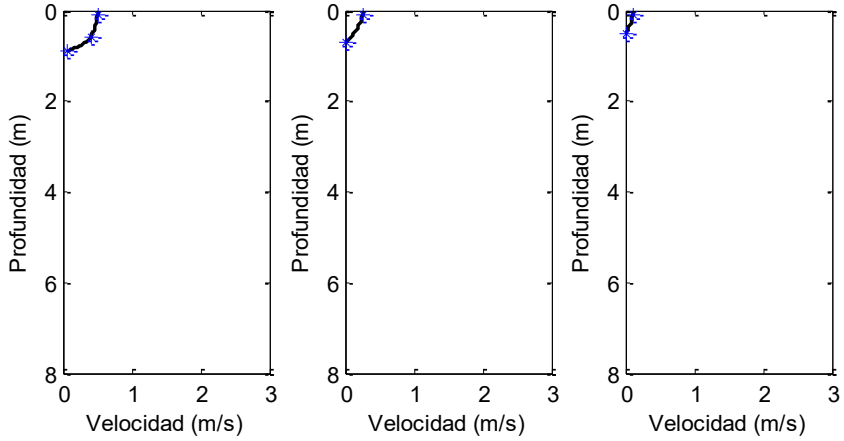


Figura 7.16.14 Perfiles de velocidad en Puente Viejo - Estaciones 21 a 23



En base a los registros de niveles en CHF, los estudios de Lara (2016) y las mediciones de caudales realizadas durante las campañas de monitoreo se ha construido la serie de caudales del RSC que se presenta la Figura 7.16.15. La Figura 7.16.16 presenta los caudales diarios (para cada día del año) que son superados el 50% del tiempo (Q_{50}), el

75% del tiempo (Q_{75}), el 95 % del tiempo (Q_{95}) y el 100 % del tiempo o caudal mínimo (Q_{100}).

Figura 7.16.15 Caudales históricos disponibles del RSC

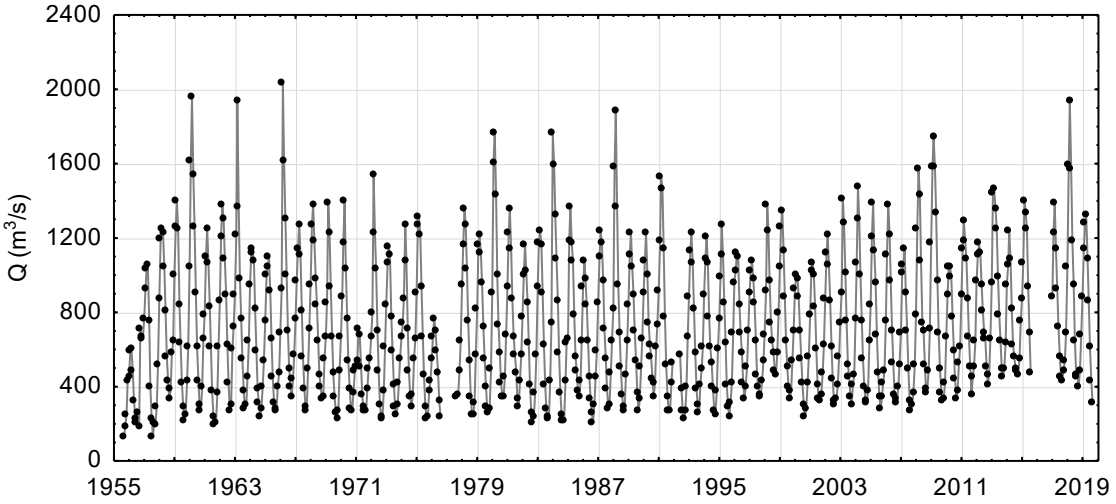
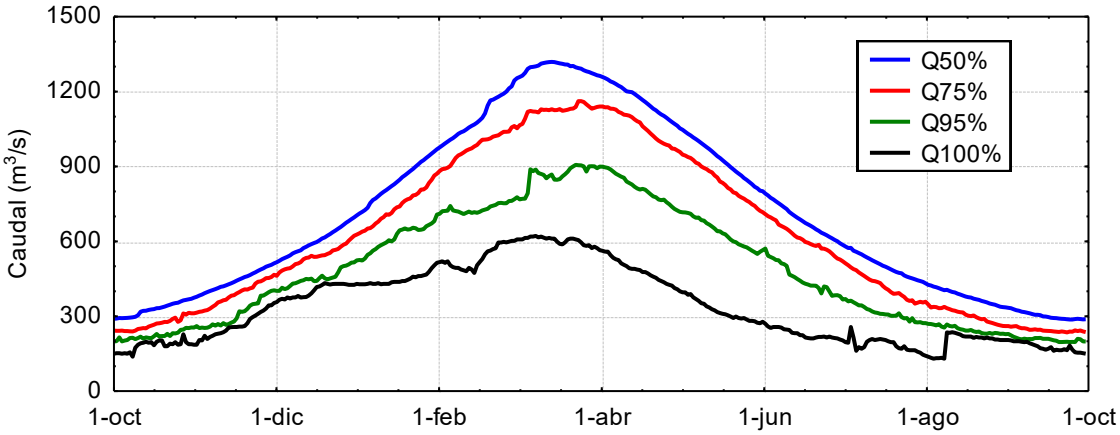


Figura 7.16.16 Caudales diarios (para cada día del año) que son superados el 50% del tiempo (Q50%), el 75% del tiempo (Q75%), el 95 % del tiempo (Q95%) y el 100 % del tiempo o caudal mínimo (Q100%).



7.17. Caudales y Concentración de Sedimentos en Suspensión del Río Chico

Se han obtenido datos de caudales del río Chico para imponer como condición de contorno de la modelación entre 1 noviembre de 2017 y 1 de junio de 2019, interpolados en base a las mediciones realizadas por ESSA durante las 20 campañas realizadas, entre el 27 de octubre de 2017 y el 28 de mayo de 2019. Entre las tareas realizadas por ESSA durante estas campañas, se tomaron muestras de agua que fueron enviadas al laboratorio del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). A las muestras de agua se les midió las concentraciones de los sólidos

suspendidos totales (SST). Los resultados de caudales y concentraciones de SST se presentan en la Tabla 7.17.1. Para obtener los valores intermedios se realizó una interpolación utilizando una función de "spline cúbico". Las Figuras 7.17.1 y 7.17.2 presenta las mediciones y la interpolación utilizada para las simulaciones.

Tabla 7.17.1 Resultados de caudales y concentraciones registrados en la Estación río Chico, durante las 20 campañas de monitoreo

Fecha	Caudal (m^3/s)	Concentración (mg/l)
28/10/2017	25.4	177
23/11/2017	23.6	479
19/12/2017	36.8	215
23/1/2018	17.1	56
20/2/2018	10.2	8
20/3/2018	9.8	23
26/4/2018	37.8	718
25/5/2018	13.7	11
23/6/2018	2.7	53
23/7/2018	5.5	11
19/8/2018	6.8	69
24/9/2018	10.5	164
31/10/2018	27.6	430
21/11/2018	23.3	567
18/12/2018	15.8	72
23/1/2019	5.7	101
27/2/2019	8.6	178
2/4/2019	5.4	61
30/4/2019	10.5	48
28/5/2019	37.2	343

Figura 7.17.1 Caudal del río Chico utilizado en las corridas de calibración

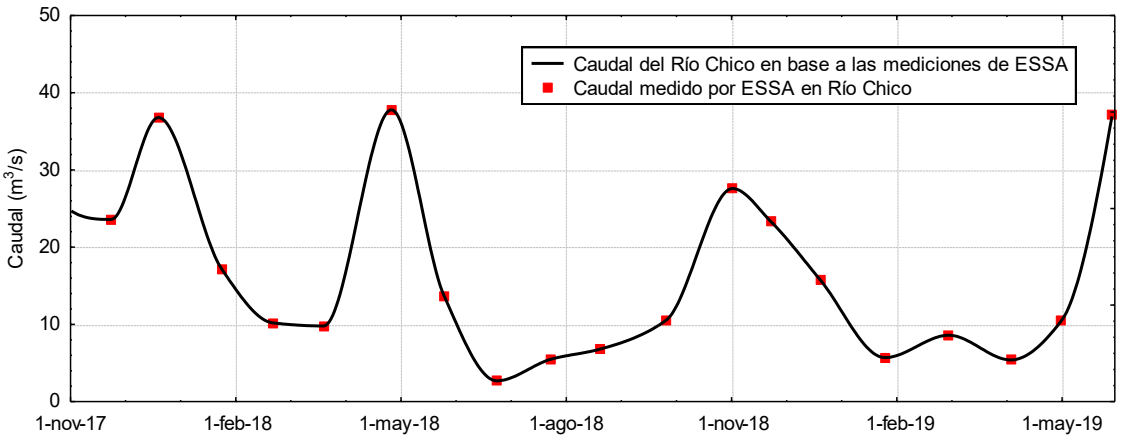
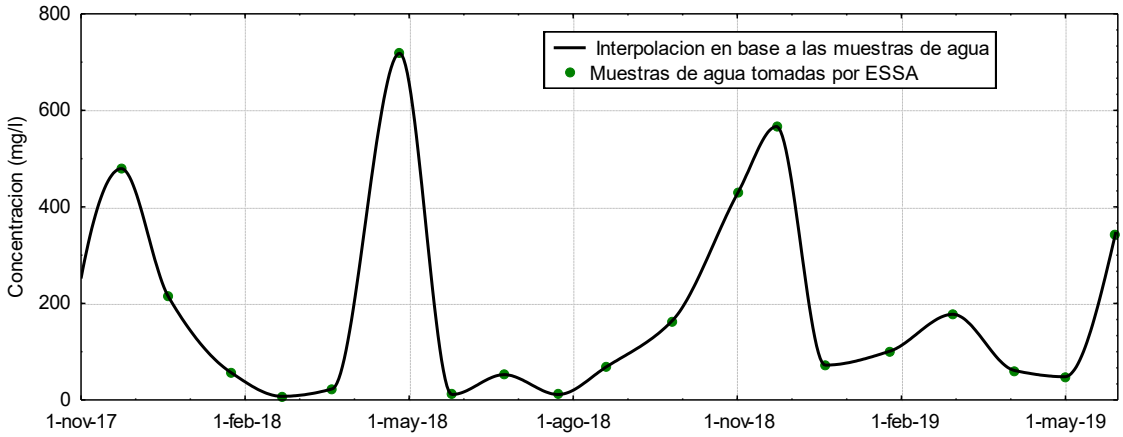


Figura 7.17.2 Concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) del río Chico utilizado en las corridas de calibración.



7.18. Relación entre Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez

En las campañas de campo a una parte de las muestras de aguas enviadas al CIG (UNLP) para la medición de SST (presentadas en el punto anterior), se les medía la turbidez con el turbidímetro de banco marca Lutron modelo TU-2016. Este instrumento se calibra con soluciones de turbidez 0 y 100 NTU con cada medición, generando resultados confiables. Los datos de SST y turbidez de las muestras para las diferentes campañas y sitios de medición se presentan en las Tablas 7.18.1 y 7.18.2.

Tabla 7.18.1 Concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) y mediciones de turbidez (2017-2018). Notas: SST obtenidos por método gravimétrico por CIG (UNLP). El material analizado es mayor o igual a 4µm.

Muestra	Posición, WGS 84	Turbidez (NTU)	SST (mg/l)	Condición de la marea
CTDTu 02	S49 59.056, W68 54.244	8.1	4.93	bajante
CTDTu 04	S49 58.383, W68 47.589	10.1	1.85	bajante
CTDTu 06	S49 59.077, W68 41.905	9.5	10.05	bajante
CTDTu 06a	S49 59.145, W68 41.547			No hay dato
CTDTu 04a	S49 58.388, W68 47.511	8	9.38	creciente
CTDTu 02a	S49 58.977, W68 54.217	9.6	17.21	creciente

Tabla 7.18.2 Concentraciones de SST (laboratorio) y mediciones de turbidez (2017-2018). Notas: SST obtenidos por método gravimétrico por CIG (UNLP). El material analizado es mayor o igual a 4µm.

Campaña	Río Chico		Isla Pavón		Charles Fuhr		Punta Quilla		Puente Viejo	
	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)
mar, 2017	634	399	19	12	5	10	-	-	-	-
oct, 2017	177	113	5	13	9	18	52	15	2	13
nov, 2017	479	212	**138**	**16**	**143**	**18**	**80**	**29**	**0**	**17**
dic, 2017	215	208	9	21	4	13	73	15	7	19
ene, 2018	56	51	12	19	5	22	57	7	2	28
feb, 2018	8	22	13	31	2	19	6	13	10	30
mar, 2018	23	26	32	26	6	8	132	62	34	30
abr, 2018	718	759	11	23	21	25	118	31	19	21
may, 2018	11	43	1	8	1	5	57	24	1	7
jun, 2018	53	52	9	12	10	14	117	69	9	11
jul, 2018	11	35	2	16	2	13	88	33	0	9
ago, 2018	69	78	5	15	32	43	73	31	12	19
sep, 2018	164	200	3	7	3	6	68	30	2	7
oct, 2018	430	530	19	60	-	-	-	-	-	-
nov, 2018	567	335	8	18	-	-	-	-	-	-
dic, 2018	72	83	10	20	-	-	-	-	-	-
ene, 2019	101	46	12	20	-	-	-	-	-	-
feb, 2019	178	380	13	20	-	-	-	-	-	-
abr, 2019	61	40	12	20	-	-	-	-	-	-
abr, 2019	48	55	9	15	-	-	-	-	-	-
may, 2019	343	237	6	10	-	-	-	-	-	-

Para obtener la relación entre SST (mg/l) y turbidez (NTU) se ha considerado:

- Los valores de la campaña de noviembre 2017 se han eliminado de la correlación entre turbidez y SST debido a que los resultados de laboratorio presentan valores fuera del rango usual. Probablemente haya habido algún problemas o con las muestras o con el procedimiento en el laboratorio. Por ejemplo, para Charles Fuhr las concentraciones de SST de todas las campañas varían entre 2 y 32 mg/l, y para la campaña de noviembre esta es de 143 mg/l (Tabla 7.18.2).
- El laboratorio CIG (UNLP) indica que en las muestras tomadas en Punta Quilla se ha detectado la presencia de sales de halita (NaCl). Es una sal soluble que ha precipitado químicamente al producirse el secado de la muestra. Este mineral ha estado disuelto en el agua y no puede ser tomado como un sólido suspendido. En consecuencia, los valores de las concentraciones de SST incluyen una parte de sales precipitadas (antes

disueltas) por lo que la relación con los valores de turbidez no es buena, como se puede ver en la Tabla 7.18.2. Por lo tanto, no se utilizan para la obtención de la relación entre SST y turbidez las mediciones en Punta Quilla.

Con los valores de las tablas se han construido las Figuras 7.18.1 y 7.18.2 que muestran la correlación entre las mediciones de turbidez y SST del laboratorio. No se han considerado los valores de Punta Quilla ni los de la campaña de noviembre de 2017.

Figura 7.18.1 Relación entre las concentraciones de SST (laboratorio) y las mediciones de turbidez (2017-2019). Río Chico (izquierda) y río Santa Cruz (derecha).

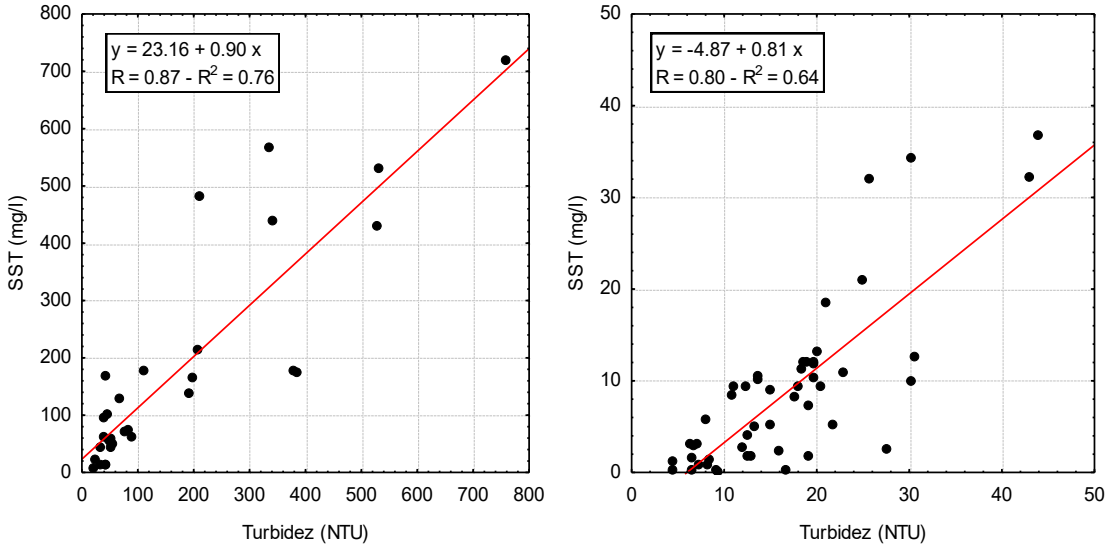
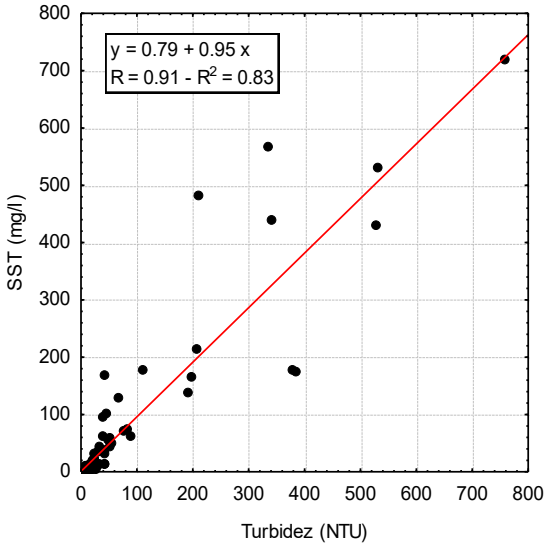
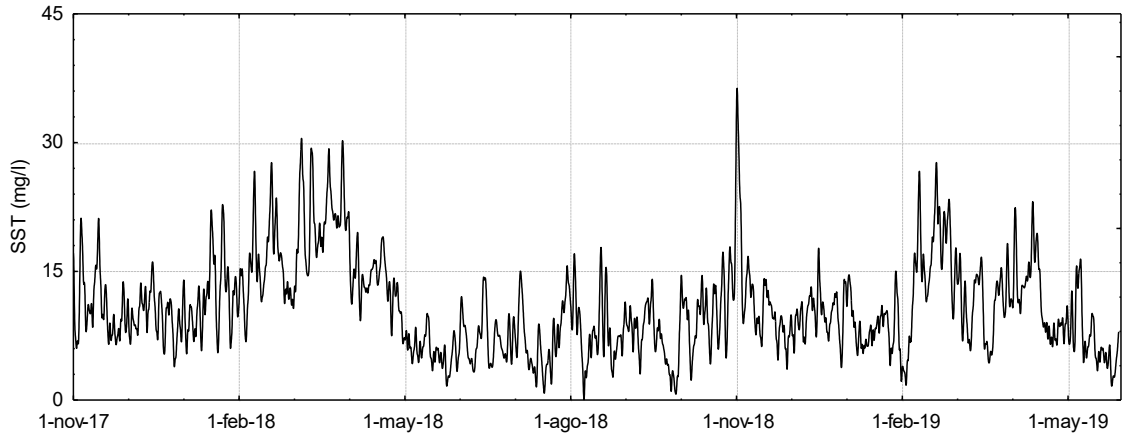


Figura 7.18.2 Relación entre las concentraciones de sólidos suspendidos totales (laboratorio) y las mediciones de turbidez (2017-2019). Estaciones de río Chico y río Santa Cruz.



Usando la relación encontrada para el río Santa Cruz entre turbidez (NTU) y SST (mg/l) se construyó la Figura 7.18.3 con la serie de tiempo que se utiliza para las simulaciones del transporte de sedimentos en el estuario del río Santa Cruz.

Figura 7.18.3 SST (mg/l) generados en base a las mediciones continuas de turbidez en Isla Pavón y los resultados de las muestras de laboratorio.



7.19. Muestras de sedimentos del fondo del Estuario del río Santa Cruz

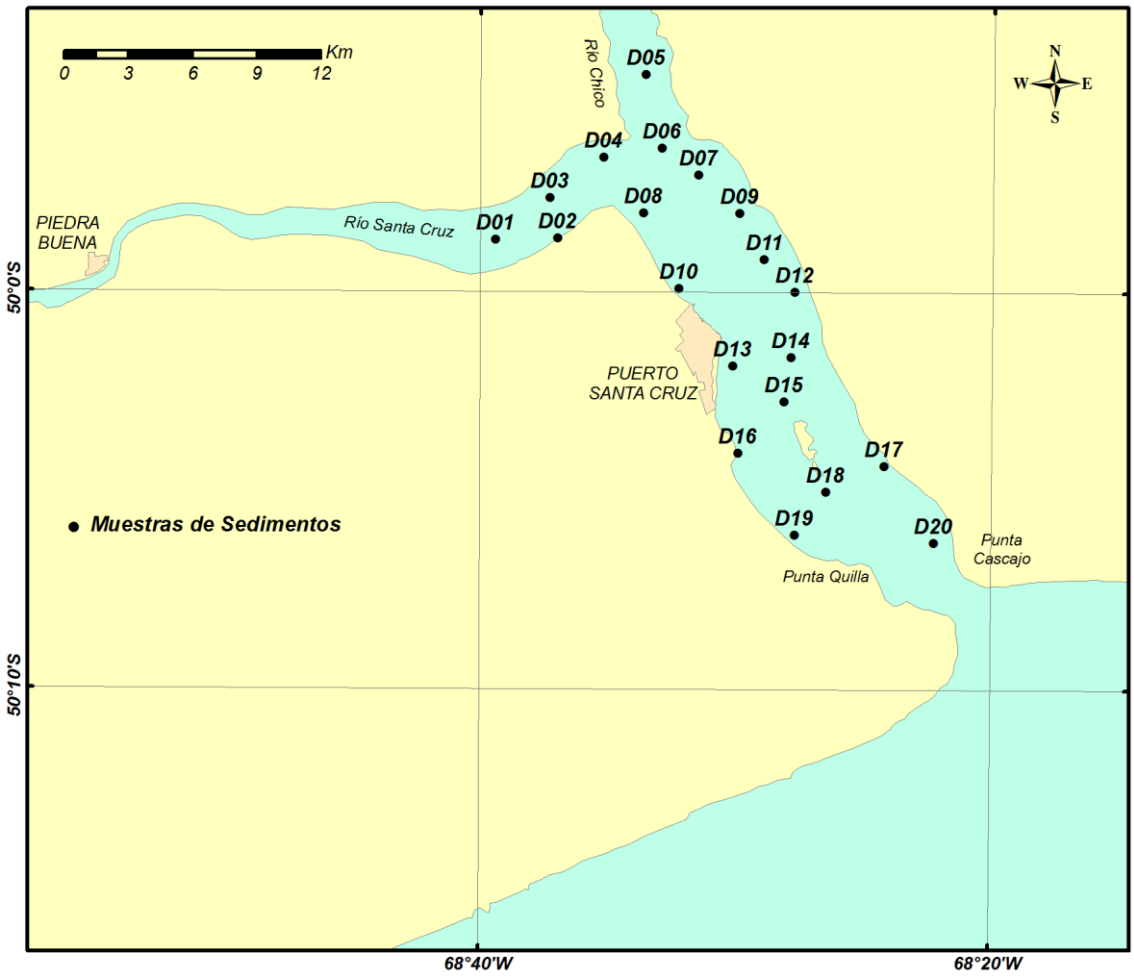
En marzo de 2017 se realizó una campaña de muestreo con el objeto de caracterizar los sedimentos que forman el fondo del estuario. Se puso particular énfasis en evaluar la existencia de sedimentos finos fuera de los cauces o canales principales, ya que en las zonas de canales las intensas corrientes solo permiten la presencia de los gruesos, como había sido observado en otras campañas anteriores. Para extraer las muestras se utilizó una draga Van Veen de 15.8 kg de peso y 2.5 dm^3 de capacidad, que se muestra en a Figura 7.19.1.

El muestreo se hizo usando el bote semirrígido "Macuna", propulsado con un motor Yamaha de 4 tiempos, de 70 HP de potencia. A este bote se le instaló un mástil de acero para operar la Draga Van Veen con seguridad.

Se tomaron 20 muestras de sedimentos, en las ubicaciones que se indican en la Tabla 7.19.1 y en la Figura 7.19.2. Cada muestra determinada con un equipo posicionador GPS, con un error probable circular menor que 5 m. Todas las muestras fueron envasadas en bolsas de polietileno y descriptas visualmente.

Figura 7.19.1 Bote "Macuna" con su mástil y la draga Van Veen de 15.8 kg con capacidad de 2.5 dm^3 lista a tomar muestras (izquierda). Draga Van Veen con la muestra del sitio D16 (derecha).

Figura 7.19.2 Posición de las 20 muestras de sedimentos de fondo



Los muestreos se realizaron en marea alta de sicigias de manera que todos los sitios tuvieron agua cuanto se extrajo la muestra. Esto asegura que el agua alcanza las posiciones muestreadas y por lo tanto, la marea tiene capacidad de reacomodarlos. La

Tabla 7.19.1 presenta las posiciones de las estaciones, la profundidad de cada sitio referida al 0 IGN, el d50 (mm) obtenido del análisis granulométrico y una descripción realizada por los operadores de campo.

El análisis de las muestras indica que el fondo del estuario está configurado por sedimentos muy gruesos en la zona de los canales (donde las corrientes de creciente y bajante son muy intensas) con presencia de arenas gruesas, medias, finas y hasta limos en los zonas intermareales.

Tabla 7.19.1 Datos de las muestras del fondo obtenidas en el estuario del río Santa Cruz. Nota: las profundidades de las posiciones de las estaciones referidas al 0 IGN son negativas cuando la altura está por sobre el cero y positivas cuando están por debajo.

Muestra	Posiciones (WGS 84)	Profundidad al 0 IGN (m)	D50 (mm)	Descripción visual
D01	S49 58.718 W68 39.427	0.4	0.18	Arena fina castaño oscuro
D02	S49 58.680 W68 36.997	-1.4	4.50	Cantos rodados medianos y grandes
D03	S49 57.653 W68 37.296	0.5	0.25	Arena fina castaño oscuro
D04	S49 56.642 W68 35.201	2.8	0.15	Limo fino con arcilla castaño gris
D05	S49 54.549 W68 33.574	1.4	0.24	Arena fina castaño oscuro
D06	S49 56.405 W68 32.930	0.6	0.30	Arena fina castaño oscuro
D07	S49 57.071 W68 31.506	3.4	0.10	Limo arcilloso castaño gris
D08	S49 58.028 W68 33.643	0.7	0.30	Arena fina castaño oscuro
D09	S49 58.040 W68 29.888	1.1	0.32	Arena fina castaño oscuro
D10	S49 59.928 W68 32.252	0.3	0.18	Limo arenoso castaño gris
D11	S49 59.196 W68 28.938	0.0	3.80	Cantos rodados chicos, medianos y grandes
D12	S50 00.015 W68 27.719	-2.7	2.50	Cantos rodados chicos con arena mediana
D13	S50 01.866 W68 30.122	-3.6	3.00	Cantos rodados medianos
D14	S50 01.661 W68 27.864	-3.5	0.27	Arena mediana, castaño oscuro
D15	S50 02.775 W68 28.127	0.1	0.80	Limo arcilloso con cantos rodados finos y arena
D16	S50 04.071 W68 29.911	-1.8	0.18	Limo arcilloso castaño gris
D17	S50 04.383 W68 24.190	0.4	4.80	Cantos rodados chicos, medianos y arena mediana
D18	S50 05.036 W68 26.460	0.7	1.80	Arena fina y muy gruesa
D19	S50 06.121 W68 27.680	-5.8	0.75	Limo arcilloso castaño gris c/cantos rodados variados
D20	S50 06.297 W68 22.224	-4.5	1.00	Cantos rodados chicos, medianos y arena gruesa

Capítulo 8

Implementación y calibración de los modelos

8.1. Introducción

El programa utilizado es MIKE 3 Flow Model (Hydrodynamic) versión FM (Flexible Mesh) con módulo transporte TR (Advection-Dispersion). Este paquete de software es el Flow Model FM (HD) al que se le acopla el módulo MT (Mud Transport) de transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos, todos desarrollado por DHI (https://www.dhigroup.com/).

MIKE 3 Flow Model FM (HD) es una herramienta de modelado tridimensional general para aplicaciones oceanográficas, costeras y estuarinas. El modelo comprende varios modelos de turbulencia e incorpora efectos baroclínicos dinámicos a partir de diferencias de salinidad y temperatura, por lo que es posible introducir la presencia de flujo estratificado. El modelo puede depender de una serie de tiempo de forzantes externos como efectos meteorológicos y mareológicos.

La malla es desestructurada y flexible, lo que proporciona una flexibilidad óptima mientras se conserva una solución numérica eficiente. La discretización horizontal puede combinar triángulos y elementos cuadriláteros, mientras que la vertical se basa en una discretización sigma. La resolución a escala regional y la batimetría pueden aproximarse muy bien en los contornos y límites, imponiendo gradualmente una mayor resolución a través del método de malla flexible.

Las áreas de aplicación son generalmente problemas donde el flujo, el transporte y / o los efectos baroclínicos son importantes con énfasis en aplicaciones costeras y marinas. Ejemplos son el flujo y los transportes en estuarios de mareas, maremotos, circulación

baroclínica, dispersión y efluentes o agua de enfriamiento e hidrodinámica de los lagos. Las características de los modelos pueden encontrase en (https://www.dhigroup.com/).

La calibración es un proceso iterativo donde se modifican ciertos coeficientes del input del modelo hasta que se obtiene una correlación satisfactoria entre los valores medidos y los calculados por el modelo. Una vez dado por calibrado, el modelo puede calcular las variaciones del nivel del mar y las corrientes debidas a marea y vientos para otras épocas fuera del período de medición.

En particular, para el estuario del río Santa Cruz y zonas de su entorno, es importante notar que la contribución de las mareas, tanto desde las variaciones periódicas del nivel del mar como de las corrientes de marea asociadas, son de gran significancia. Las corrientes de marea dominan el flujo de agua hacia dentro del estuario (creciente) y hacia el mar (bajante), produciendo el llenado del estuario y el vaciado dos veces por día debido al carácter semidiurno de la marea que tiene dos pleamares y dos bajamares por día, aproximadamente.

Tal es la importancia de la marea que basta con observar la amplitud media (distancia desde la pleamar a la bajamar) que alcanza algo más de 10 m que la superficie del mar recorre en apenas algo más de 6 h (tiempo entre pleamar y bajamar). Es por esta razón que las corrientes son muy intensas con velocidades en superficie que superan 1.5 m/s.

Respecto a la calibración, se presentan en este capítulo las comparaciones finales luego de realizar unas 200 simulaciones en la búsqueda de los parámetros del modelo que generan los resultados que mejor se ajustan a las mediciones. La gama de datos y épocas de medición es variada, y todas las mediciones han sido comparadas con los resultados de las modelaciones.

Durante el proceso de calibración, se han utilizado diferentes indicadores para cuantificar la performance del modelo, de manera ir ajustando los parámetros en la calibración. Estos indicadores fueron:

- coeficientes de correlación lineal (R)
- correlación lineal al cuadrado (R^2)
- rectas de regresión (con pendiente y ordenada al origen)

El objetivo es obtener una ordenada al origen cercana a 0, una pendiente de la recta cercana a 1, el coeficiente de correlación lineal (R) cercano a 1 y lo mismo para coeficiente de correlación lineal al cuadrado (R^2). En las tablas y figuras que se presentan a continuación no siempre se muestran los resultados de los ajustes finales de todos los indicadores.

8.2. Grilla del Modelo

Se realizó un relevamiento batimétrico, que se adicionó a la batimetría realizada por la UTE Represas Patagonia y a la batimetría de las cartas náuticas: H413 “De Puerto San Julián a Río Gallegos", Carta náutica 2 “Puerto Santa Cruz”, H367 “Punta Quilla”.

Los datos batimétricos en formato XYZ, fueron incorporados al MIKE 3 Flow Model FM (HD) que, a partir de una subrutina, generó la grilla de modelación sobre la cual se hicieron las simulaciones. El procedimiento de construcción de la grilla dentro del mundo del MIKE puede consultarse en DHI (2012). La grilla seleccionada cuenta con 16013 elementos de variada forma y tamaño para hacer eficiente el cálculo. La resolución de la grilla es construida en base regiones a las que se les define el área máxima que pueden tomar los triángulos que la componen. En este caso, los triángulos de menor resolución (mayor área), los ubicados en el mar, poseen un área máxima de 10 millones de m^2, mientras que los poseen la mayor resolución (menor área), ubicados en el interior del río, tienen como máximo un área de 6400 m^2.

En puntos de superposición entre los datos batimétricos obtenidos por ESSA, por Represas Patagonia y cartas náuticas, se encontró coincidencia. En algunos sitios puntuales donde se detectaron algunas discrepancias entre los sondajes de las cartas y los sondajes de los relevamientos de Represas Patagonia y ESSA, se utilizaron los valores de estos últimos relevamientos para la grilla de modelación, por ser más recientes.

La Figura 8.2.1 presenta una imagen de la construcción de la grilla numérica donde se pueden apreciar en puntos los datos utilizados para construir la batimetría. La Figura 8.2.2 presenta un acercamiento a la zona del RSC.

Figura 8.2.1 Imagen de la construcción de la grilla numérica donde se pueden apreciar en puntos los datos utilizados para construir la batimetría. Estos datos incluyen mediciones generadas por el proyecto y los sondajes de carta náutica.

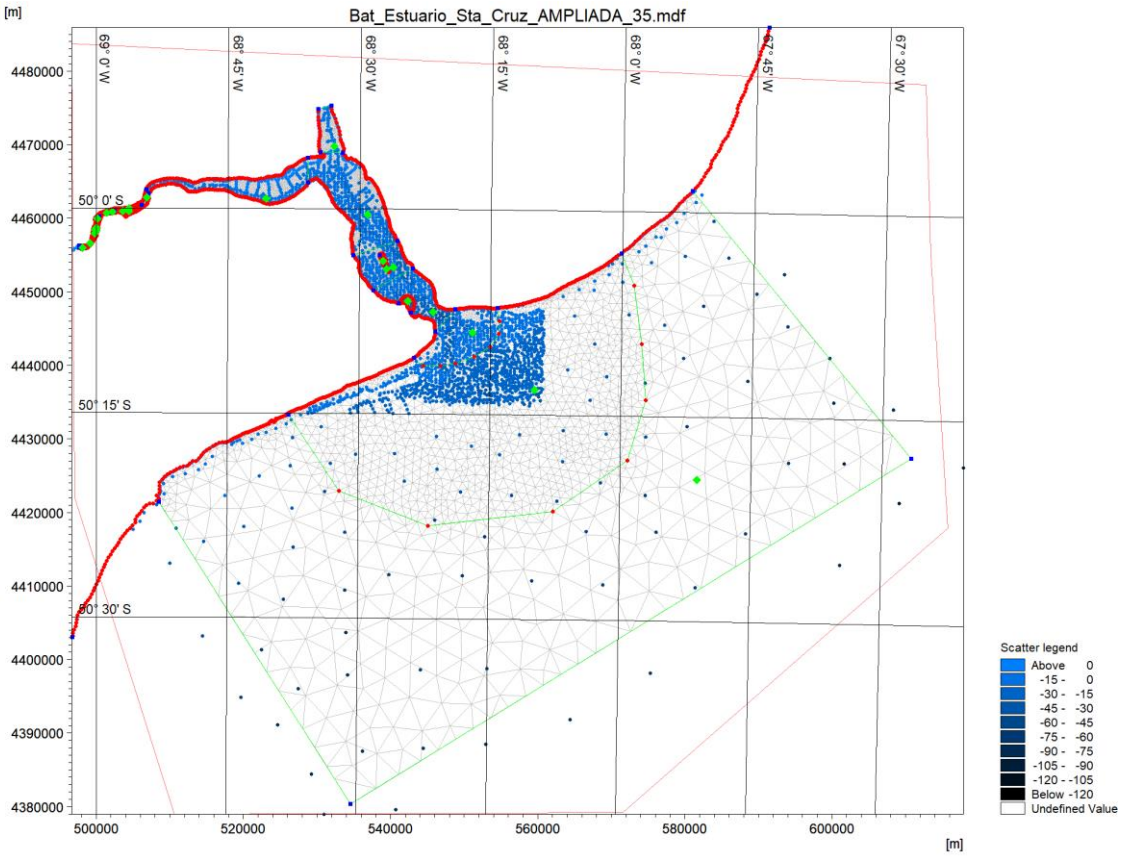
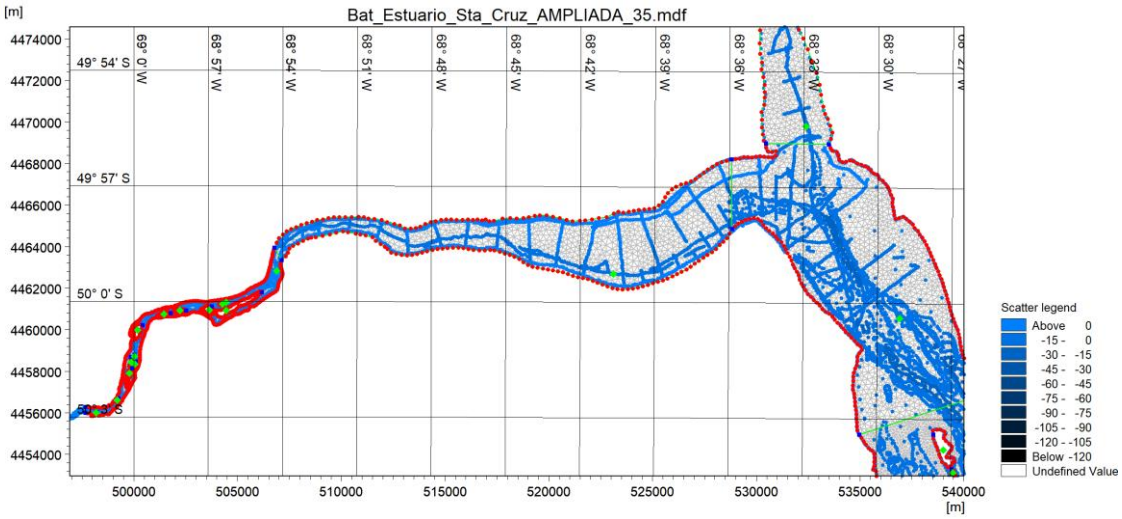


Figura 8.2.2 Acercamiento de la construcción de la grilla numérica irregular a la zona del RSC.



La batimetría sobre la cual se soporta la grilla se presenta en la Figura 8.2.3. Un detalle de la grilla del modelo se presenta en la Figura 8.2.4.

Figura 8.2.3 Batimetría completa del modelo sobre la cual se soporta la grilla

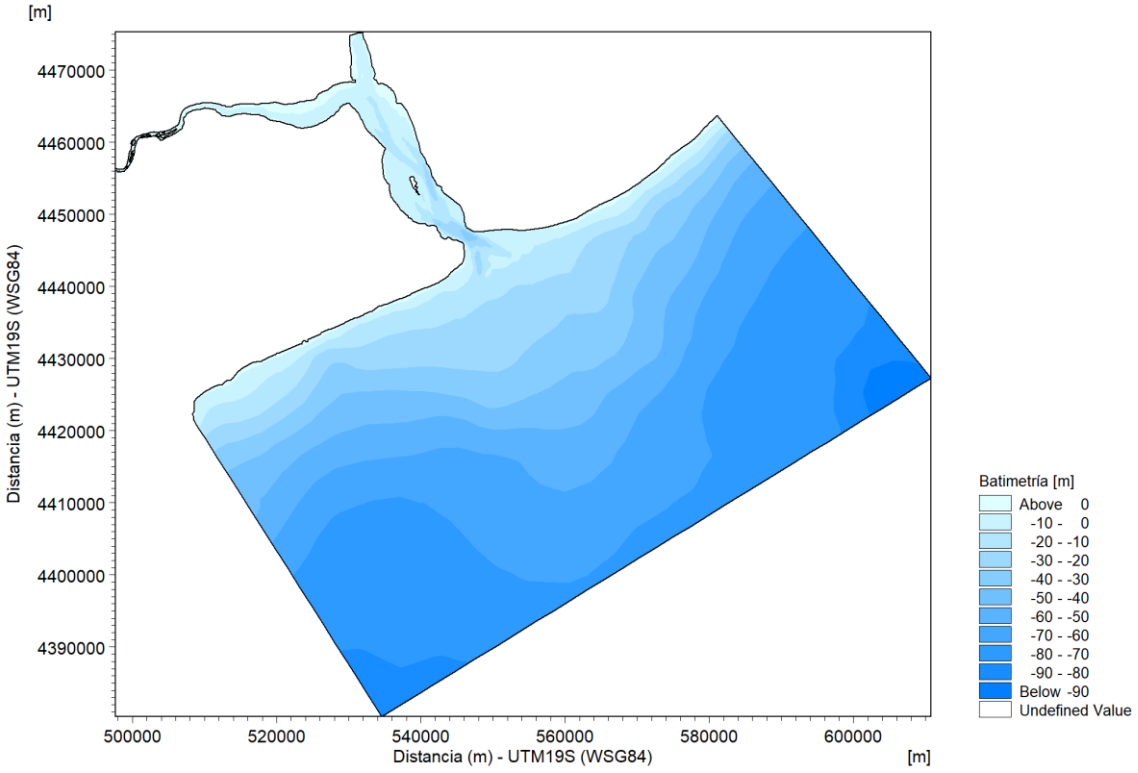


Figura 8.2.4 Batimetría parcial y detalle de la grilla del modelo.

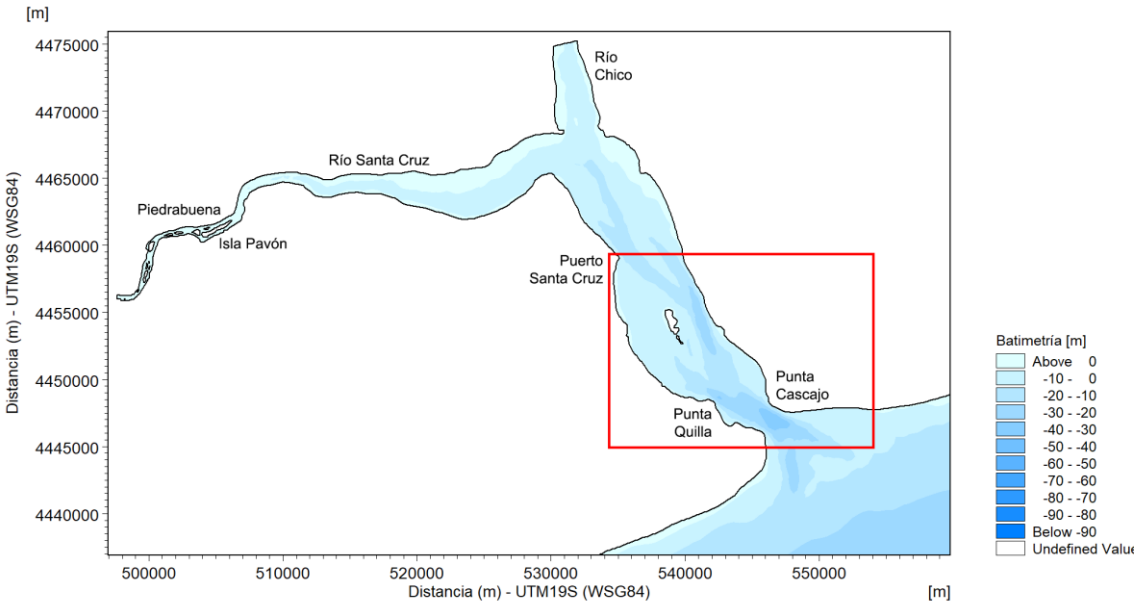
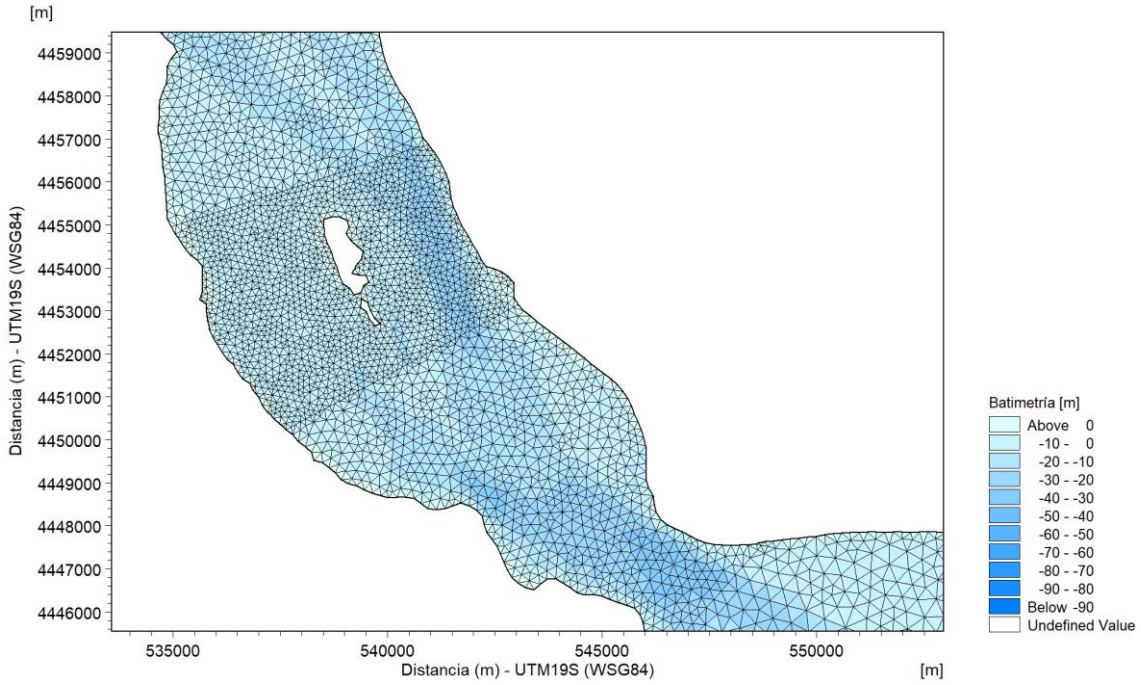


Figura 8.2.4 Continuación. Batimetría parcial y detalle de la grilla del modelo.



8.3. Formulación del modelo e input utilizado

El MIKE 3 Flow Model FM es un completo sistema de modelización 3D desarrollado por DHI (https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/products).

El modelo hidrodinámico se basa en la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. Pueden aplicarse tanto las ecuaciones tridimensionales completas de Navier-Stokes como las ecuaciones tridimensionales de aguas poco profundas.

En el Anexo A: MIKE 3 Flow Model FM del presente documento, se presentan los links a los documentos que describen detalladamente los modelos utilizados y se realiza una breve presentación del sistema de ecuaciones que el modelo hidrodinámico discretiza.

Input utilizado en las simulaciones del Estuario del río Santa Cruz

El seteo del modelo implica la selección de importante cantidad de parámetros que permiten construir la simulación de las variables deseadas en el algún sitio en particular. Una vez diseñada, construida y asociado a cada volumen de la grilla los valores batimétricos, se deben imponer condiciones para que el modelo opere. Estos valores representan parámetros físicos que pueden tener mayor o menor variabilidad temporal y espacial, y que pueden modificarse en la búsqueda de una mejor representación de la realidad (mediciones). El proceso del acercamiento de los resultados del modelo a las

mediciones se denomina calibración, y se realiza modificando estos parámetros del modelo en la búsqueda de la disminución de los errores de las variables medidas.

La Tabla 8.3.1 muestra un resumen de las características de la modelación luego de haber calibrado el modelo con las mediciones de temperatura, salinidad, nivel del mar y velocidades disponibles. La rugosidad del fondo se definió variable en el dominio de modelación. La Figura 8.3.1 muestra las características de la rugosidad empleada en la modelación.

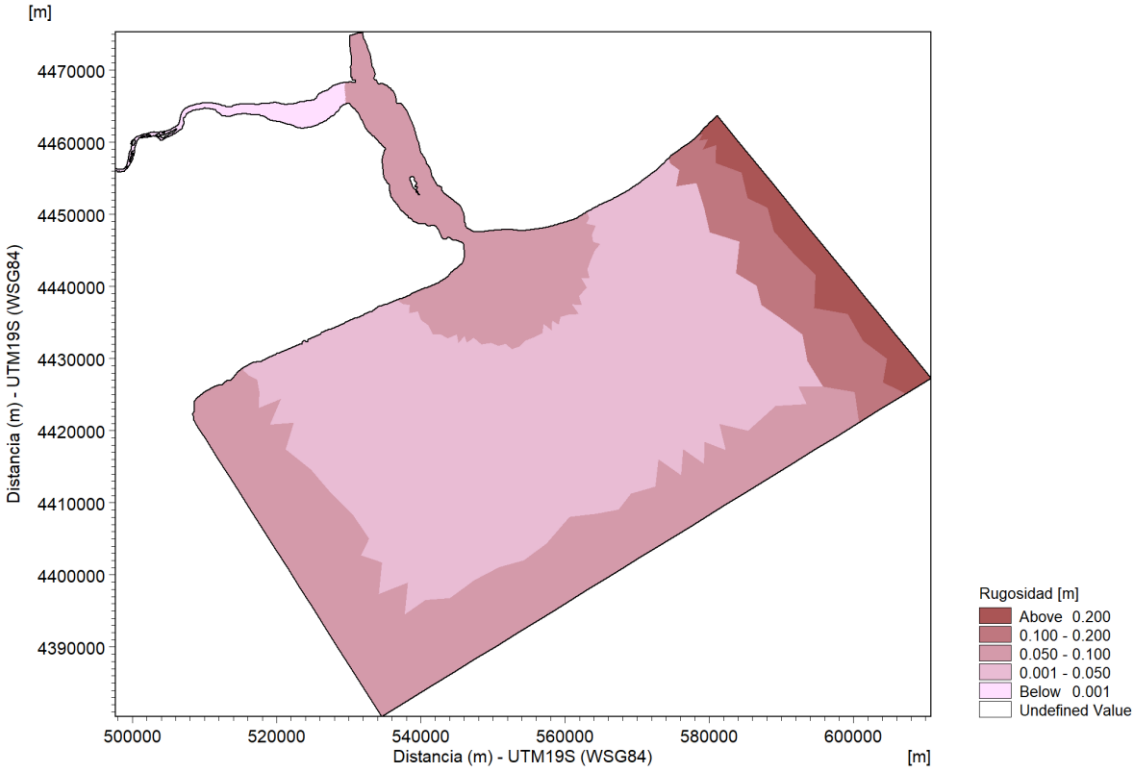
Las condiciones iniciales de los modelos numéricos son campos de números que representan a las diferentes variables, temperatura, por ejemplo, que no necesariamente son campos reales, es decir que son útiles para iniciar los cálculos. Pero dado que el modelo resuelve la física de las variables intervinientes: velocidades, niveles del mar, temperatura y salinidad, es de esperar que al cabo de cierto tiempo (si el modelo fue alimentado con condiciones realistas en los bordes) los resultados generados sean semejantes a la realidad y puedan contrastarse con mediciones.

MIKE 3 Flow Model FM permite además considerar un intervalo de tiempo en el que se pueden hacer crecer suavemente las variables en los bordes considerando una variación lineal o sinusoidal. Este procedimiento se denomina inicio suave (“soft start” en inglés) y permite el comienzo de la integración numérica ocurra con variaciones suaves de la variables favoreciendo la estabilización del modelo en los primeros instantes de corrida. Esta estabilización puede ser más o menos larga dependiendo de las características del modelo implementado: tamaño de grilla, espaciado temporal y características hidrodinámicas de la simulación a realizar, es decir que está controlada por el número de Courant.

Tabla 8.3.1 Características generales de las simulaciones.

Tema	Característica	Detalle
Batimetría	Tipo de grilla	Flexible mesh (elementos finitos)
	Nodos de cálculo	8814
	Elementos	16013
	Capas sigma	5
	Datos batimétricos:	Carta, ESSA y mediciones de ADB
Variables tratadas	Niveles del agua	Variable 2D en tiempo y espacio
	Corrientes	Variable 3D en tiempo y espacio
	Temperatura	Variable 3D en tiempo y espacio
	Salinidad	Variable 3D en tiempo y espacio
	Transporte de sedimentos	Variable 3D en tiempo y espacio
Módulo hidrodinámico	Tipo de solución numérica	Orden bajo con algoritmo rápido
	Celdas secas y húmedas	Si
	Viscosidad turbulenta horizontal	Formulación de Smagorinsky, coeficiente: 0.35.
	Viscosidad turbulenta vertical	Formulación logarítmica, entre 1e-5 m^2/s y 1 m^2/s.
	Rugosidad del fondo	Variable entre 0.001 y 0.3 (m)
	Coeficientes de forzantes de viento	Variable en función del viento entre 0.0025 (5 m/s) y 0.005 (25 m/s)
	Condiciones de contorno	Niveles de marea en los bordes abiertos (modelo TPXO 9.1) Caudal del río Santa Cruz: Para calibración variable en base a las mediciones. Para las corridas finales: caudales estadísticos Q50, Q75, Q95%, Q55-56, H1 y H2, entre otros. Caudal del río Chico: variable en base a las mediciones de ESSA. Temperatura y salinidad variable en tiempo y la vertical extraídos del modelo global HYCOM (https://www.hycom.org/)
Temperatura y salinidad	Tipo de solución numérica	Orden bajo con algoritmo rápido
	Celdas secas y húmedas	Si
	Dispersión horizontal	Viscosidad turbulenta, coeficiente: 1.2
	Dispersión vertical	Viscosidad turbulenta, coeficiente: 0.0001
	Intercambio de calor con la atmósfera	Calor latente Calor sensible Radiación de onda larga Radiación de onda corta Condiciones atmosféricas de temperatura, humedad y cobertura del cielo
	Condiciones de contorno	Series de tiempo de temperatura y salinidad respaldadas por mediciones.
Transporte de sedimentos	Nº de fracciones	2 (una fracción sedimentable y otra coloidal)
	Nº de capas de fondo	1
	Velocidad de caída por fracción	1.2e-5 (sedimentables) y 3.0e-8 (coloides)
	Deposición, tensión crítica	0.076 N/m^2
	Coeficiente de erosión	Inactivo
	Erosión, tensión crítica	No se permite la erosión de los sedimentos del fondo, pero si la resuspensión
	Densidad de la capa del fondo	600 kg/m^3
	Dispersión horizontal	Variables entre 0.001 y 0.1 m^2/s
	Dispersión vertical	Variables entre 0.0001 y 0.01 m^2/s
	Condiciones de contorno	Concentraciones de sedimentos variables en el tiempo en base a las mediciones realizadas en el río Santa Cruz (Figura 7.18.3) y en río Chico (Figura 7.17.2)

Tabla 8.3.1 Características de la rugosidad empleada en la modelación



Las condiciones de niveles del mar y corrientes utilizadas para inicializar el modelo hidrodinámico MIKE 3 fueron de 0 para todo el dominio. Respecto a las condiciones de borde en los ríos, MIKE 3 permite incorporar, caudales, niveles o ambos, esta última condición requiere de datos coherentes para no generar inestabilidades. Para el río Santa Cruz y Chico se contó con información de caudal y se buscó ajustar los niveles en puntos cercanos a los bordes. Para ello se utilizó una rugosidad de 0.001 m en la zona del borde aguas arriba de Piedra Buena.

Respecto a los campos iniciales de temperatura y salinidad, MIKE 3 corrió condiciones constantes en todo el dominio y se dejó evolucionar el modelo para establecer una condición estable en el tiempo en la que agua del estuario comenzó a mostrar variaciones periódicas de salinidad como las registradas por los equipos. No se consideró período de "soft start" para estas variables. Se requirió de cierto tiempo para lograr una condición de equilibrio dinámico entre el estuario y el mar, este periodo además es variable en función del mes utilizado para la simulación, ya que el caudal del río Santa Cruz define este tiempo. Cuanto mayor sea el caudal el equilibrio se alcanza antes.

En el dominio horizontal se pueden utilizar coordenadas cartesianas y esféricas. La superficie libre se tiene en cuenta utilizando un enfoque de transformación de coordenadas sigma. La discretización espacial de las ecuaciones primitivas se realiza utilizando un método de volumen finito centrado en la celda. El dominio espacial es discretizado por subdivisión del continuo en elementos / celdas que no se superponen. En el plano horizontal se utiliza una grilla no estructurada mientras que en el dominio vertical se utiliza una discretización estructurada. Los elementos pueden ser “prismas” o “ladrillos” cuyas caras horizontales son triángulos y elementos cuadriláteros, respectivamente. Para la integración en el tiempo se utiliza un enfoque semi-implícito: los términos horizontales se tratan explícitamente y los verticales implícitamente.

Los intervalos de tiempo discretos generales (overall) especificados se utilizan para determinar la frecuencia con la que se pueden obtener resultados de los diferentes módulos y para sincronizar el acoplamiento entre ellos.

Los intervalos de tiempo para los cálculos hidrodinámicos, de advección-dispersión y de transporte de sedimentos son dinámicos y se determinan individualmente para satisfacer los criterios de estabilidad.

Todos los intervalos de tiempo dentro de la simulación para los distintos módulos se sincronizan con el intervalo de tiempo discreto general. El intervalo de tiempo para los cálculos hidrodinámicos se sincroniza con el intervalo de tiempo para los cálculos de advección/dispersión. Para el módulo de Transporte de Sedimentos el intervalo de tiempo para actualizar la descripción del proceso puede ser un múltiplo del intervalo de tiempo general.

Debido a la restricción de estabilidad al usar un esquema explícito, el intervalo de tiempo debe seleccionarse de modo que el número CFL sea menor que 1. En el cálculo de las ecuaciones se utiliza un intervalo de tiempo variable, determinado para que el número CFL sea menor que un número CFL crítico en todos los nodos computacionales. El número CFL para las ecuaciones de transporte suele ser menos restrictivo que el número CFL para las ecuaciones de aguas someras. Por lo tanto, normalmente se utiliza un intervalo de tiempo mayor para las ecuaciones de transporte que para las ecuaciones de aguas someras. Para controlar el intervalo de tiempo, se especifica un intervalo de tiempo

mínimo y uno máximo. El intervalo de tiempo para las ecuaciones de transporte se sincroniza para que coincida con el intervalo de tiempo general, y el intervalo de tiempo para las ecuaciones de aguas someras se sincroniza para que coincida con el intervalo de tiempo de las ecuaciones de transporte.

En este caso se utilizó un paso temporal de 60 s (overall) y para los pasos variables el mínimo fue de 0.2 s, con un CFL máximo permitido de 0.8.

Bordes de Temperatura y Salinidad: Modelo de escala global HYCOM (Temperatura y salinidad variable en tiempo y la vertical extraídos del modelo global HYCOM)

EL modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) requiere de datos de temperatura y salinidad para imponer en los contornos. Se utilizó el modelo global HYCOM para obtener estos datos e imponerlos como condición de contorno. La cobertura espacial de la grilla del MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) es pequeña para observar variaciones de temperatura y salinidad entre los diferentes contornos marinos del dominio y la grilla del HYCOM es relativamente grosera, por lo que se utiliza un solo punto de HYCOM para extraer esta información.

HYCOM en un consorcio multi-institucional estadounidense que forma parte del GODAE (U.S. Global Ocean Data Assimilation Experiment). El producto utilizado fue el GOFS 3.1 (Global Ocean Forecast System), que consiste en la combinación entre el sistema NCODA (Navy Coupled Ocean Data Assimilation) y el modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model).

El NCODA es un sistema de asimilación de datos realizado por el NRL (Naval Research Laboratory) de EE. UU., que realiza un análisis de las variables temperatura, salinidad, geopotencial y velocidad del océano. Asimila datos satelitales, de altímetros, y también datos in situ, y realiza una interpolación de dichos datos para el océano, estimando las incertezas en las aproximaciones realizadas.

El HYCOM es un modelo que resuelve las ecuaciones de continuidad, movimiento, difusión y calor para el océano mediante un sistema de coordenadas híbrido, que combina coordenadas isopícnicas para el océano interior, con la coordenada z para aguas cercanas a superficie, y con coordenadas sigma (que siguen el fondo) para zonas costeras.

Para resolver las ecuaciones el modelo utiliza una grilla Mercator, la batimetría GLBa 0.08, y como forzante atmosférico el NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System).

Se han extraído los datos de temperatura y salinidad del modelo HYCOM para las profundidades de 0 m,10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m y 70 m, entre noviembre de 2017 y mayo de 2019 (período requerido para la calibración del modelo hidrodinámico). La Figura 8.3.2 presenta las series de tiempo de temperaturas para las diferentes profundidades y la Figura 8.3.3 las salinidades correspondientes.

Figura 8.3.2 Temperaturas del agua de mar producto del modelo global HYCOM para las 8 profundidades.

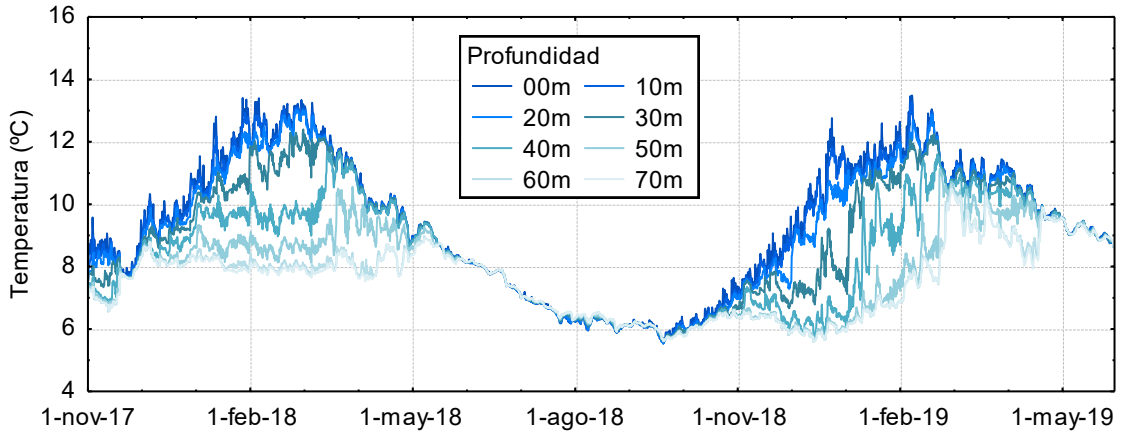
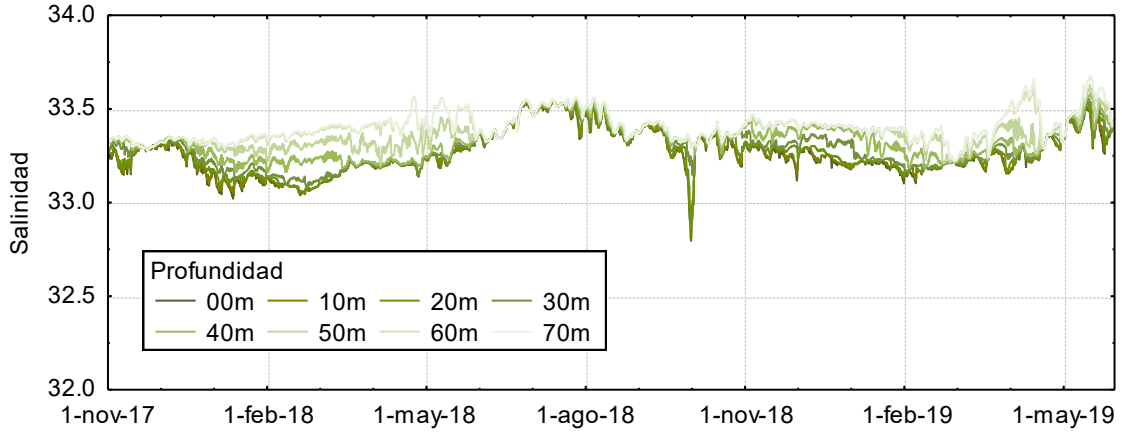


Figura 8.3.3 Salinidades del agua de mar producto del modelo global HYCOM para las 8 profundidades.



En la Figura 8.3.2 es posible observar como en los meses de mayor temperatura (entre noviembre y mayo) el agua de mar se estratifica, generando una importante variación de la temperatura en la columna de agua. En el resto de los meses cuando el agua superficial

se enfría, se hace más densa, genera mezcla vertical y homogeniza la temperatura de la columna de agua. La salinidad acompaña este fenómeno.

Por otro lado, se han obtenido datos de la temperatura y salinidad de la WOD18 (World Ocean Database 2018 - https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database de la NOAA) para compararlos con los resultados del HYCOM. Para obtener algunos datos que muestren rasgos de la región se ha extraído un sector relativamente grande entre 49.5°S – 51°S y 67.5°W – 69°W. Las Figuras 8.3.4 y 8.3.5 muestran los valores de temperatura y salinidad obtenidos de la base de datos WOD18, ordenados mensualmente. No se discrimina la profundidad a la cual fueron tomados los datos.

Figura 8.3.4 Rango de temperaturas del agua y valores medios mensuales interpolados de la base de datos WOD18

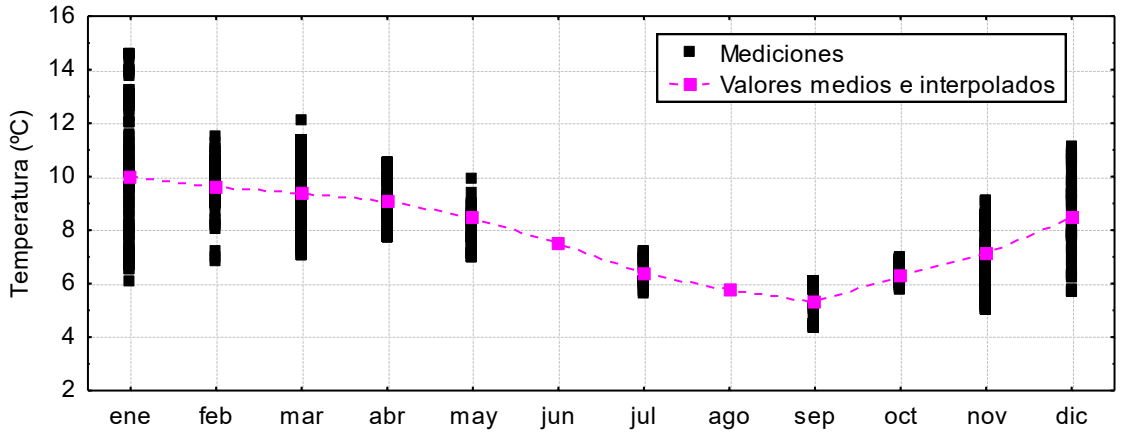
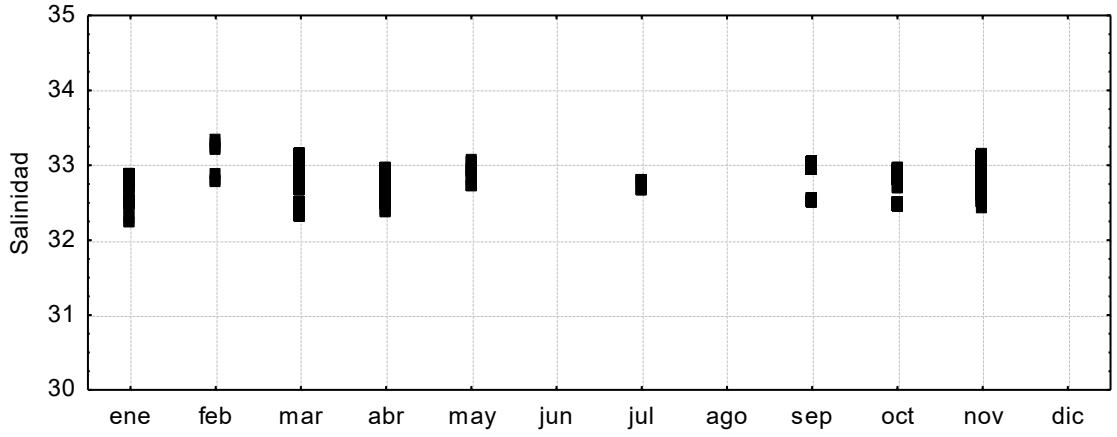


Figura 8.3.5 Rango de valores de salinidad de la base de datos WOD18



Las Figuras 8.3.6 y 8.3.7 muestran la comparación entre las mediciones de la WOD18 y los resultados de modelo. Las temperaturas del HYCOM muestran una muy buena representación de las mediciones. Respecto a la salinidad, el HYCOM subestima a las

mediciones de la WOD 18. De todas maneras, para la calibración del modelo se encontró que las salinidades del HYCOM fueron adecuadas para estimar el comportamiento de la de esta variable en el estuario. No es objeto de esta tesis investigar la calidad de las mediciones disponibles, pero debe decirse que estos datos son pocos para una comparación robusta.

Figura 8.3.6 Comparación entre las mediciones de temperatura de la WOD18 y los resultados de modelo HYCOM

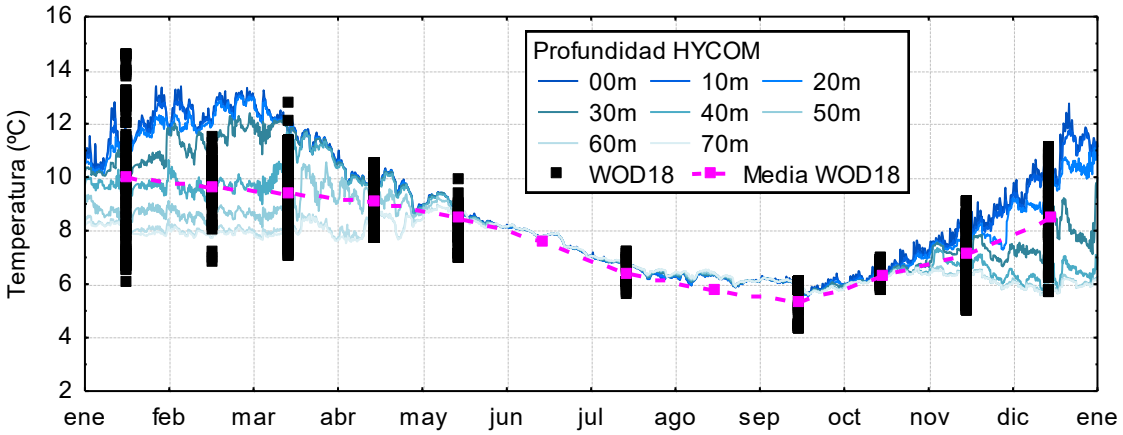
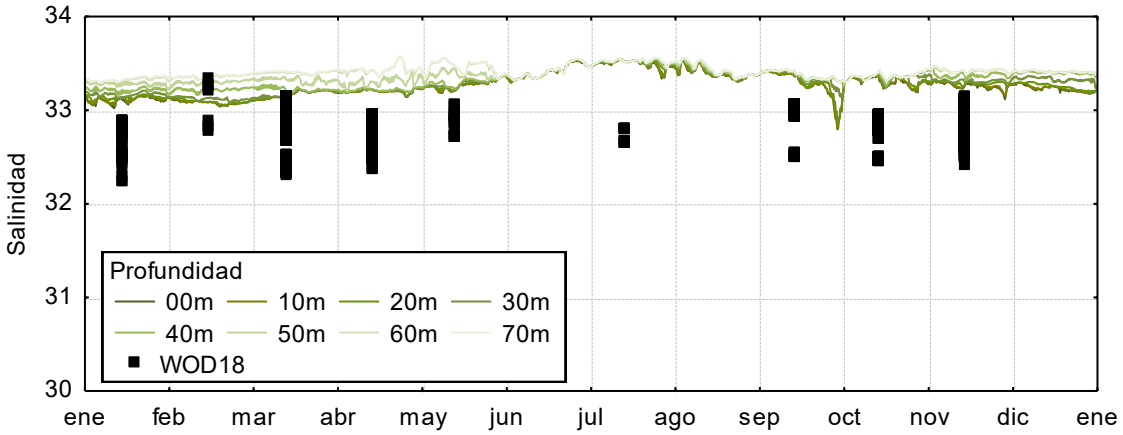


Figura 8.3.7 Comparación entre las mediciones de salinidad de la WOD18 y los resultados de modelo HYCOM



Coeficientes y formulaciones asociadas al intercambio con la atmósfera

En las simulaciones, MIKE 3 Flow Model FM funcionó de modo baroclínico, incluyendo en sus cálculos el módulo de transporte de temperatura y salinidad disponible en su formulación. Fue necesario para mejorar los ajustes verticales de los datos de temperatura a los resultados del modelo (y eso probablemente haya incidido en el resto de las variables) la incorporación de intercambio de calor con la atmósfera. A

continuación, se presentan los coeficientes utilizados para las simulaciones que no fueron modificados de los sugeridos por el DHI.

Calor latente. El proceso de calor latente se refiere a la pérdida de energía debida a la evaporación. Para el flujo de calor latente es necesario especificar la constante de la ley de Dalton y el coeficiente de viento de la ley de Dalton, respectivamente. La velocidad crítica del viento es la velocidad mínima del viento utilizada en el cálculo del flujo de calor latente.

- Constante de la ley de Dalton: 0.5
- Coeficiente de viento de la ley de Dalton: 0.9
- Velocidad crítica del viento: 2 m/s

Calor sensible. El proceso de calor sensible se refiere a la transferencia de calor por convección entre el agua y la atmósfera. Para el flujo de calor sensible es necesario especificar el coeficiente de transferencia para calentamiento y enfriamiento. La velocidad crítica del viento es la velocidad mínima del viento utilizada en el cálculo del flujo de calor sensible.

- Coeficiente de transferencia de calentamiento: 0.0033
- Coeficiente de transferencia de enfriamiento: 0.0033
- Velocidad crítica del viento: 2 m/s

Radiación de onda corta. La radiación de onda corta puede formularse de tres maneras:

- Empírica
- Radiación solar especificada
- Radiación de onda corta neta especificada

La penetración de onda corta depende de la visibilidad. Se especifica mediante el parámetro «Coeficiente de extinción de la luz». También se puede especificar un coeficiente de intercambio, que se especifica como «Beta en la ley de Beer». Para el caso del Estuario del RSC se utilizó la formulación Empírica, que requiere de las constantes

solares a y b en la ley de Ångstrøm, el meridiano estándar local para la zona y el desplazamiento horario (si el horario de verano es efectivo).

- a en la ley de Ångstrøm: 0.295
- b en la ley de Ångstrøm: 0.371
- Coeficiente de extinción de la luz: 1
- Beta en la ley de Beer: 0.3
- meridiano estándar local = -45

Radiación de onda corta. La radiación de onda larga puede formularse de tres maneras:

- Empírica
- Radiación atmosférica especificada
- Radiación de onda larga especificada

Se utilizó la formulación empírica que no requiere de ninguna información por parte del operador.

Condiciones atmosféricas. Para el uso de las formulaciones empíricas del intercambio de calor por radiación de ondas cortas y largas debe especificarse la temperatura del aire, la humedad relativa y un coeficiente de claridad porcentual. Un coeficiente de claridad del 100% corresponde a un cielo totalmente despejado y un 0% a un cielo completamente nublado. Se utilizaron series de tiempo de estas variables que fueron presentadas antes en puntos 7.1, 7.4 y 7.5 de este informe.

8.4. Niveles del mar y corrientes en Estación Mar y Estuario 2

Series de tiempo

Esta parte trata sobre la calibración del MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR), esto es la comparación entre los valores medidos del nivel del mar y el campo de corrientes, y los calculados por el modelo.

La amplitud media de la marea en esta región es algo mayor a los 10 m, por lo tanto, el nivel del mar aumenta unos 10 m en 6 horas (tiempo aproximado entre la bajamar y la

pleamar). Es por esta razón que las corrientes son muy intensas, con velocidades en superficie que superan 1.5 m/s. Este vigoroso flujo de agua que ingresa y egresa promueve cambios continuos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del estuario.

Como se ha presentado, se han realizado diferentes estudios de campo en el que se han realizados mediciones de niveles del mar y río, corrientes, temperatura, salinidad y turbidez. En este caso, los datos de las estaciones Mar y Estuario, (ver posiciones en la Figura 2.5) fueron utilizados para la calibración del modelo. A continuación, se presentan una serie de figuras con las comparaciones entre los datos y resultados del modelo.

Mareas en el estuario

Las Figuras 8.4.1 y 8.4.2 muestran la comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) para las estaciones Mar y Estuario 2, respectivamente. Se puede ver que el modelo representa muy bien las variaciones del nivel del mar para el período de medición. La ventaja de disponer de una fuerza dominante como las mareas de gran amplitud, cuyas características son perfectamente predichas dado su origen astronómico, es que asegura que el modelo simulará los niveles del mar dentro del estuario con gran precisión más allá del período de medición.

Figura 8.4.1 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar

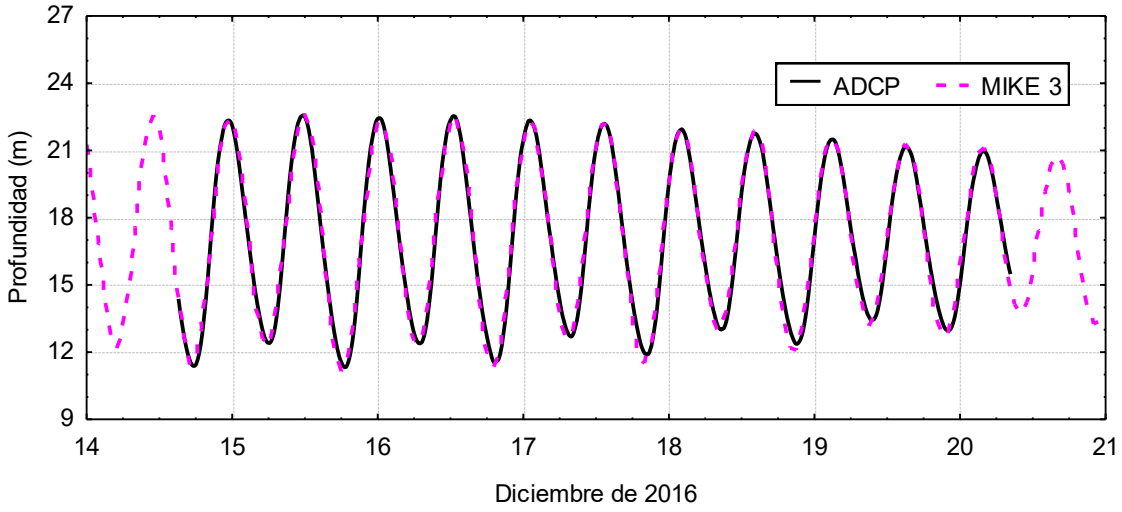
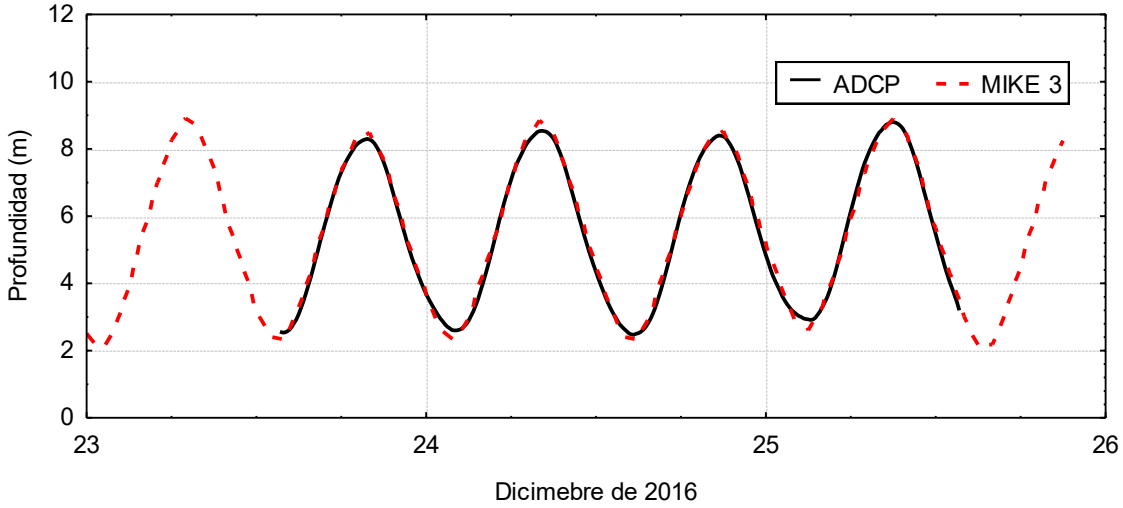


Figura 8.4.2 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Estuario 2



Mareas en Isla Pavón y en Estación S6

Durante marzo de 2017 se realizaron mediciones de niveles del río Santa Cruz para algunos días en las estaciones Isla Pavón y S6 (ver figura 8.4.3). Si bien estas mediciones son de corto tiempo, permiten sumar un punto de medición al análisis del funcionamiento del modelo.

Se corrió el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) durante marzo de 2017 y se compararon los resultados con los niveles medidos. Estas comparaciones permitieron ajustar los coeficientes de rugosidad de fondo en el río Santa Cruz. La Figura 8.4.4 presenta la comparación entre las mediciones y los resultados del modelo. Como en las estaciones Mar y Estuario 2, el ajuste alcanzado en Isla Pavón y S6 es muy bueno, tanto en nivel como en la amplitud y fase de las variaciones de nivel.

Figura 8.4.3 Posiciones de las estaciones de medición Isla Pavón y Estación 6.

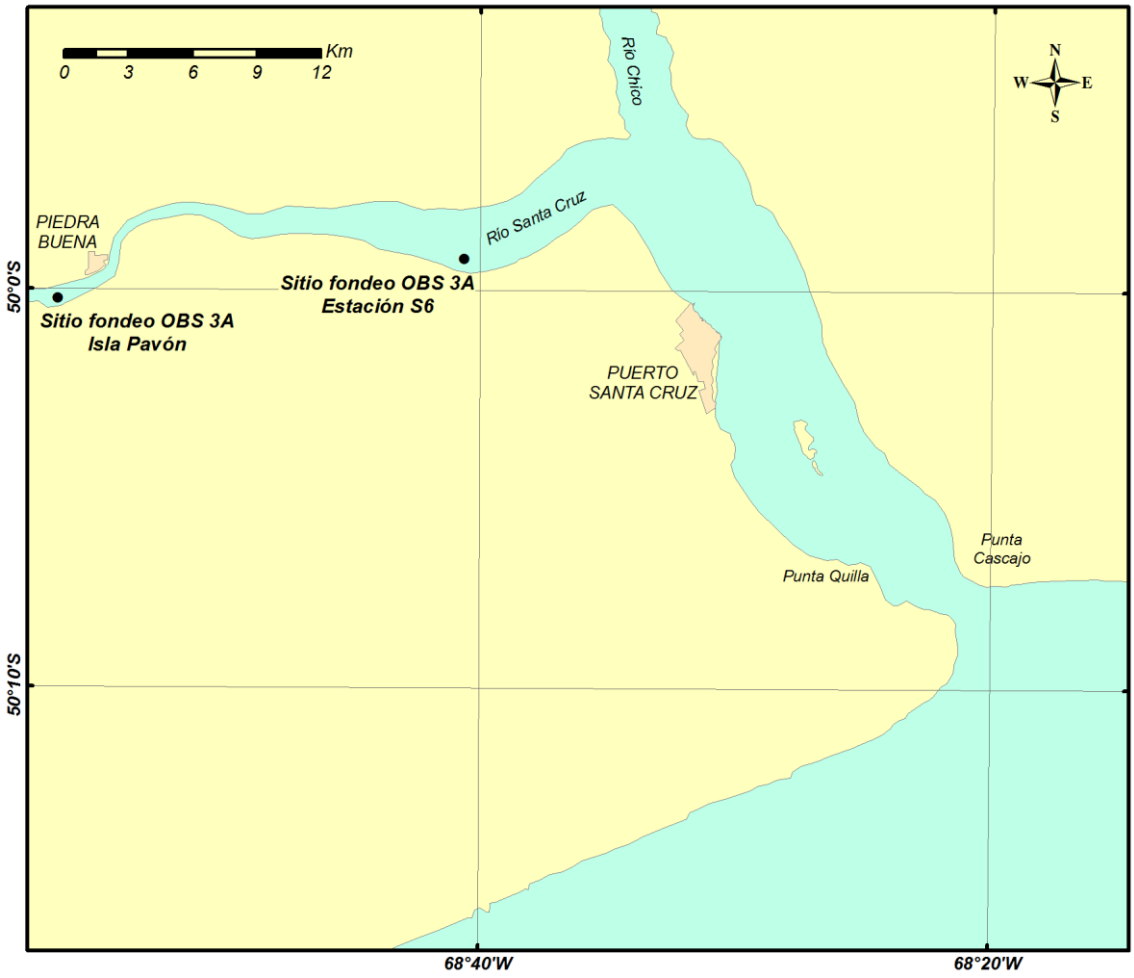
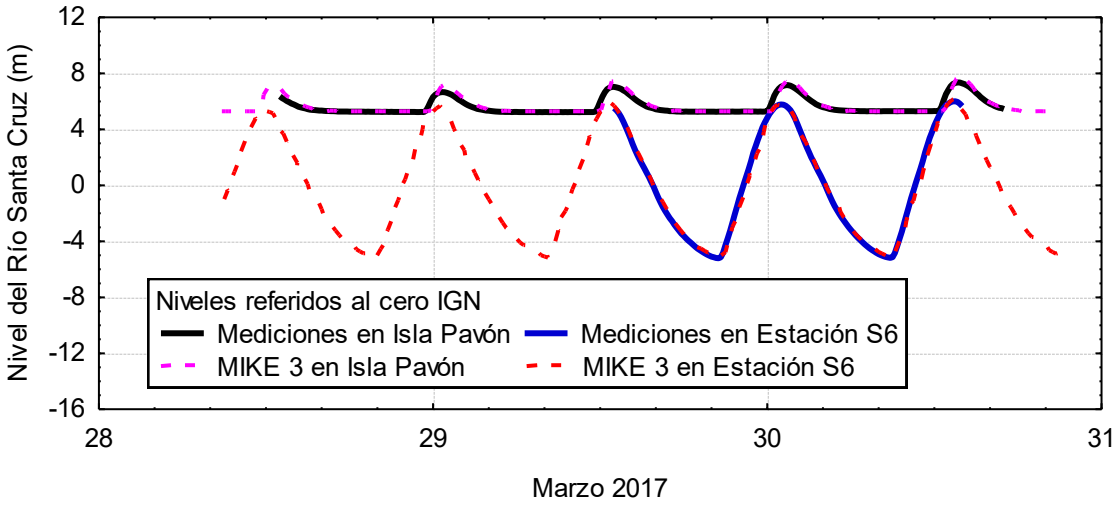


Figura 8.4.4 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Isla Pavón y S6.



Corrientes en estación Mar y Estuario 2

Las Figuras 8.4.5 a 8.4.8 muestran comparaciones entre las componentes de la velocidad medida y aquella calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) para la Estación Mar (ver Figura 2.5).

La Figura 8.4.8 muestra la comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar, en una capa ubicada a 14.5 m, sobre el fondo. En este caso, puede verse que los datos se cortan, esto es, se interrumpe la serie porque en bajante la columna cuenta con menos agua de los 14.5 m.

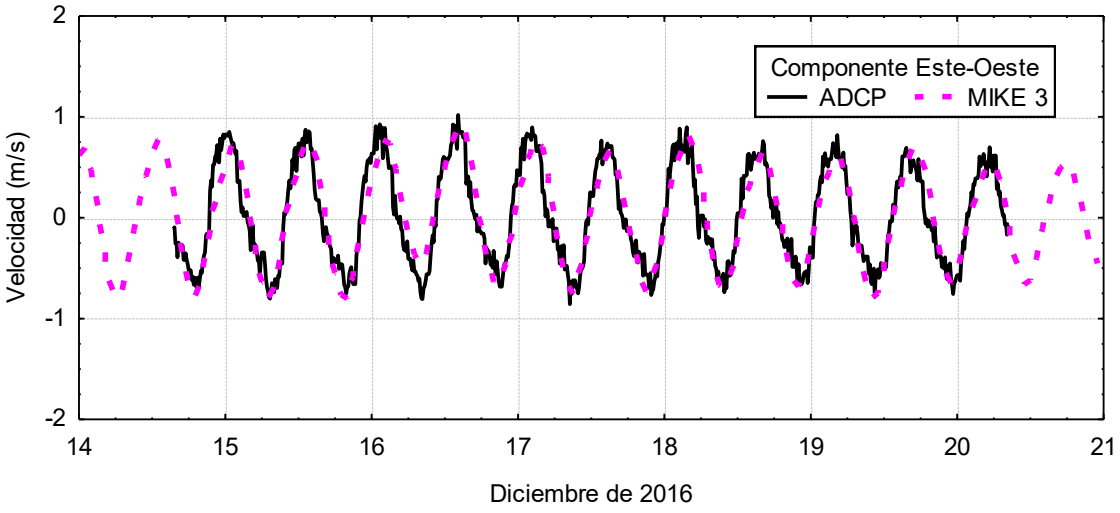
Dado que las corrientes dominantes son las corrientes de marea, es esperable que las corrientes medidas y las calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) tengan una muy buena correlación, tanto cerca de la boca del estuario (Estación Mar) como dentro del estuario (Estación Estuario 2). En el caso de las corrientes puede verse que la correlación entre las mediciones y los cálculos se satisfacen tanto en la magnitud de las corrientes como en su fase, para todas las profundidades. Las Figuras 8.4.9 a 8.4.12 muestran comparaciones entre las componentes de la velocidad medida y aquella calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) para la Estación Estuario 2. En este caso, las velocidades de las corrientes son de menor magnitud que en la estación Mar. Las correlaciones entre velocidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) son muy buenas según indican los coeficientes de correlación. La Tabla 8.4.1 resume los valores de los coeficientes de correlación para las distintas comparaciones, que resultan satisfactorios y permite considerar calibrado el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD).

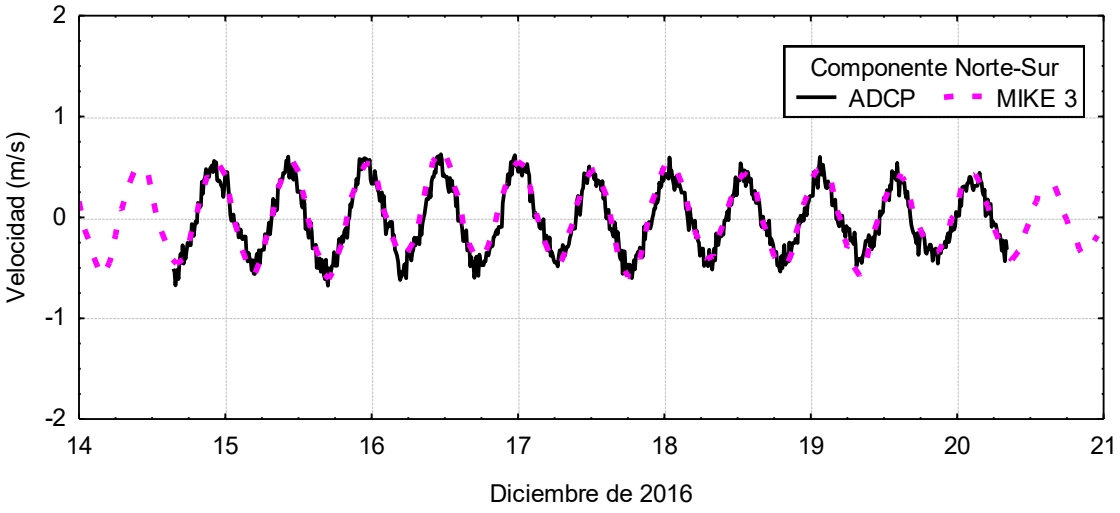
Tabla 8.4.1 Valores de los coeficientes de correlación para las distintas comparaciones de las componentes de velocidad

Estación	Componente	Distancia desde el fondo (m)	Coeficiente de correlación, r
Mar	E-W	2.5	0.94
	N-S	2.5	0.96
	E-W	6.5	0.96
	N-S	6.5	0.98
	E-W	10.5	0.95
	N-S	10.5	0.97
	E-W	14.5	0.91
	N-S	14.5	0.96
Estuario 2	E-W	1.25	0.94
	N-S	1.25	0.93
	E-W	2.25	0.99
	N-S	2.25	0.93
	E-W	3.25	0.98
	N-S	3.25	0.97
	E-W	5.25	0.98
	N-S	5.25	0.98

Puede verse que las series de tiempo de comparación de velocidades de las diferentes capas utilizadas presentan períodos en los que no hay datos. Este efecto corresponde a que la comparación se realiza para una profundidad constante. Por lo tanto, el nivel al que se realiza la comparación puede quedar fuera del agua cuando el pelo de agua se encuentra por debajo de este nivel. Este efecto es muy notable para estas simulaciones debido a la importante variación de niveles que impone la marea. Lo interesante es que el modelo y las mediciones son coherentes en los períodos sin agua, como puede verse en todas las figuras. Vale la pena aclarar que resultaría confuso realizar una comparación de velocidades asociadas a diferentes niveles de la columna de agua (típicamente: superficie, media agua y fondo), ya que, en zonas de escasa profundidad con una importante variación de nivel del agua, estas capas son de cuestionable definición y carecen de sentido físico. Por ejemplo, para la Estación Estuario 2, que posee una profundidad de la columna de agua de 2 m en la bajamar y 9 m en la pleamar, es muy poco útil definir que es superficie y que es fondo. Por lo que se utilizan profundidades constantes para realizar las comparaciones de las velocidades.

Figura 8.4.5 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar, a 2.5, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.





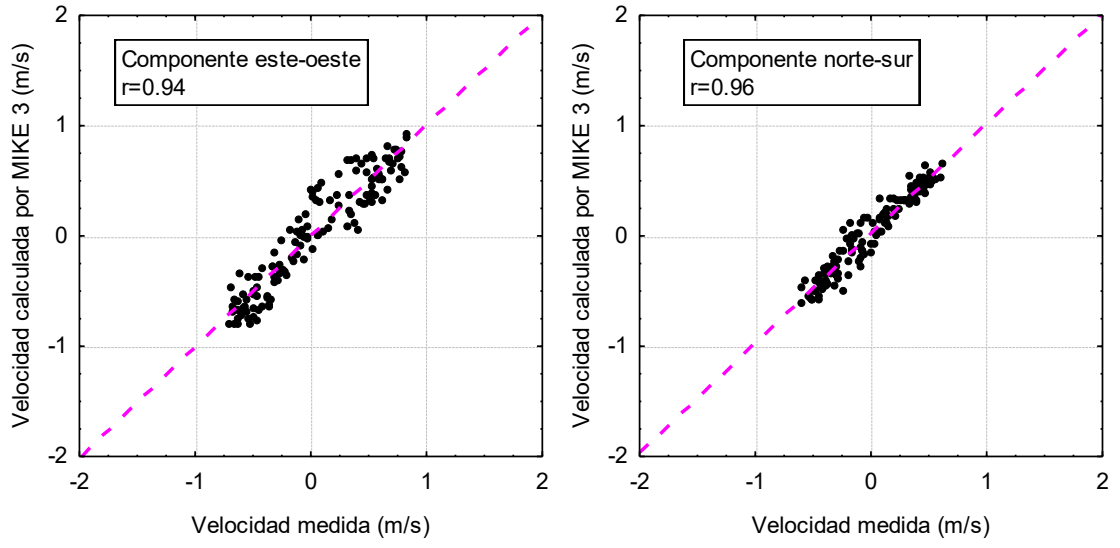
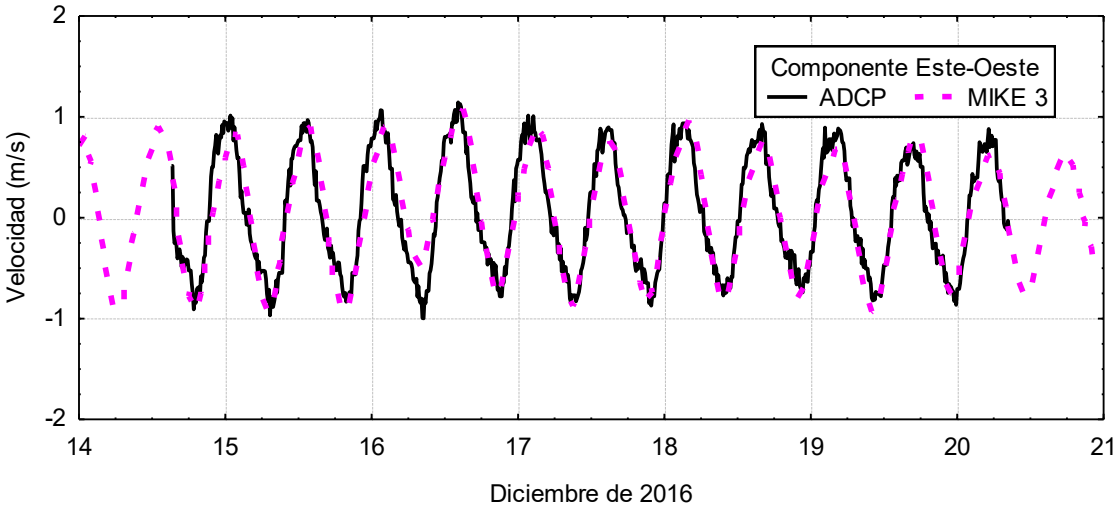
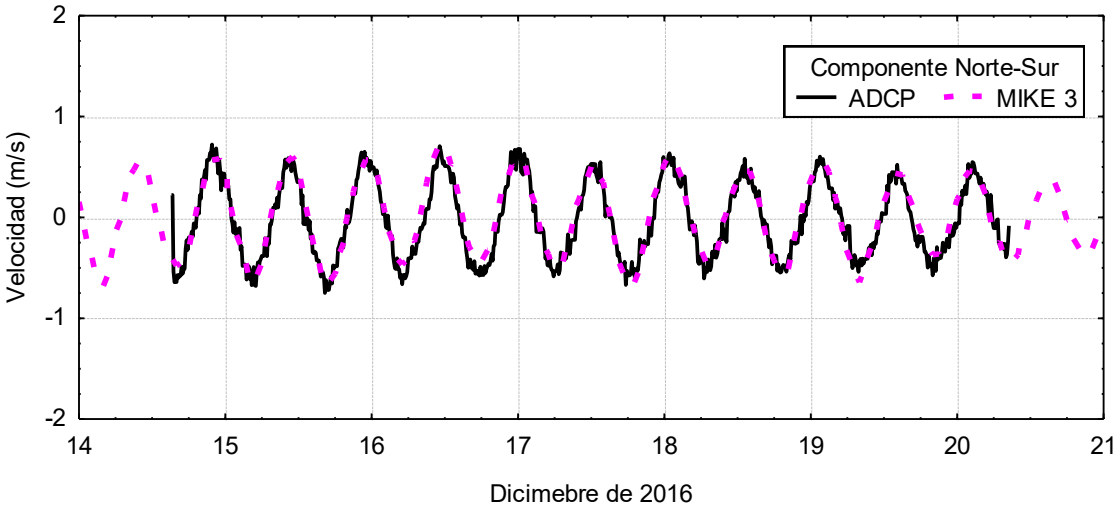


Figura 8.4.6 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar, a 6.5, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.





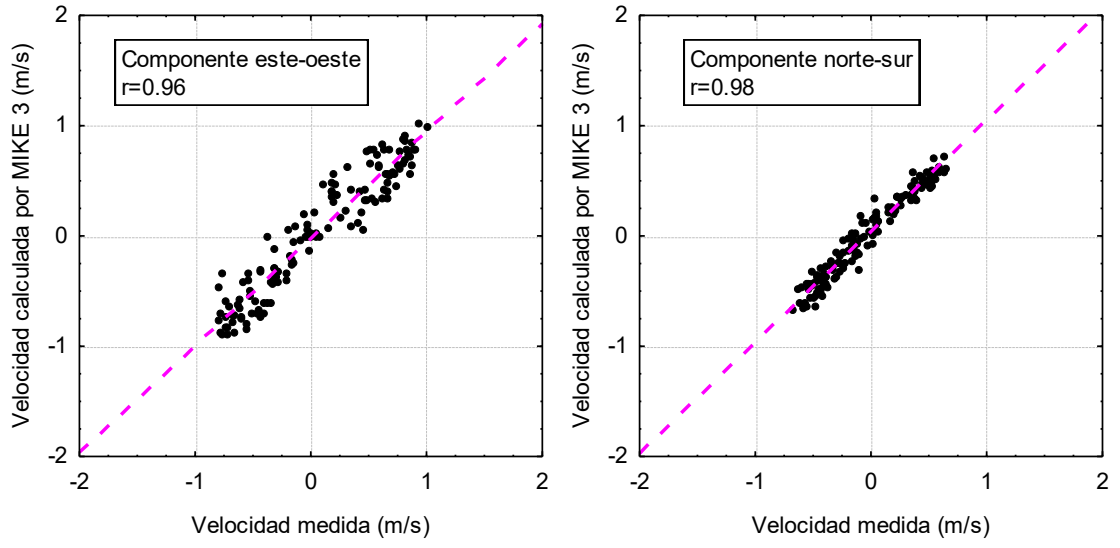
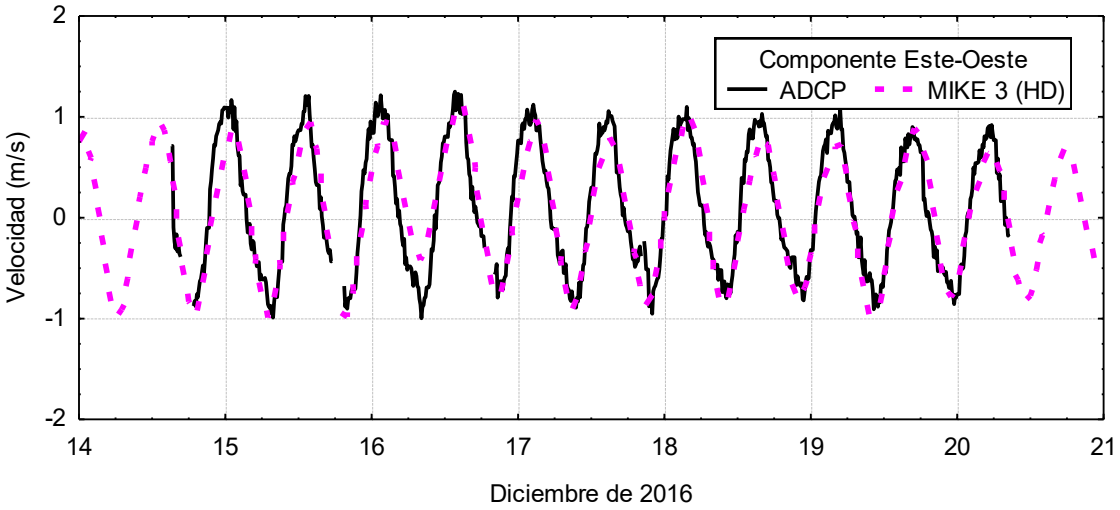
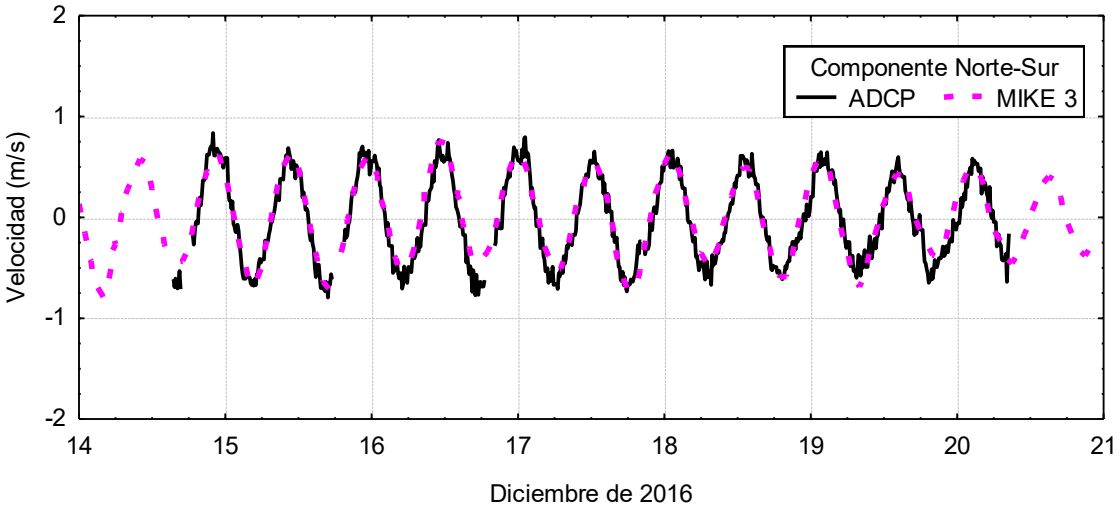


Figura 8.4.7 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar, a 10.5, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.





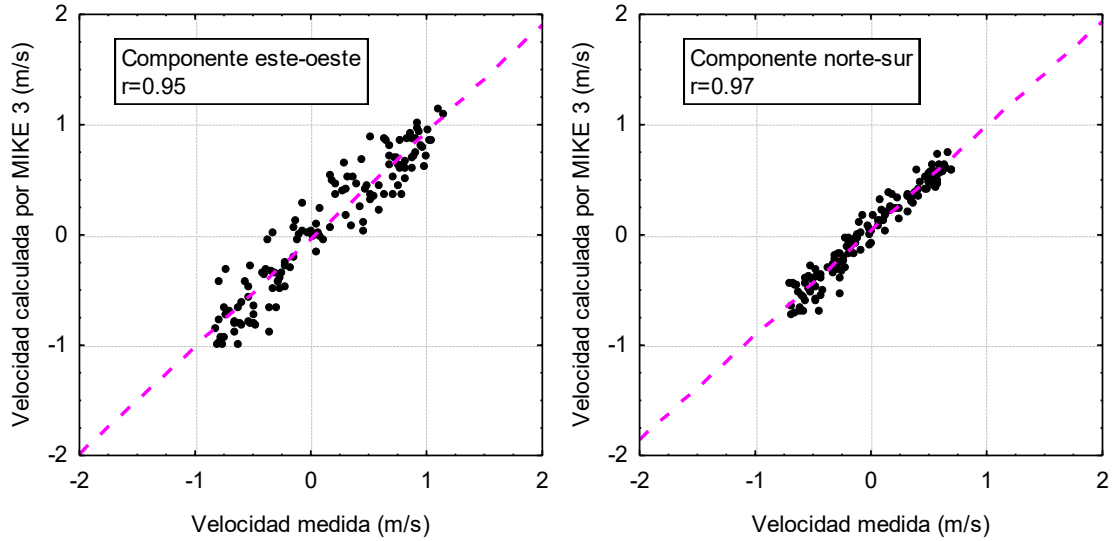
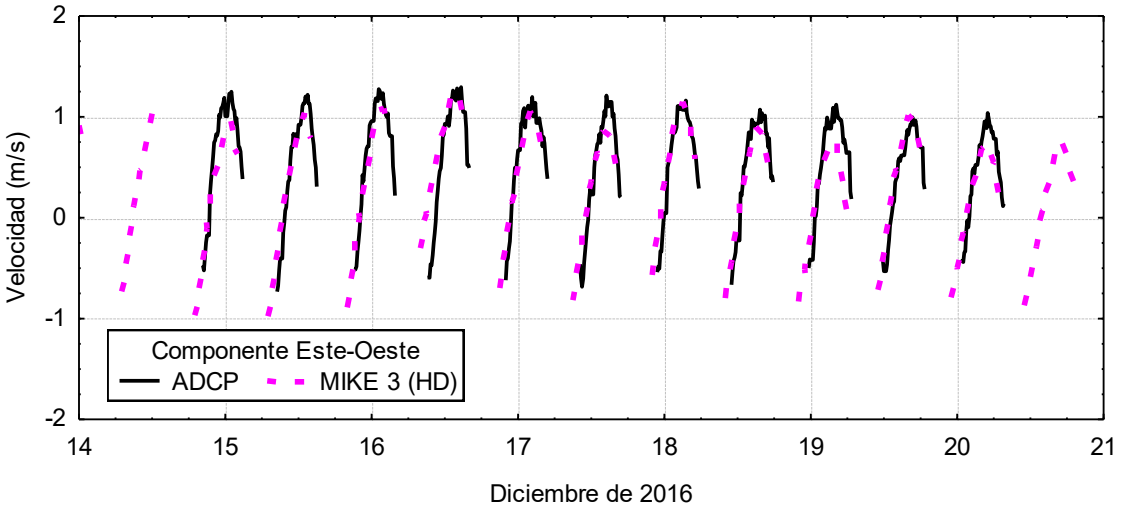
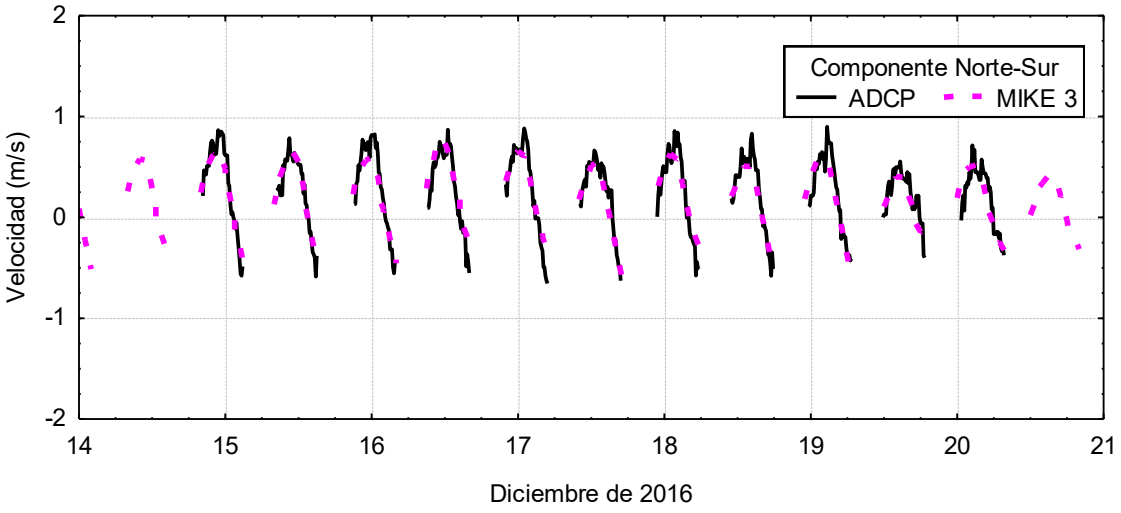


Figura 8.4.8 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Mar, a 14.5, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.





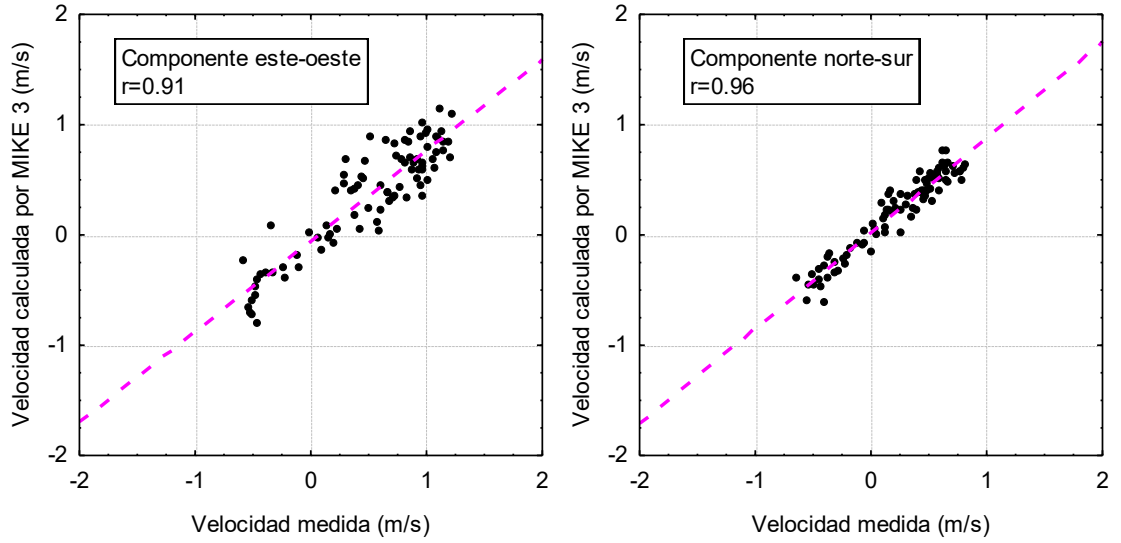
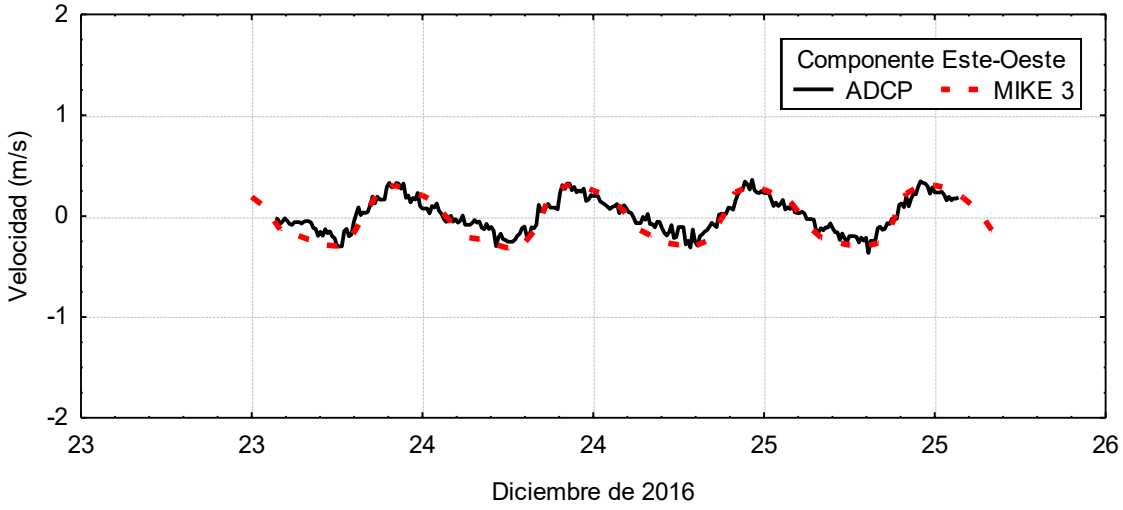
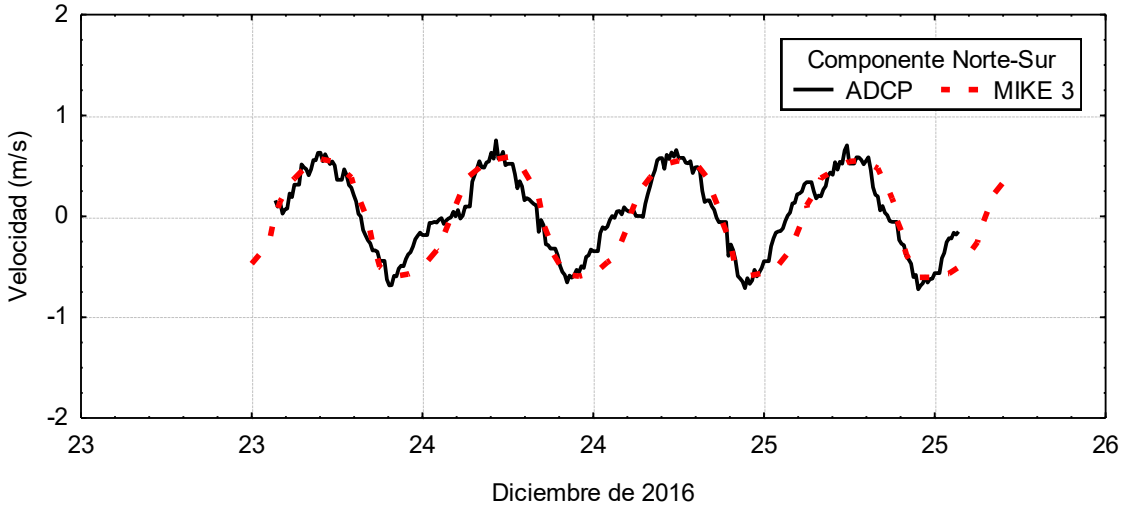


Figura 8.4.9 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estuario 2, a 1.25, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.





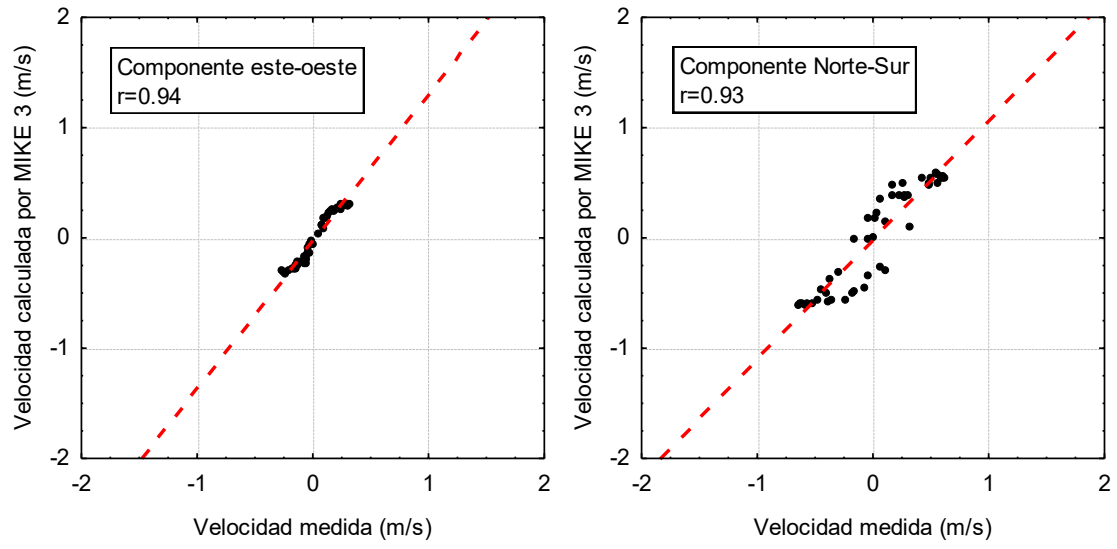


Figura 8.4.10 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Estuario 2, a 2.25, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.

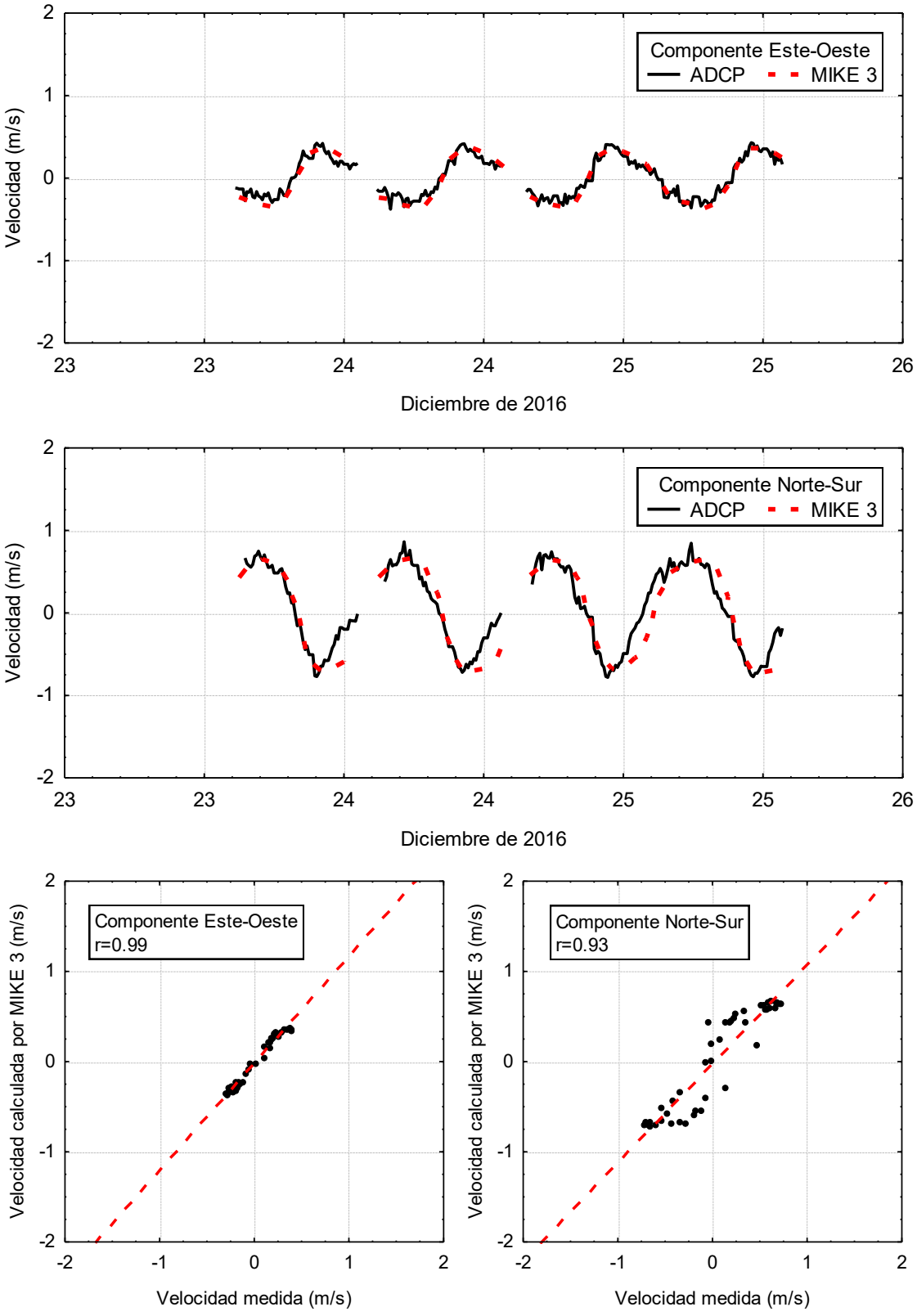


Figura 8.4.11 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Estuario 2, a 3.25, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.

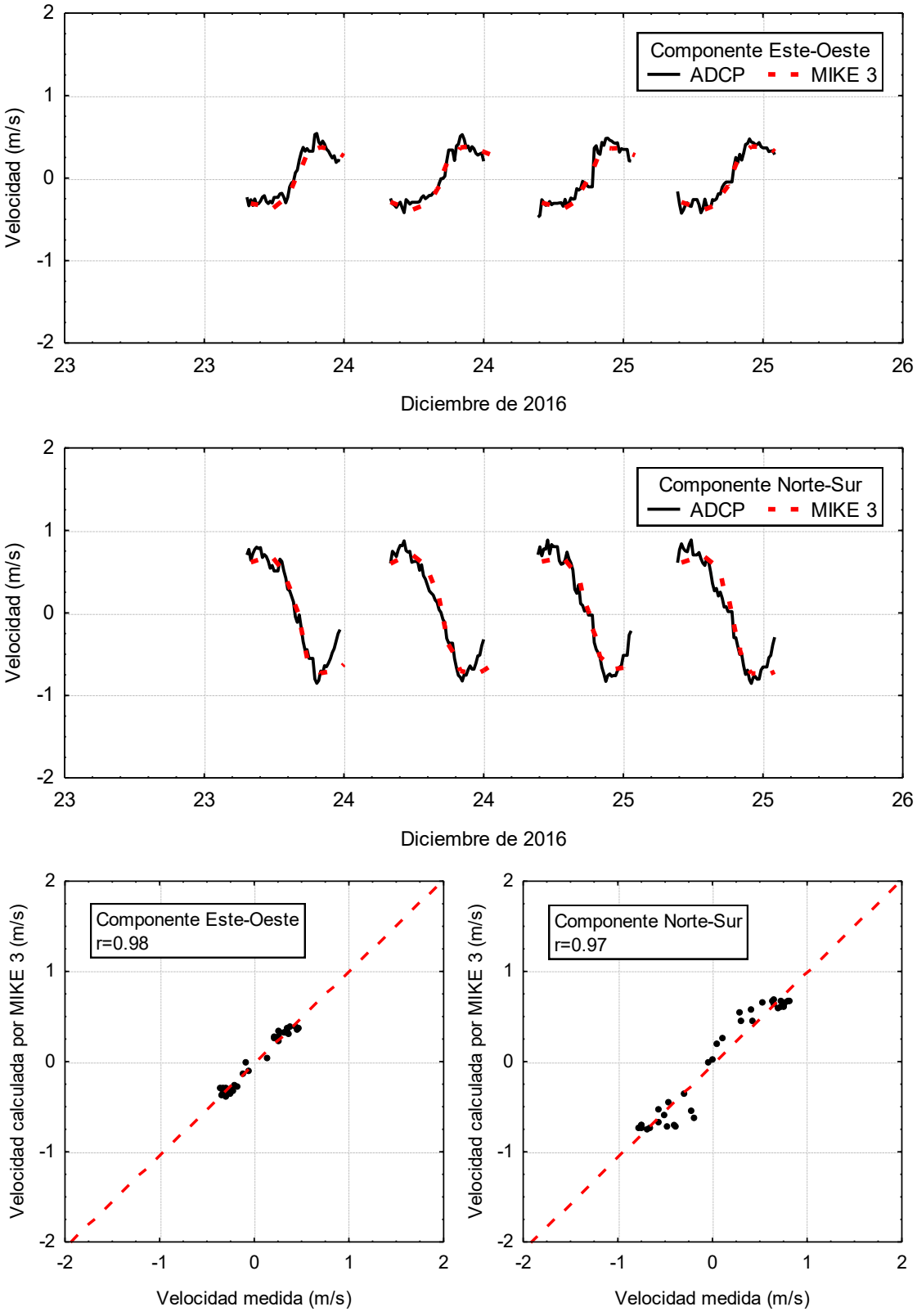
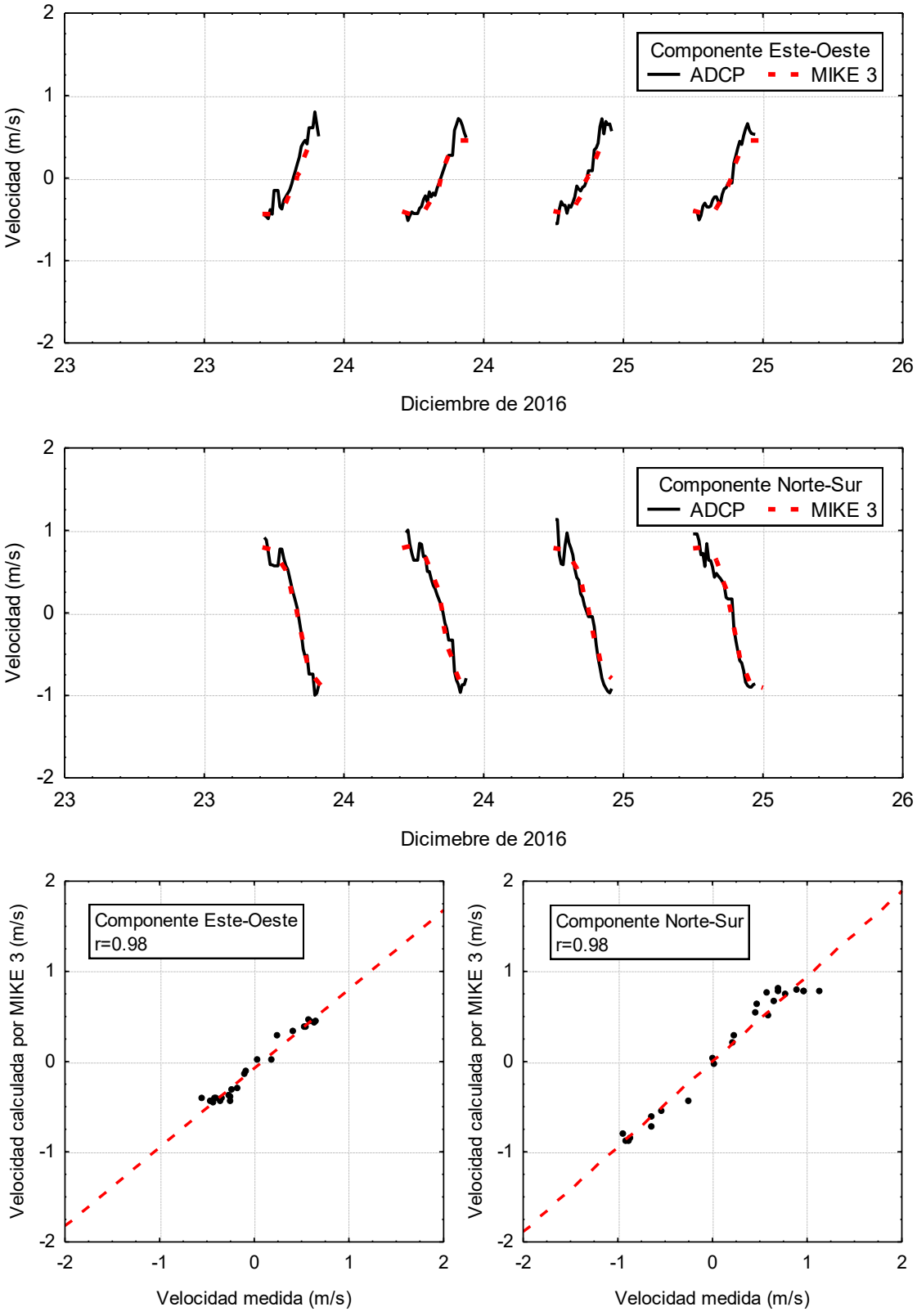


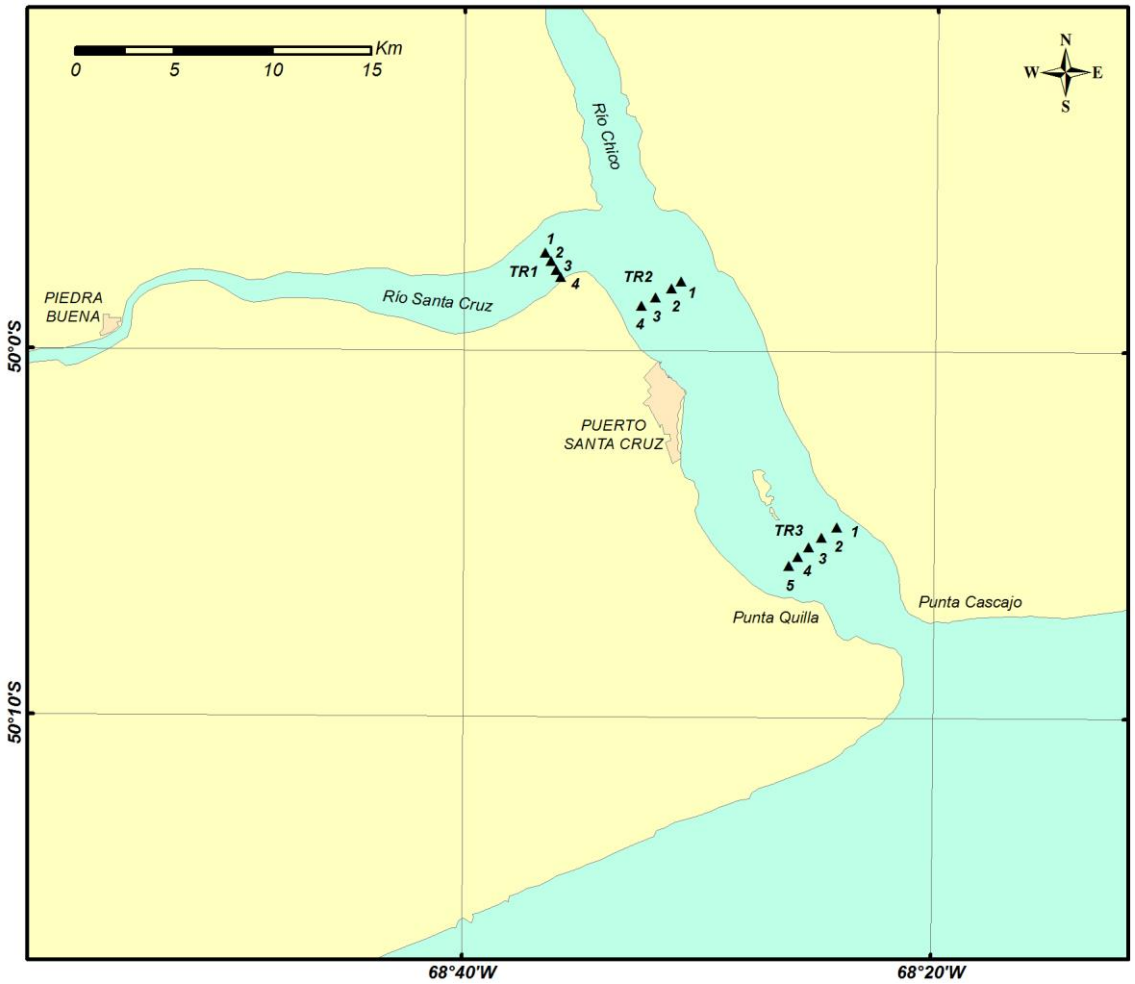
Figura 8.4.12 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la Estación Estuario 2, a 5.25, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.



Perfiles de corrientes en el estuario

El día 17 de diciembre de 2016 se midieron perfiles verticales de corrientes en 13 puntos, ubicados sobre 3 transectos, como se muestra en la Figura 8.4.12. Se usó el equipo ADCP AWAC de 1000 kHz de frecuencia acústica, por su superior resolución. Debido a las intensas corrientes, del orden de 3 a 3.5 m/s, y el mal tenedero para las anclas en esos fondos con cantos rodados, se adoptó la técnica de "posicionamiento dinámico" para conducir las mediciones. El patrón de la lancha mantuvo la posición con máquina adelante y proa a la corriente, haciendo coincidir en la pantalla del GPS el punto de posición con el punto de medición programado. Esta técnica resultó confiable y precisa.

Figura 8.4.12 Ubicaciones, sobre la imagen del estuario, de los transectos con estaciones de mediciones de corrientes con equipo AWAC ADCP de 1000 kHz.



Se utilizaron estos de perfiles instantáneos (mediciones en las transectos 1, 2 y 3) para compararlos con los resultados del modelo, en términos de las velocidades y direcciones de la corriente para las distintas capas. Para comparar los datos y los resultados de modelo, se extrajeron los perfiles más cercanos en espacio y tiempo a los perfiles medidos. La comparación se presenta en la Figura 8.4.13 (transecto TR 1), la Figura 8.4.14 (transecto TR 2) y la Figura 8.4.16 (transecto TR 3). Los valores de la velocidad media se presentan en la Tabla 8.4.2.

La correlación entre valores medidos y calculados se considera muy buena y coherente con las correlaciones encontradas para las series de tiempo.

*Tabla 8.4.2 Comparación entre las velocidades medias de los perfiles de velocidad medidos el día **17 de diciembre de 2016**, durante las primera campaña de ESSA en la región, y los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD).*

Estación	Hora	Velocidad media medida (m/s)	Velocidad media calculada (m/s)	Dirección media medida (º)	Dirección media calculada (º)
TR 1-1	15:38:34	1.1	1.1	67	60
TR 1-2	15:49:08	1.4	1.4	43	54
TR 1-3	16:27:07	1.3	1.3	39	53
TR 1-4	16:46:28	1.9	1.6	41	31
TR 2-1	12:33:11	0.8	0.8	292	307
TR 2-2	12:19:31	0.8	1.1	294	301
TR 2-3	12:01:47	1.8	1.7	322	299
TR 2-4	11:38:14	1.7	1.6	317	302
TR 3-1	18:34:28	0.8	0.9	131	133
TR 3-2	18:21:06	1.5	1.6	147	115
TR 3-3	18:11:25	1.1	1.2	159	116
TR 3-4	18:00:37	0.8	0.9	151	129
TR 3-5	17:41:46	1.1	1.2	118	137

Figura 8.4.13 Comparación entre los perfiles de velocidad registrados durante la campaña de diciembre de 2016 y los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD). Estaciones TR 1-1 (arriba izquierda), TR 1-2 (arriba derecha), TR 1-3 (abajo izquierda) y TR 1-4 (abajo derecha).

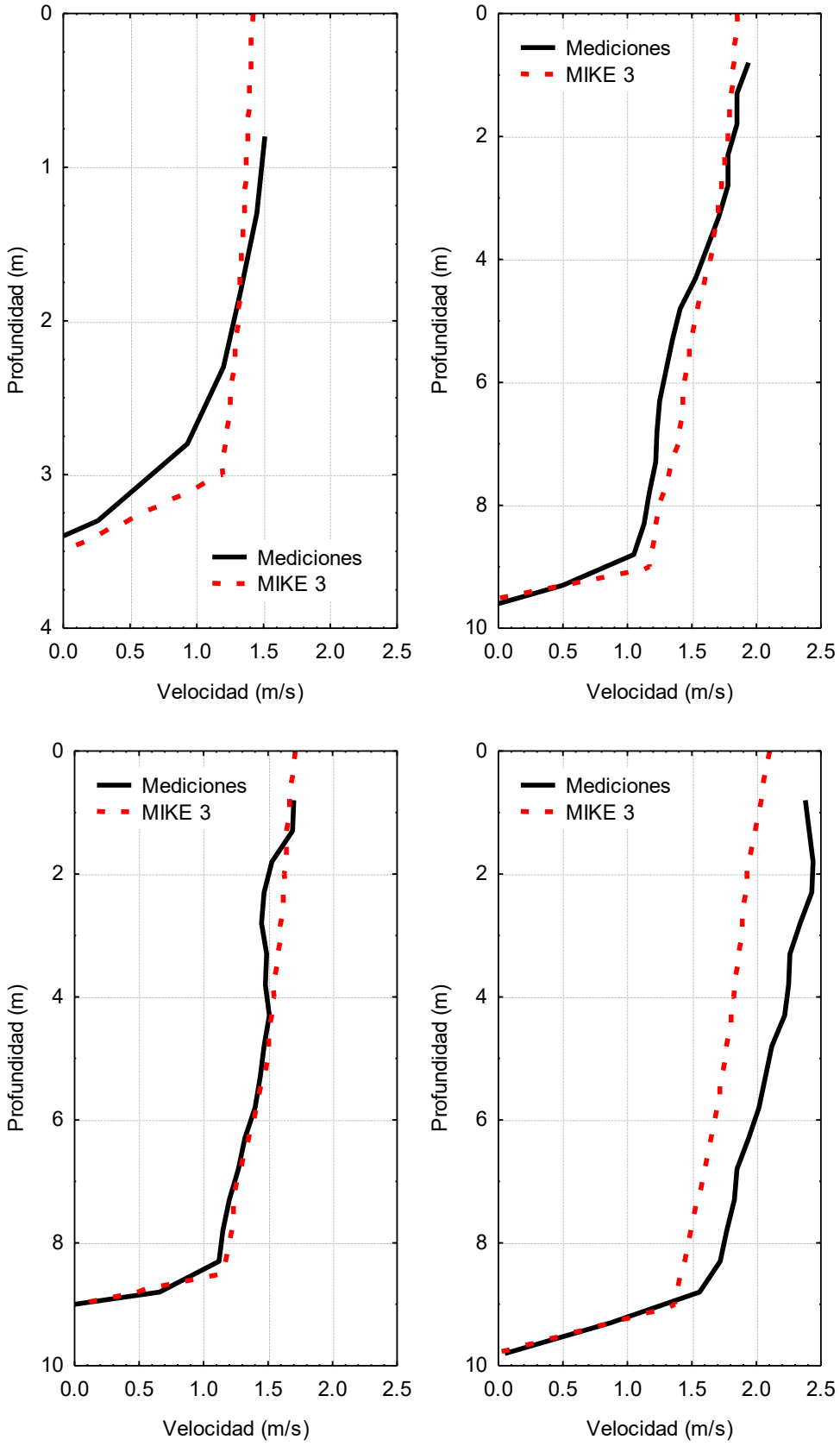


Figura 8.4.14 Comparación entre los perfiles de velocidad registrados durante la campaña de diciembre de 2016 y los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD). Estaciones TR 2-1 (arriba izquierda), TR 2-2 (arriba derecha), TR 2-3 (abajo izquierda) y TR 2-4 (abajo derecha).

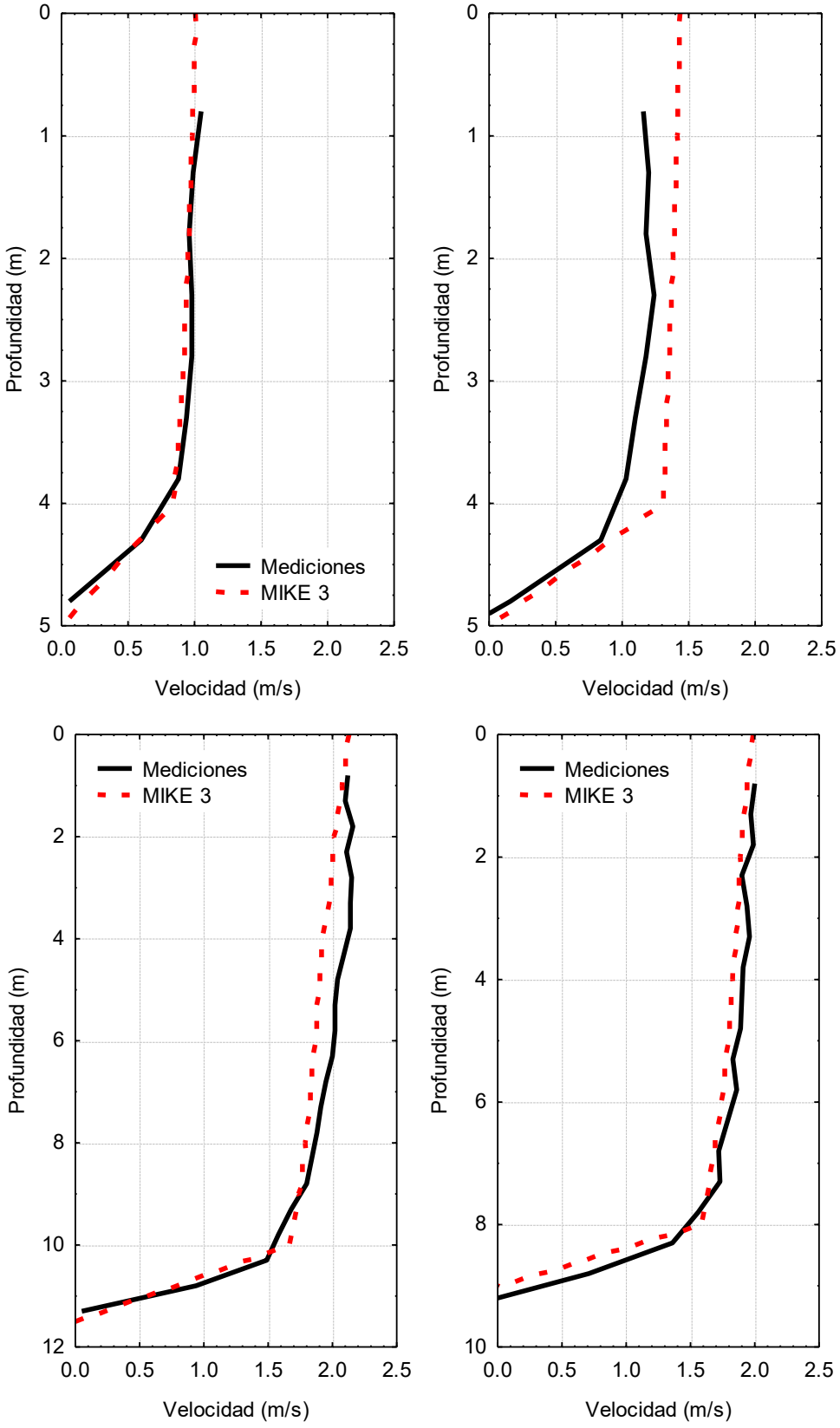
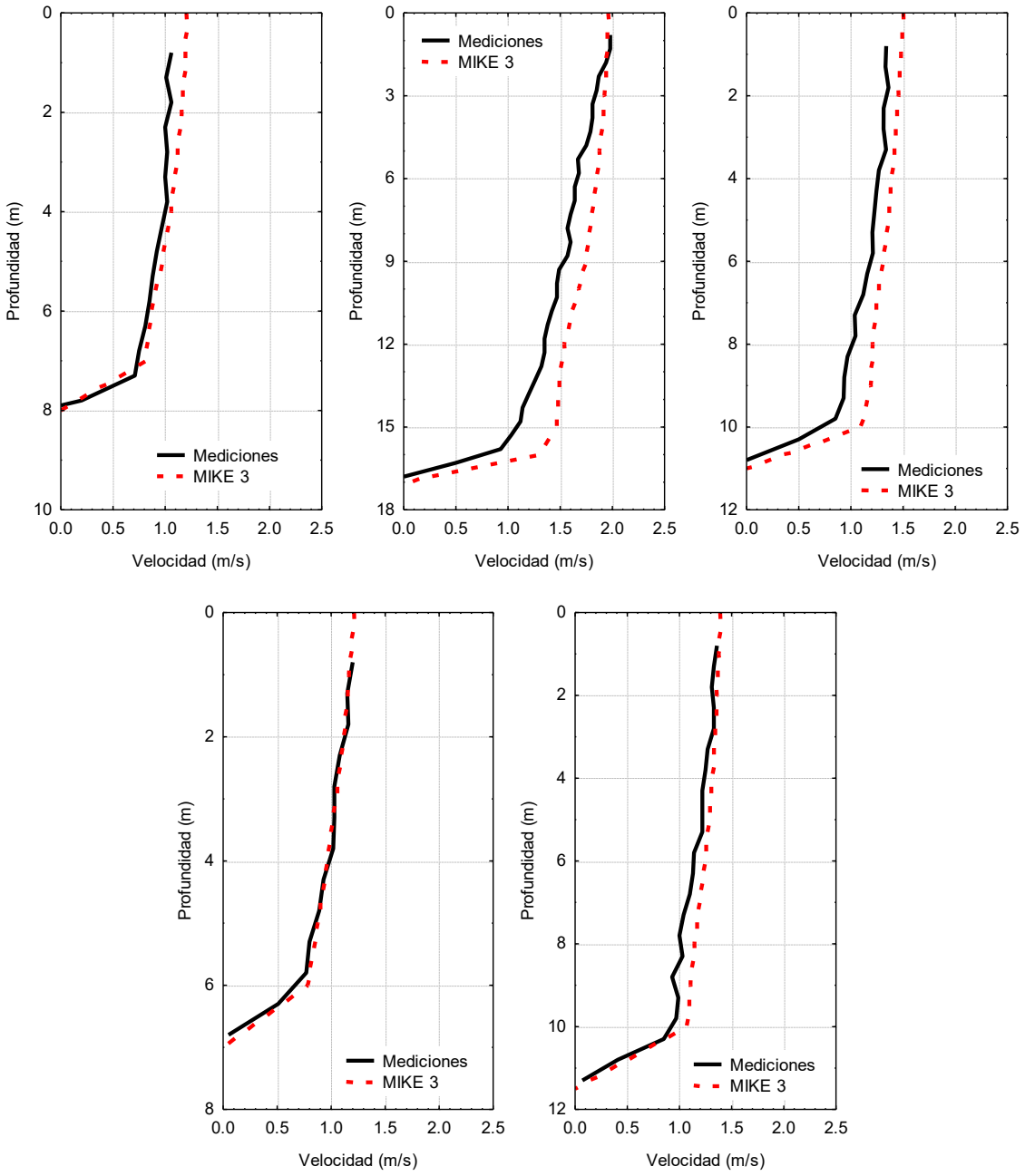


Figura 8.4.16 Comparación entre los perfiles de velocidad registrados durante la campaña de diciembre de 2016 y los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD). Estaciones TR 3-1 (arriba izquierda), TR 3-2 (arriba centro), TR 3-3 (arriba izquierda), TR 3-4 (abajo izquierda derecha) y TR 3-5 (abajo derecha).



8.5. Temperatura en el estuario, estación Mar y Estuario 2

Simultáneamente a los ajustes realizados para la calibración del MIKE 3 Flow Model FM (que muestra una muy buena representación del campo de velocidades y niveles del mar), se utilizó el modelo en modo baroclínico para simular las variaciones de temperatura y la salinidad. En particular se realizaron diferentes ensayos sobre características de los perfiles verticales de estas variables. Se pudo verificar que al incorporar las variaciones de la temperatura ambiente al modelo, mejoraron los ajustes sobre las mediciones.

Detalles de los coeficientes utilizados para la inclusión del intercambio con la atmósfera se presentaron en el punto 8.3 del presente documento. Especificaciones sobre las formulaciones que utiliza el modelo en relación con este intercambio se pueden encontrar en los documentos científicos del MIKE 3 Flow Model FM (https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/MIKE_3.htm).

Se presentan a continuación los resultados de los ajustes encontrados al finalizar la calibración. La Figura 8.5.1 muestra la comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) durante diciembre de 2016 en las estaciones Mar y Estuario 2. En este caso, son series de tiempo de temperatura medidas cerca del fondo en las estaciones mencionadas. Puede verse que los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) están bien correlacionados en términos de los valores medios y en sus variaciones periódicas, indicando además, que las temperaturas dentro del estuario son más altas que en la boca del estuario.

Las Figuras 8.5.2 y 8.5.3 muestran la comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) durante marzo de 2017 en las estaciones Isla Pavón y S6. En este caso, son series de tiempo de temperatura medidas cerca del fondo en las estaciones mencionadas. Puede verse que los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) están bien correlacionados en términos de los valores medios.

Figura 8.5.1 Comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en las estaciones Mar y Estuario

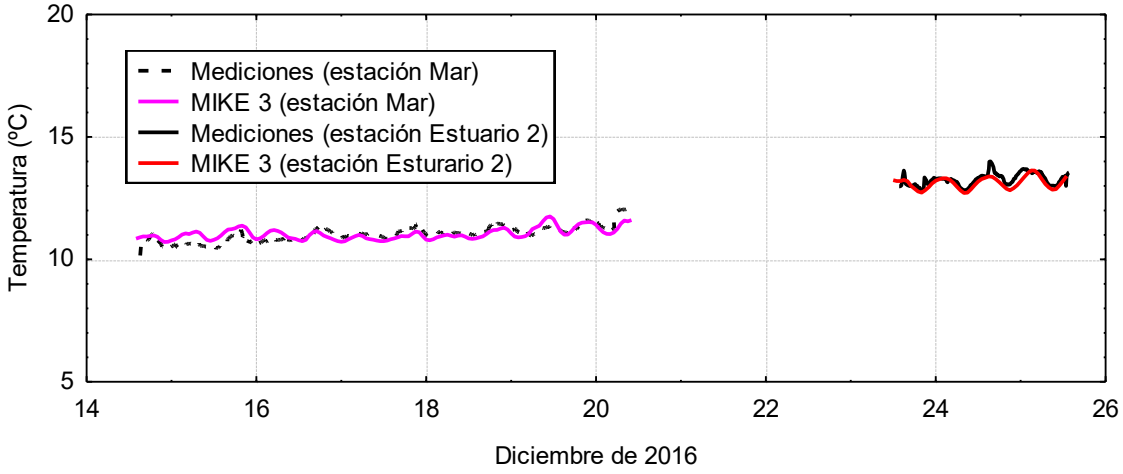
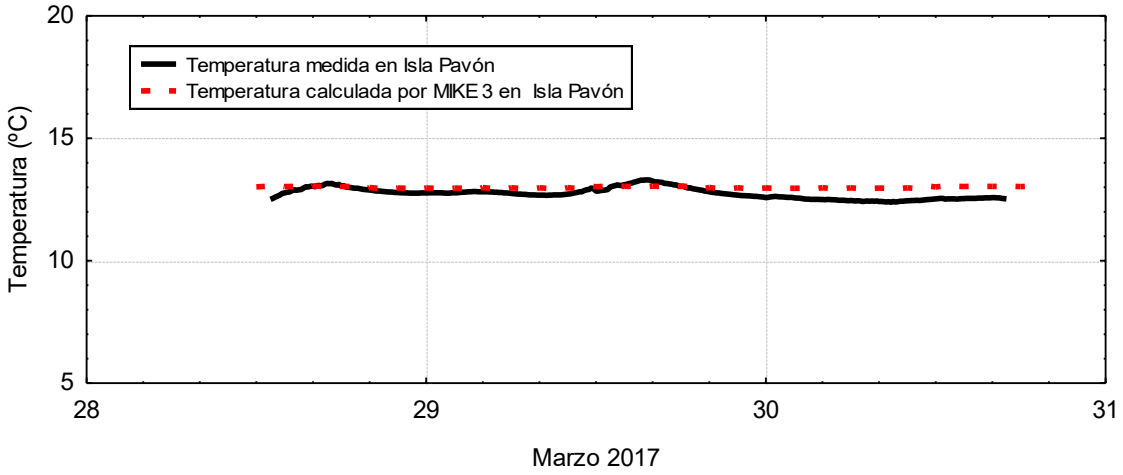


Figura 8.5.2 Comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la estación Isla Pavón



Las Figuras 8.5.5 a 8.5.9 muestra la comparación entre los perfiles verticales de temperaturas medidos y calculados con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en las estaciones P1 a P10, cuyas posiciones se identifican con cuadrados rojos en la Figura 8.5.4. Debe tenerse en cuenta que se comparan perfiles de temperatura medidos casi instantáneamente (el instrumento recorre el espacio entre la superficie del mar hasta el fondo en 1 min, aproximadamente) con un perfil extraído, aproximadamente en el mismo instante de la serie de tiempo que genera el modelo.

Figura 8.5.3 Comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en la estación S6

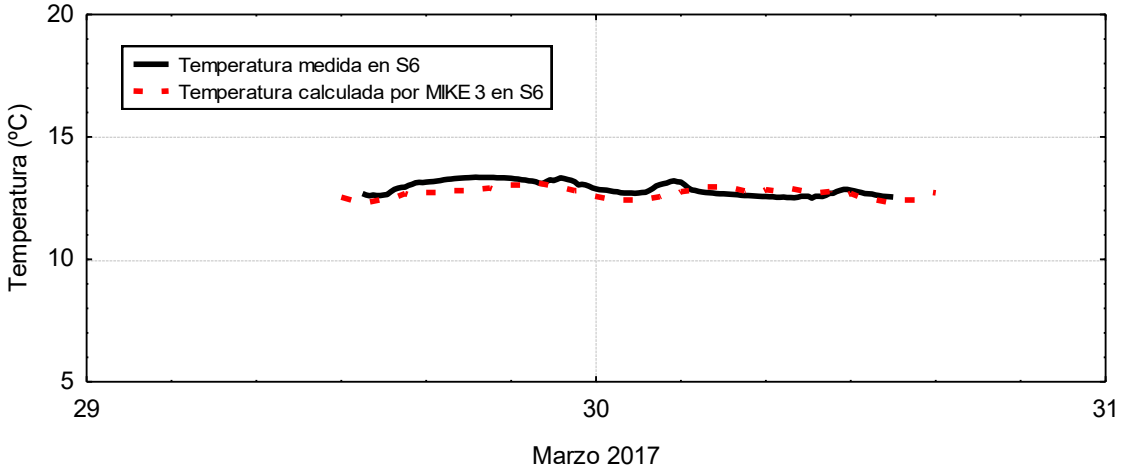


Figura 8.5.4 Ubicación de las estaciones de medición. Los puntos P1 a P10 corresponden a las posiciones de los perfiles de temperatura y salinidad.

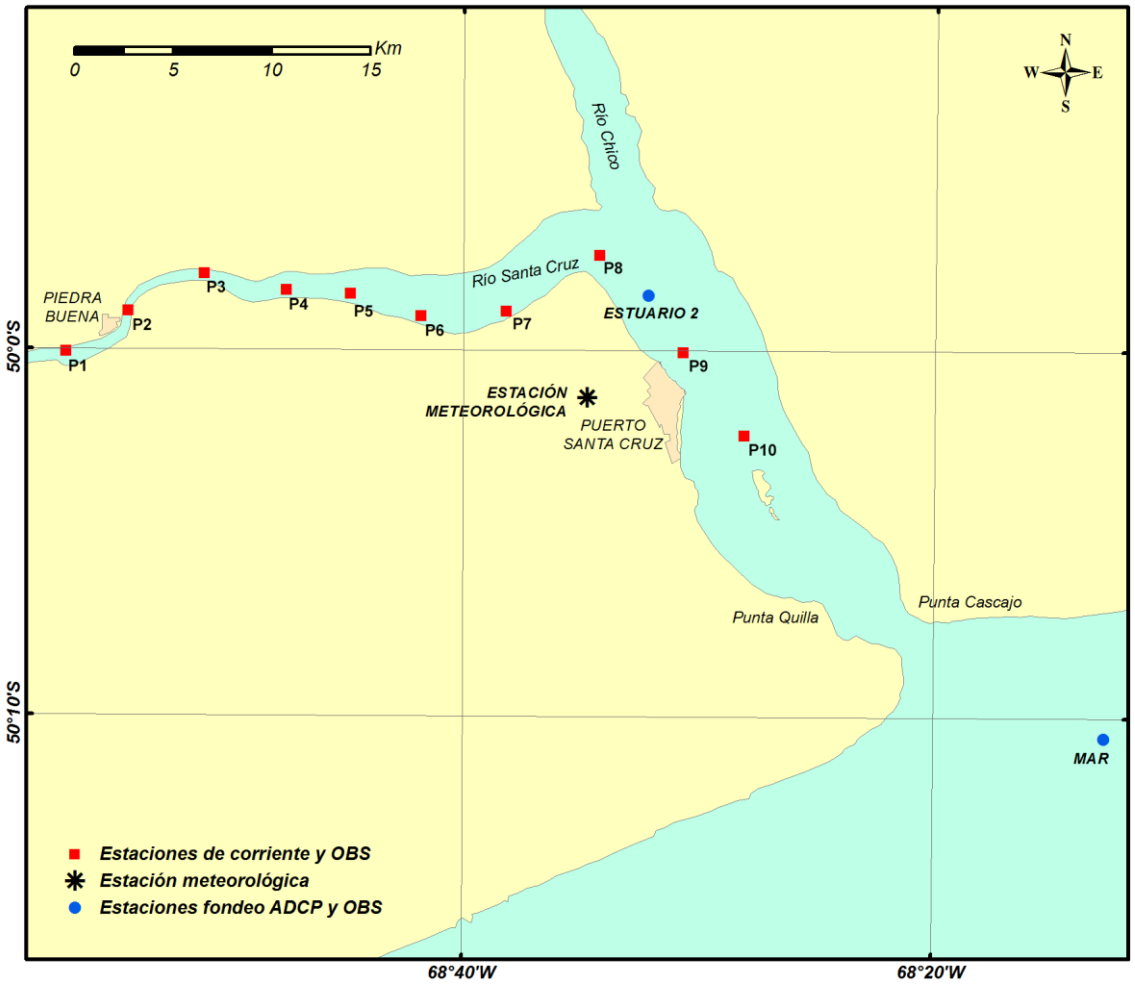


Figura 8.5.5 Comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en P1 (izquierda) y P2 (derecha).

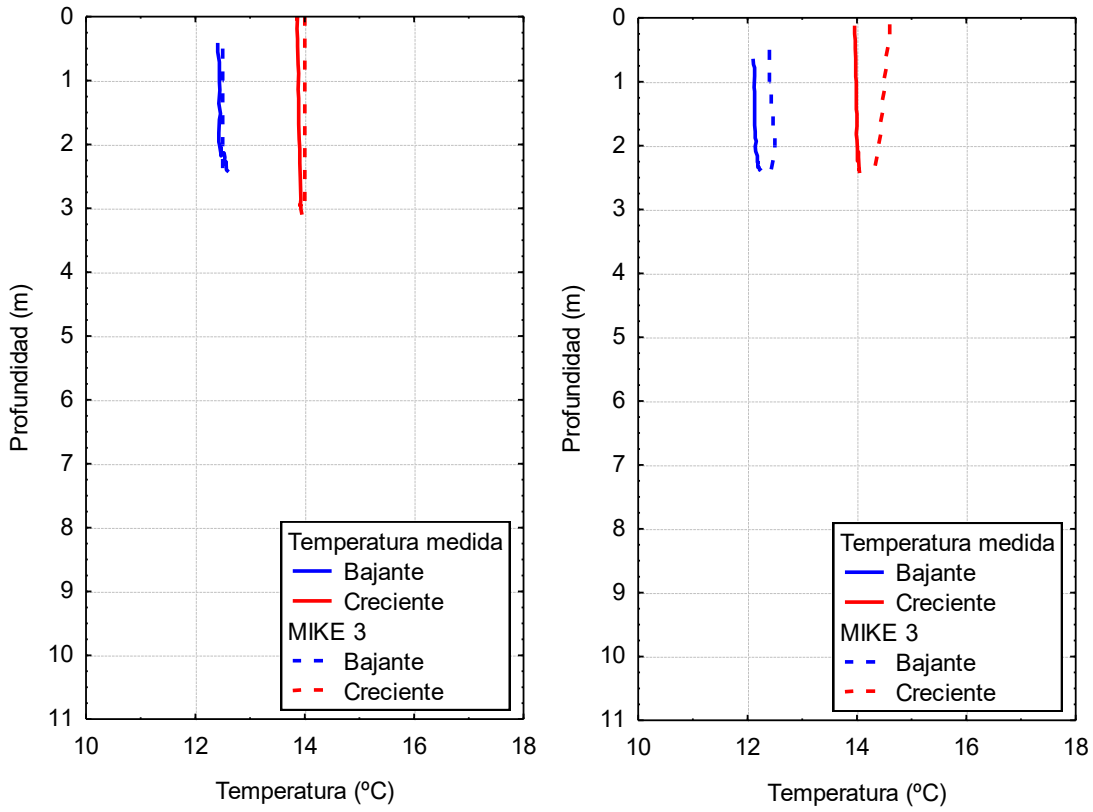


Figura 8.5.5 Comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en P3 (izquierda) y P4 (derecha).

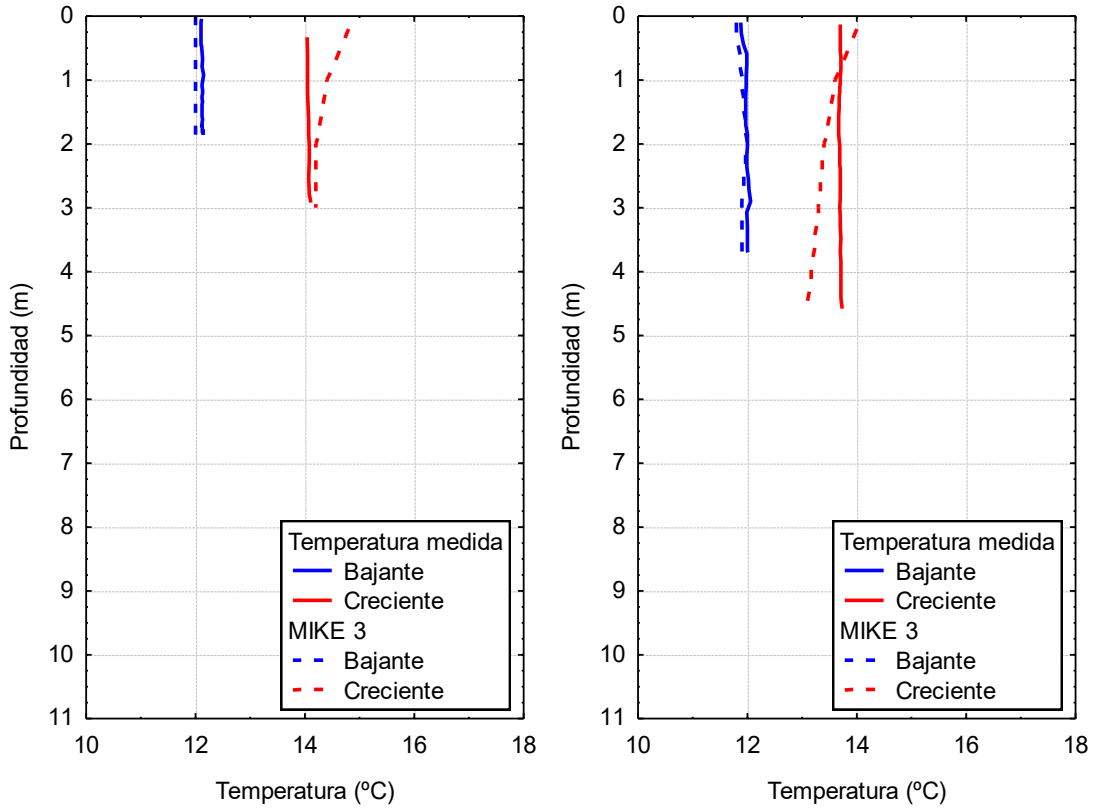


Figura 8.5.6 Comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en P5 (izquierda) y P6 (derecha).

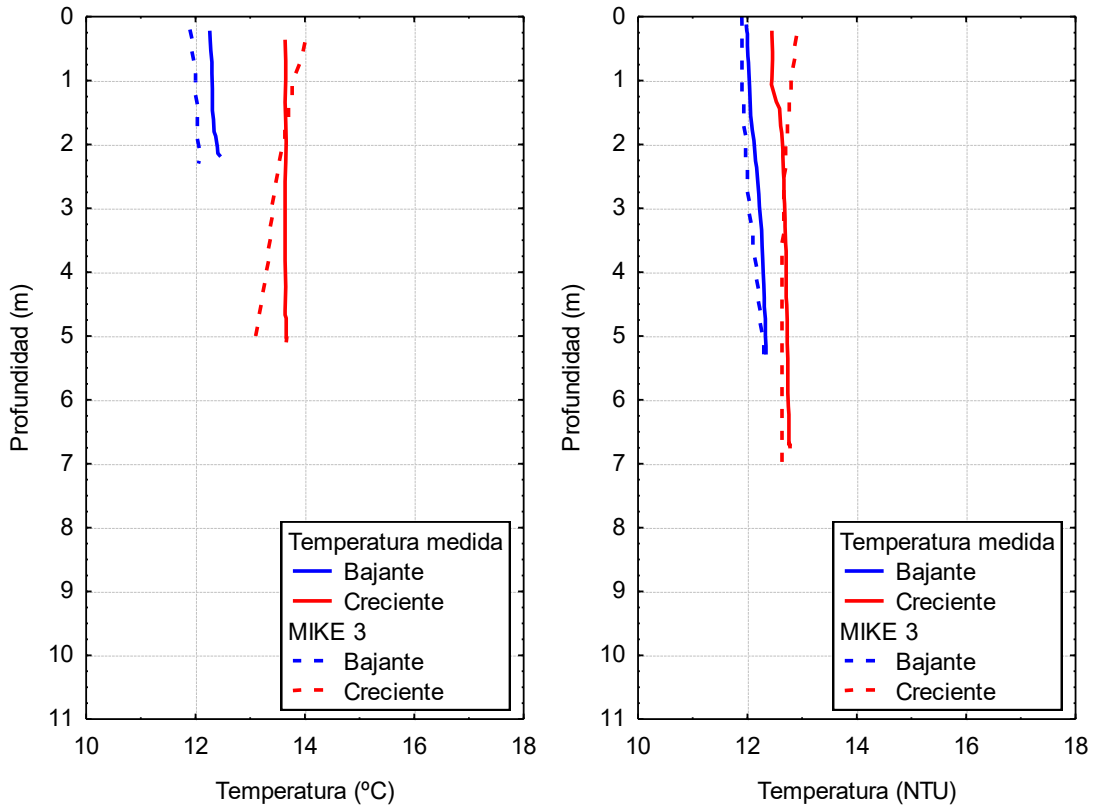


Figura 8.5.7 Comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en P7 (izquierda) y P8 (derecha).

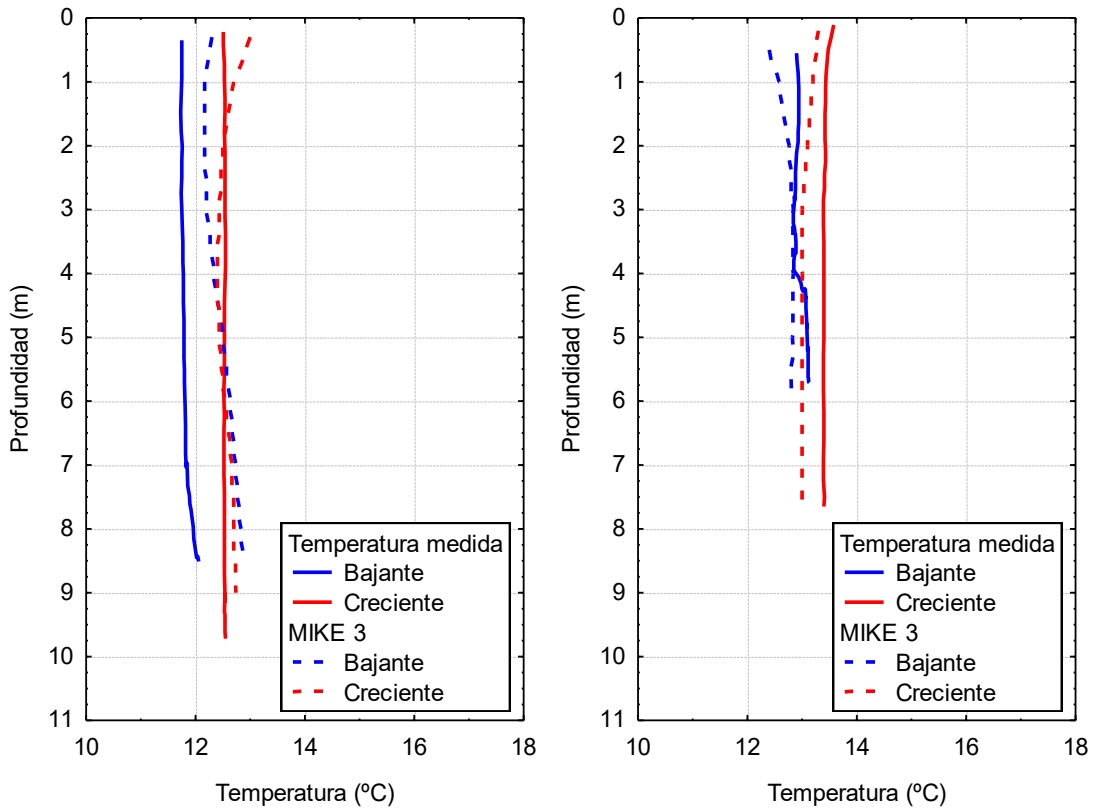
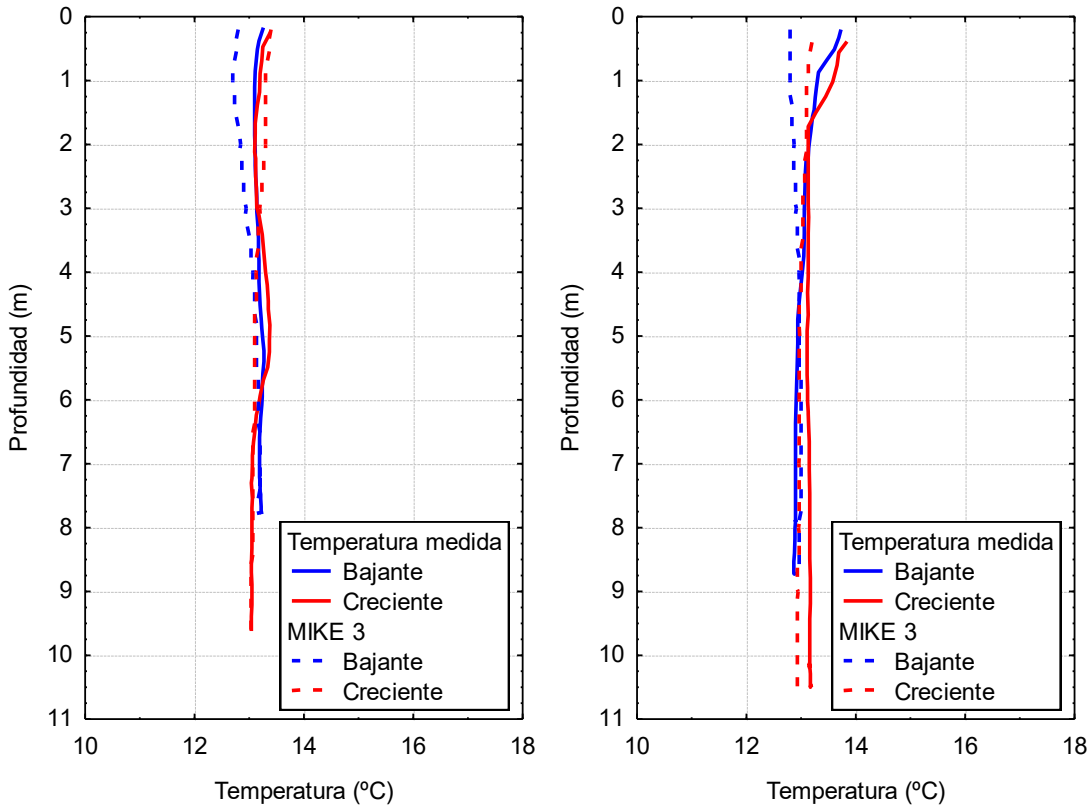


Figura 8.5.8 Comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) en P9 (izquierda) y P10 (derecha).



8.6. Salinidad en Estación Mar, Estuario 2 y S6

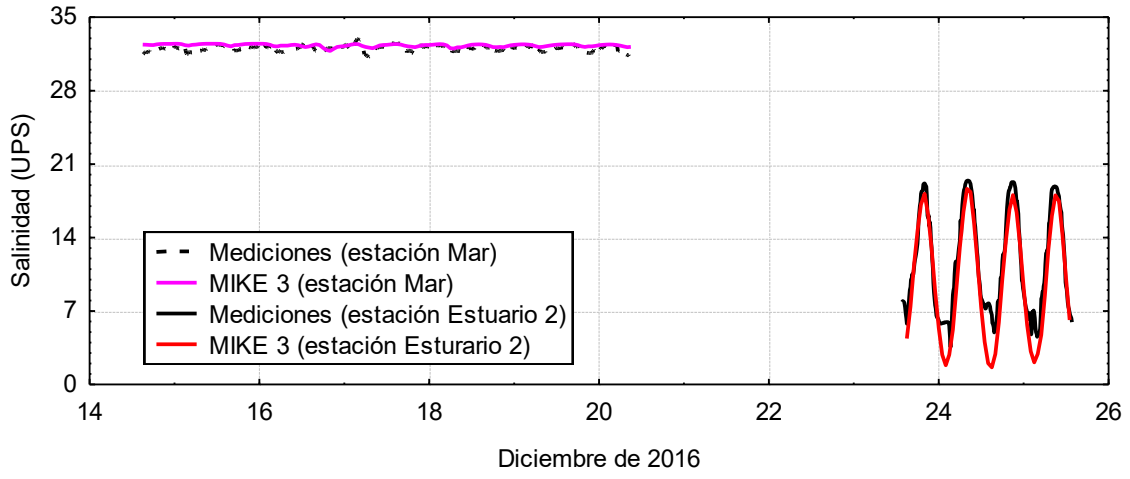
Series de tiempo

De la misma manera que la temperatura, la salinidad varía en tiempo y espacio siendo advectada y dispersada por el campo de corrientes y la turbulencia del medio. Numéricamente esto se traduce en variaciones de salinidad producto de las corrientes generadas por MIKE 3 Flow Model FM y de diferentes coeficientes que se imponen en el input del modelo, como la viscosidad turbulenta en la horizontal y vertical. Como se presentó en la Tabla 8.3.1 para las simulaciones del Estuario del río Santa Cruz, se utilizaron coeficientes de viscosidad turbulenta en la horizontal, basados en la formulación de Smagorinsky, que dependen de los gradientes horizontales de velocidad. Se ajustó un coeficiente de proporcionalidad de 0.35. En tanto que para la viscosidad turbulenta vertical se utilizó una formulación logarítmica con valores máximos de 1 m^2/s y mínimos de 1e-5 m^2/s. Detalles de las formulaciones que utiliza el modelo se pueden encontrar en los documentos científicos del MIKE 3 Flow Model FM (https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/MIKE_3.htm).

Además, MIKE 3 Flow Model FM permite incorporar coeficientes de dispersión propios de la salinidad que también pueden imponerse al input del modelo de forma explícita o como proporcionales a la viscosidad turbulenta. Para estas simulaciones estos coeficientes se consideraron proporcionales a la viscosidad y fueron de 1.2 en la horizontal y de 1e-4 en la vertical. Los resultados se muestran a continuación. Debe considerarse además la presencia de campos de temperatura que pueden generar estratificación en la zona modificando los campos de salinidad. Estos efectos están contemplados en la calibración encontrada.

La Figura 8.6.1 muestra la comparación de la salinidad medida y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM en los puntos de las estaciones de medición Estuario y Mar. Estas series de tiempo de salinidad (cuyo cálculo se hace a partir de los valores medidos de conductividad) muestran un acuerdo muy bueno entre los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 Flow Model FM, tanto para la Estación Mar (boca de la ría) y la Estación Estuario 2 (interior de la ría).

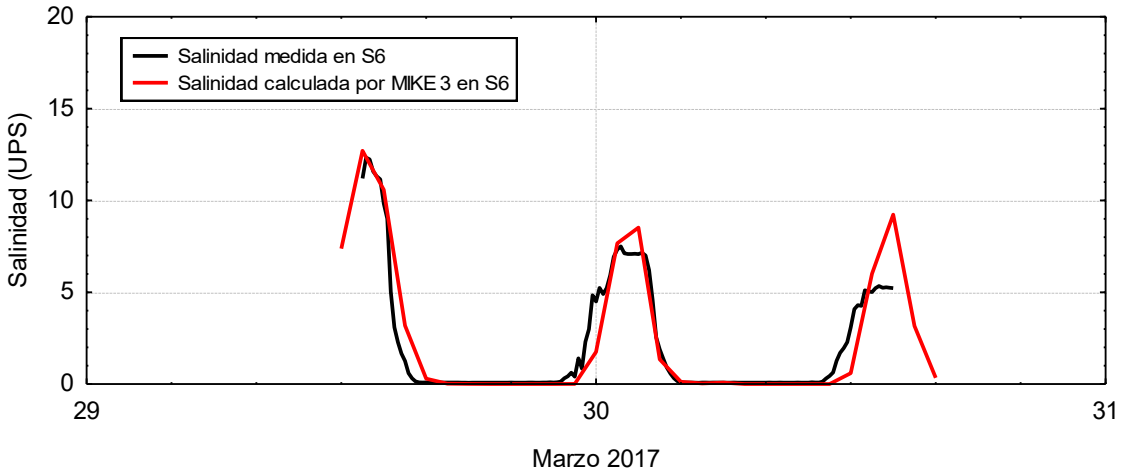
Figura 8.6.1 Comparación de la salinidad medida y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM en los puntos de las estaciones de medición Estuario 2 y Mar



Los valores de salinidad varían entre unos 2 y 20 UPS en unas 6 h, en la estación Estuario 2, siguiendo a la evolución de las mareas. Este efecto sobre la salinidad no es tan cambiante en la estación Mar (en la boca del estuario) donde el agua de mar es dominante y mantiene una salinidad de unos 32 UPS, casi independiente del estado de la marea. Para el período de medición en la estación S6 se observan variaciones bruscas y

periódicas de salinidad entre 0 y 13 UPS, que ocurren en unas 2 h, como muestra la Figura 8.6.2.

Figura 8.6.2 Comparación de la salinidad medida y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM en la estación S6.



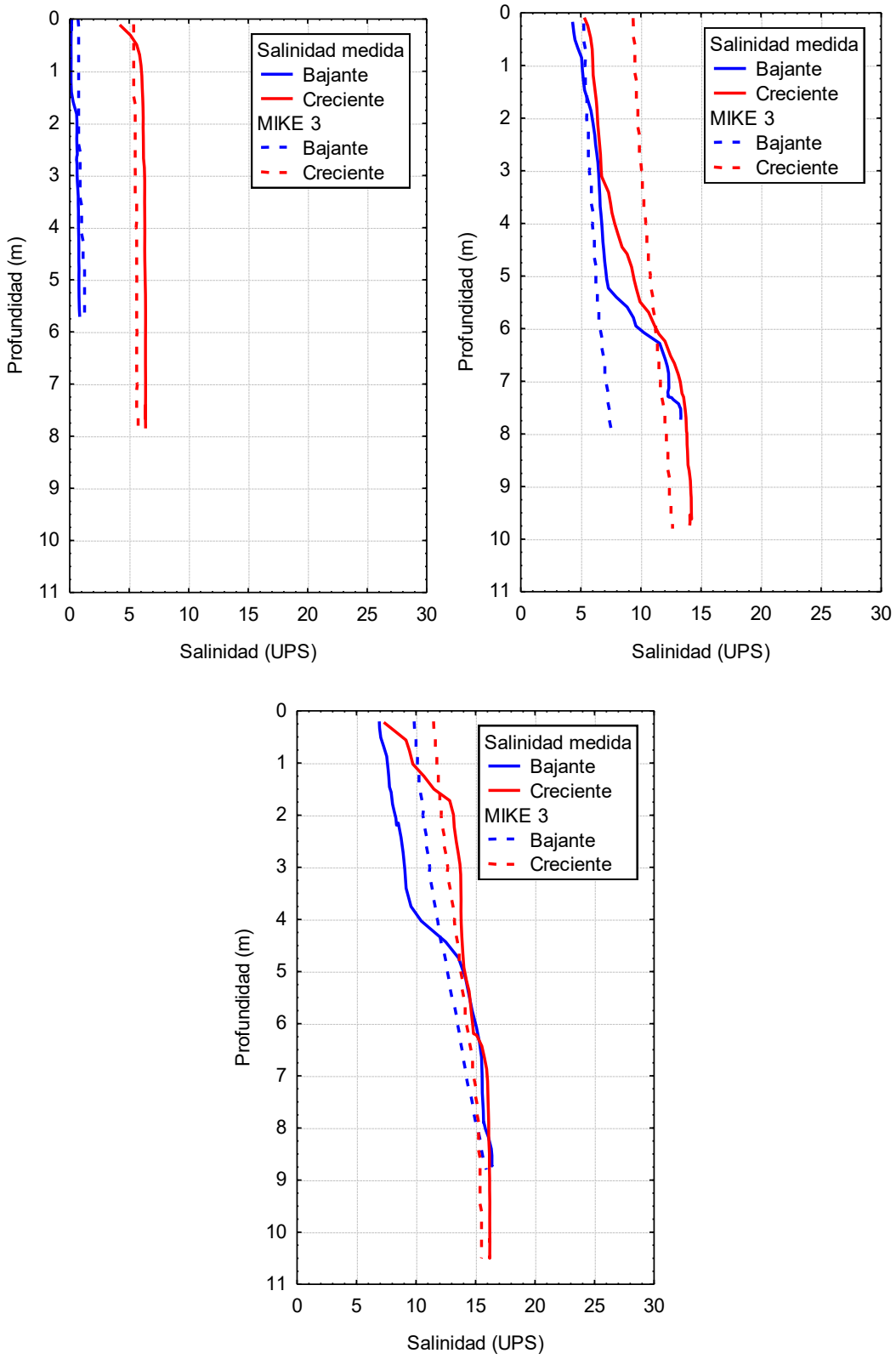
Perfiles de salinidad

La Figura 8.6.3 muestra la comparación en las mediciones de perfiles de salinidad y los generados por el modelo MIKE 3 Flow Model FM en los puntos P8, P9 y P10. El resto de las estaciones (río arriba) no muestran valores de salinidad con alguna significación.

Los valores medidos y los calculados por el modelo, se ajustan bien en general, y en particular para la Estación 08 (Figura 8.6.3 arriba a la izquierda), tanto en bajante como en creciente. Sin embargo, la comparación en tiempo y espacio de los perfiles de salinidad es muy demandante para las simulaciones. Debe tenerse en cuenta que estas comparaciones entre perfiles instantáneos (se tarda 1 min en perfilar la columna de agua) requiere de una gran precisión en el tiempo del modelo para extraer exactamente el perfil que correspondiente. Por ejemplo, para el caso de la Estación 09 (Figura 8.6.3 arriba a la derecha) la correlación es satisfactoria, con una correcta estimación del rango de salinidades en el punto de medición, pero se observa que en bajante la correlación es mejor en las capas superiores cerca de la superficie que cerca del fondo, donde el modelo subestima la salinidad), mientras que en creciente el modelo sobrestima la salinidad en

superficie y representa bien la salinidad en el fondo. Para el caso de la Estación 10 (Figura 8.6.3 abajo) la correlación es satisfactoria tanto en creciente como en bajante.

Figura 8.6.3 Comparación en las mediciones de perfiles de salinidad y los generados por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) en los puntos P8 (arriba a la izquierda), P9 (arriba a la derecha) y P10 (abajo).



8.7. Turbidez en estación Mar y Estuario 2

Los trabajos de campo de diciembre de 2016 produjeron series de tiempo de turbidez en las estaciones Estuario 2 y Mar, que fueron transformados a sólidos suspendidos totales (SST en mg/l) a partir de la relación entre ambas variables presentadas en el capítulo anterior. Estas mediciones forman parte de los datos utilizados para realizar la calibración del modelo de MIKE 3 Flow Model FM acoplado al módulo de transporte sedimentos cohesivos y no cohesivos Mud Transport (MT). Las Figuras 8.7.1 y 8.7.2 presentan las comparaciones encontradas entre los resultados del modelo y las mediciones para estas series.

Figura 8.7.1 Comparaciones de concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST en mg/l)) registradas y calculadas por el MIKE 3 (MT) en la Estación Mar.

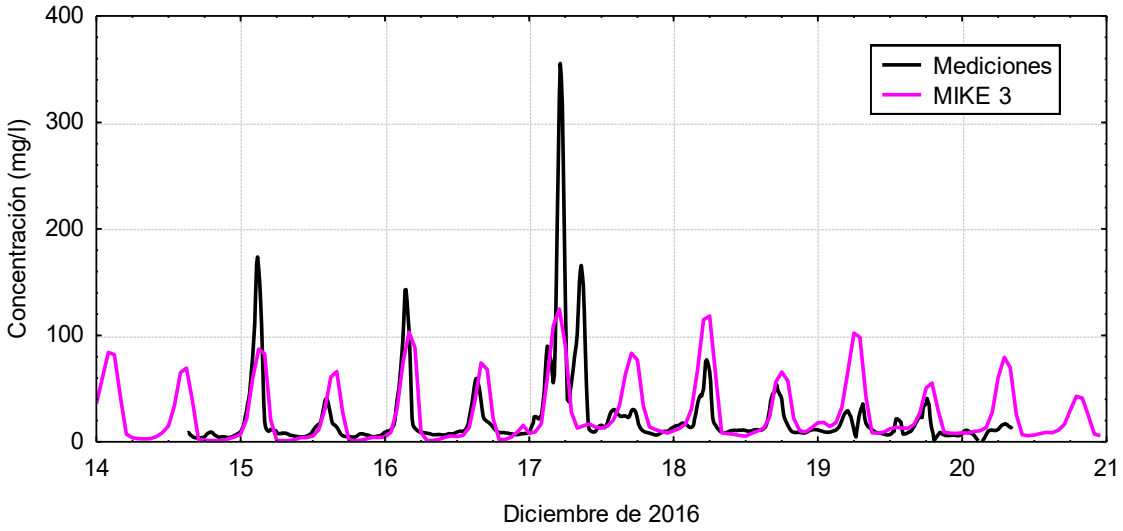
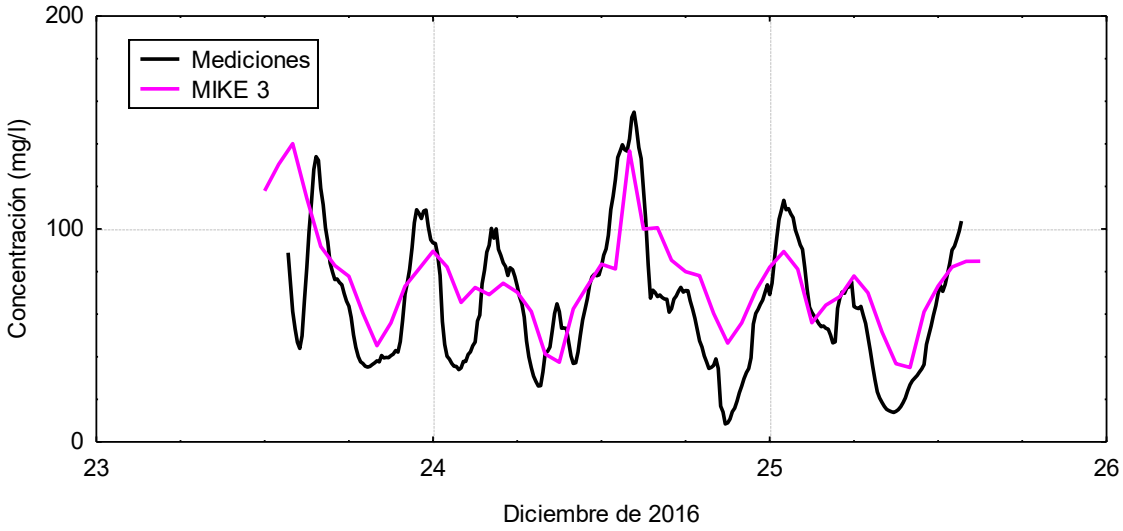


Figura 8.7.2 Comparaciones de concentraciones de sedimentos en suspensión registradas y calculadas por el MIKE 3 (MT) en la Estación Estuario 2.



Cualitativamente, las comparaciones muestran una representación aceptable de los resultados del modelo a las mediciones. Debe tenerse en cuenta que las modelaciones presentadas no incluyen los aportes de sedimentos a la ría por efecto del viento

Durante los trabajos ambientales en el estuario, se realizó una estimación del potencial del viento para transportar los sedimentos de las zonas cercanas a la ría, en base a mediciones disponibles con trampas. Los resultados indican que las magnitudes relativas entre los aportes de sedimentos de los ríos y el potencial del viento para transportar grandes cantidades de sedimentos hacia la ría hacen pensar que el transporte eólico deberá ser considerado al momento de analizar la importancia del déficit de sedimentos del río Santa Cruz en el funcionamiento hidrosedimentológico de la ría, una vez que las obras hayan sido terminadas.

8.8. Nivel del Mar, Temperatura y Salinidad en Punta Quilla e Isla Pavón

Esta parte trata sobre la calibración del MIKE 3 Flow Model FM (HD), utilizando las series de tiempo del nivel del mar, temperatura y salinidad los calculados por el modelo.

Existe una muy importante cantidad de información recopilada para este estudio. A los datos ya presentados, se les incorpora la información de campo registrada entre noviembre de 2017 y mayo de 2019 en Punta Quilla e Isla Pavón (niveles del mar y río, temperatura, salinidad y turbidez) para hacer las calibraciones de los modelos tratada en esta parte. A continuación, se presenta una serie de figuras con las comparaciones entre datos y los resultados del modelo, en términos de los niveles del mar, temperatura, salinidad y turbidez.

El modelo fue calibrado con mediciones puntuales en diferentes lugares y con 19 meses de temperatura, salinidad (basada en conductividad), nivel del mar y concentraciones de sedimentos en suspensión (basados en turbidez), en las estaciones de Isla Pavón, Punta Quilla y río Chico. La estación de punta Quilla ubicada en el interior del dominio de modelación es ideal para realizar comparaciones entre los resultados del modelo y las mediciones. También resultaron importantes las mediciones de niveles en Isla Pavón, ya que el borde del dominio de modelación en el río Santa Cruz fue elegido río arriba, en una zona donde la marea carece de influencia en el nivel. La comparación en Isla Pavón

del nivel del río permitió verificar una correcta propagación (en fase y amplitud) de la marea astronómica en el río Santa Cruz e indirectamente en el estuario. En Isla Pavón no se registraron valores de salinidad durante los 19 meses de recopilación de información. El modelo también coincidió con este resultado.

La Tabla 8.8.1 resume los coeficientes alcanzados por la calibración. En general un buen coeficiente R^2 es mayor 0.8, indicando que los resultados encontrados explican por lo menos el 80 % de la varianza.

Tabla 8.8.1 Resumen de los coeficientes alcanzados por la calibración

Variable	Estación	Ordenada al origen de la recta de regresión	Pendiente de la recta de regresión	Coeficiente de correlación lineal (R)	Coeficiente de correlación al cuadrado (R^2)
Nivel del mar (m)	Punta Quilla	0.17	1.00	0.99	0.97
Nivel del mar (m)	Isla Pavón	0.17	0.97	0.99	0.92
Temperatura (°C)	Punta Quilla	0.46	0.95	0.98	0.96
Salinidad (UPS)	Punta Quilla	-3.7	1.1	0.91	0.82

Niveles del mar en Punta Quilla

Las Figuras 8.8.1 y 8.8.2 muestran la comparación entre las profundidades medidas y calculadas por MIKE 3 Flow Model FM (HD) para la estación Punta Quilla. Se puede ver que el modelo representa muy bien las variaciones del nivel del mar para el período de medición. Las Figuras 8.8.3 a 8.8.6 ilustran acerca de los campos de niveles del mar para el dominio de modelación en diferentes condiciones de marea.

Figura 8.8.1 Correlación de los niveles del mar en Punta Quilla. Número de datos: 13740

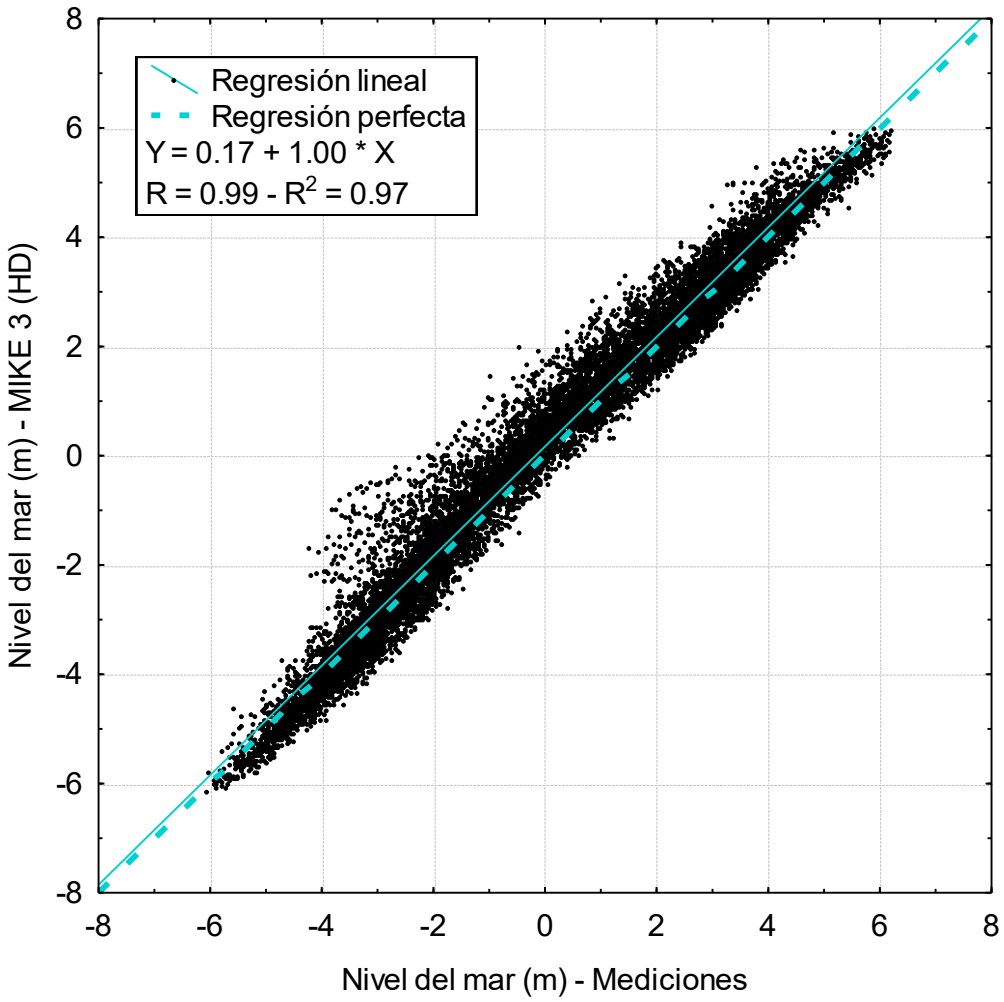


Figura 8.8.2 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

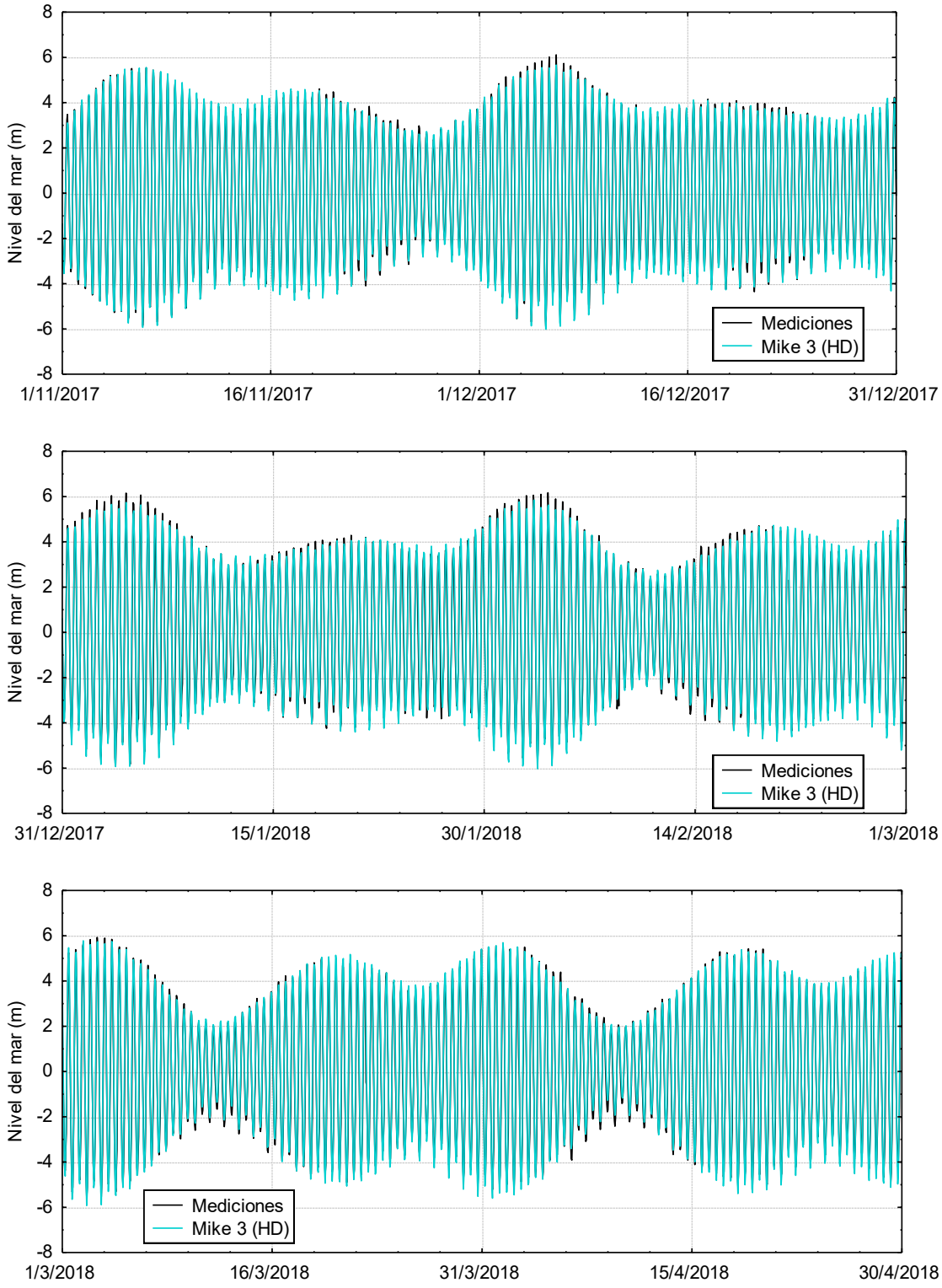


Figura 8.8.2 Continuación. Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

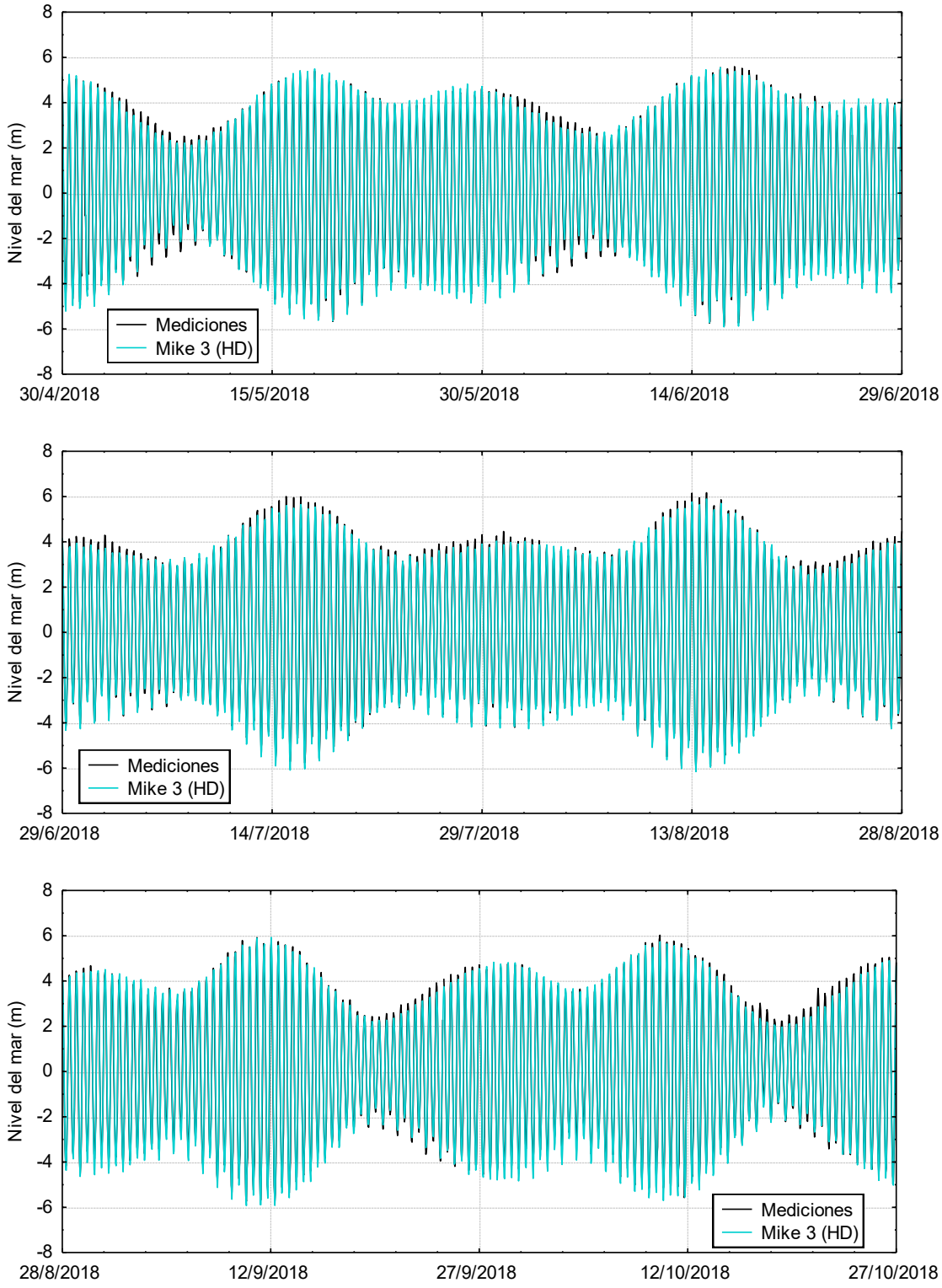


Figura 8.8.2 Continuación. Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

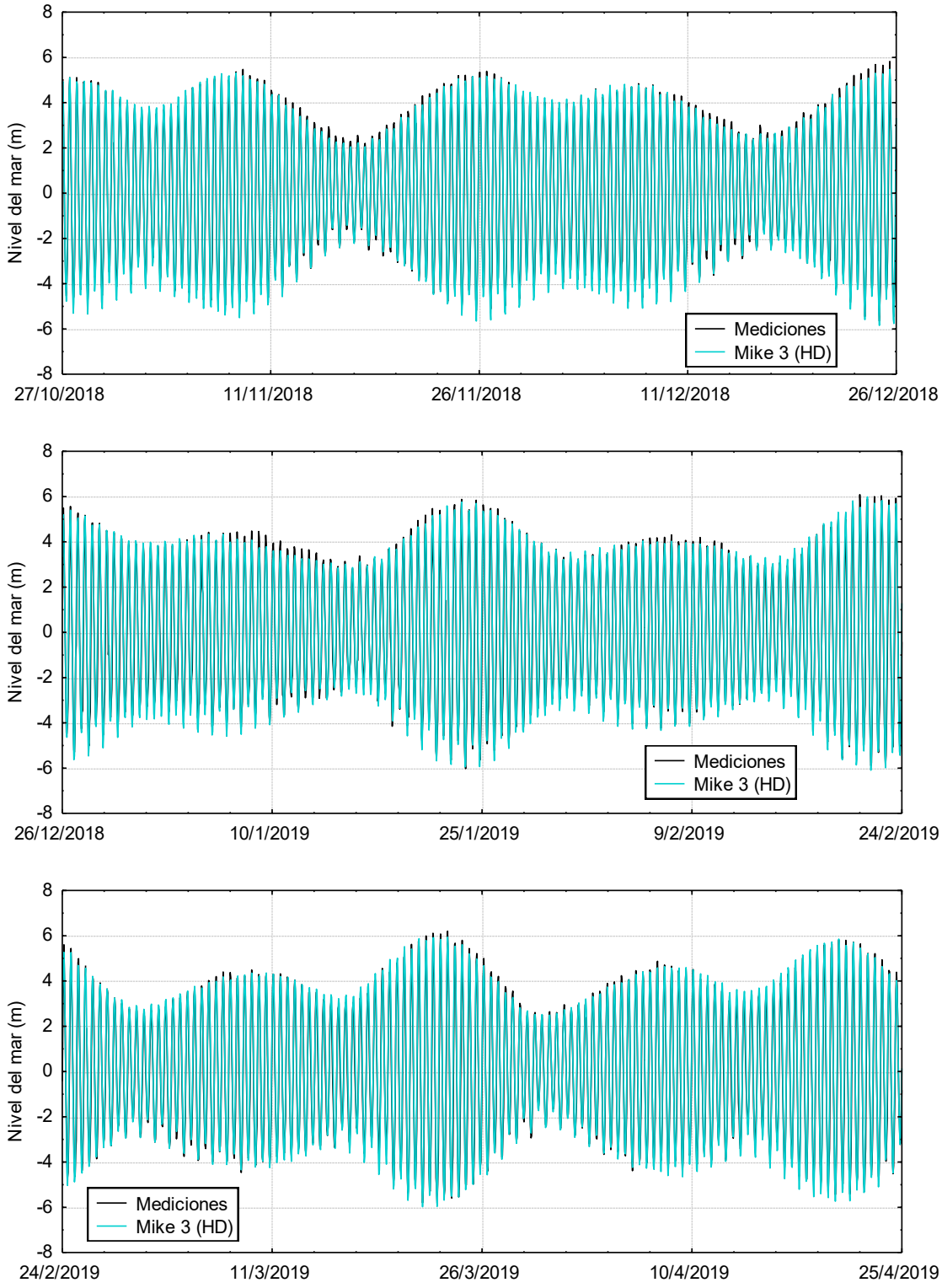


Figura 8.8.2 Continuación. Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

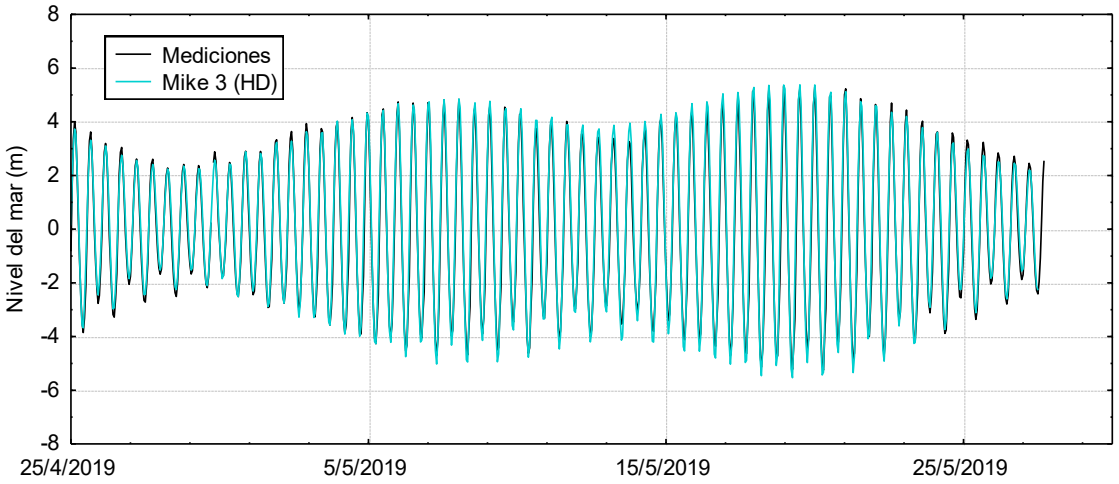


Figura 8.8.3 Nivel del mar calculado por el modelo MIKE 3 HD, en condición de pleamar

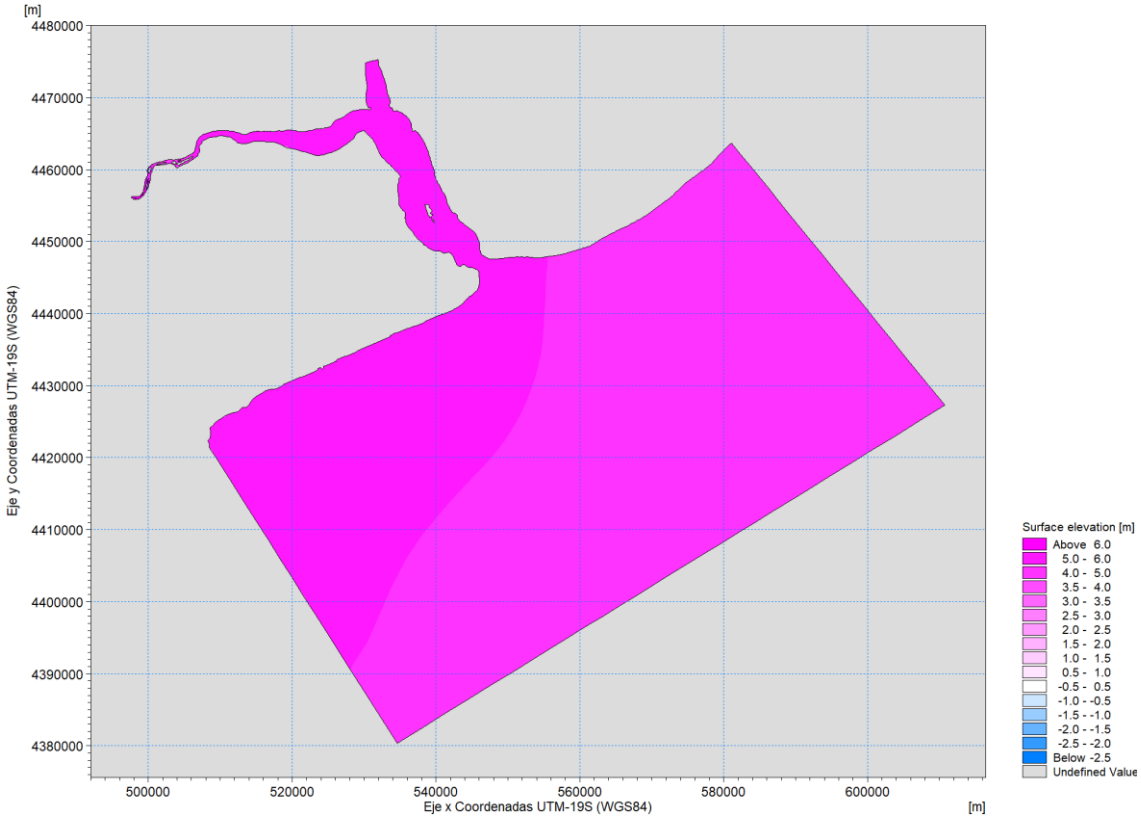


Figura 8.8.4 Nivel del mar calculado por el modelo MIKE 3 HD, en condición de marea bajante

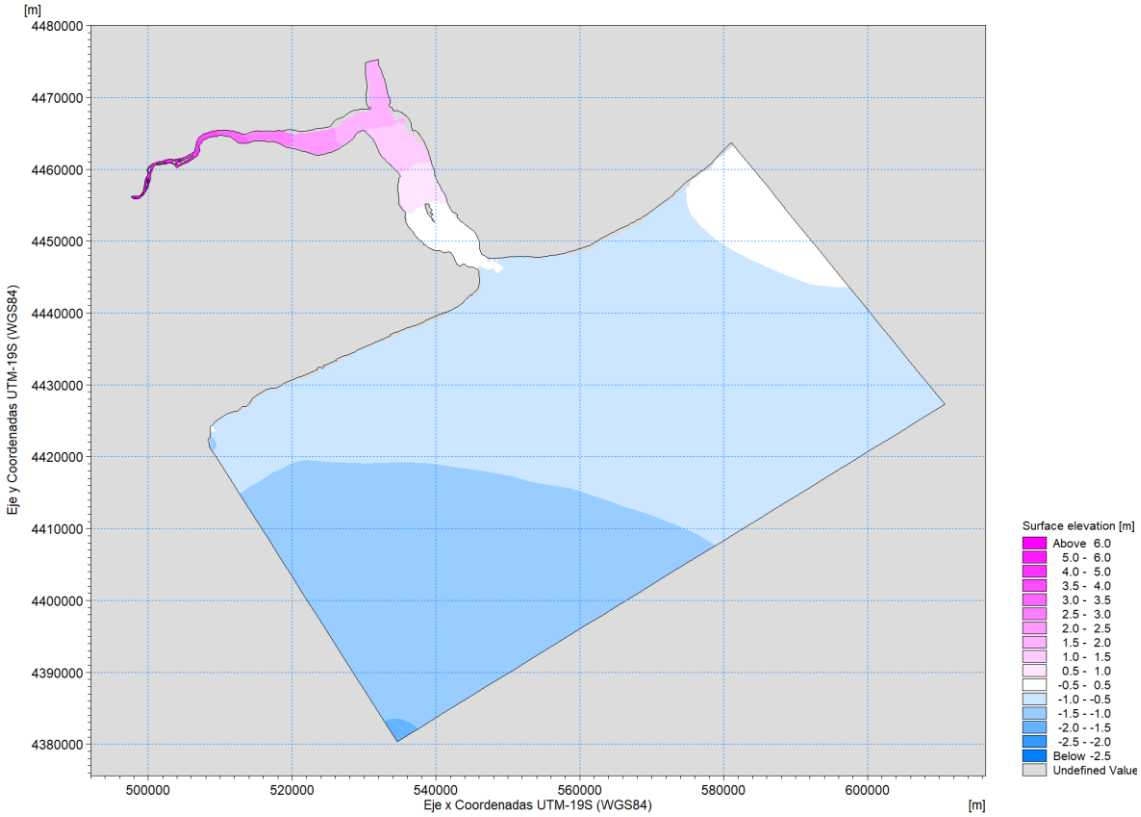


Figura 8.8.5 Nivel del mar calculado por el modelo MIKE 3 HD, en condición de bajamar

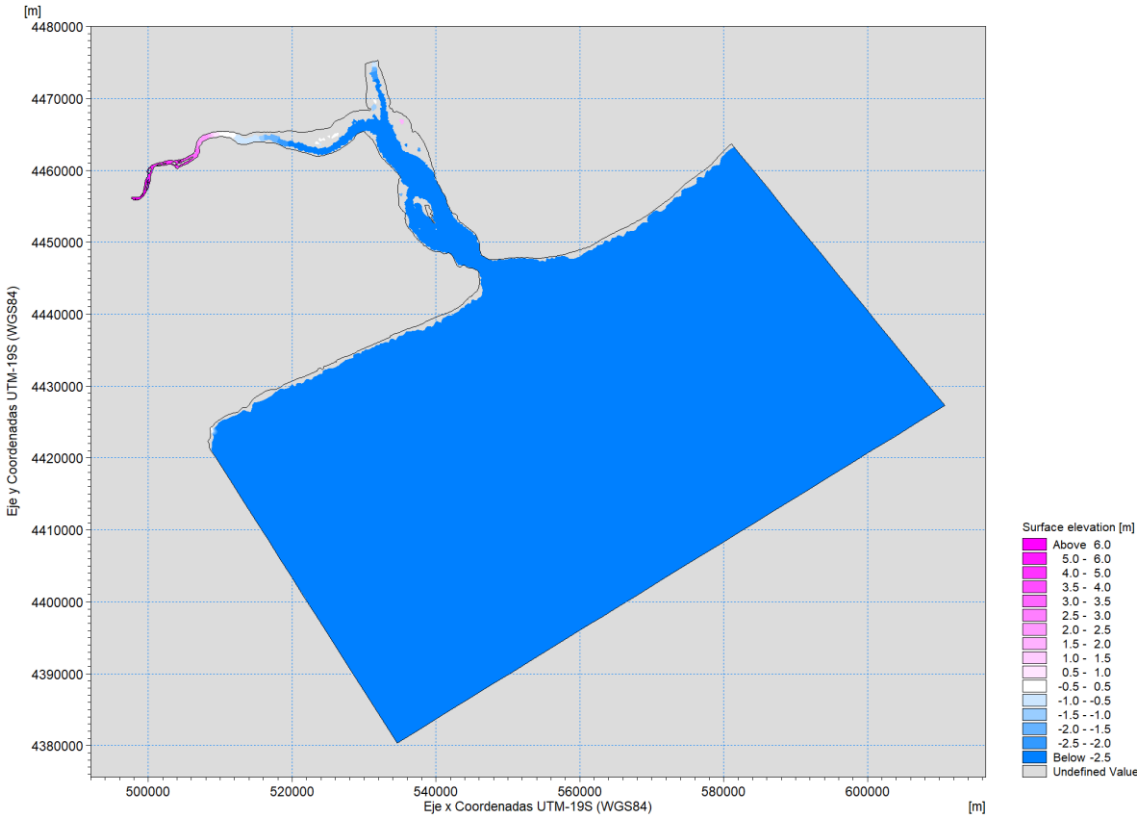
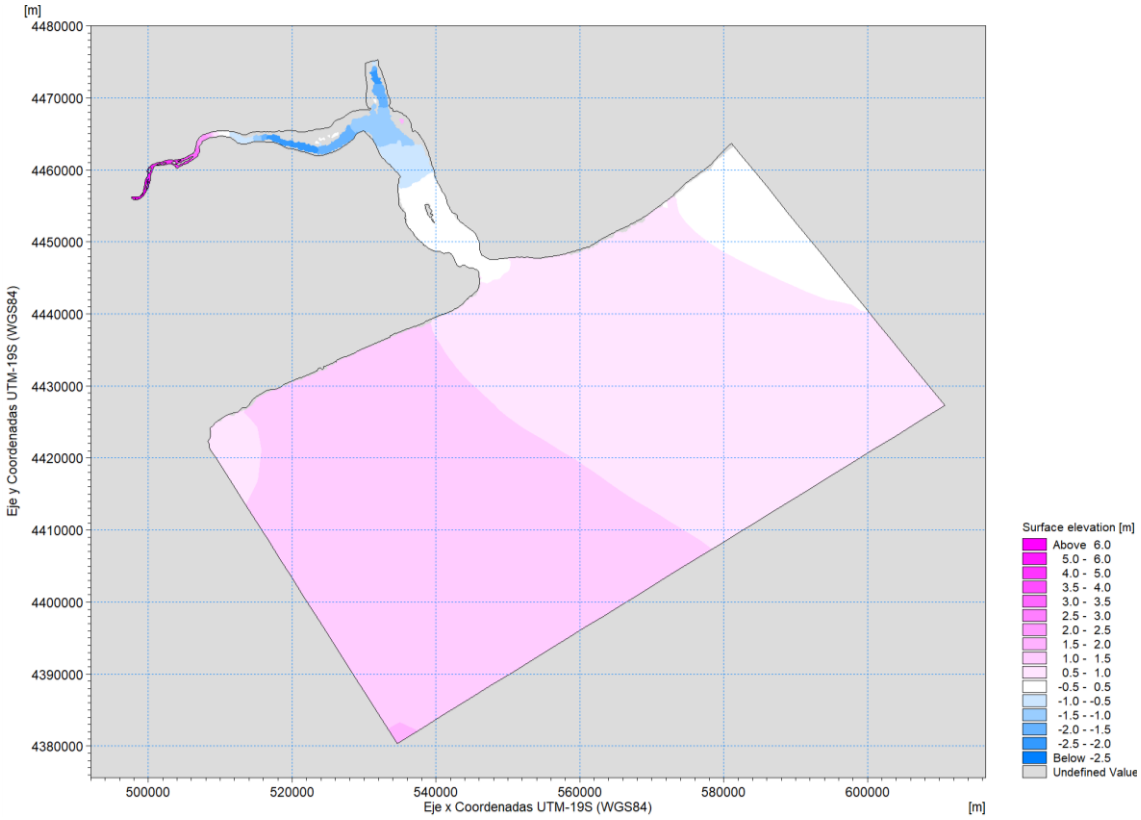


Figura 8.8.6 Nivel del mar calculado por el modelo MIKE 3 HD, en condición de marea bajante

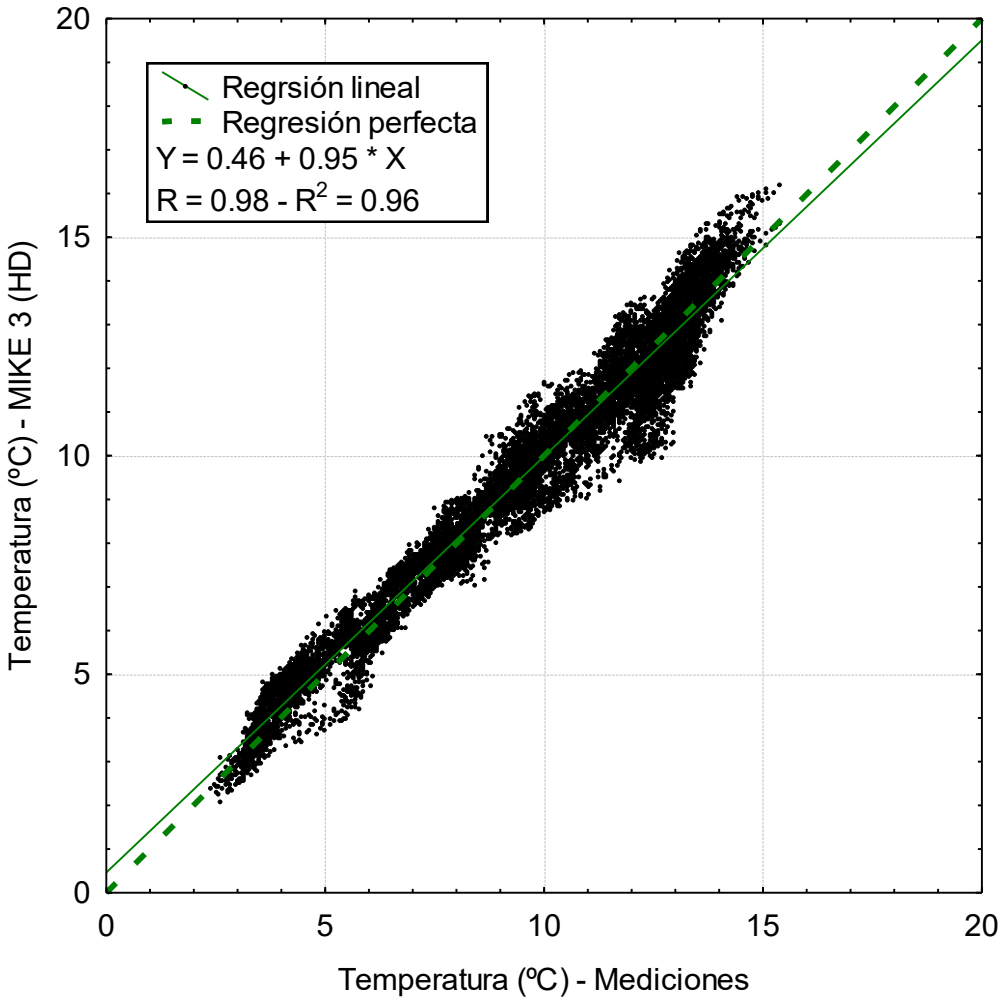


Temperatura en Punta Quilla

Simultáneamente a los ajustes realizados para la calibración del MIKE 3 Flow Model FM (HD), se utilizó el módulo de trasporte de MIKE 3 (TR) que simula la difusión y dispersión de la temperatura y la salinidad. Para calibrar estas variables se realizaron corridas del MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) en busca de un ajuste satisfactorio.

Las Figuras 8.8.7 y 8.8.8 muestran las comparaciones entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) durante noviembre de 2017 y abril de 2018. En este caso, son series de tiempo de temperatura medidas cerca del fondo durante noviembre y a media agua para el resto del tiempo de medición. Puede verse que los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR) están bien correlacionados en términos de los valores medios y en sus variaciones periódicas. El coeficiente de correlación es 0.98, la pendiente de recta de regresión es 0.95 y su ordenada al origen 0.46.

Figura 8.8.7 Correlación de la temperatura del mar en Punta Quilla. Número de datos: 13740



Para ilustrar acerca de las variaciones diarias espaciales de la temperatura se presentan las Figuras 8.8.9 a 8.8.16 que muestran los campos de temperatura superficial (en colores) y velocidades de las corrientes (con flechas) para el dominio de modelación durante 8 instantes del día 4 de enero de 2018. Las Figuras 8.8.17 a 8.8.28 presentan 12 instantes extraídos de los 12 meses del año 2018, se incluyen los vectores de la velocidad en superficie. Los promedios mensuales se presentan más delate en la comparación con datos satelitales.

Figura 8.8.8 Comparación entre la temperatura medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

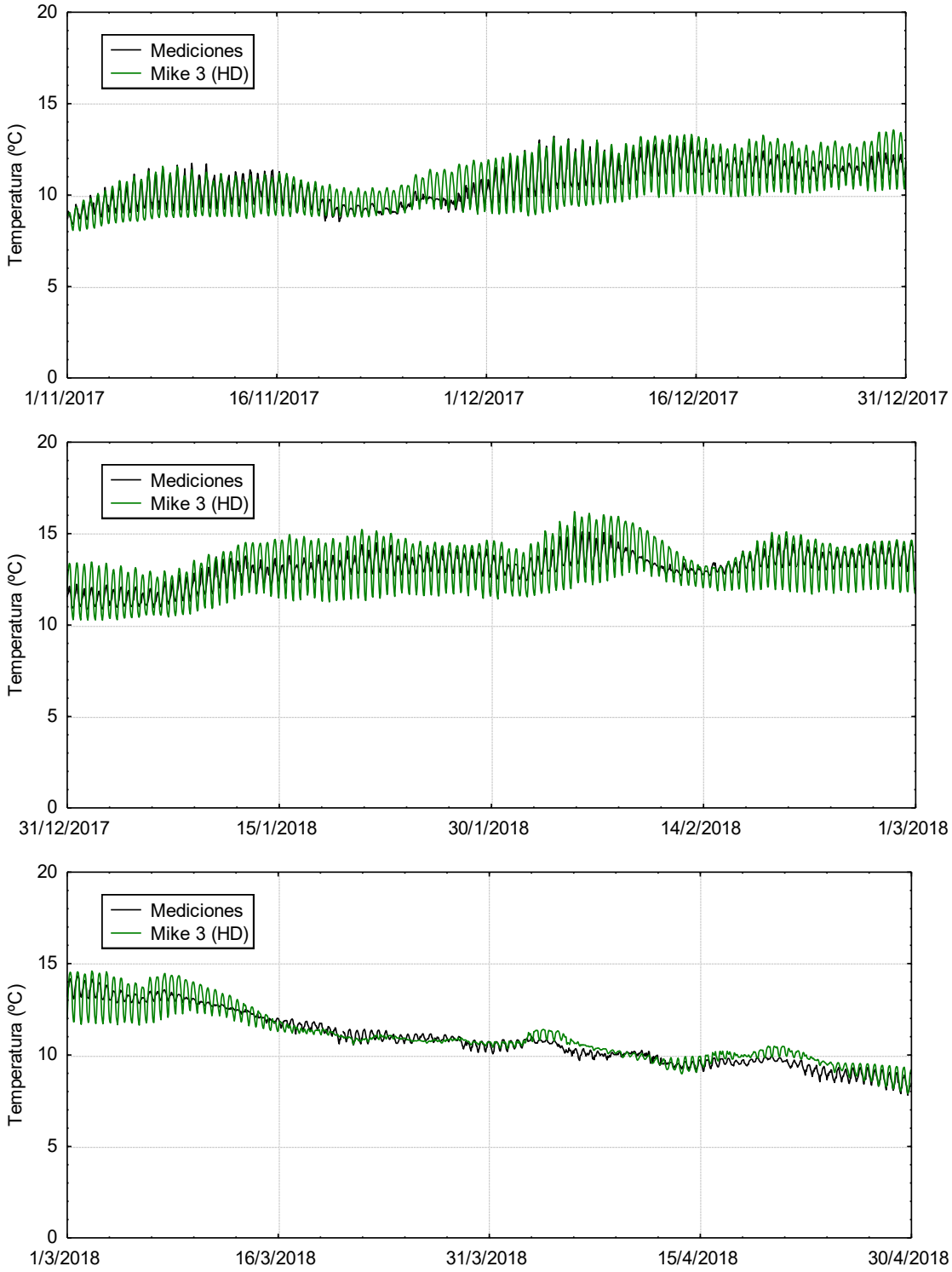


Figura 8.8.8 Continuación. Comparación entre la temperatura medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

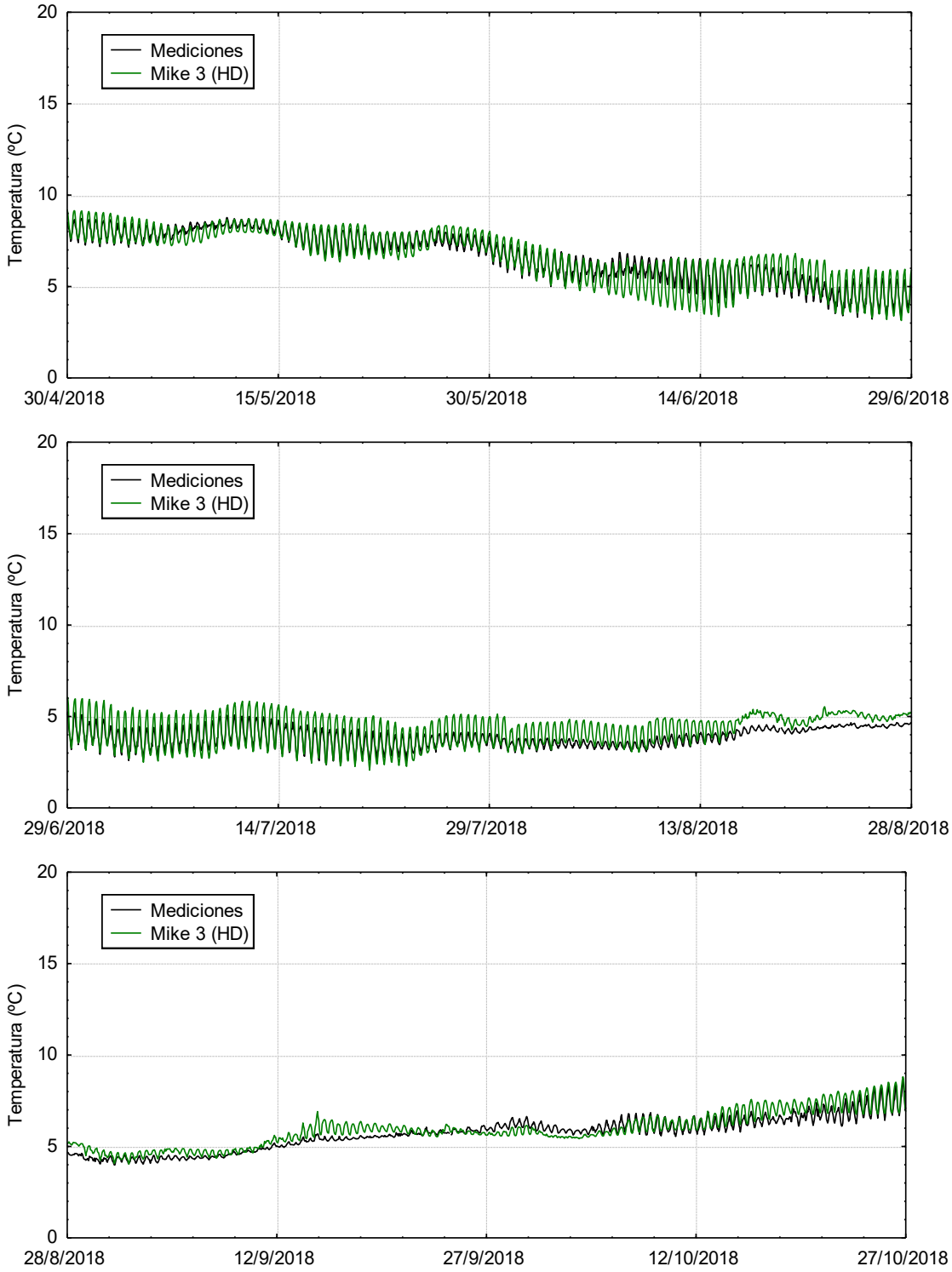
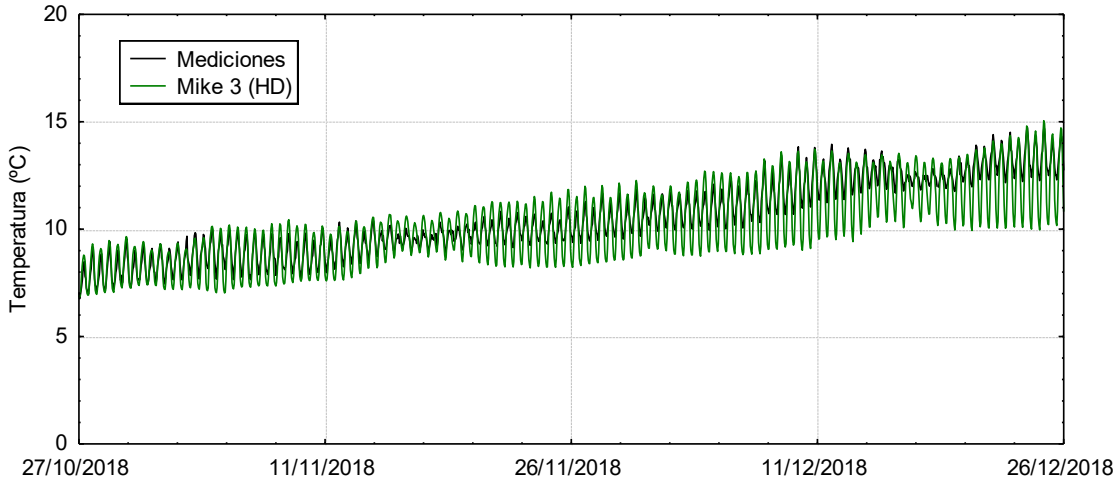
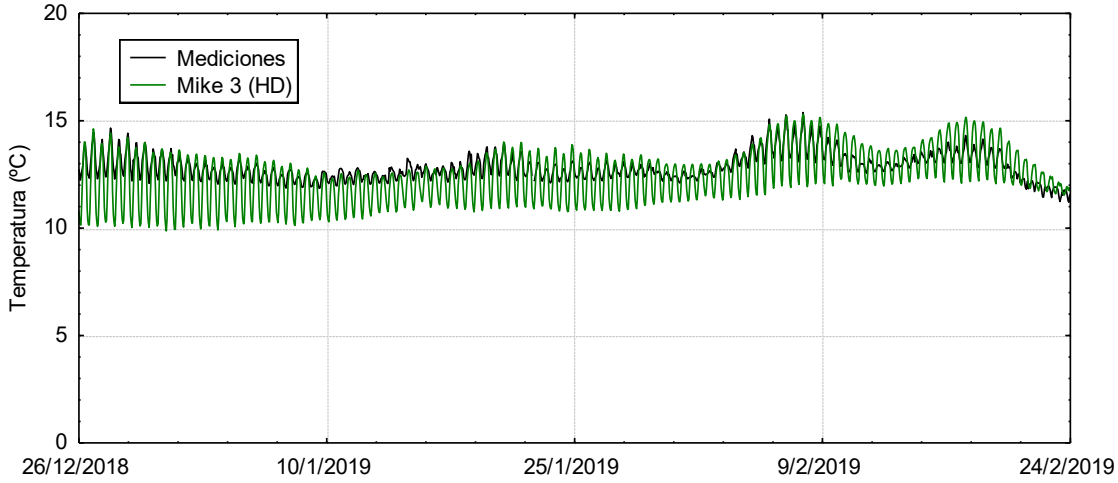


Figura 8.8.8 Continuación. Comparación entre la temperatura medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.





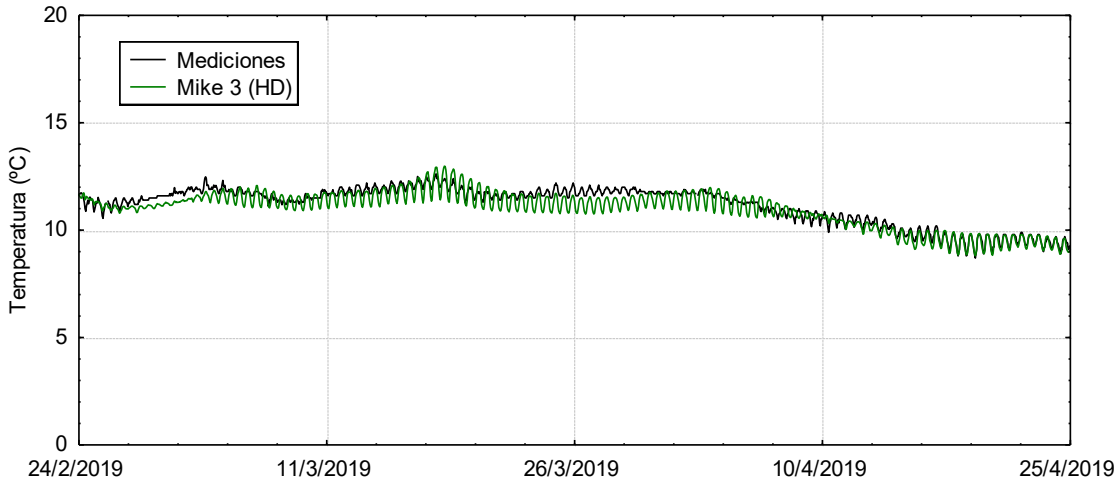


Figura 8.8.8 Continuación. Comparación entre la temperatura medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

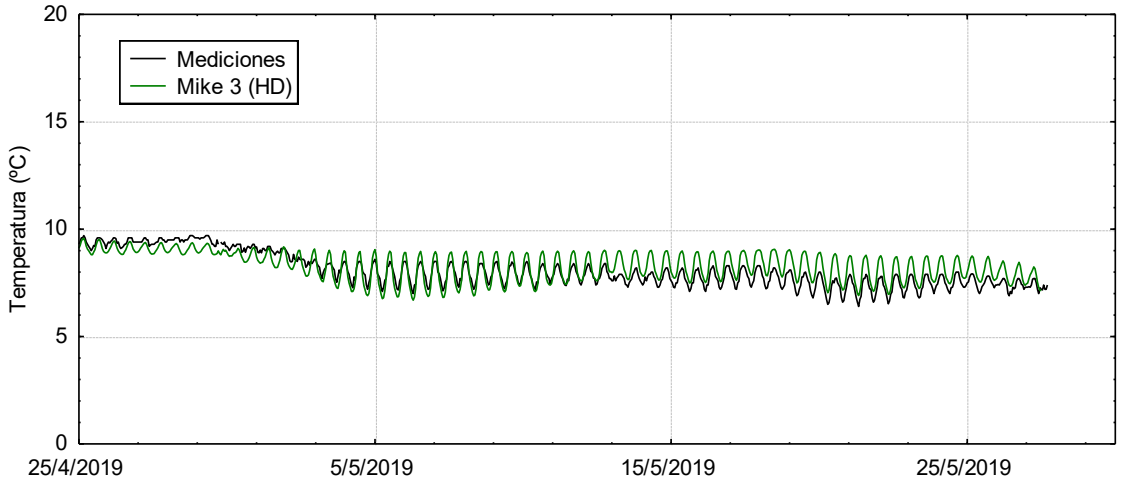


Figura 8.8.9 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de marea creciente el día 4 de enero de 2018 a las 10:00.

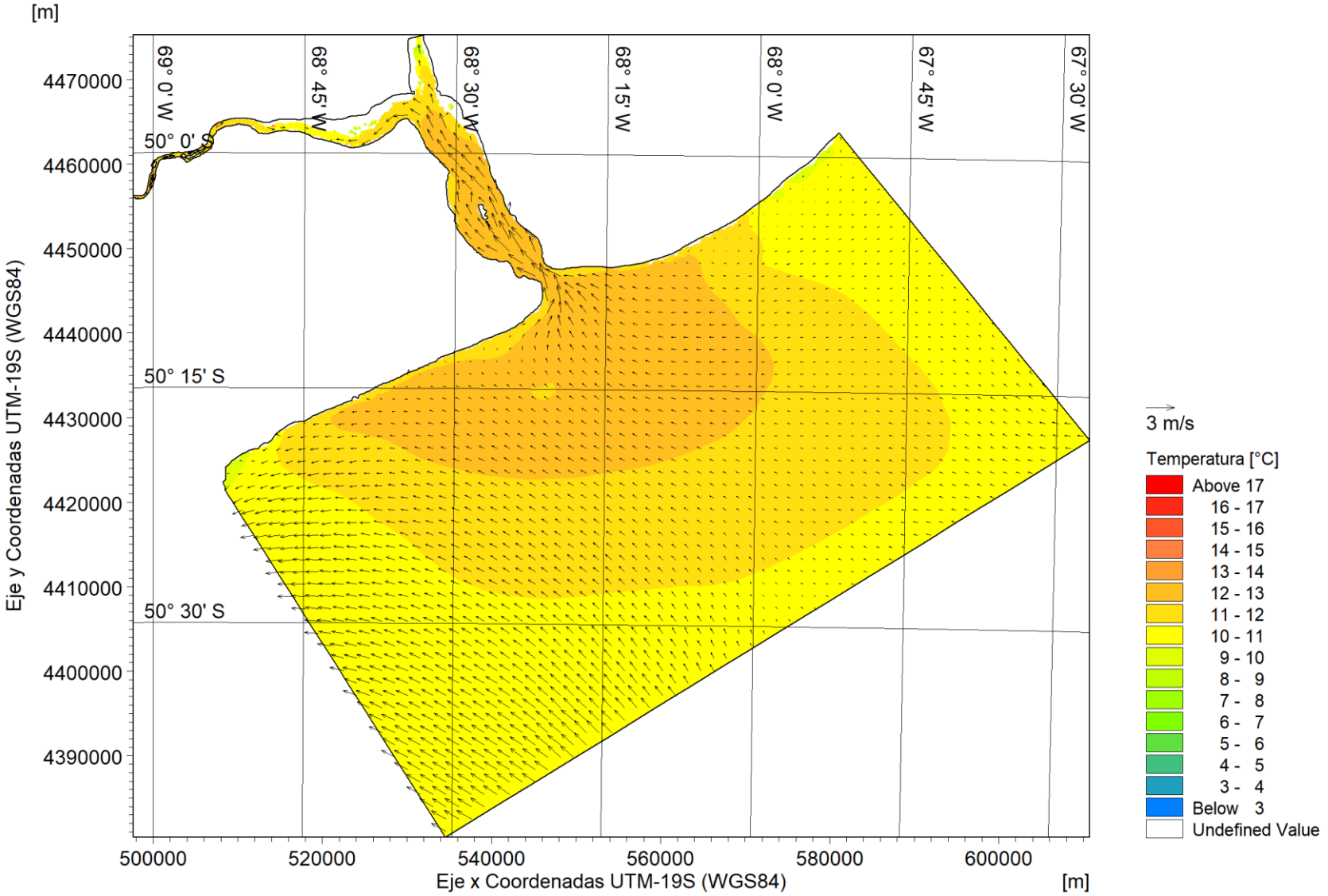


Figura 8.8.10 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de pleamar el día 4 de enero de 2018 a las 13:00.

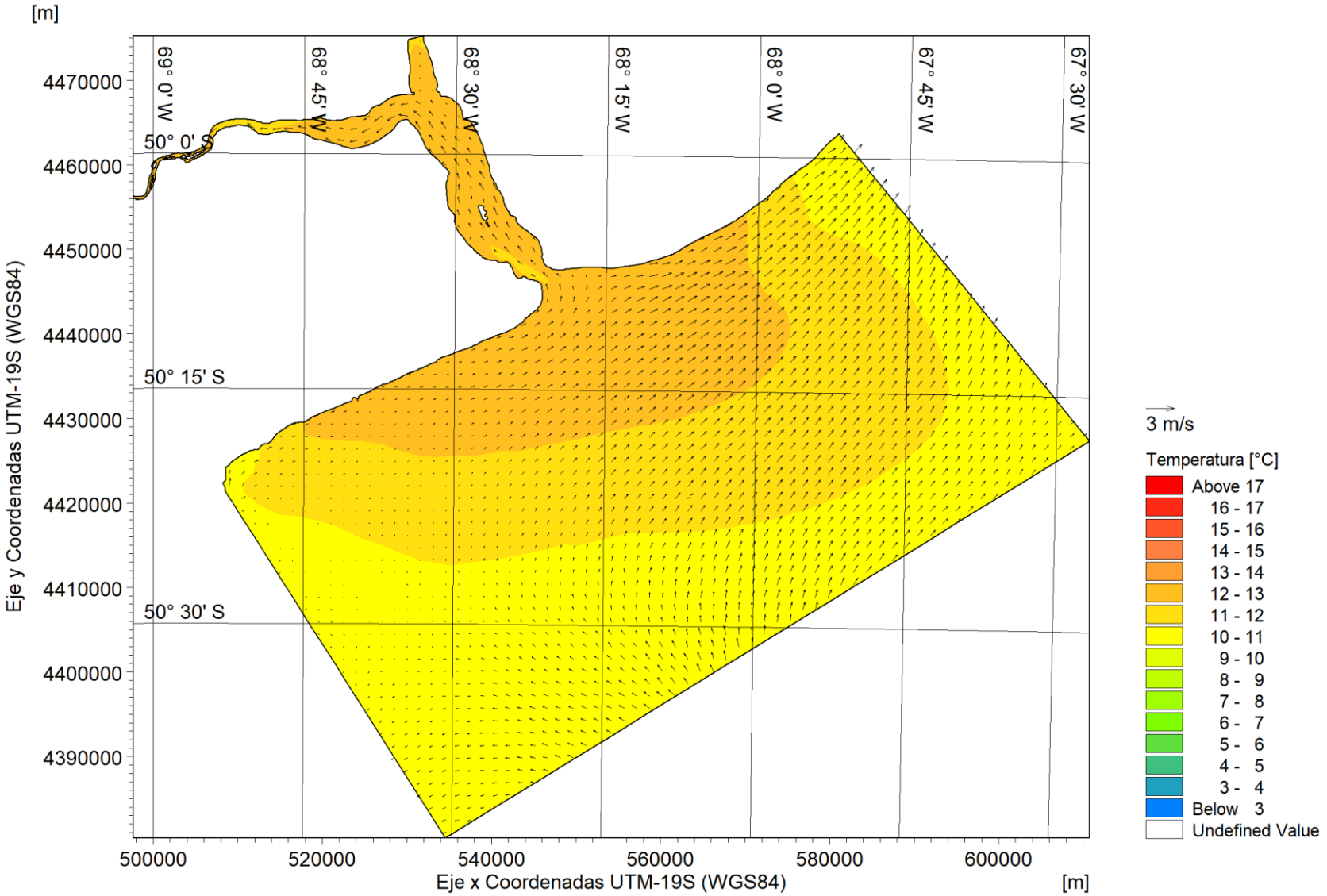


Figura 8.8.11 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de marea bajante el día 4 de enero de 2018 a las 16:00.

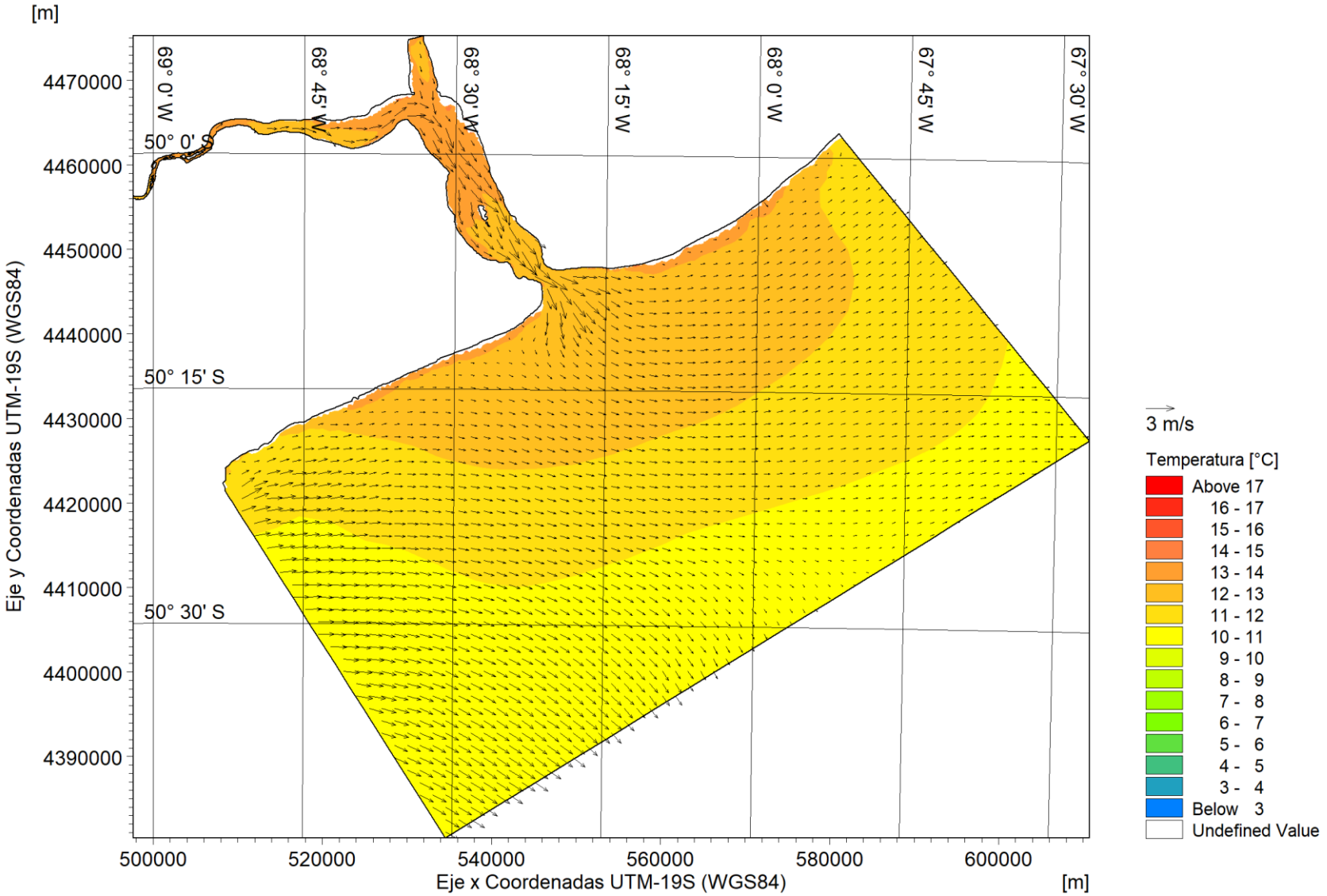


Figura 8.8.12 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de bajamar el día 4 de enero de 2018 a las 19:00.

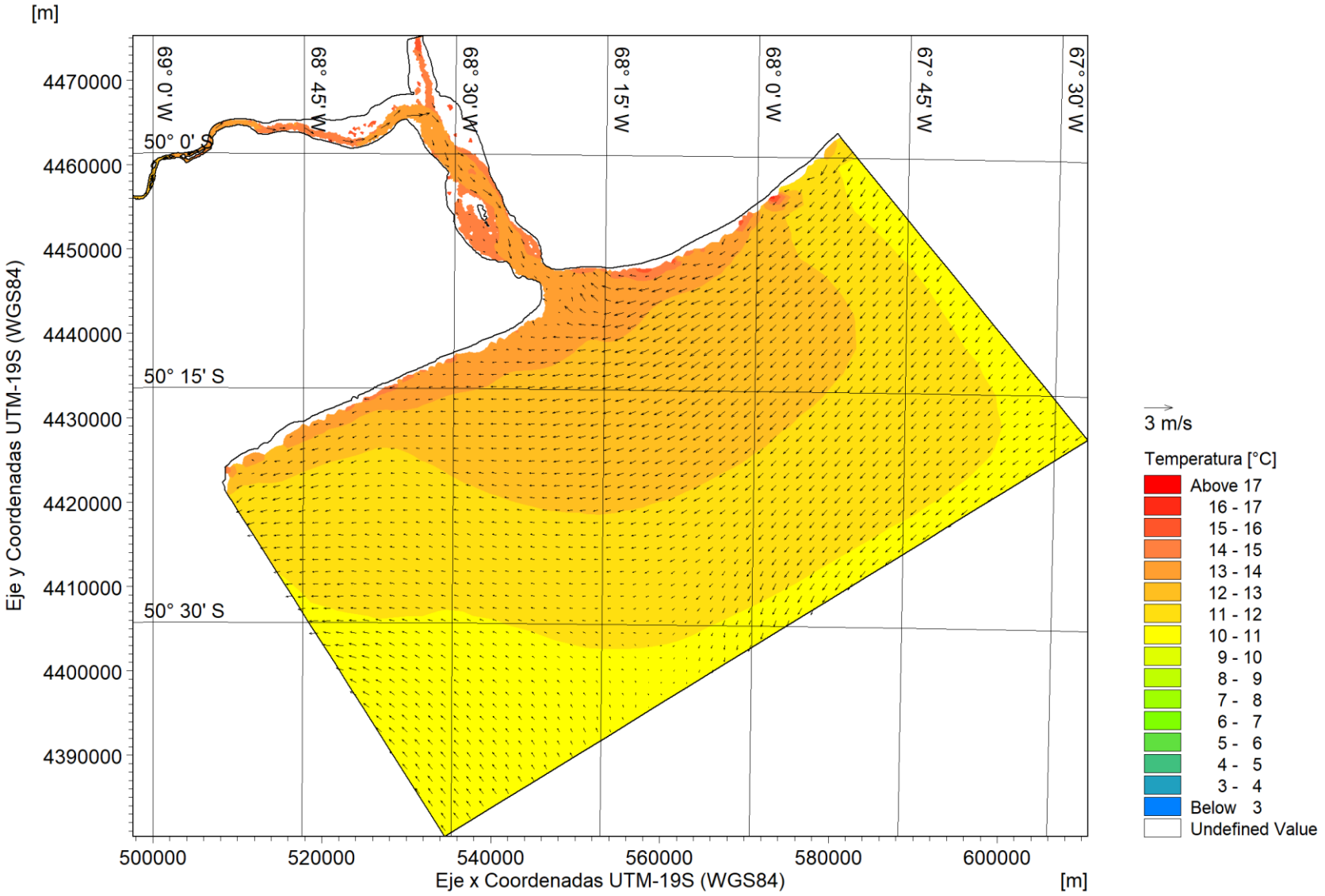


Figura 8.8.13 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de marea creciente el día 2 de febrero de 2018 a las 10:00.

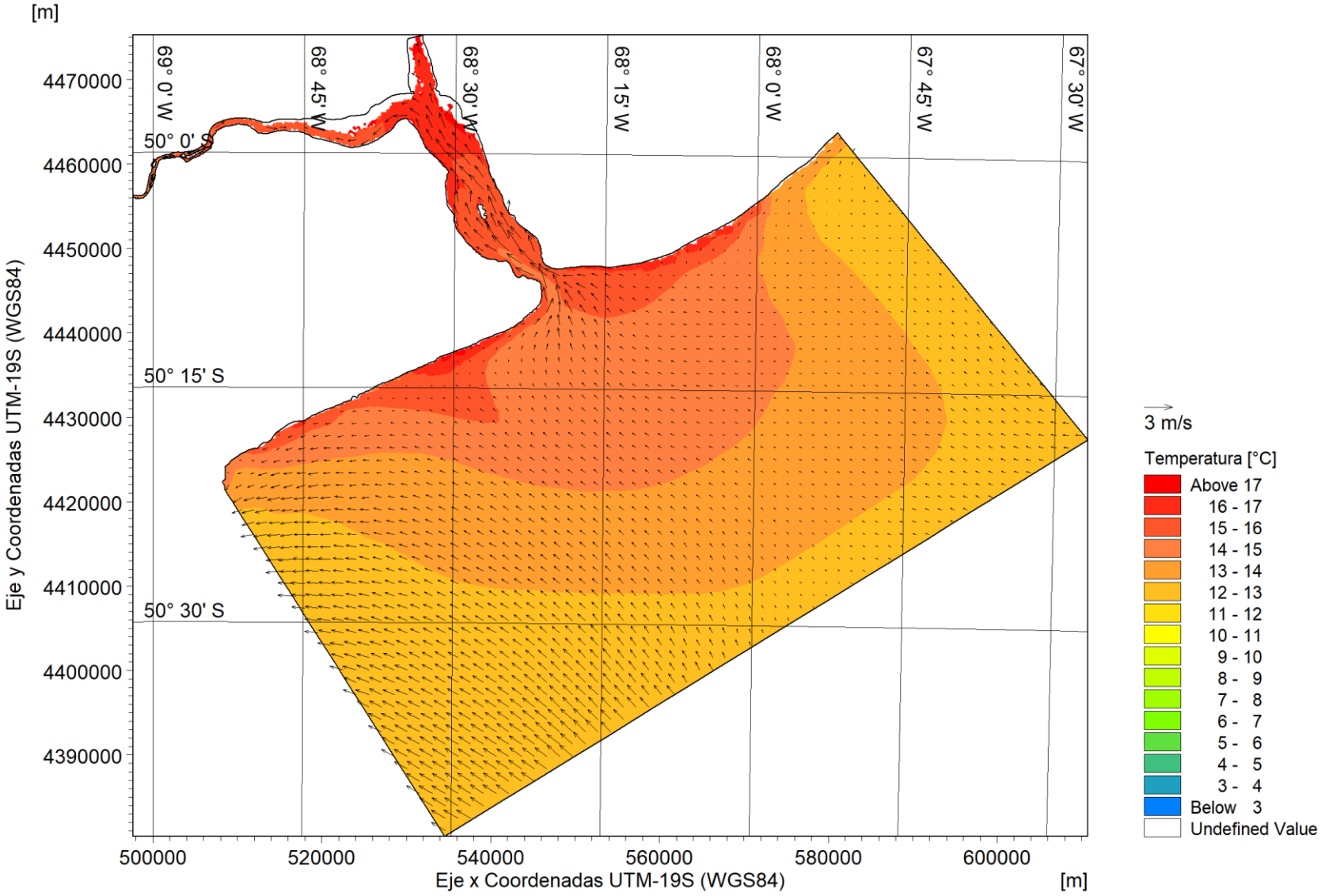


Figura 8.8.14 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de pleamar el día 2 de febrero de 2018 a las 13:00.

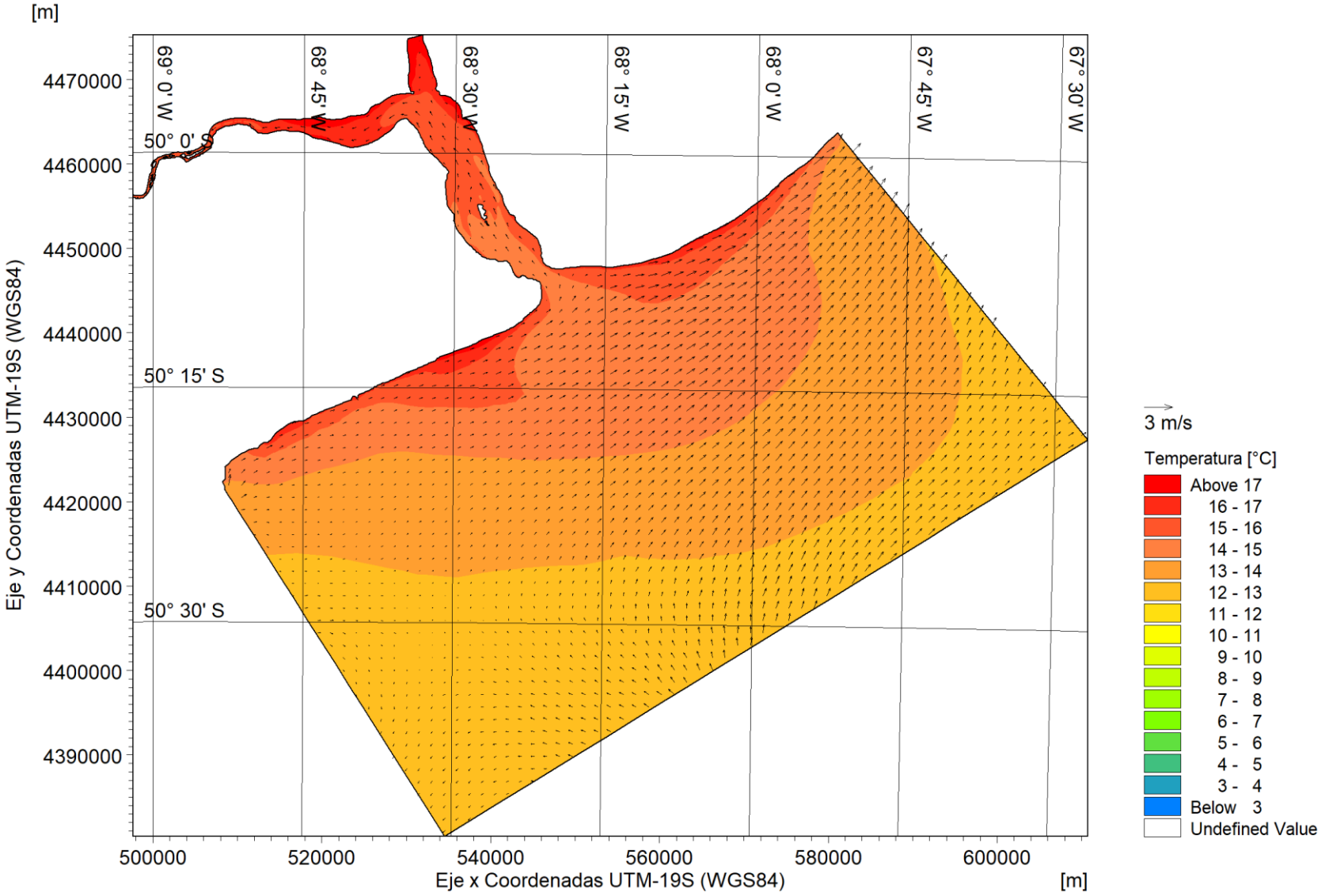


Figura 8.8.15 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de pleamar el día 2 de febrero de 2018 a las 16:00.

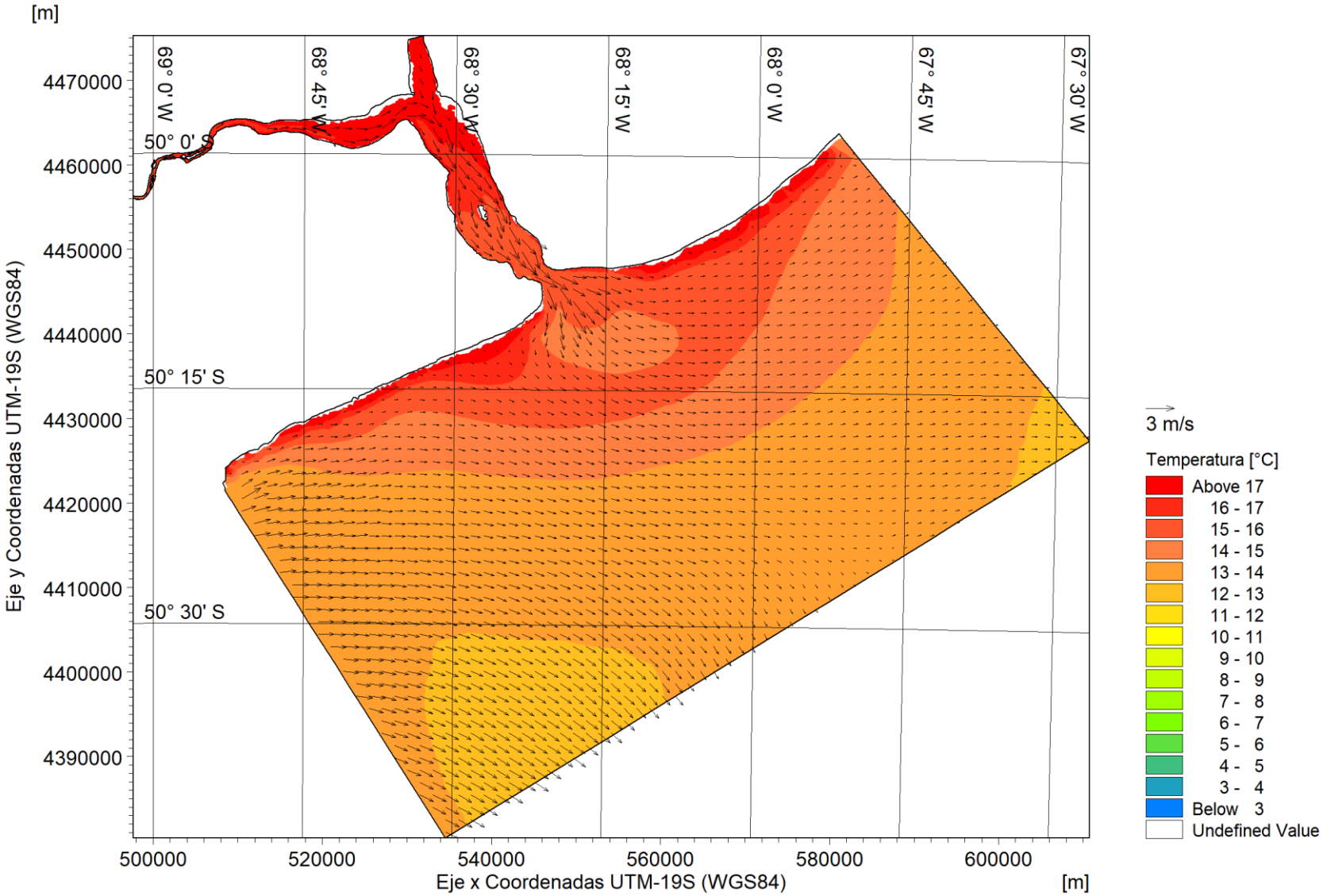


Figura 8.8.16 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación en un instante de simulación con condición de bajamar el día 2 de febrero de 2018 a las 19:00.

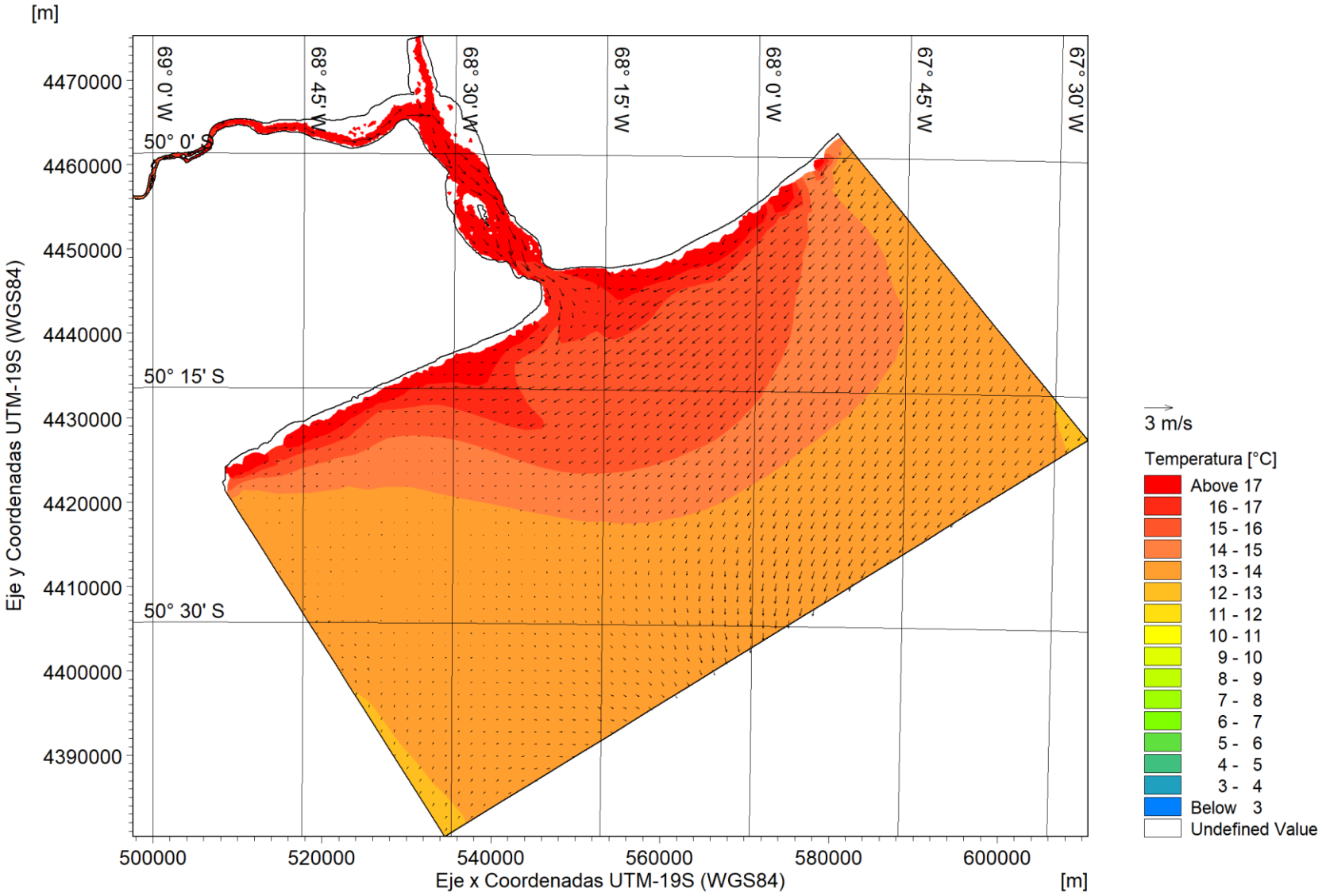


Figura 8.8.17 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Enero de 2018.

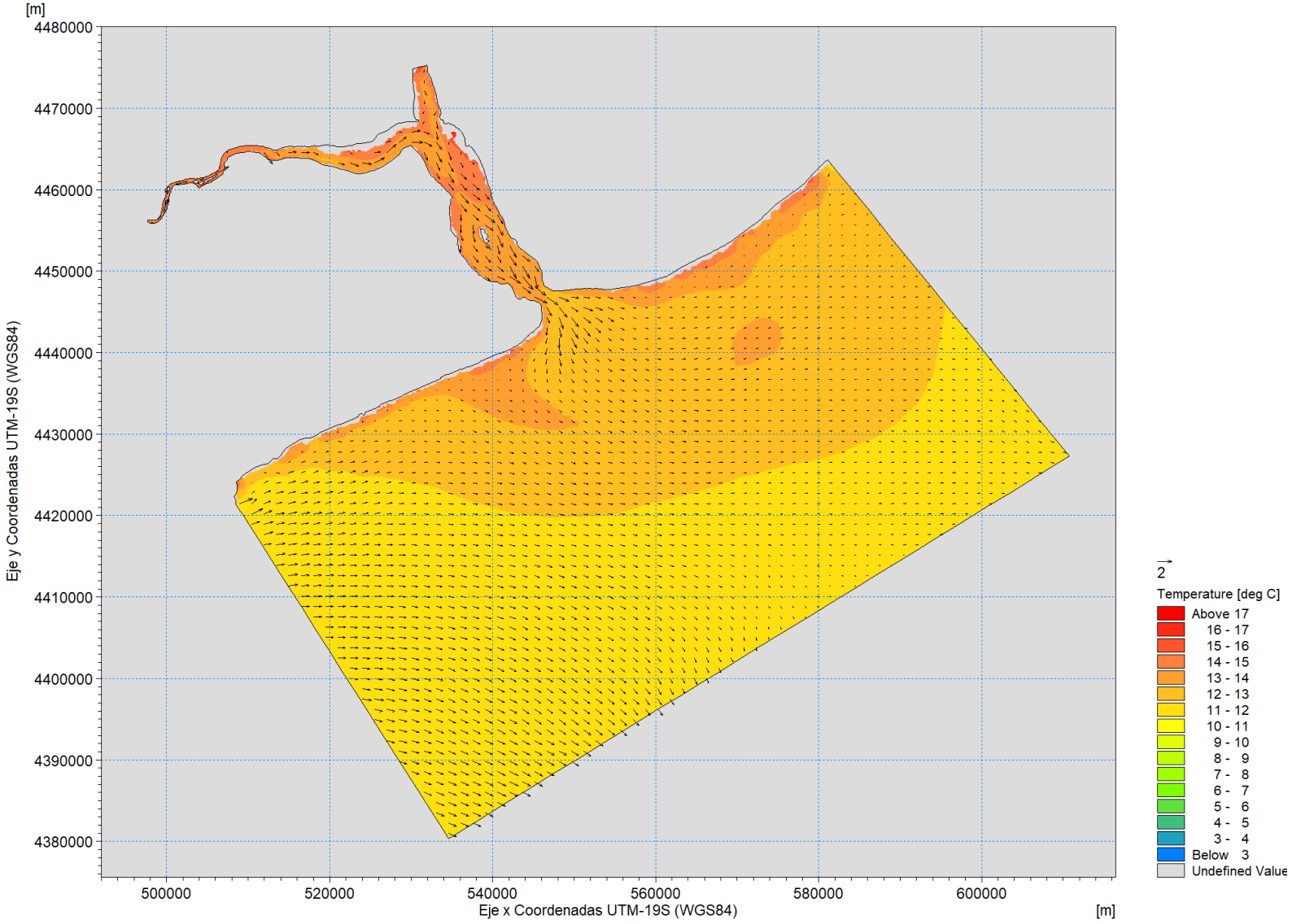


Figura 8.8.18 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Febrero de 2018.

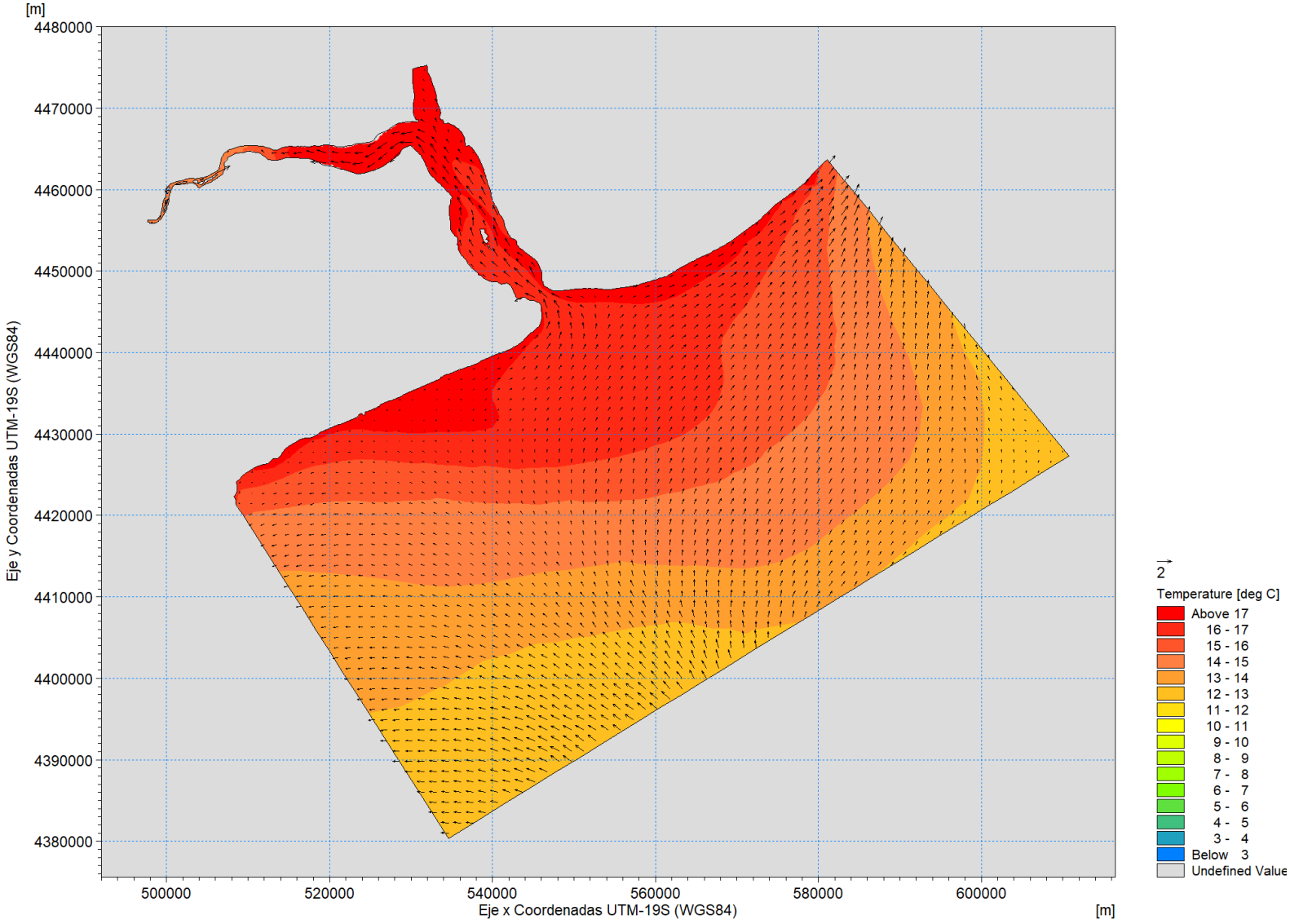


Figura 8.8.19 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Marzo de 2018.

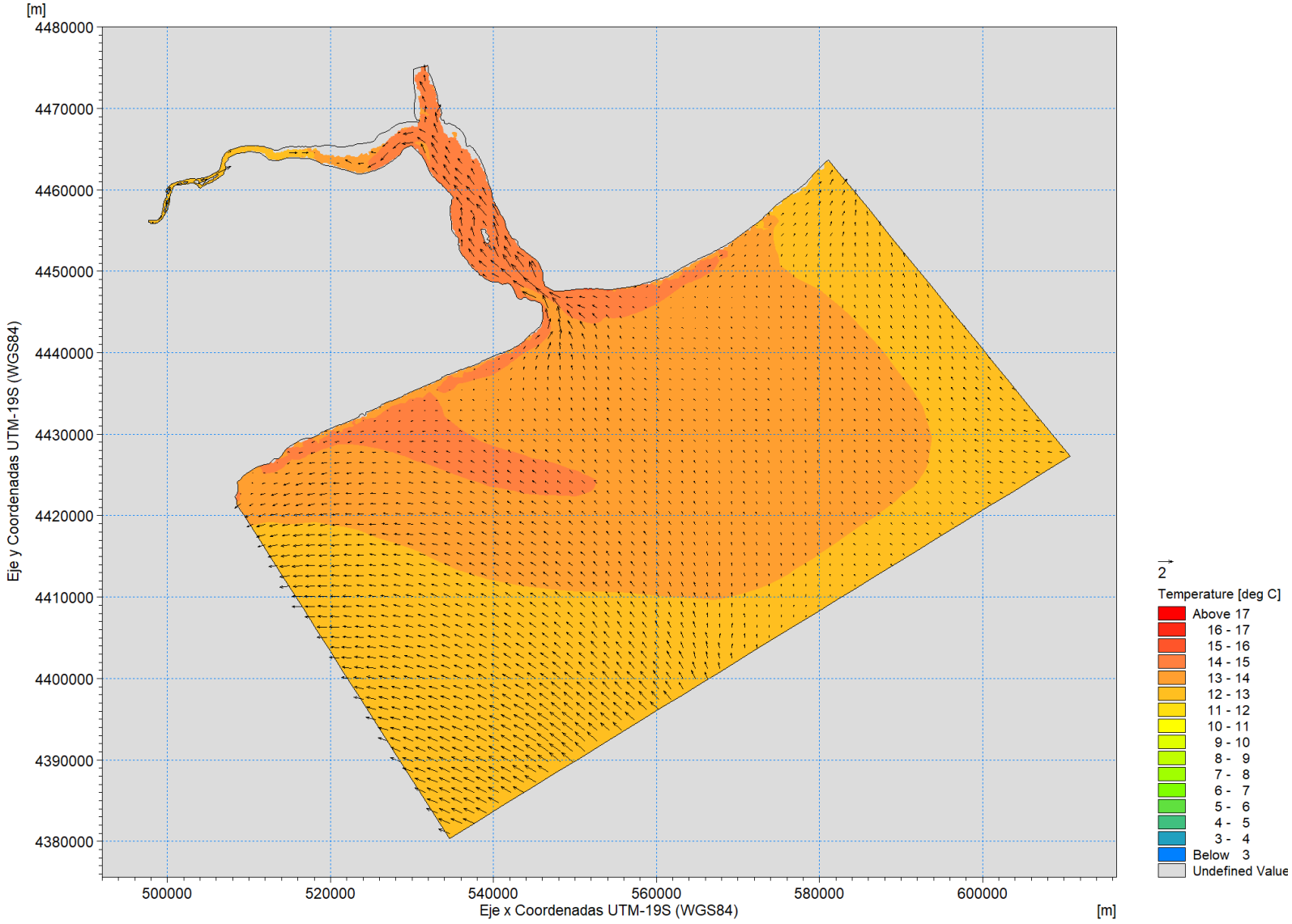


Figura 8.8.20 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Abril de 2018.

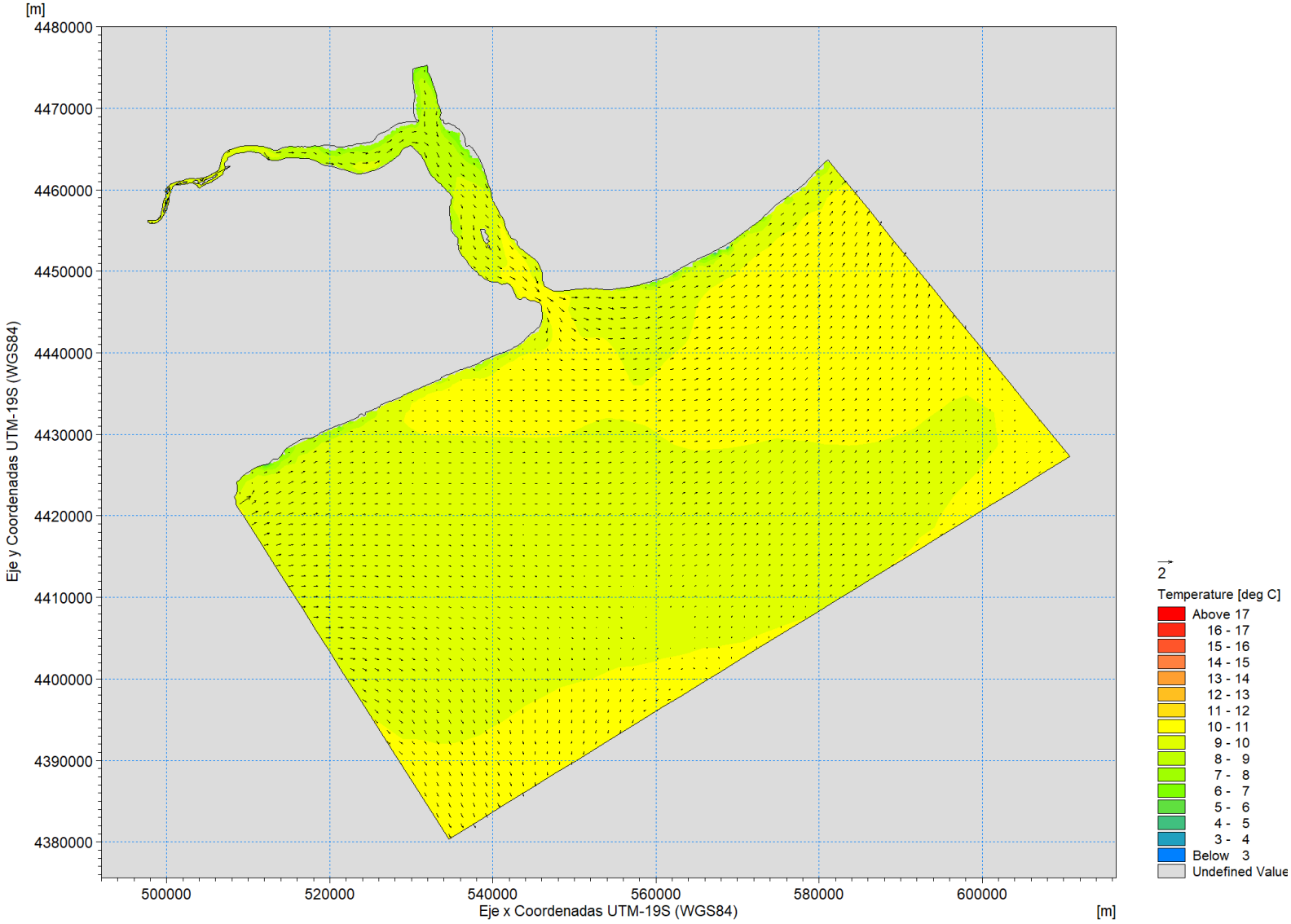


Figura 8.8.21 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Mayo de 2018.

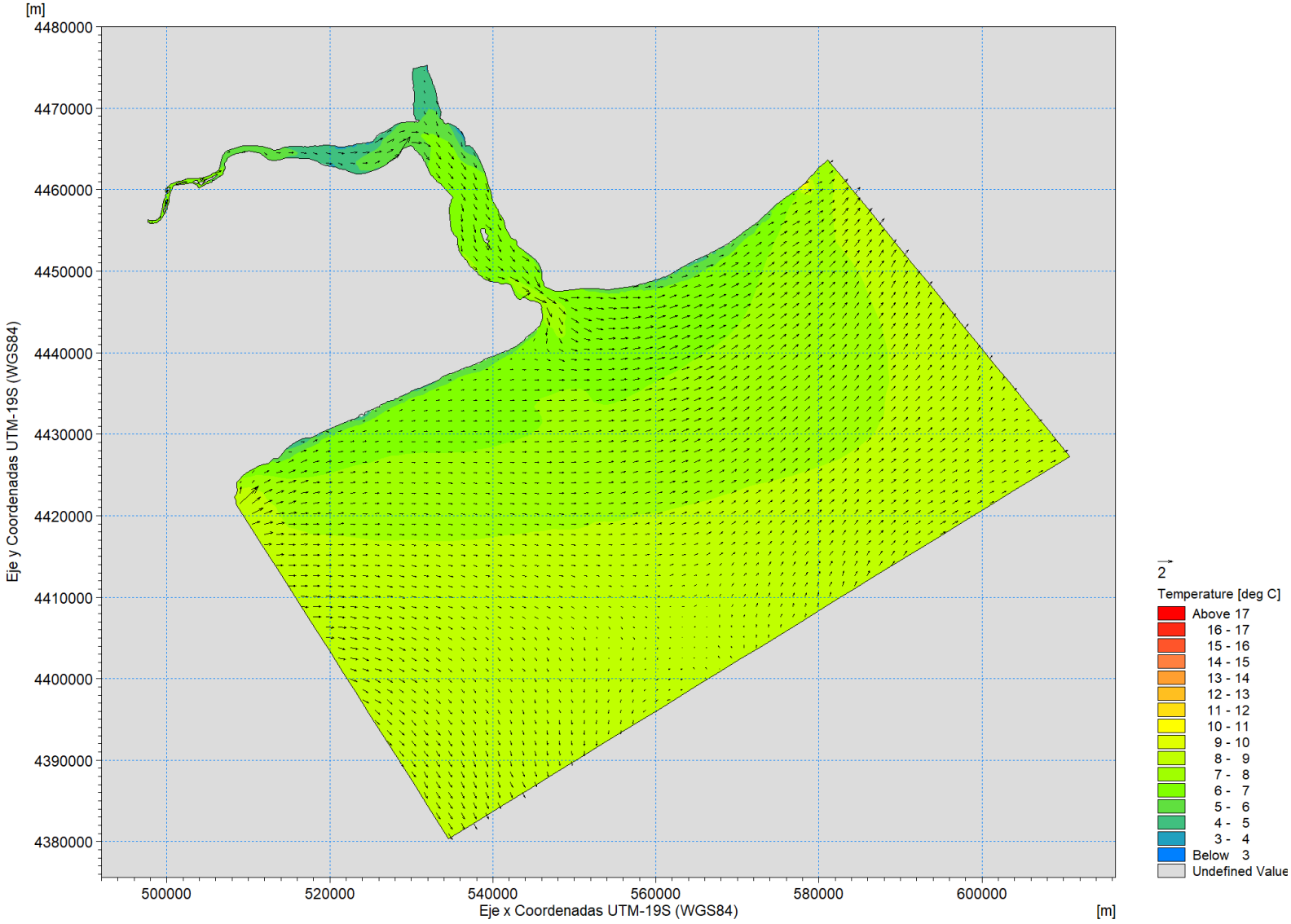


Figura 8.8.22 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) en el dominio de modelación para un instante de simulación. Junio de 2018.

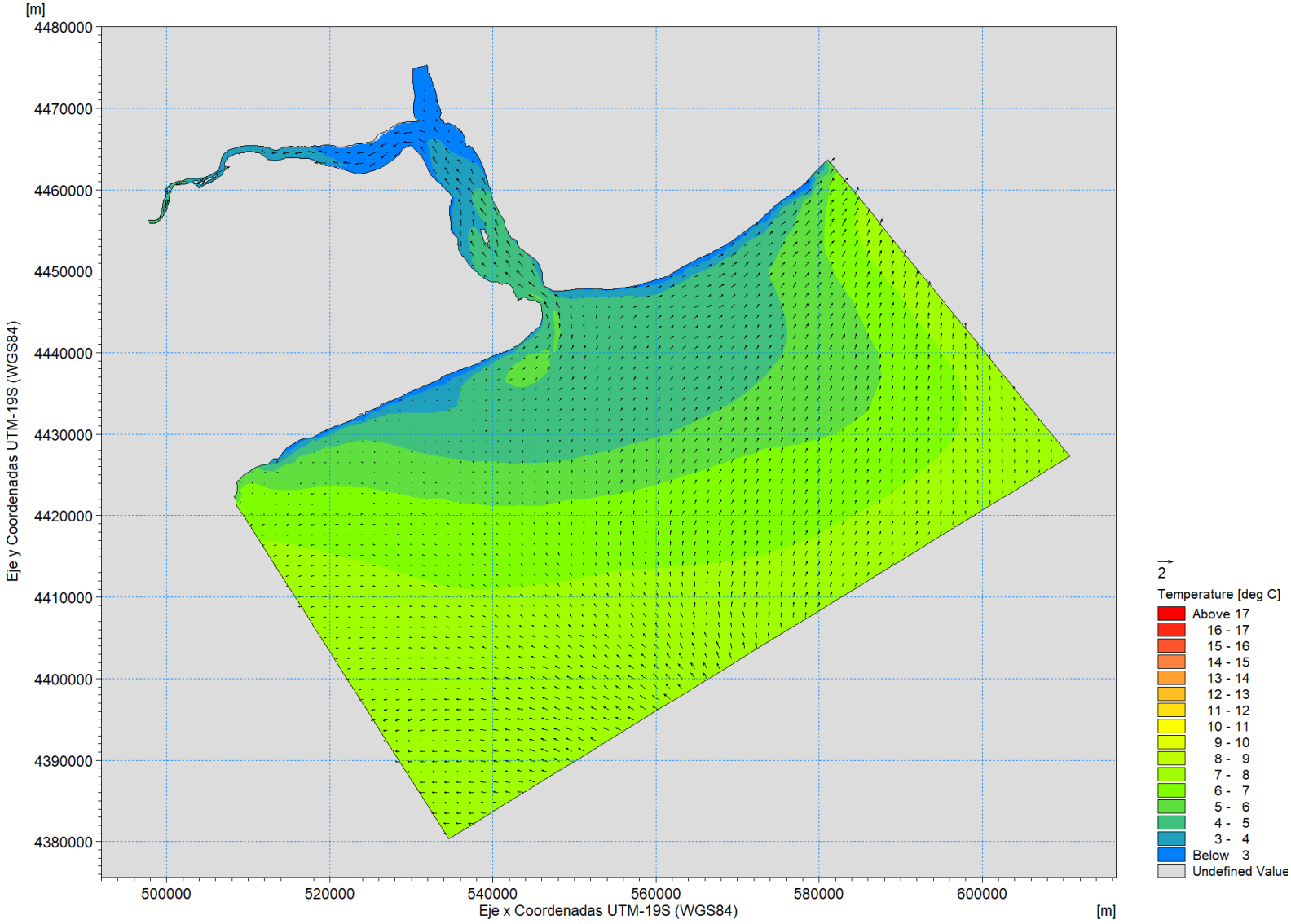


Figura 8.8.23 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) en el dominio de modelación para un instante de simulación. Julio de 2018.

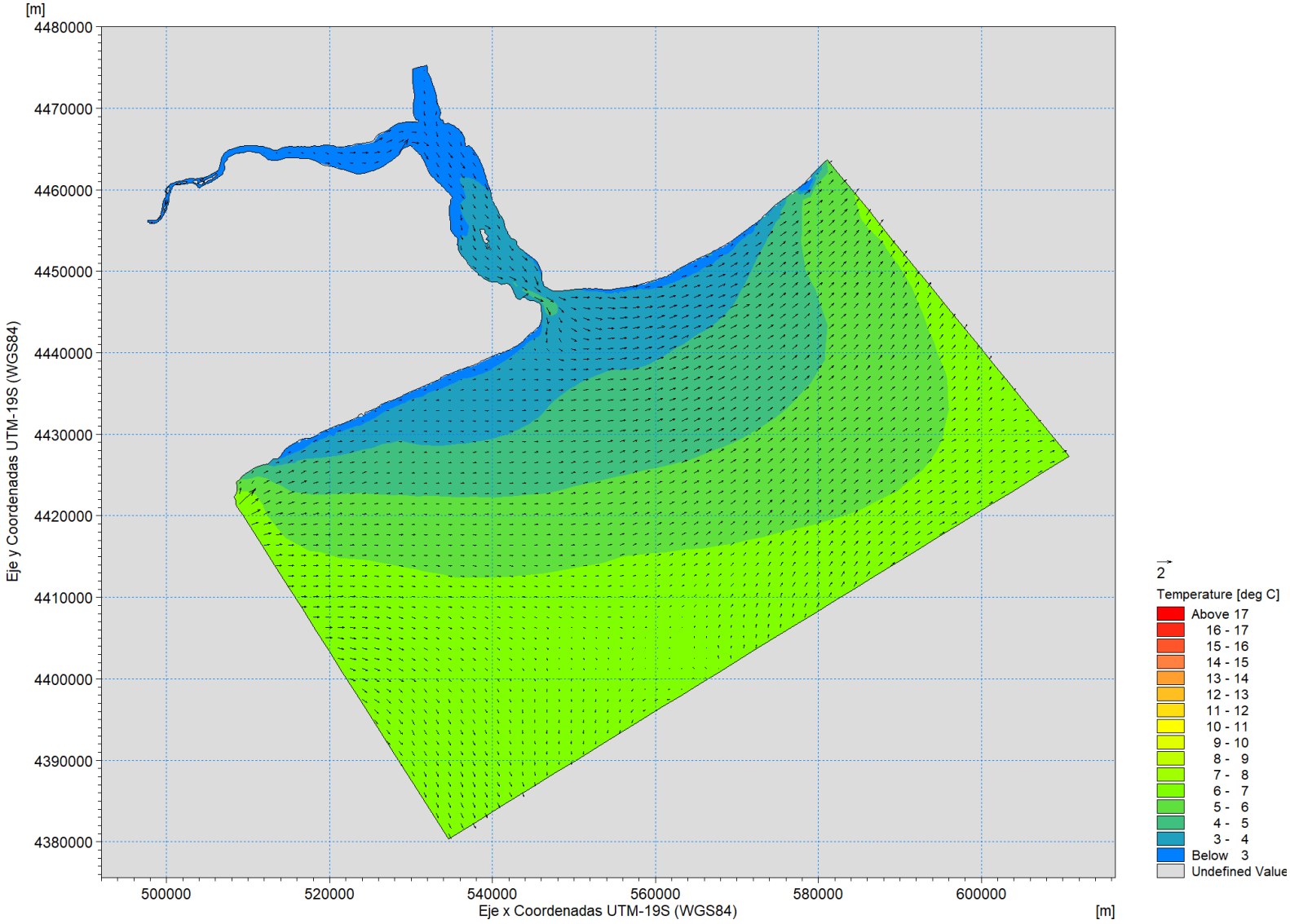


Figura 8.8.24 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) en el dominio de modelación para un instante de simulación. Agosto de 2018.

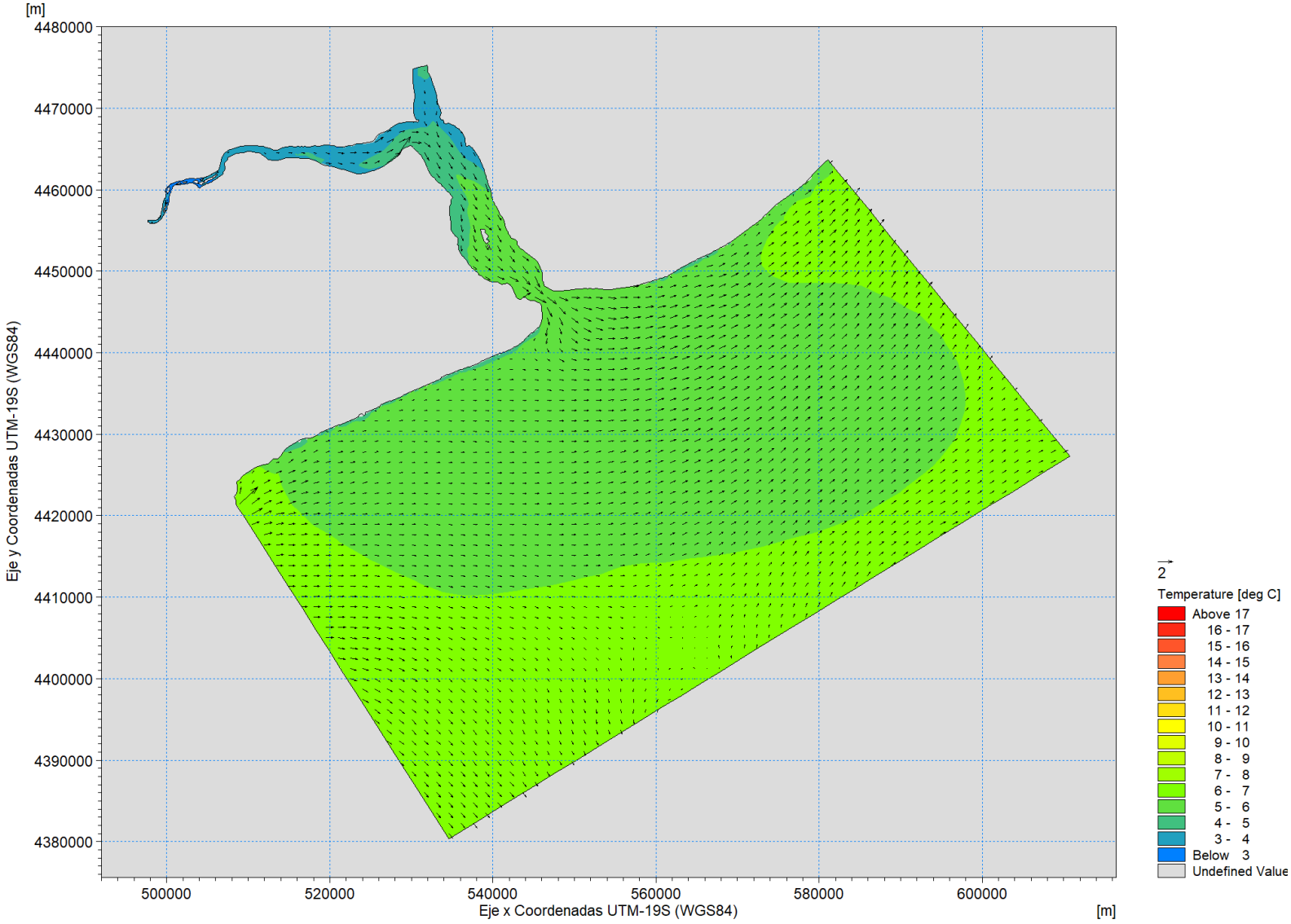


Figura 8.8.25 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) en el dominio de modelación para un instante de simulación. Septiembre de 2018.

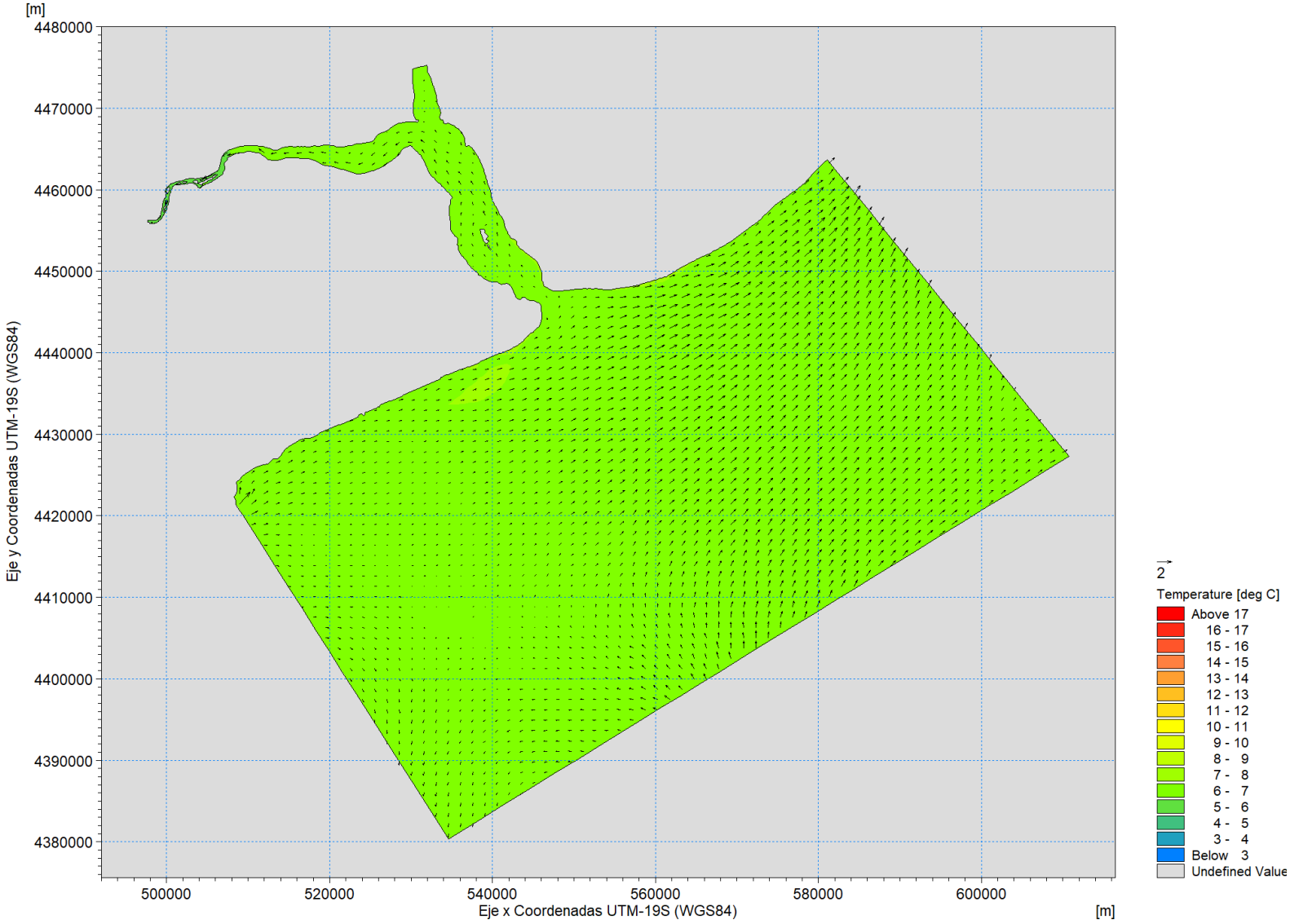


Figura 8.8.26Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (con vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Octubre de 2018.

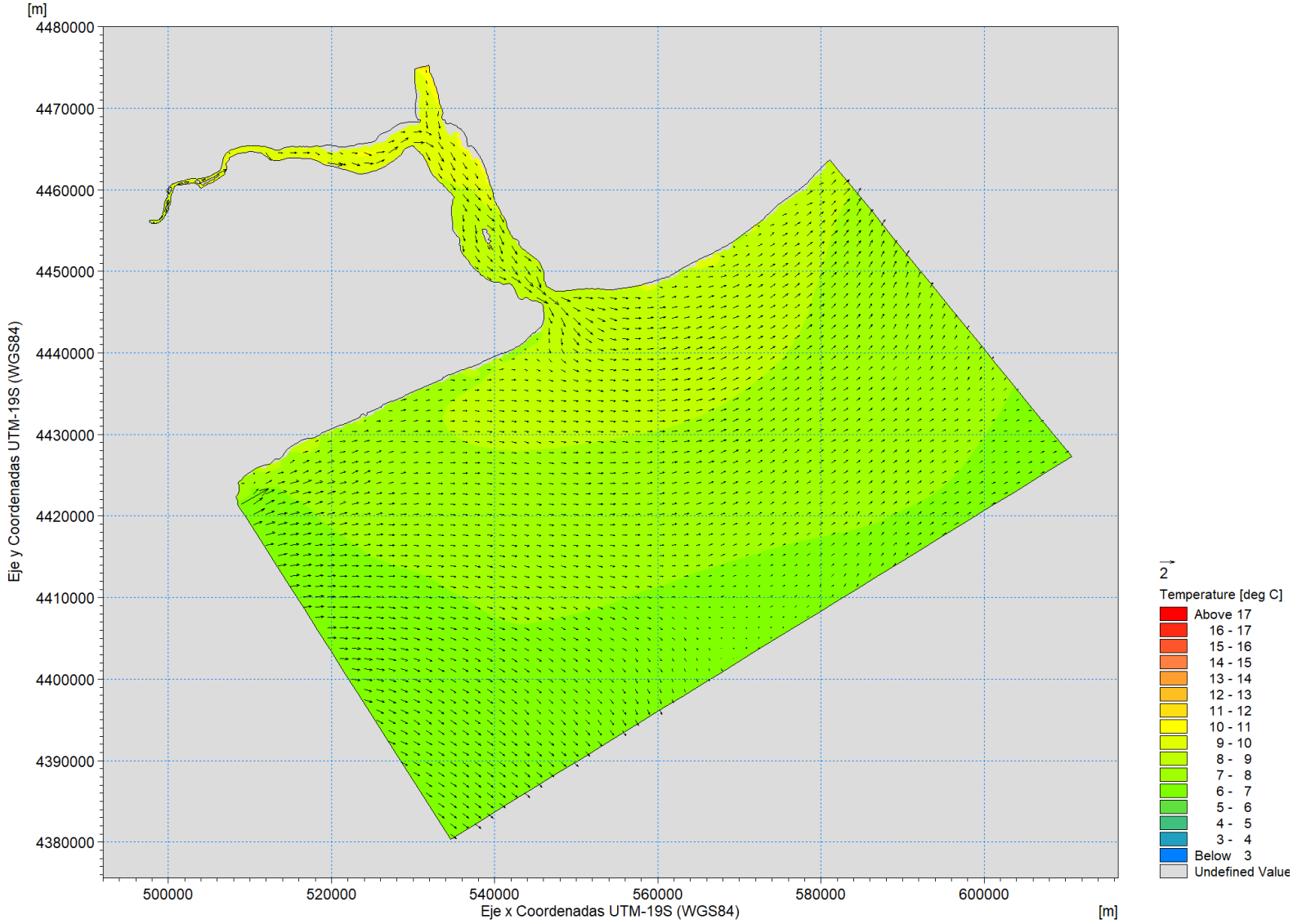


Figura 8.8.27 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Noviembre de 2018.

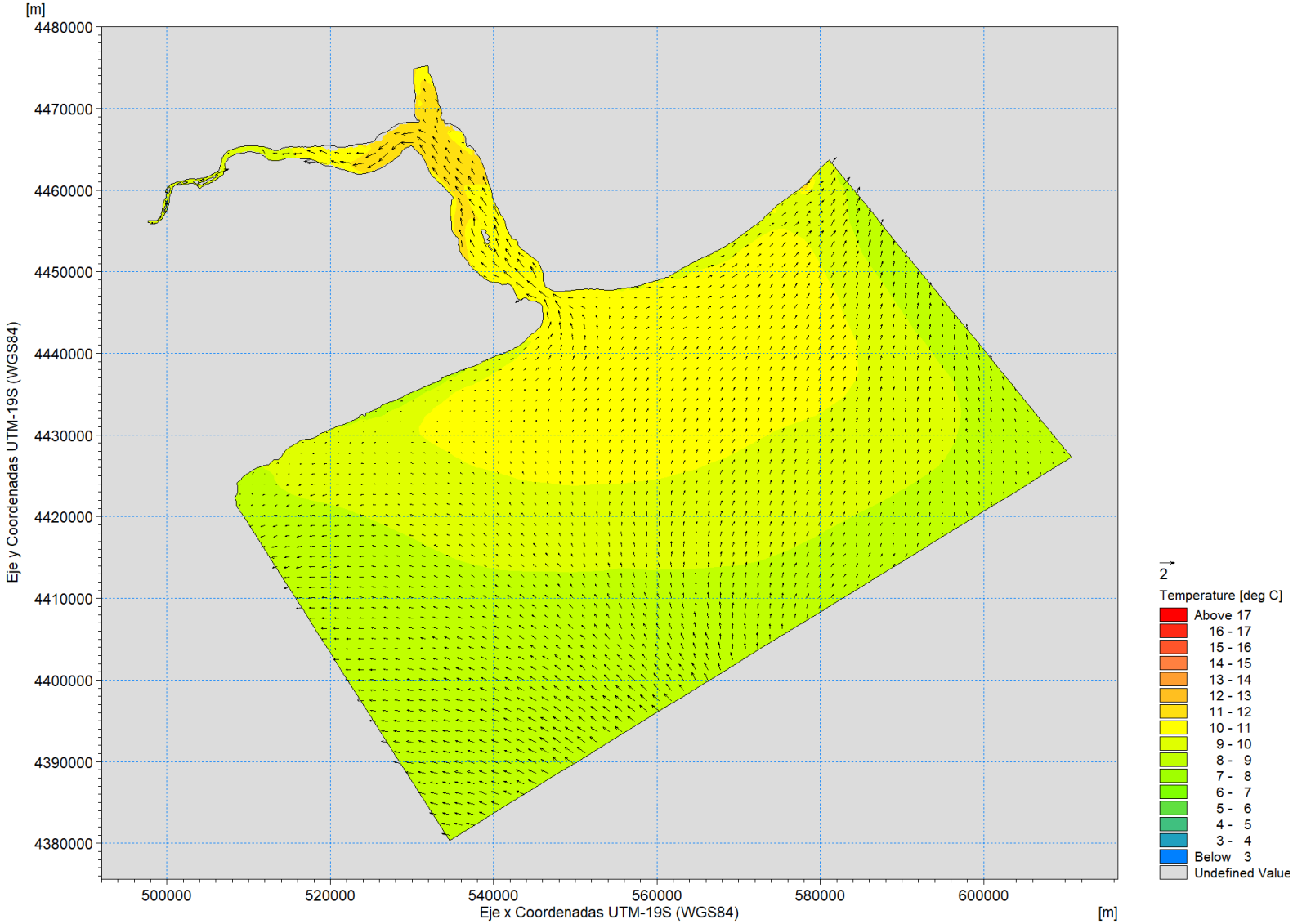
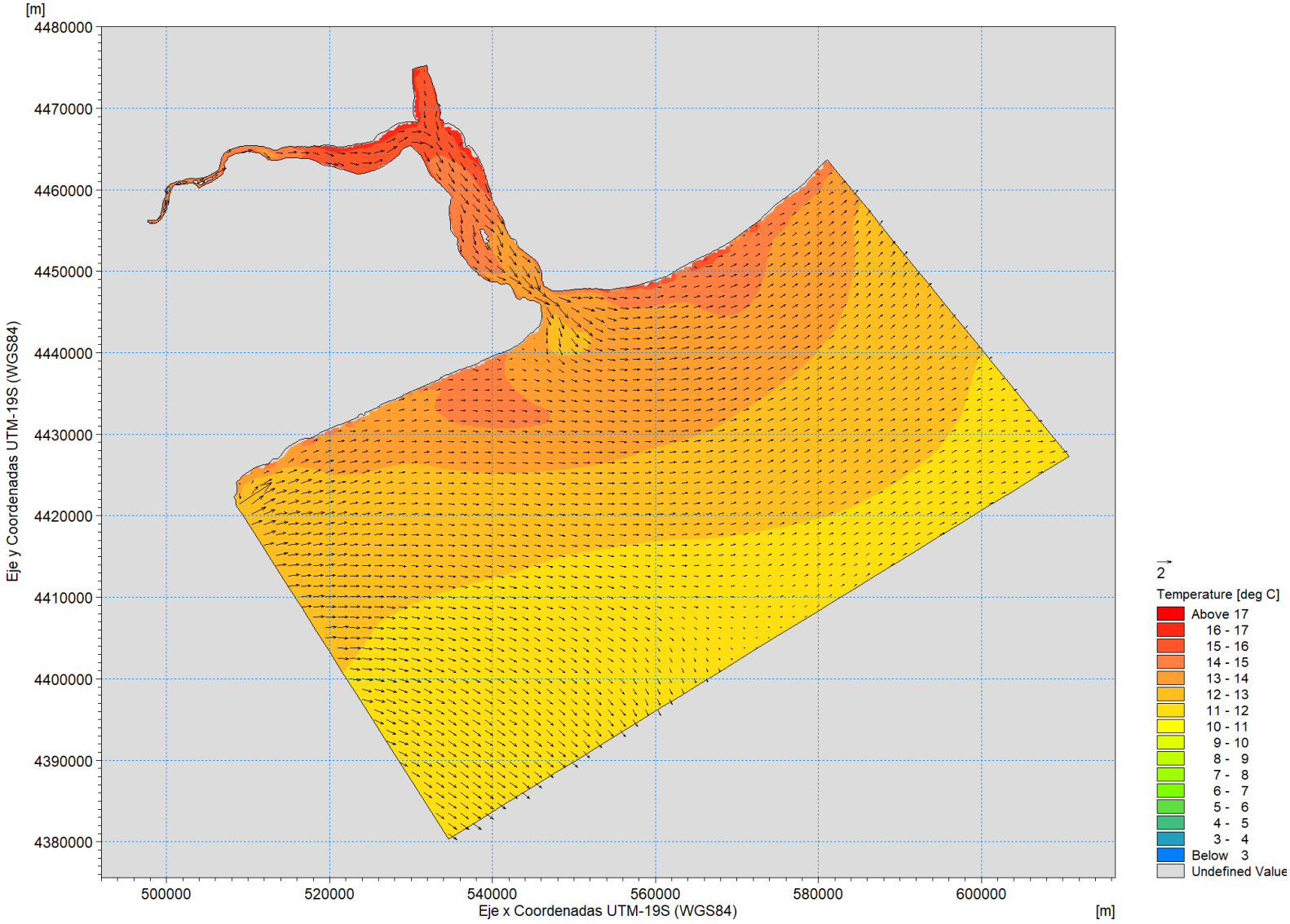


Figura 8.8.28 Campo de temperatura superficial (colores) y velocidades de las corrientes (vectores) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Diciembre de 2018.



Salinidad en Punta Quilla

Para observar el comportamiento de la salinidad se realizaron corridas del MIKE 3 Flow Model FM (HD) en busca de un ajuste satisfactorio. Las Figuras 8.8.29 y 8.8.30 muestran las comparaciones entre la salinidad (calculada en base a la conductividad) y calculadas con MIKE 3 Flow Model FM (HD) durante noviembre de 2017 y abril de 2018. En este caso, son series de tiempo de salinidad medidas cerca del fondo. Puede verse que los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) están bien correlacionados en términos de los valores medios y en sus variaciones periódicas, aunque se observa cierta dispersión principalmente hacia salinidades menores y con un alejamiento mayor entre las series para los períodos de cuadraturas. El coeficiente de correlación es 0.91, la pendiente de recta de regresión es 1.1 y la ordenada al origen -3.7.

Las Figuras 8.8.31 y 8.8.32 ilustran acerca de los campos de salinidad superficial (en colores) y velocidades de las corrientes (con flechas) para el dominio de modelación para la marea en condición de bajante y creciente.

Figura 8.8.29 Correlación de la salinidad en Punta Quilla. Número de datos: 13740

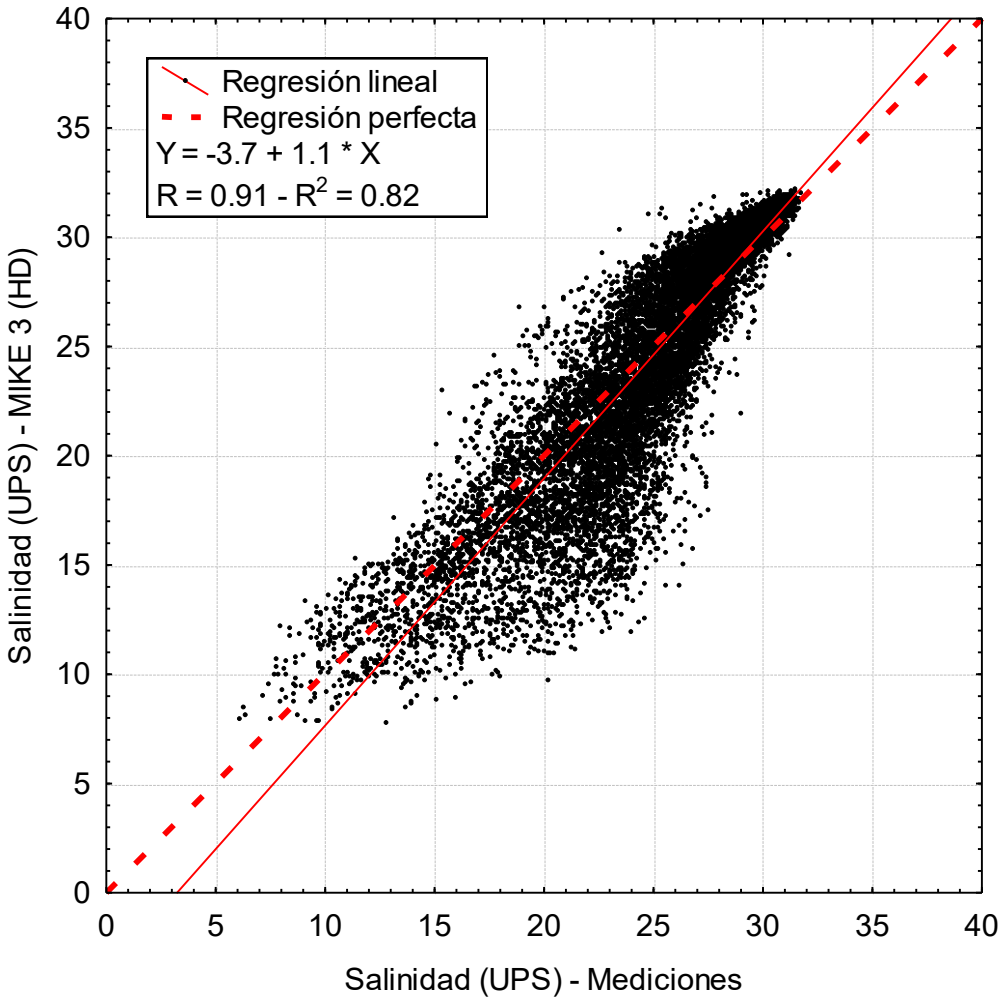


Figura 8.8.30 Comparación entre la salinidad medida y calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

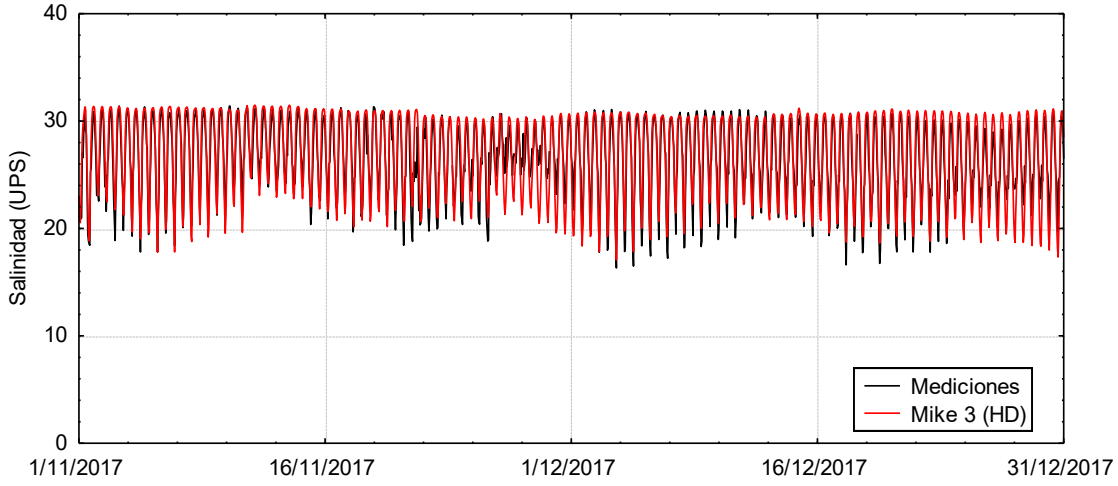


Figura 8.8.30 Continuación. Comparación entre la salinidad medida y calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

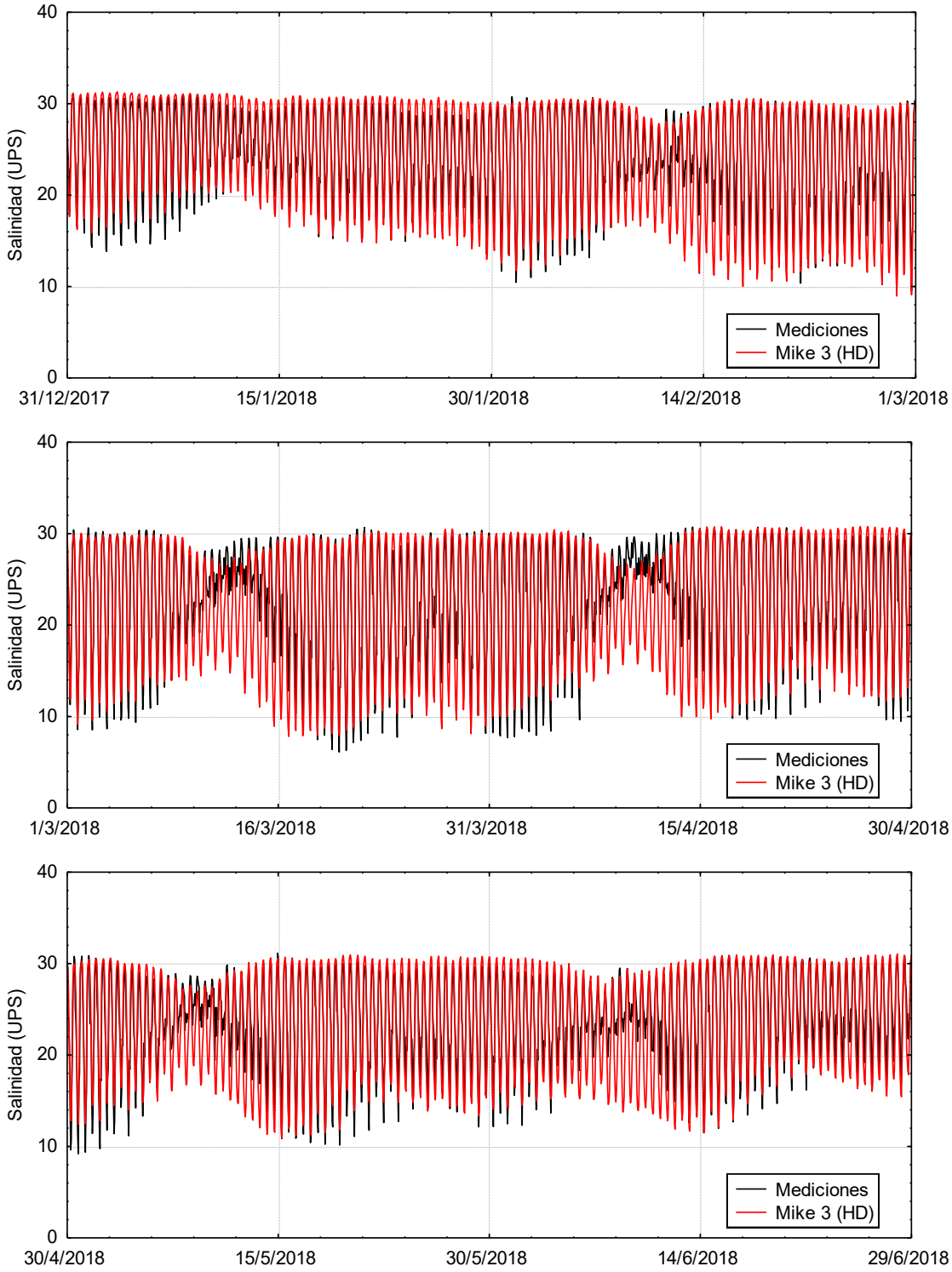


Figura 8.8.30 Continuación. Comparación entre la salinidad medida y calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

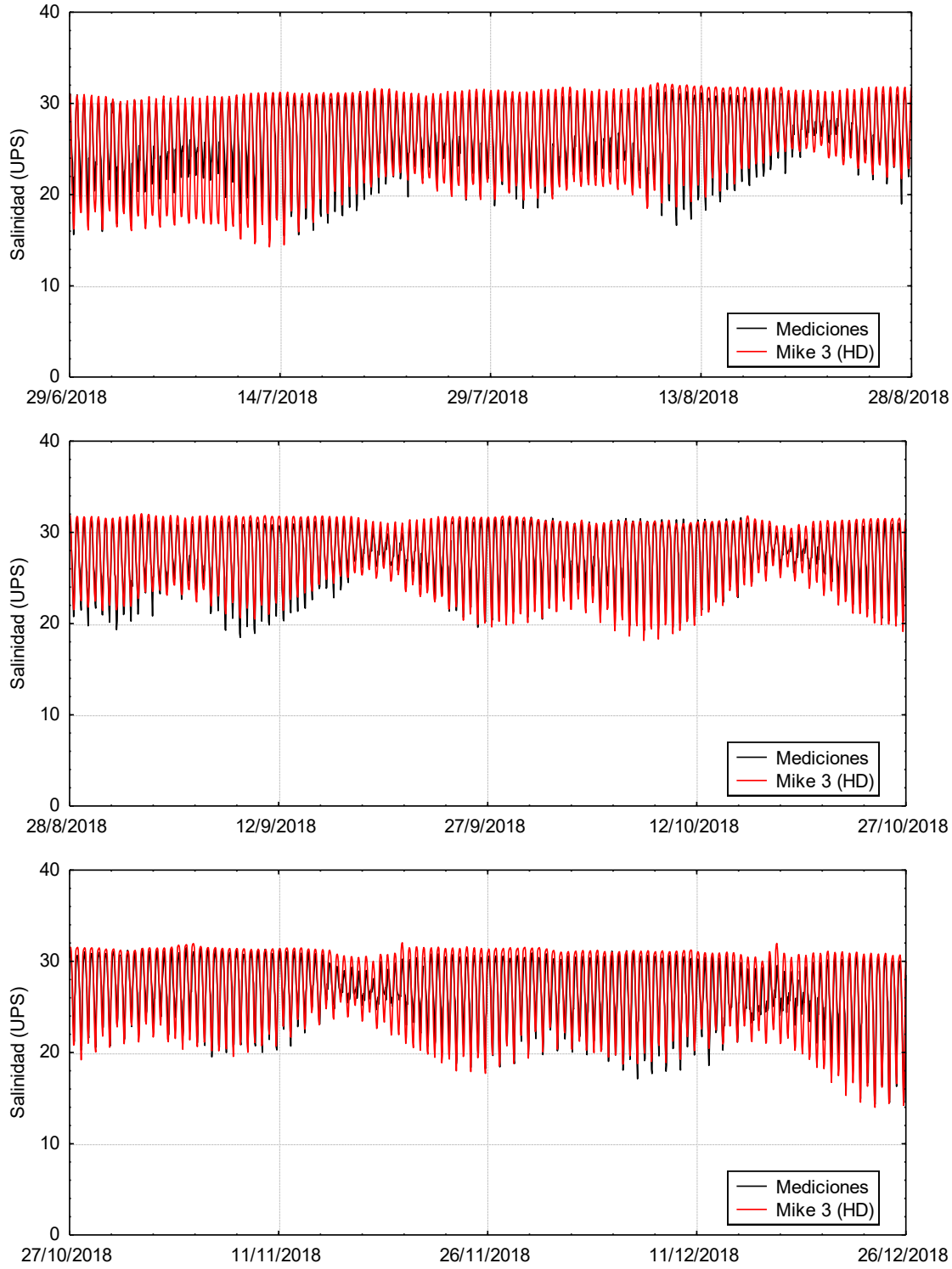


Figura 8.8.30 Continuación. Comparación entre la salinidad medida y calculada por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) en Punta Quilla.

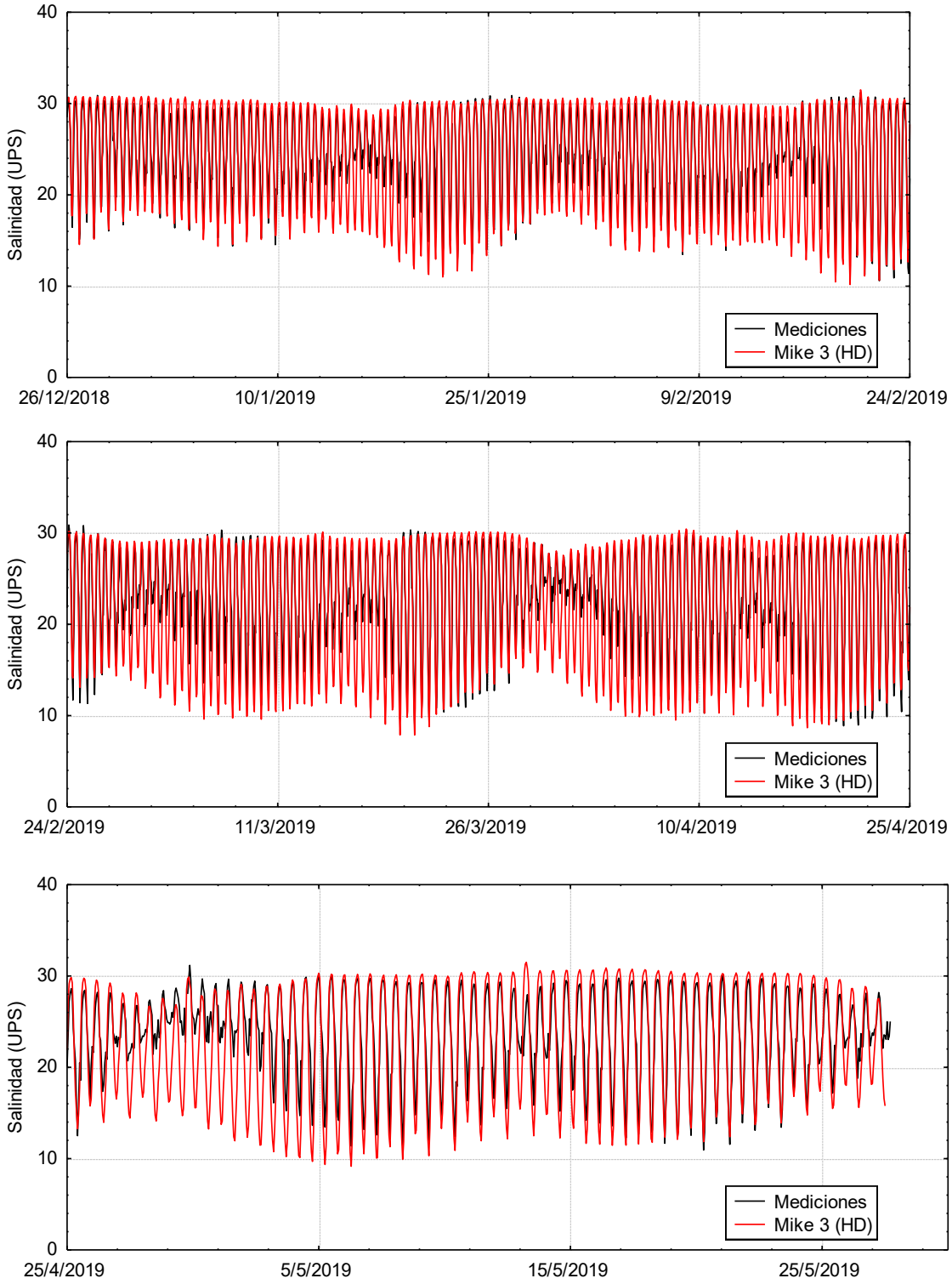


Figura 8.8.31 Campo de salinidad superficial (en colores) y velocidades de las corrientes (con flechas) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Marea bajante.

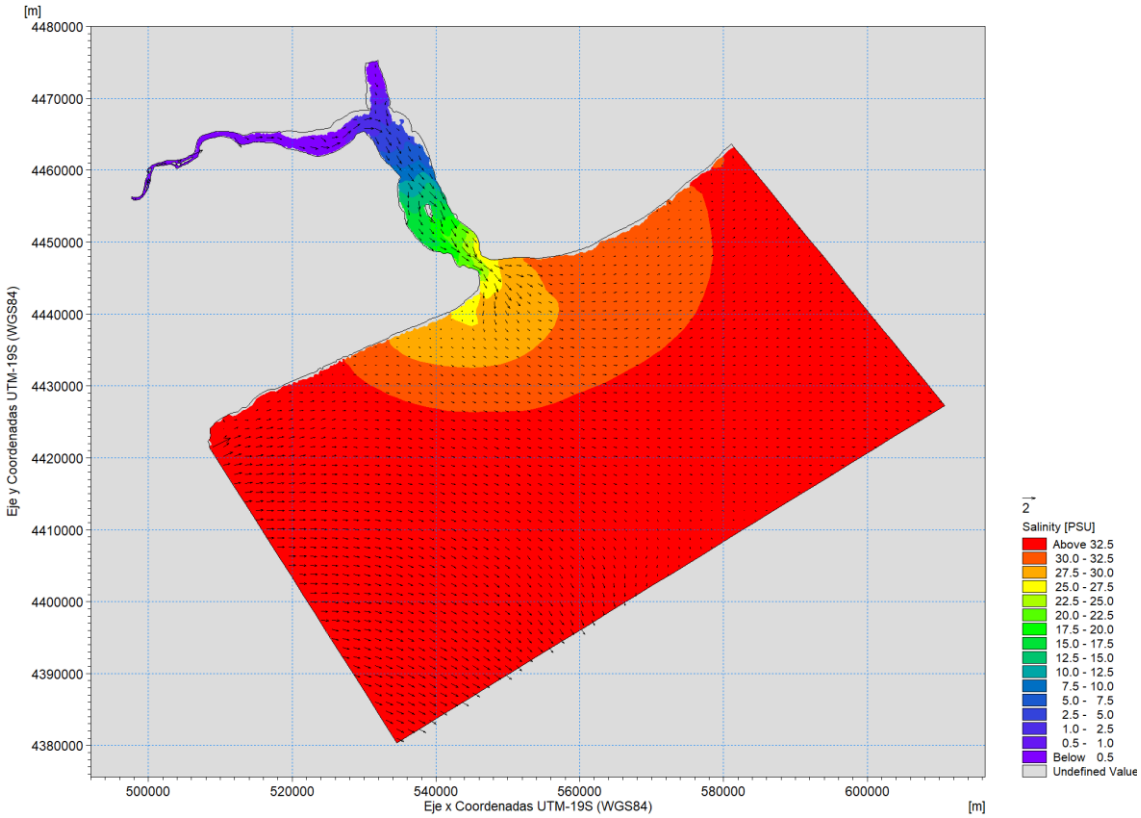
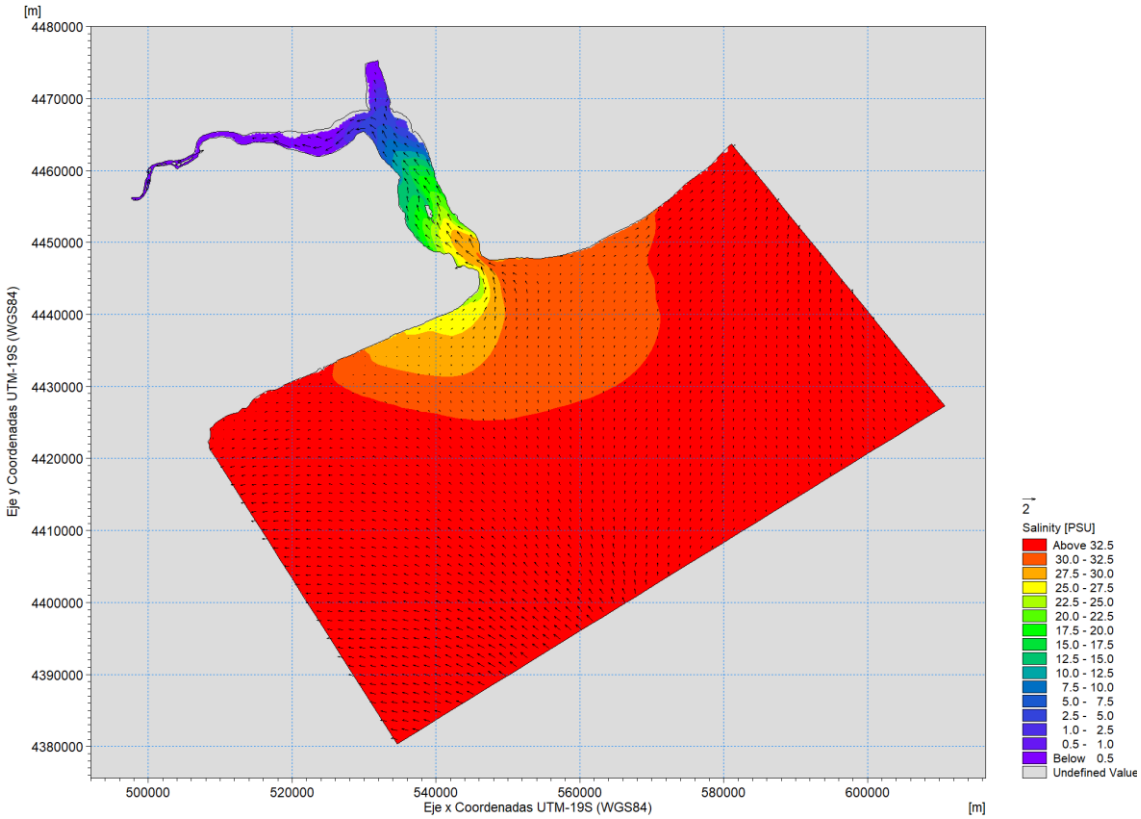


Figura 8.8.32 Campo de salinidad superficial (en colores) y velocidades de las corrientes (con flechas) para el dominio de modelación para un instante de simulación. Marea creciente.



Niveles del río Santa Cruz en Isla Pavón

Las Figuras 8.8.35 y 8.8.36 muestran la comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD) para la estación Isla Pavón. El modelo es alimentado por los caudales diarios y se han realizado los ajustes necesarios en busca de una buena representación por parte de los resultados del modelo. Se puede ver que el modelo representa bien las variaciones del nivel del río para el período de medición. El coeficiente de correlación es 0.99, la pendiente de recta de regresión es 0.97 y la ordenada al origen 0.17.

Conviene aclarar que, a pesar de la buena calidad de las mediciones, se observa un periodo con cierto "ruido" en datos posterior al 5 de marzo de 2018 (de un mes aproximadamente). Este ruido se puede vincular al importante caudal de la época y a los consecuentes movimientos del equipo (principalmente inclinación), favorecidos por el diseño de implantación. Dado que el equipo midió colgado y aunque estaba fuertemente lastrado, los caudales importantes (como el de la ruptura del Glaciar Perito Moreno ocurrido en este periodo) podrían haber favorecido cierta inclinación y movimiento del instrumento.

Por la calidad del sensor y de los datos antes después de los períodos más ruidosos, es posible asumir que estos periodos se deben a movimientos del instrumentos y no a errores del sensor durante el periodo de registro. Para investigar esta situación se calculó desvío estándar horario (los datos están cada 10 min y se han considerado valores medios horarios) de la serie de niveles. Estos resultados resultan en un indicador de ruido, que se presenta en la Figura 8.8.34 juntamente con el caudal de RSC. Se observa que el aumento de ruido coincide con los períodos de mayor caudal, apoyando la presunción de que el ruido es generado por el movimiento del instrumento. En consecuencia, para la comparación con los resultados del modelo en la Figura 8.8.36, la serie de tiempo de los tramos caudalosos (donde el más notorio es marzo y abril de 2018) debe considerarse el valor superior del período ruidoso, correspondiente a cuando el instrumento se encontraba en la posición menos perturbada (menos inclinado que se corresponde con mayor profundidad y por lo tanto, mayor nivel).

Figura 8.8.34 Indicador del ruido en las mediciones de niveles en Isla Pavón y el caudal de RSC, que identifica el aumento de ruido durante los períodos de mayor caudal. El indicador de ruido se calculó identificando el mínimo desvío estándar horario de la serie de niveles.

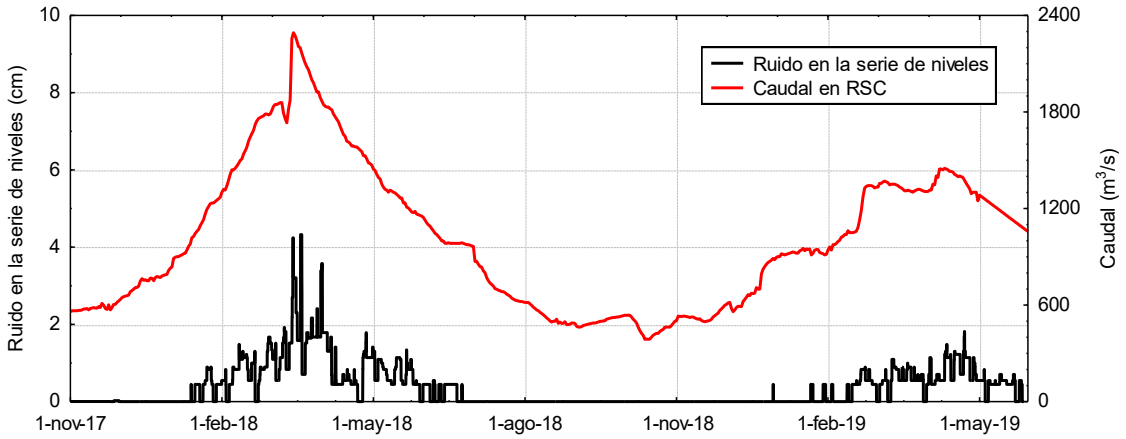


Figura 8.8.35 Correlación de los niveles del río Santa Cruz en Isla Pavón. Número de datos: 82441

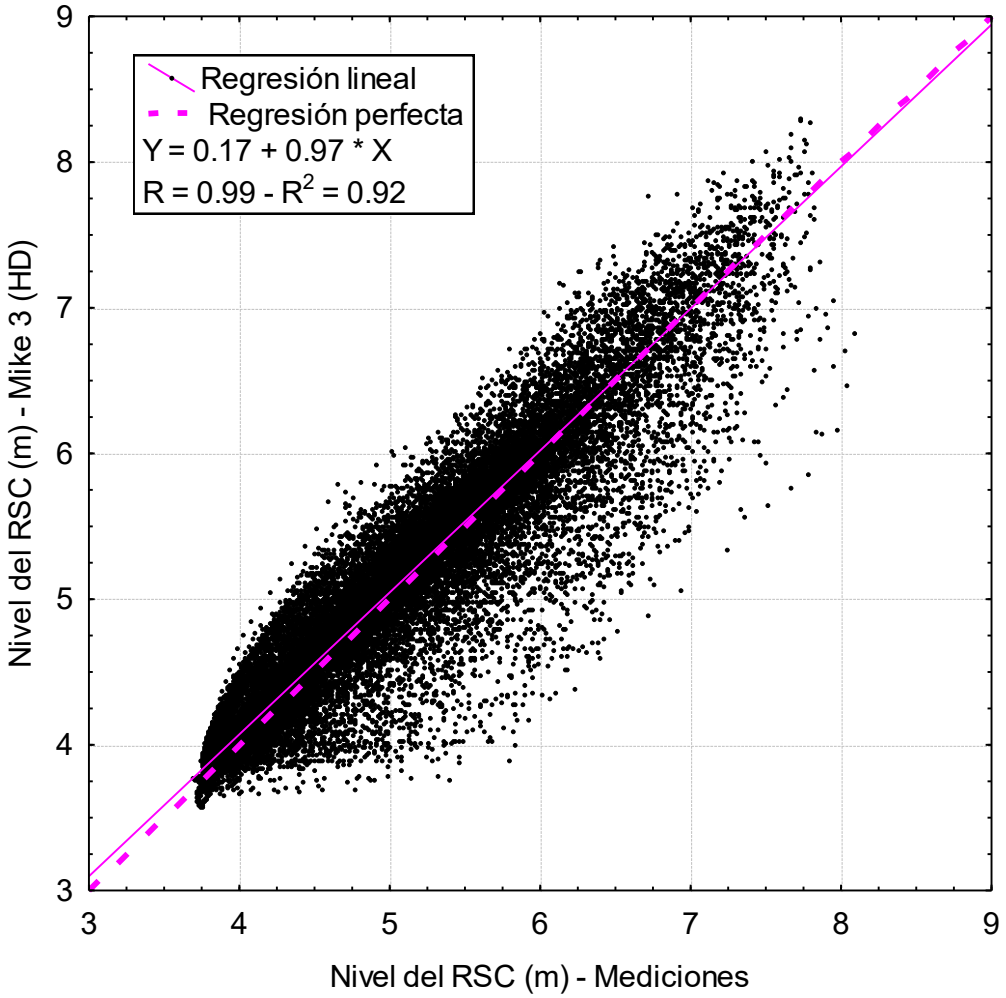


Figura 8.8.36 Comparación entre profundidades medidas y calculadas por MIKE 3 Flow Model FM (HD) en I. Pavón

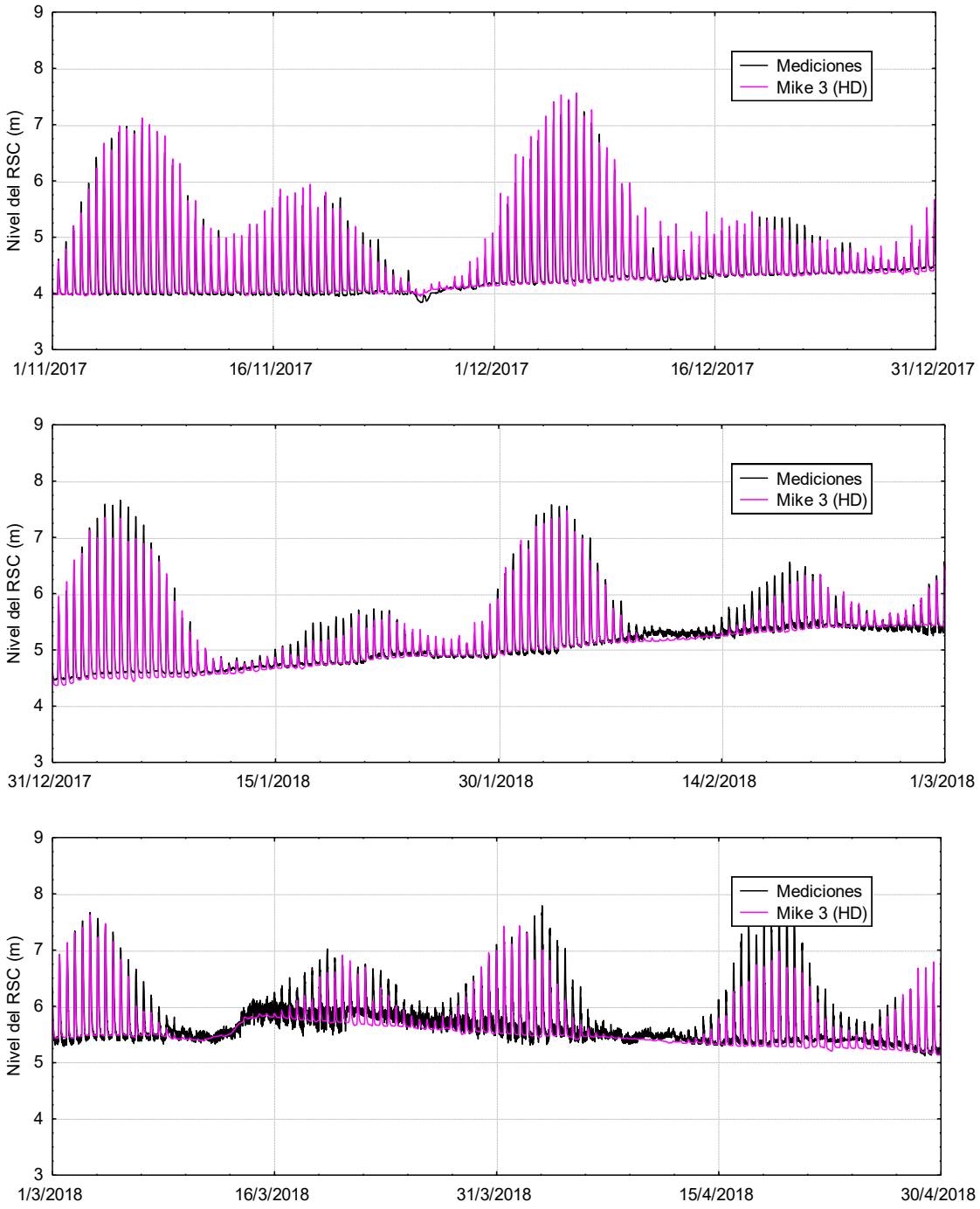


Figura 8.8.36 Continuación. Comparación entre profundidades medidas y calculadas por MIKE 3 Flow Model FM (HD) en I. Pavón

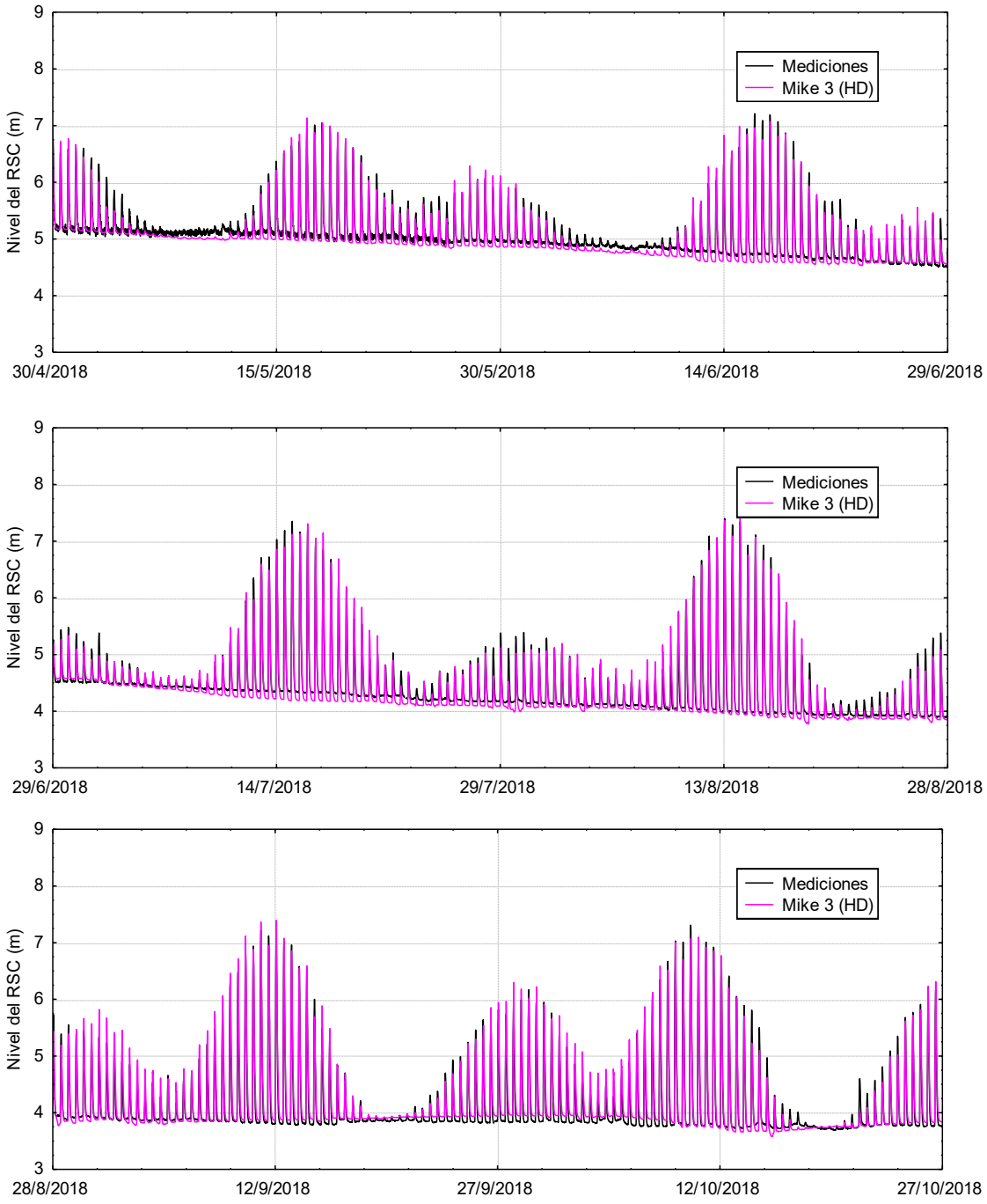


Figura 8.8.36 Continuación. Comparación entre profundidades medidas y calculadas por MIKE 3 Flow Model FM (HD) en I. Pavón

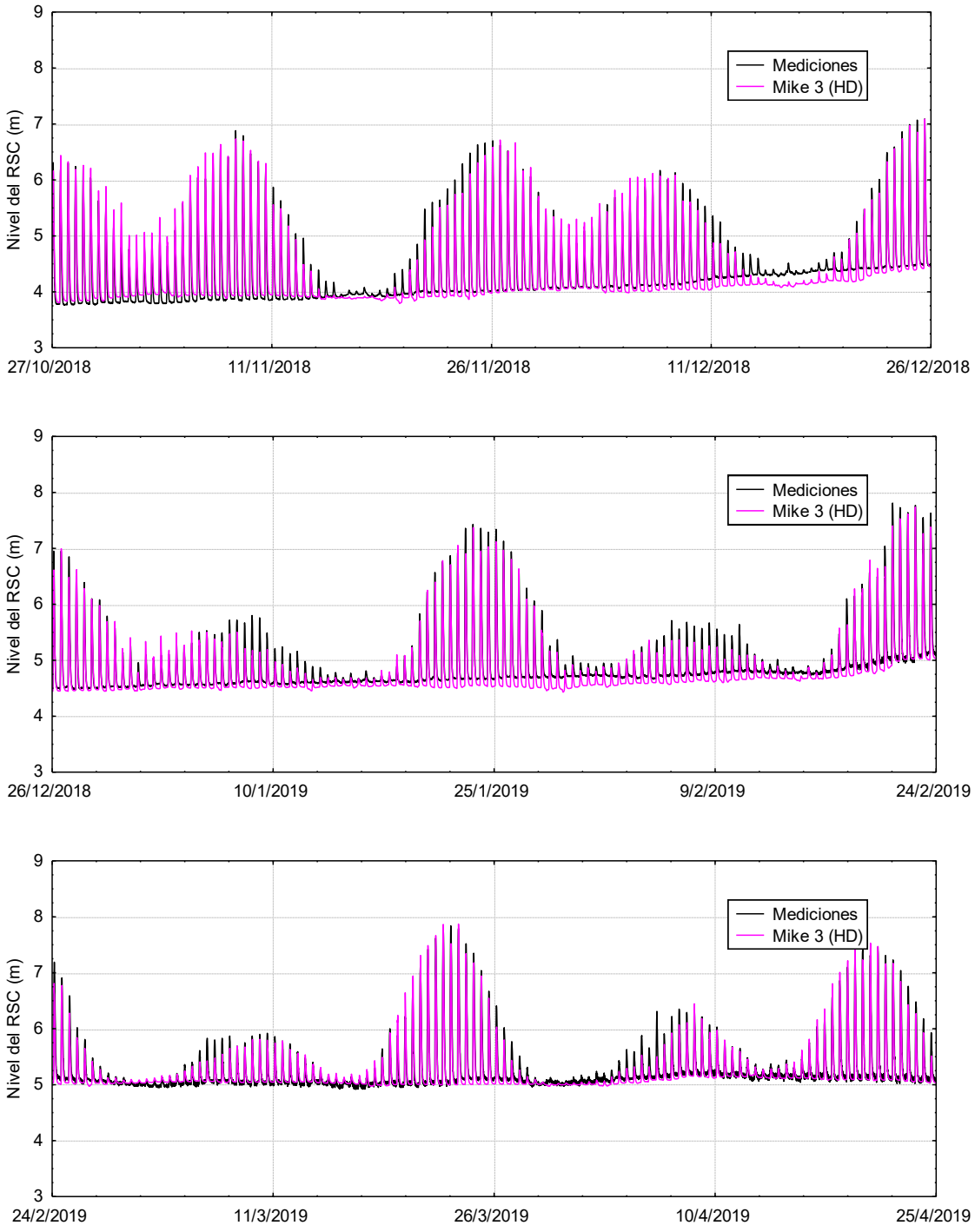
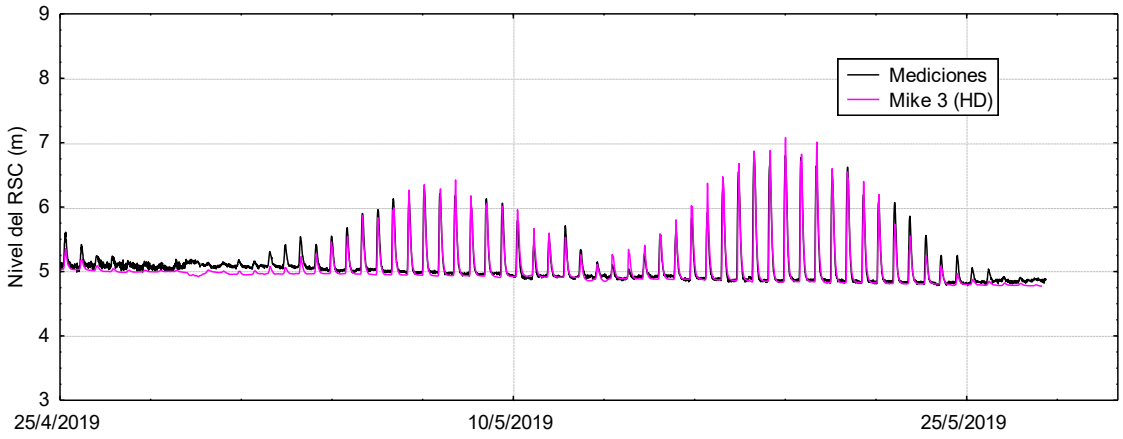


Figura 8.8.36 Continuación. Comparación entre profundidades medidas y calculadas por MIKE 3 Flow Model FM (HD) en I. Pavón



Turbidez en Punta Quilla

Se ha procesado la información de turbidez en Punta Quilla de modo de poner en contexto los resultados obtenidos. Se trata, entonces, de obtener valores característicos de las concentraciones de sedimentos en suspensión en Punta Quilla para compararlos con las concentraciones calculadas por la modelación, asociadas a los caudales de erogación de las represas. Para ello se han hecho ciertas consideraciones que se describen a continuación, dada la complejidad que presentan los datos de turbidez.

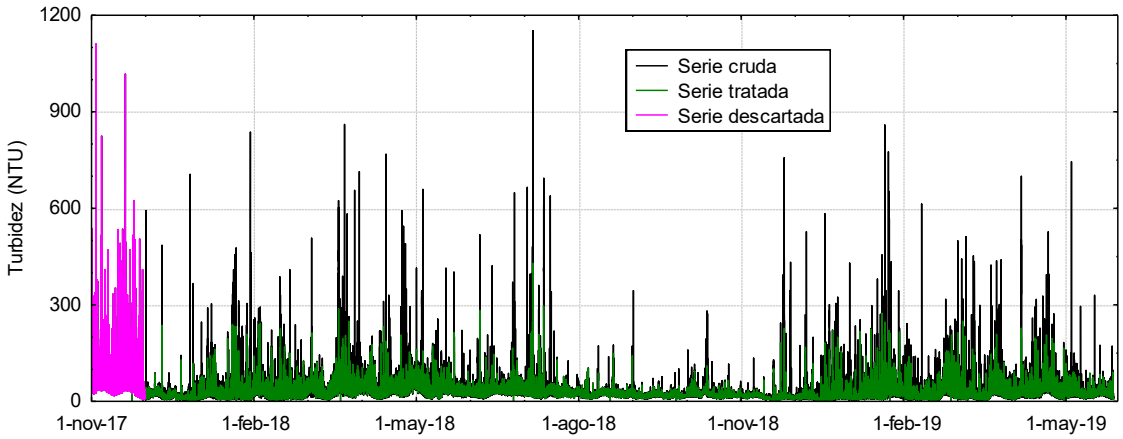
La Figura 8.8.37 presenta la turbidez cruda registrada en Punta Quilla (negra), un tramo de serie que ha sido descartado para el análisis (rosa) y la serie tratada como resultado de haber hecho un promedio horario de los valores de turbidez que se midieron cada 10min (verde), luego de haber eliminado los picos (spikes).

El tramo descartado corresponde al primer mes de medición en el que el equipo (con sensor de turbidez incluido) fue dispuesto cerca del fondo. Los datos no fueron de buena calidad debido a que, por lo menos en parte, se observaron algas enredadas en el implante y el equipo. Luego del primer mes, el instrumento se reubicó a media agua y allí la calidad de los datos mejoró. Hay dos aspectos que valen la pena rescatar del tramo descartado (Figura 8.8.37):

- Los mínimos de este tramo poseen la forma esperada por la variación de la marea, observándose la influencia de los períodos de sicigias y cuadraturas.

- Los mínimos del tramo descartado son mayores a los mínimos del resto del registro. Esto puede deberse a que ese tramo muestra datos medidos a 0.5 m del fondo, aproximadamente, y el resto del registro se obtuvo con el equipo ubicado a unos 6m del fondo. Mayores concentraciones cerca del fondo son un indicio de que las velocidades de las corrientes de marea ponen en suspensión sedimentos del fondo del estuario.

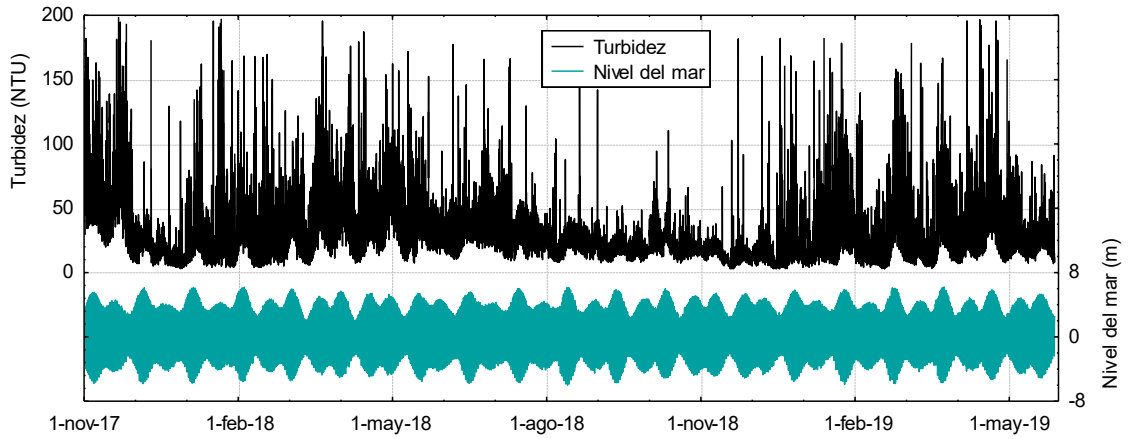
Figura 8.8.37 Turbidez en Punta Quilla. Serie cruda (negra), serie descartada para el análisis (rosa) y la serie tratada (verde) resultado del promedio horario de los datos.



La serie turbidez tratada se presenta en la Figura 8.8.38, incluido el mes de noviembre de 2017 que como se explicó muestra una media de turbidez mayor porque se registró cerca del fondo. La figura también muestra los niveles del mar y permite ver la relación entre ambas variables: los períodos con marea de sicigias aumentan los mínimos de turbidez.

Las Figuras 8.8.39 y 8.8.40 presentan comparaciones entre la turbidez medida y la calculada por el modelo MIKE 3 (HD+MT), para diferentes períodos y acercamientos para observar los ajustes alcanzados. En todas estas figuras se incluye la variación del nivel del mar en Punta Quilla para acompañar el análisis.

Figura 8.8.38 Turbidez y los niveles del mar, en Punta Quilla.



Una explicación física a este hallazgo puede ser la siguiente: durante los períodos de sicigias el nivel del agua en el estuario es mayor, en consecuencia, también es mayor la superficie cubierta porque el agua penetra más sobre los terrenos intermareales aumentando la superficie con sedimentos que puede poner en suspensión durante la bajante.

Este fenómeno fue representado aceptablemente por el MIKE 3 Flow Model FM (HD+MT). El modelo calcula el transporte de sedimentos utilizando el módulo Mud Transport (MT). Para lograrlo se consideró el efecto de la variación del nivel mar asociado a la marea dentro de estuario, imponiendo como fuente de sedimentos finos a los contornos del dominio de modelación. Sin embargo, como muestran las Figuras 8.8.39 y 8.8.40 se observan picos difíciles de representar por el modelo. Una fuente posible puede ser la voladura de sedimentos por el viento que ingresen al estuario, que no fue considerada en las simulaciones realizadas. La Tabla 8.8.2 muestra valores de la concentración de SST y turbidez (valores medios, mínimos y desvíos estándar) medidos y simulados en Punta Quilla.

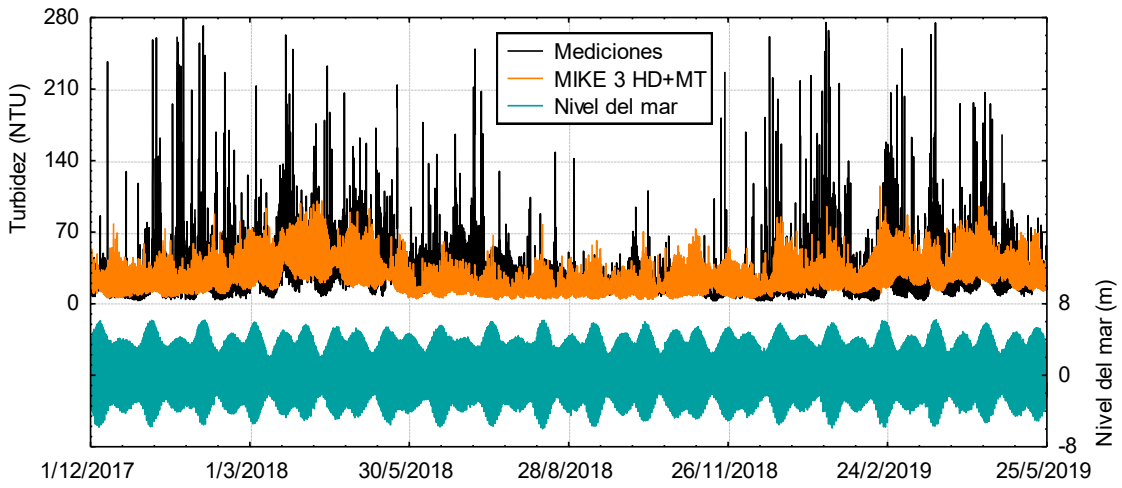
*Tabla 8.8.2 Comparaciones (valores medios de las concentraciones y desvíos) para las mediciones en Punta Quilla y la Modelación. Los valores de concentraciones de SST (mg/l) se obtiene en base a la relación encontrada para esta y la turbidez: SST (mg/l) = turbidez*0.95 + 0.79 (Figura 7.18.2).*

Lugar	Período	Origen de los datos	Valor medio		Valor mínimo		Desvío estándar	
			NTU	mg/l	NTU	mg/l	NTU	mg/l
Punta Quilla	01/12/17 a 27/05/19	Mediciones	31	30	3	4	27	26
		Modelación - MIKE 3 Flow Model FM (HD)	26	25	4	5	16	16

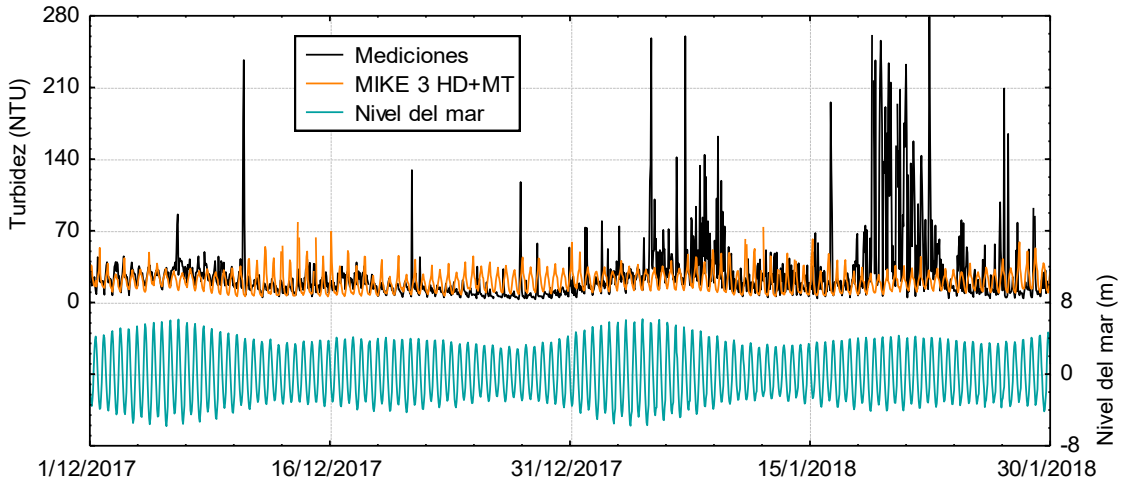
Las mediciones indican que la turbidez posee una estructura cíclica. Con cada bajante se observa un pico de turbidez y con cada creciente un valle de esta (agua relativamente turbia durante las bajantes y relativamente clara durante las crecientes). Por lo tanto, los valores mínimos que ocurren en las crecientes son la mejor medida de la turbidez que viene del mar, aunque es posible que la turbidez real del mar sea aún menor ya que es concebible que parte de la turbidez medida haya tenido origen en el estuario. A partir de los datos disponibles, el agua de mar posee una turbidez media de unos 3 NTU.

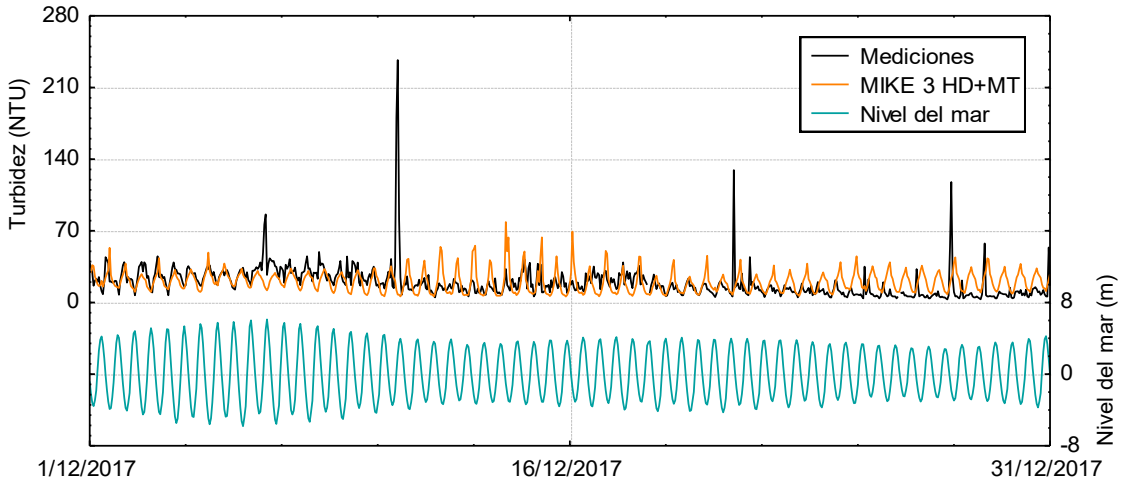
También en las Figuras 8.8.39 y 8.8.40 es posible observar la variación semidiurna y los períodos de sicigias y cuadraturas en los que las concentraciones computadas por el modelo siguen razonablemente a las mediciones.

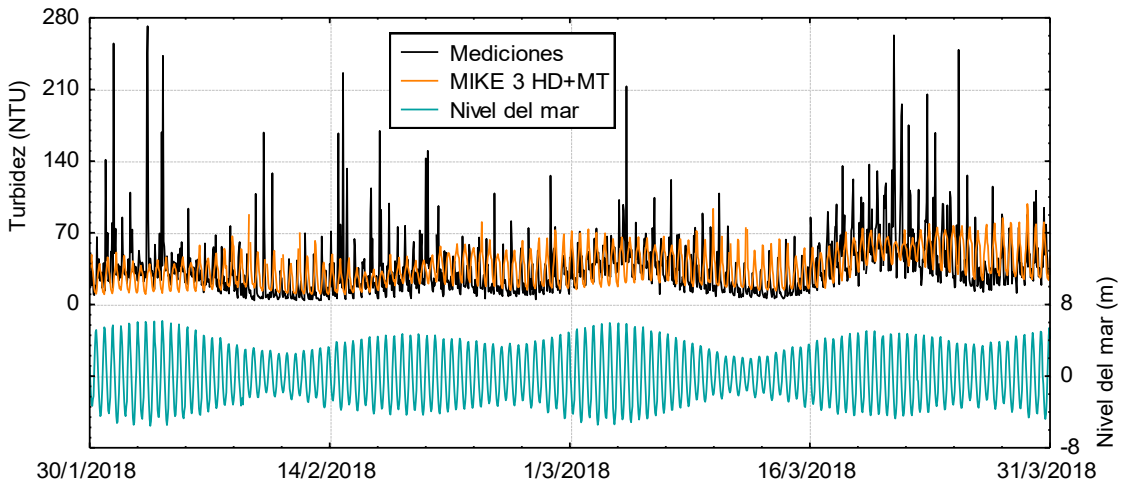
Figuras 8.8.39 Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla. Cobertura temporal 1 de diciembre de 2017 al 25 de mayo de 2019.



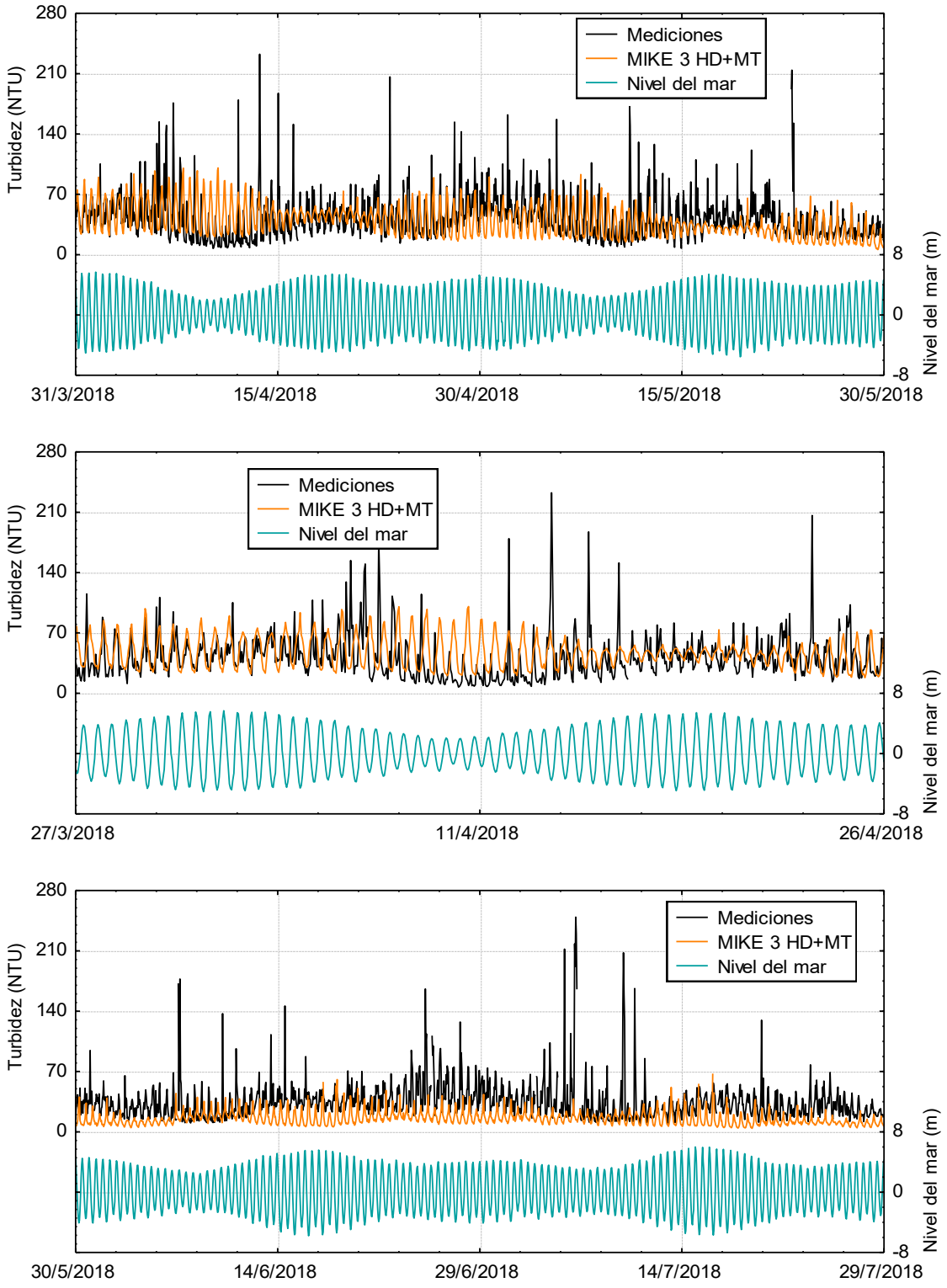
Figuras 8.8.40 Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla.



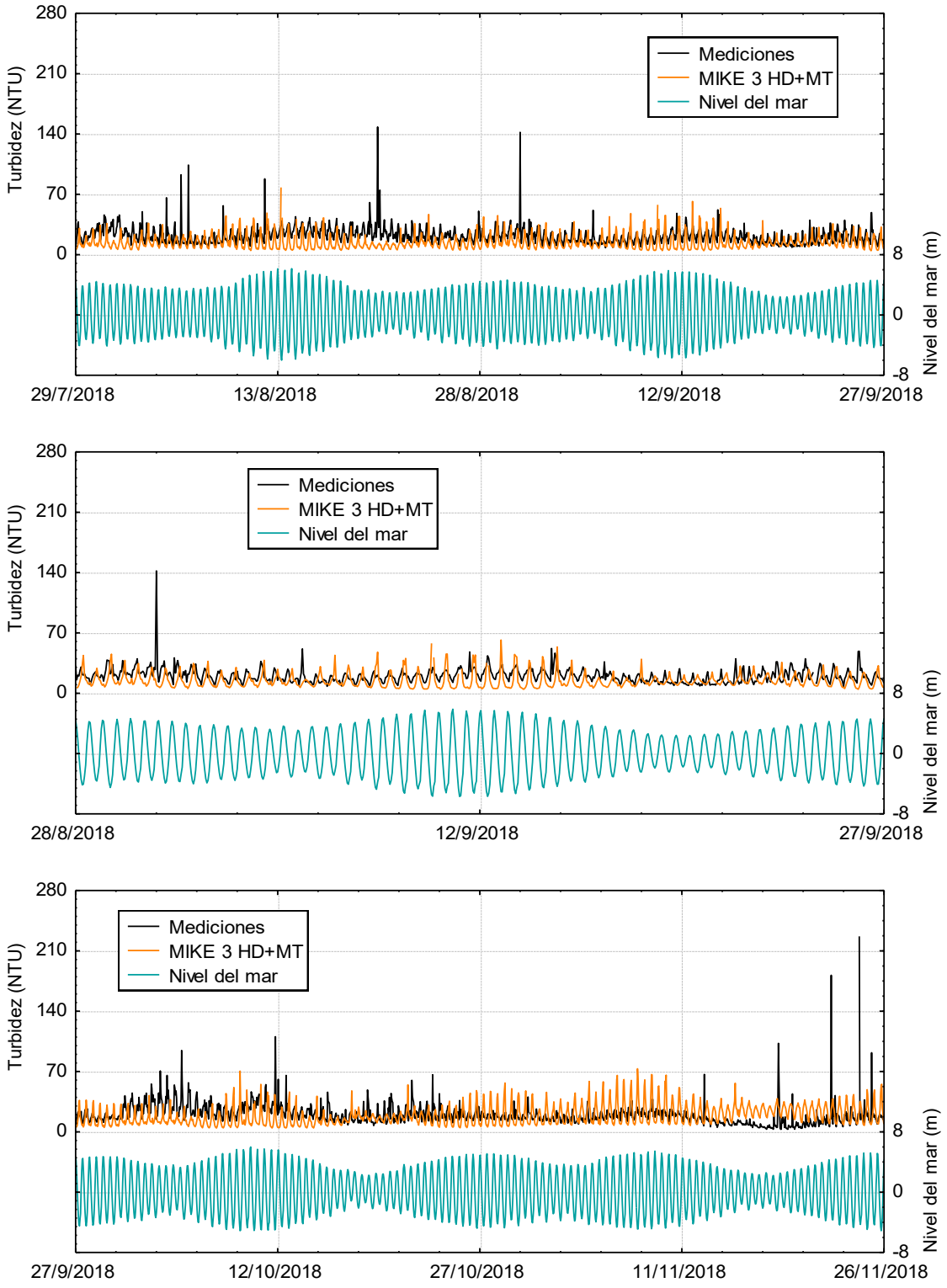




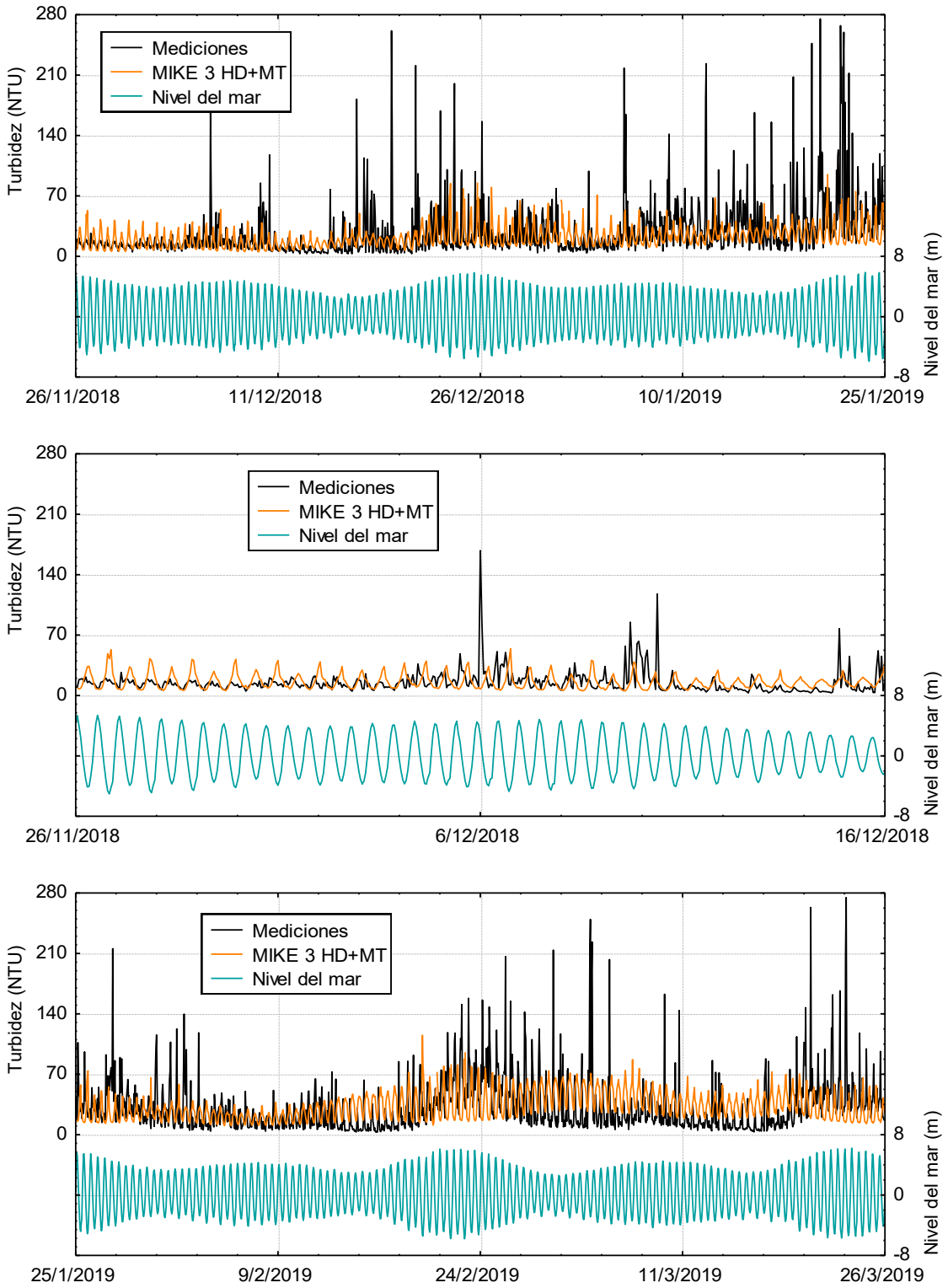
Figuras 8.8.40 Continuación. Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla.



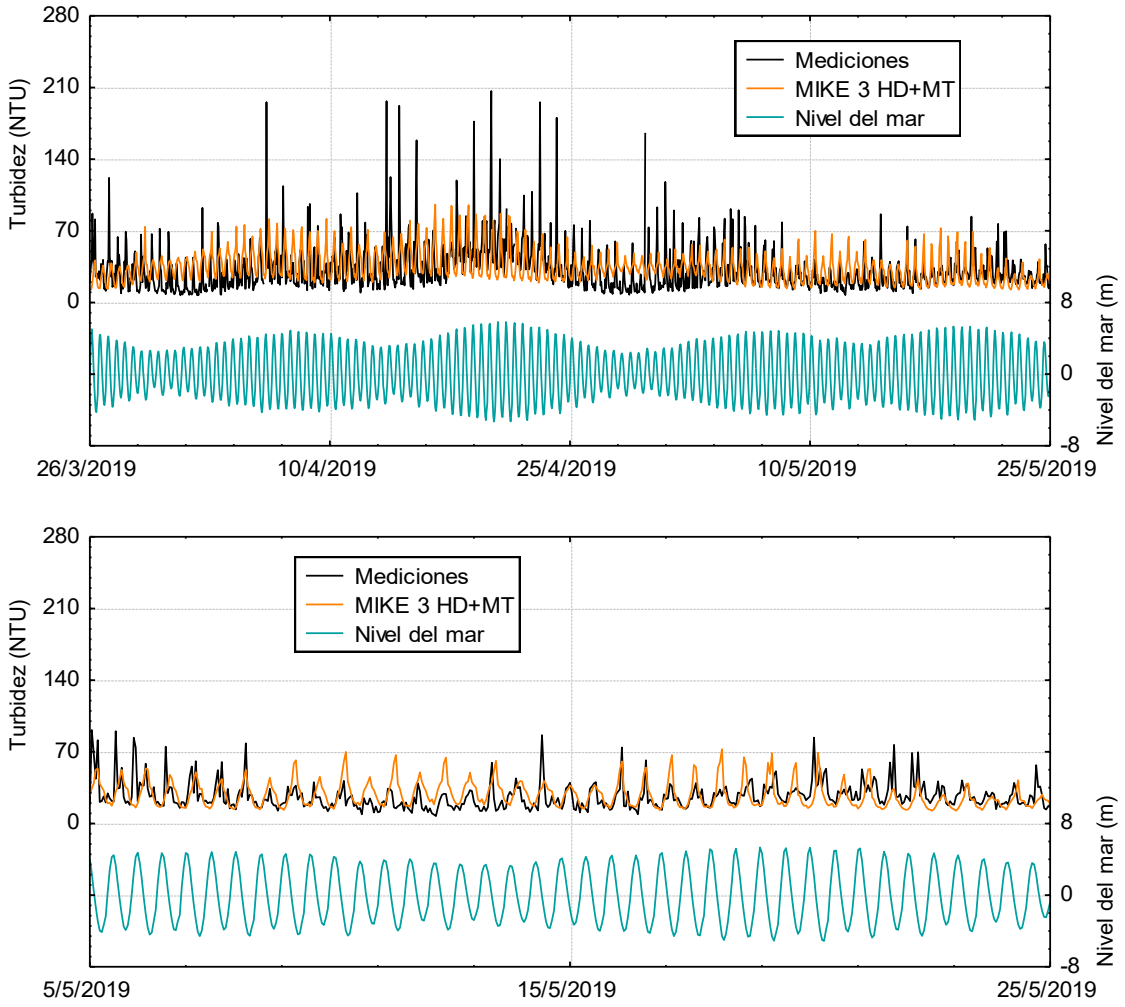
Figuras 8.8.40 Continuación. Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla.



Figuras 8.8.40 Continuación. Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla.



Figuras 8.8.40 Continuación. Mediciones de turbidez y resultados del modelo MIKE 3 HD+MT, en Punta Quilla. Datos de niveles del mar en Punta Quilla.



Las Figuras 8.8.41 y 8.8.42 presentan los análisis de Fourier (usando FFT) para la turbidez registrada en la estación de Punta Quilla y la generada por el modelo matemático MIKE 3 HD+MT.

Las Figuras 8.4.43 a 8.8.46 ilustran acerca de los campos de sedimentos para el dominio de modelación en diferentes condiciones de marea.

Figuras 8.8.41 Análisis de Fourier asociado a la turbidez registrada en Punta Quilla.

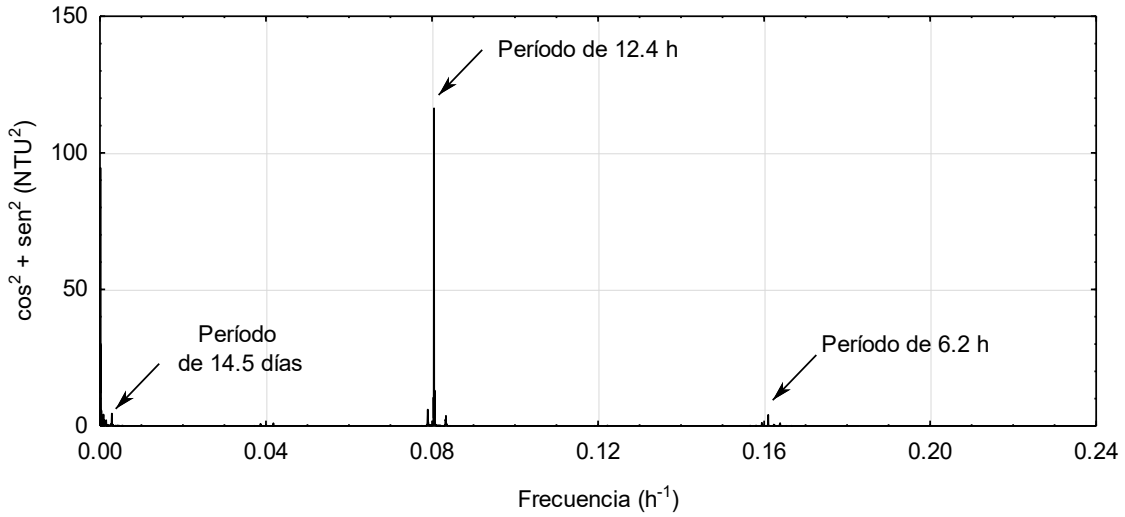


Figura 8.8.42 Análisis de Fourier asociado a la turbidez generada por el modelo MIKE 3 HD+MT en Punta Quilla.

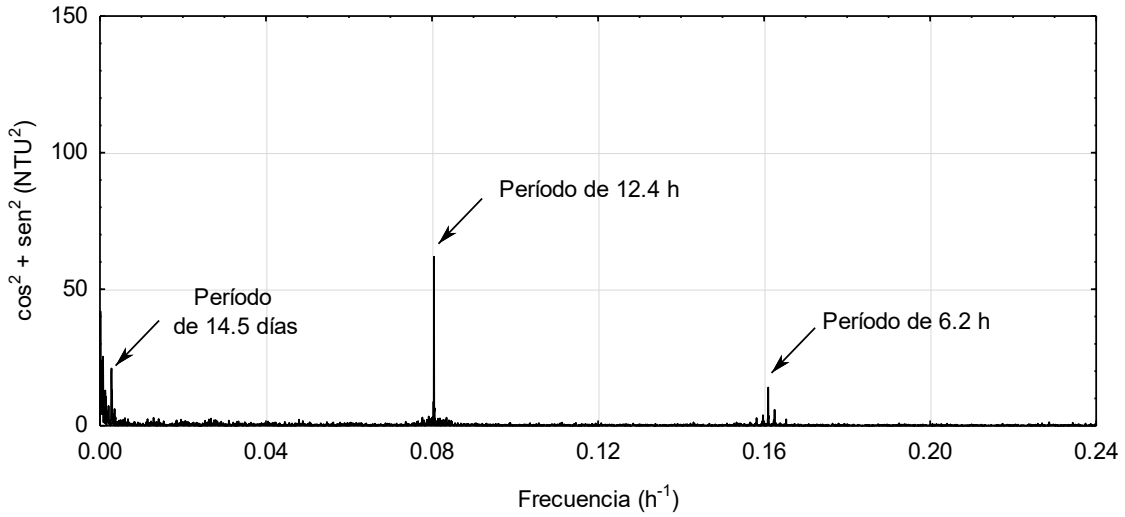


Figura 8.8.43 Campos de concentraciones de sedimentos en suspensión para una condición pleamar.

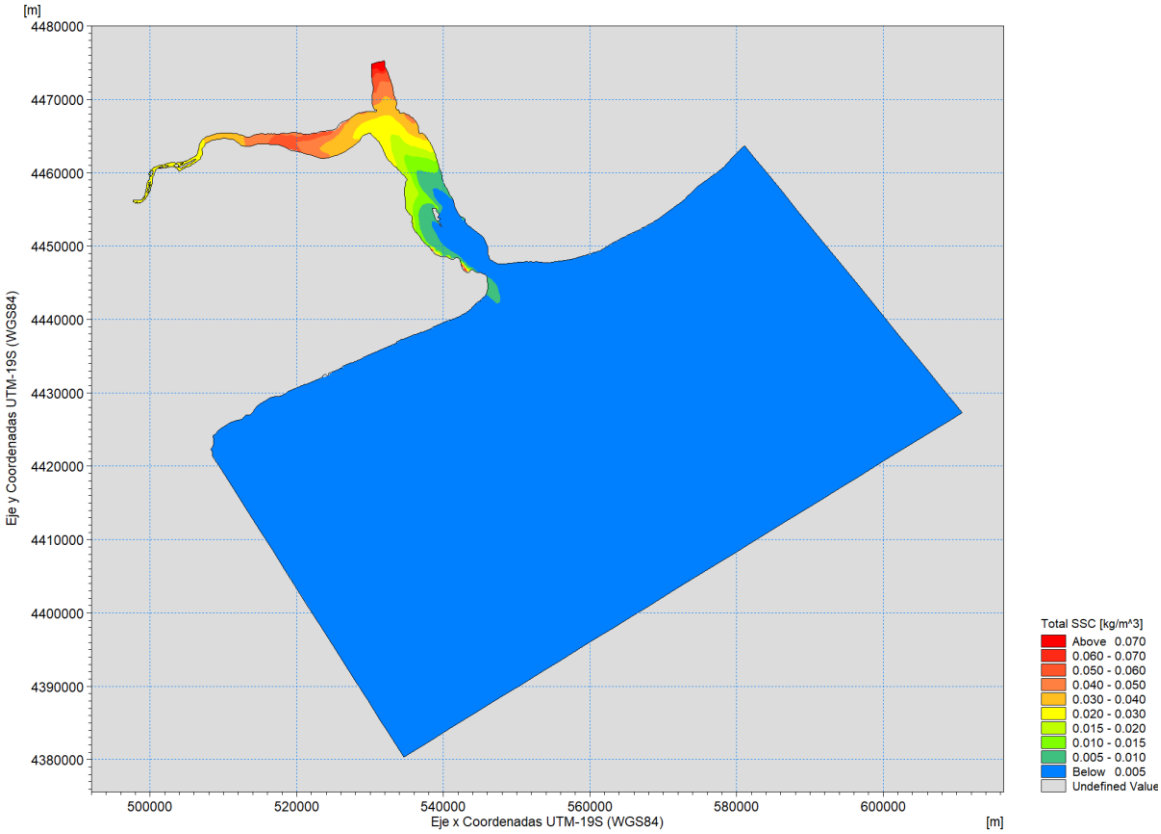


Figura 8.8.44 Campos de concentraciones de sedimentos en suspensión para una condición de marea bajante.

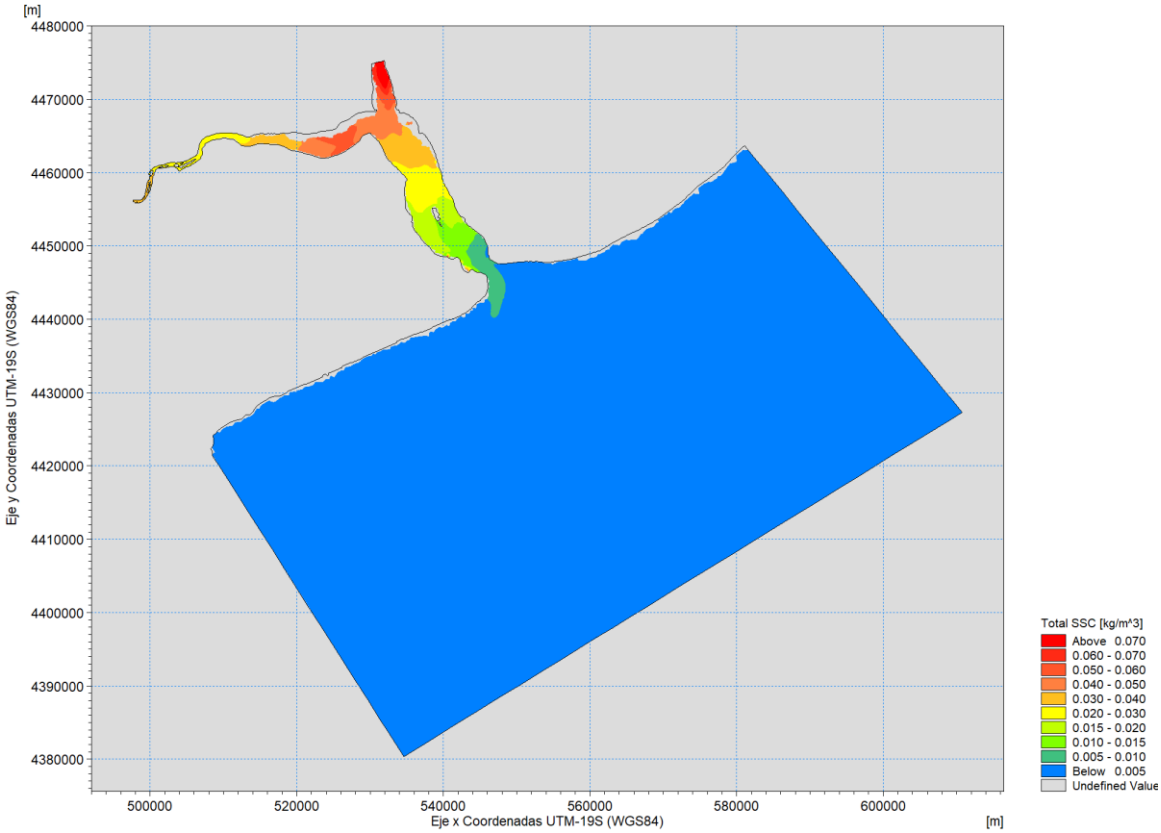


Figura 8.8.45 Campos de concentraciones de sedimentos en suspensión para una condición bajamar.

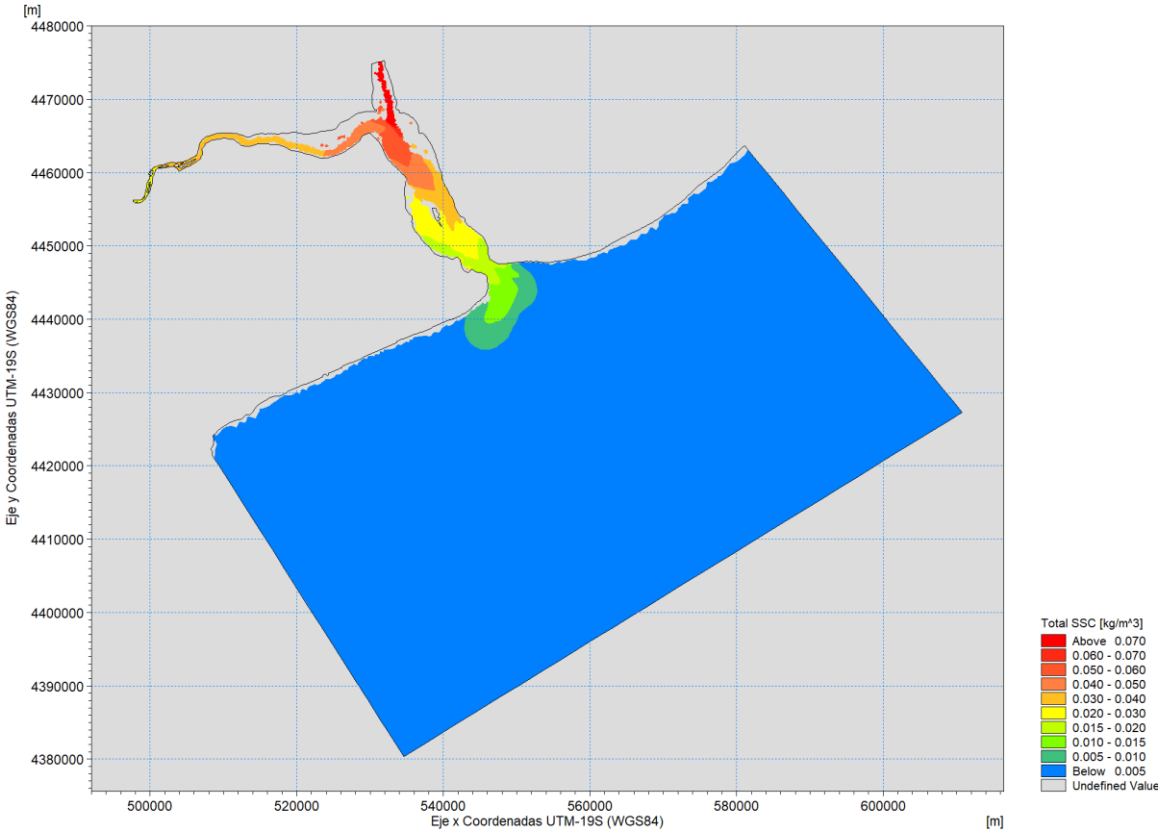
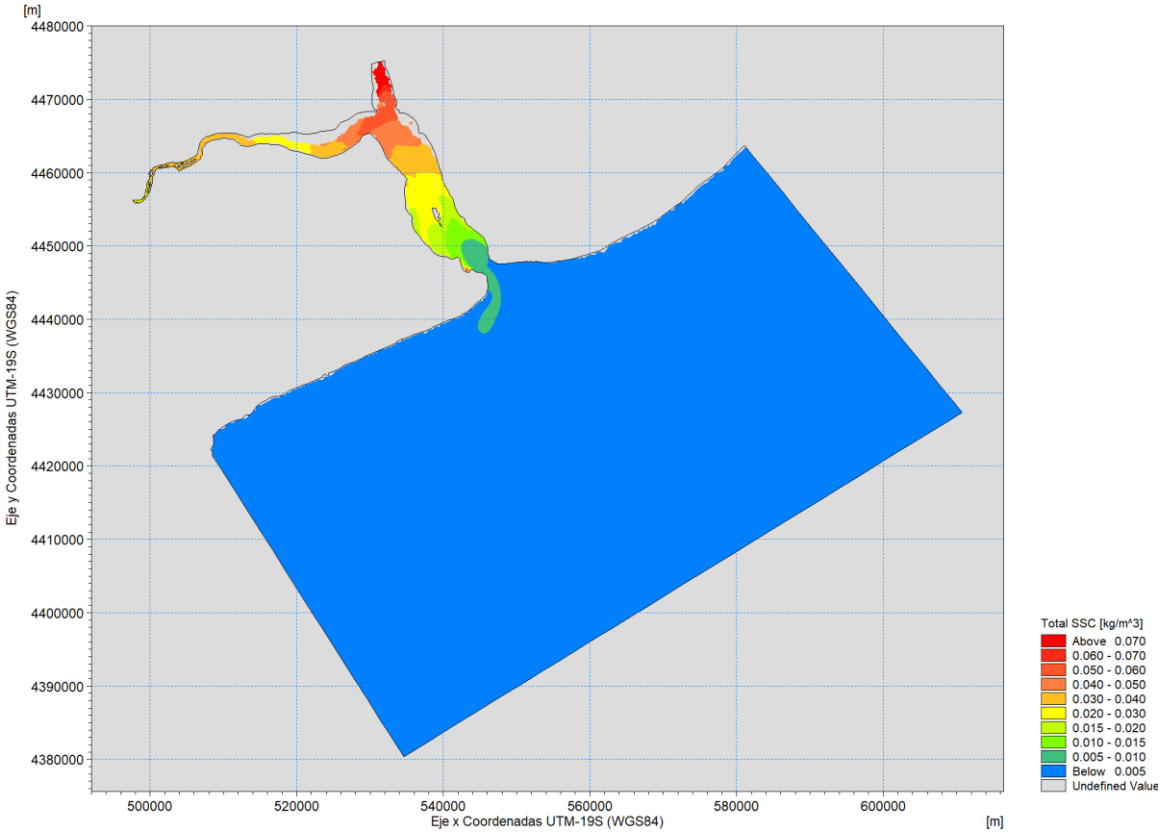


Figura 8.8.46 Campos de concentraciones de sedimentos en suspensión para una condición de marea creciente.

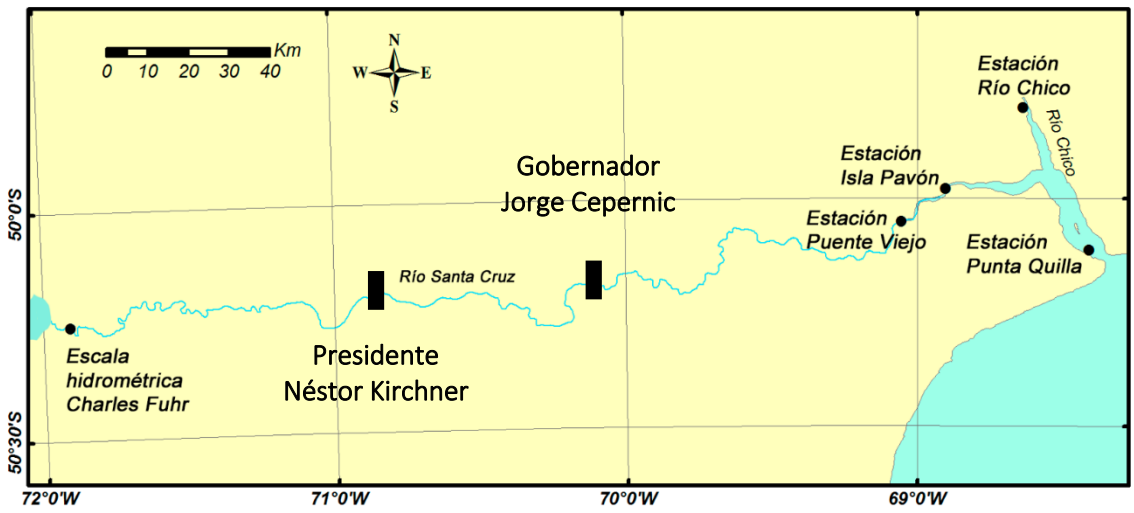


Capítulo 9

Represas

Esta tesis presenta un aspecto inusual en su confección ya que la información utilizada forma parte de un proyecto actualmente en ejecución: la construcción de 2 represas sobre el río Santa Cruz. La represas son las llamadas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. La Figura 9.1 presenta la posición de las represas cuya construcción en abril de 2025, se encuentra paralizada por falta de financiamiento, (https://noticias.santacruz.gob.ar/gestion/ministerio-de-energia-y-mineria/item/32459-piden-al-gobierno-nacional-y-a-la-ute-la-urgente-reactivacion-de-las-obras-de-represas). El proyecto incluye la construcción, operación y mantenimiento de las represas, y se estuvo llevando a cabo por la UTE (Unión Transitoria de Empresas) conformada por la firma Gezhouba Group Company de la República Popular de China y las firmas argentinas Eling Energía S.A. e Hidrocuyo.

Figura 9.1 Recorrido del Río santa Cruz desde su nacimiento en el Lago Argentino (a oeste en 72°W) hasta su desembocadura en el estuario y el mar. Se identifican las posiciones de las Represas en construcción: Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic.



Es parte importante de este trabajo establecer las posibles variaciones que pudiere sufrir el estuario durante el llenado de los diques. Para ello, se utilizarán las herramientas ya presentadas, especialmente la modelación, considerando condiciones de interés para el proyecto.

La tesis se centra en el estuario, pero como fue visto en capítulos previos de este trabajo la zona de estudio incluye unos 39 km del río Santa Cruz, la porción final del Río chico, el estuario y una fracción del mar. Para analizar la concentración de los sedimentos en suspensión, se ha considerado el estudio Represas Patagonia (2017) y las comunicaciones con la UTE respecto a los caudales utilizados en la modelación.

9.1. Inicio y fin del llenado de los embalses

La ingeniería del proyecto ha establecido que por la variabilidad anual del caudal del río Santa Cruz, el llenado de los embalses se realizará entre el 15 de noviembre y el 1 de junio, del año en que las represas estén en condiciones de comenzar a acumular el agua, (Represas Patagonia, 2017). Este periodo coincide por supuestos con el de mayor caudal, como muestra la figura 9.2.1.

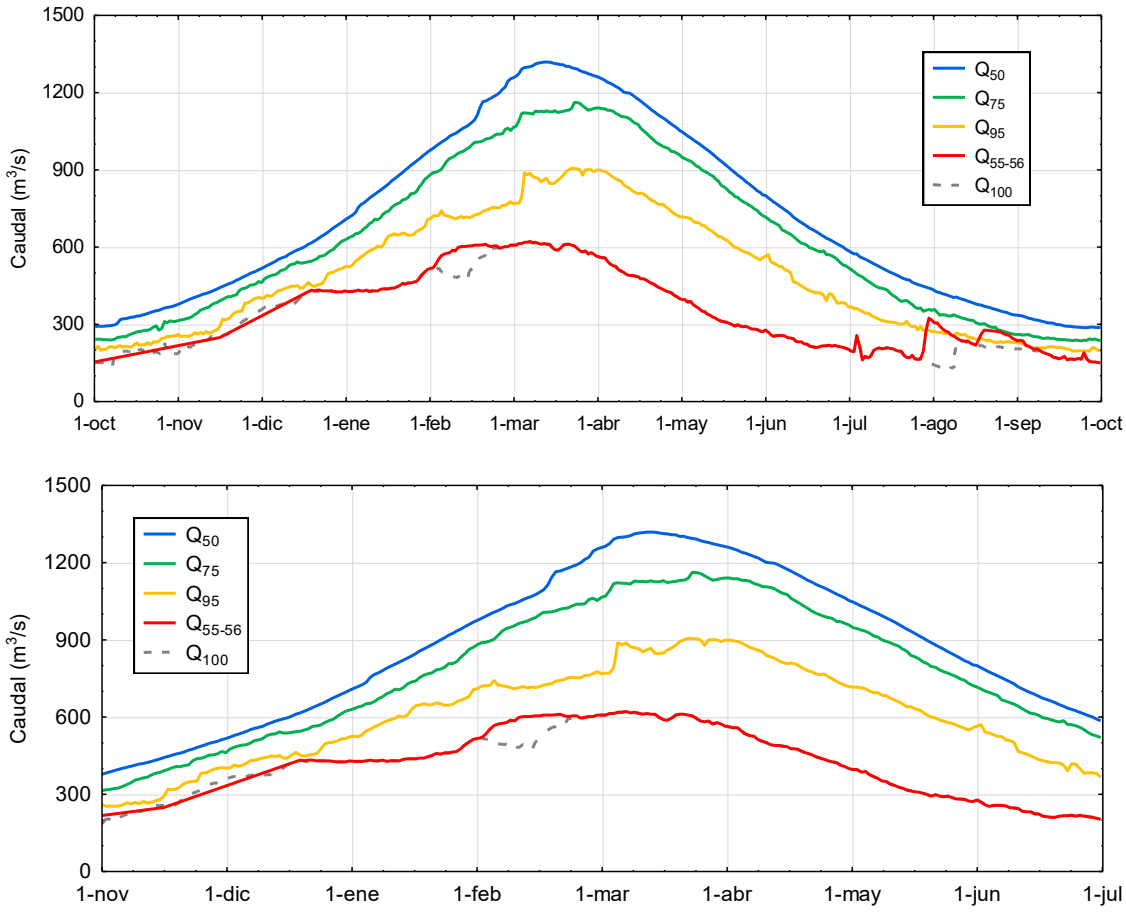
9.2. Caudales

Para estudiar los caudales del río Santa Cruz se cuenta con registros diarios en la estación Charles Furh para el período 1955 a 2016. Los cálculos de los distintos caudales estadísticos que se presentan en la Tabla 9.2.1 se realizó a partir de estos registros históricos. Los caudales $Q_{N\%}$ corresponden a los caudales a partir del cual se ha superado N% del tiempo. Por ejemplo, la serie denominada como Q_{95} implica que, para cada día calendario ese valor de caudal fue igualado o superado el 95% de los años disponibles (Represas Patagonia, 2017) dado que, para cada día del año se dispone de 61 valores de caudales, uno por cada año. Ver Tabla 9.2.1 y Figura 9.2.1 para la caracterización de las 4 series de caudales seleccionadas para las simulaciones.

Tabla 9.2.1 Caudales seleccionados para las simulaciones (Represas Patagonia, 2017) y Comunicaciones con UTE Represas Patagonia. Los caudales de salida corresponden a la erogación en la represa Gobernador Jorge Cepernic.

Caudal de salida	Descripción
Q_{50}	Caudal igualado o superado el 50% de los años para cada día calendario.
Q_{75}	Caudal igualado o superado el 75% de los años para cada día calendario.
Q_{95}	Caudal igualado o superado el 95% de los años para cada día calendario
$Q_{55\text{-}56}$	Caudales mínimos históricos (noviembre a junio de los años 1955 y 1956). Muy parecido al Q100 (caudal igualado o superado el 100% de los años para cada día calendario). Nota: los caudales medios diarios comienzan el 19 de diciembre 1955 (es decir que faltan los datos desde el 1 de octubre al 19 de diciembre). Se completaron a partir de la serie de los caudales medios mensuales de octubre, noviembre y diciembre de 1955 que si están disponibles.
Q_{H1}	Conformado por el hidrograma Q55-56 de noviembre a enero y Q95 en adelante, (Uva, 2018).
Q_{H2}	Conformado por el hidrograma Q55-56 durante diciembre y enero y Q95 el resto del tiempo, (Uva, 2018).

Figura 9.2.1 Caudales considerados para la modelación. Año completo (arriba) y meses previstos para el llenado (abajo). Nota: dado que el Q_{100} y el $Q_{55\text{-}56}$ son muy parecidos se decidió usar este último.



Observando la Figura 9.2.1 puede verse que el hidrograma del $Q_{55\text{-}56}$ (en color rojo) y del Q_{100} (en color gris) no poseen diferencias significativas, a excepción de una corta diferencia en el mes de febrero. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el hidrograma de los mínimos es generado estadísticamente mediante un análisis de frecuencias ("sintético"). Por ello se juzga más lógico el empleo de $Q_{55\text{-}56}$, (Uva, 2018).

9.3. Características de los Sedimentos en Suspensión

Diámetro de los sedimentos en suspensión

No ha sido posible determinar la composición granulométrica de las muestras en laboratorio. Esto se debió a que, de acuerdo con lo informado por el laboratorio analítico, se requería una "masa crítica" de 25 g de sedimento en cada muestra para realizar esa determinación. Para darle magnitud a la imposibilidad de conseguir este dato durante las 20 campañas de monitoreo realizadas por ESSA, se presenta a continuación un ejemplo concreto:

> Como se puede observar en la Tabla 9.3.1 con un ejemplo de los resultados de los análisis de laboratorio de sedimentos en suspensión del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), correspondiente al muestreo de febrero de 2018, la concentración de solidos suspendidos en las muestras tomadas en el rio Santa Cruz estuvo entre los 1.74 mg/l (estación Charle s Fuhr) y los 9.89 mg/l (estación Puente viejo). Por lo tanto para conseguir los 25 g de sedimentos requeridos por el laboratorio habría que haber filtrado 14400 l de agua de río en la estación Charles Fuhr, y 2500 l de agua de río en la estación Puente Viejo, tornándose impracticable el monitoreo (comunicación con la UTE).

Tabla 9.3.1 Resultados de laboratorio (CIG, UNLP) correspondientes al análisis de las muestras de agua tomadas en febrero de 2018

Muestra	Río Chico	Isla Pavón	Charles Fuhr	Punta Quilla	Puente Viejo
Volumen de agua (l)	2.00	1.95	1.83	1.91	2.01
Material suspendido (mg)	15.20	24.41	3.19	11.82	19.89
SST (mg/l)	7.60	12.55	1.74	6.17	9.89

Por ello se ha recurrido al informe Menéndez et al (2017) que presenta los resultados de una modelación hidro sedimentológica del río Santa Cruz bajo el efecto de las represas patagónicas, sin considerar el estuario. En la página 28 del informe, el autor explica:

> *"No se contó con información granulométrica de los sedimentos sedimentables, constituidos por limos y arcillas no coloidales. Para caracterizarlos se asumió un diámetro medio d50 = 4µm, es decir, relativamente bajo, apoyándose en la observación de que debe ser una fracción muy fina para subsistir a la deposición en el Lago Argentino".*

En consecuencia, se ha seleccionado el diámetro de 4 µm ya que no se cuenta con nueva evidencia que contradiga lo dicho por el mencionado autor. Este tamaño de sedimentos corresponde a limos muy finos, según la escala de Wentworth.

Sedimentos en suspensión que llegan al tramo inferior del río Santa Cruz (RSC)

El RSC posee ciertas concentraciones de sedimentos en suspensión que serán perturbadas por la presencia de las represas, ya que la acumulación de agua es acompañada por el depósito de los sedimentos.

Este proceso reduce la concentración natural en el estuario como indica (Menéndez et al., 2017). Sus conclusiones son utilizadas por esta tesis para alimentar el modelo del estuario. Los resultados del trabajo mencionado, considerando las condiciones sin represas y con represas, para el tramo inferior del RSC, se presentan en la Tabla 9.3.2, donde se identifican los porcentajes de sólidos sedimentables, coloides y sólidos suspendidos totales que no llegan al tramo inferior del río producto de la presencia de las represas.

Tabla 9.3.2 Resumen de los resultados de las modelaciones (Menéndez et al., 2017). SS: Sólidos sedimentables, Co: Coloides, SST: sólidos suspendidos totales

Diámetros de los sedimentables (µm)	Concentraciones en el tramo inferior Sin represas			Concentraciones en el tramo inferior Con represas			Diferencia (no llegan al tramo inferior)		
	SS (mg/l)	Co (mg/l)	SST (mg/l)	SS (mg/l)	Co (mg/l)	SST (mg/l)	SS (%)	Co (%)	SST (%)
4 µm, SS (50%), Co (50%) en Lago Argentino	8.16	3.84	12	2.48	3.84	6.32	70	0	47
4 µm, SS (80%), Co (20%) en Lago Argentino	10.48	1.54	12.02	2.56	1.54	4.1	76	0	66
4 µm, SS (20%), Co (80%) en Lago Argentino	5.85	6.14	11.99	2.4	6.14	8.54	59	0	29
2 µm, SS (50%), Co (50%) en Lago Argentino	8.51	4.1	12.62	3.59	4.1	7.69	58	0	39
10 µm, SS (50%), Co (50%) en Lago Argentino	8.17	3.84	12.01	2.19	3.84	6.04	73	0	50
Promedio	-	-	-	-	-	-	**67**	**0**	**46**

Considerando las 3 primeras simulaciones (con diámetros de 4µm) puede decirse que:

- En promedio, para las tres corridas de (Menéndez et al., 2017), con diámetros de 4µm, el 32% de los sólidos sedimentables (SS), de la concentración sin represas, llegan al tramo inferior del RSC. Se asume que este porcentaje ocurre en Piedrabuena.
- En promedio, los sólidos suspendidos totales (SST) llegan al tramo inferior con un porcentaje promedio del 53% de la concentración sin represas.

Los sedimentos considerados para el análisis son los que transportan los ríos Chico y Santa Cruz. A los efectos de comparar las concentraciones entre las condiciones actuales y aquellas que resultarán como producto del llenado de las represas, no se considerarán en la modelación los sedimentos que ponen en suspensión las corrientes de marea. Estos sedimentos significan una contribución extra de sedimentos en suspensión que enmascara el déficit de sedimentos en suspensión producido por el funcionamiento de las represas. Sin embargo, los sedimentos que llegan al estuario pueden depositarse y resuspenderse.

9.4. Relación Caudal – Turbidez

La comparación entre la turbidez y el caudal del río (proporcional al nivel del río sin mareas) no muestra una relación clara entre ambas variables (ver Figura 9.4.1), por las siguientes razones:

a) En noviembre de 2017 (caudal es de unos 500 m^3/s) se midió turbidez en magnitudes tan altas y variables similares a las de enero de 2018 (caudal de 800 a 1200 m^3/s). Por lo tanto, la duplicación del caudal no significó cambios significativos en el nivel de la turbidez.

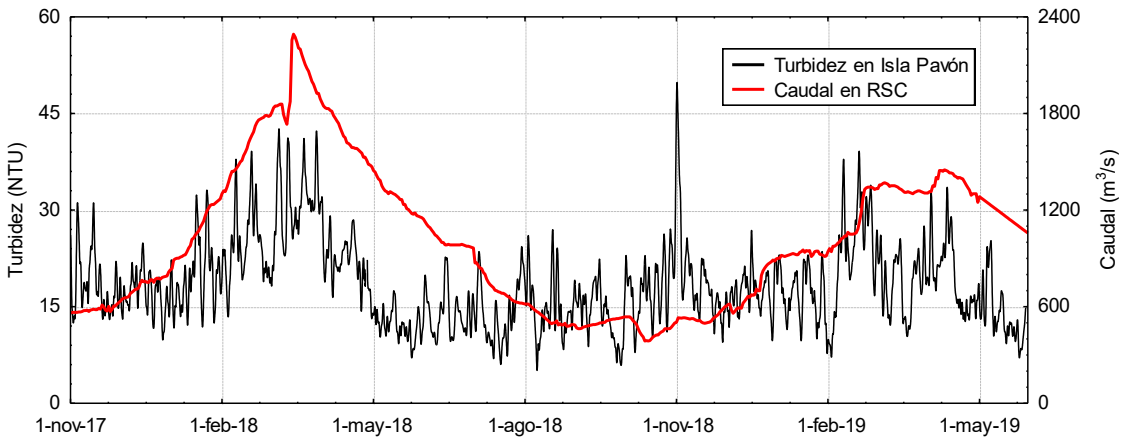
b) En diciembre de 2017 (caudal promedio de unos 700 m^3/s) la turbidez fue claramente menor que para noviembre de ese año, cuando ocurre un caudal menor.

c) En febrero de 2018 (caudal entre 1100 y 1600 m^3/s) la amplitud de la turbidez fue de unos 20 NTU mientras que en abril de 2018 (caudal entre 1900 y 1500 m^3/s) la amplitud fue de unos 10 NTU.

d) En marzo de 2018 aumenta el caudal y aumenta la turbidez.

Tal vez sí exista una relación entre la turbidez mínima y el caudal, pero es demasiado especulativo afirmar esta vinculación. Para este estudio se consideró la serie de turbidez variable medida en Isla Pavón, filtrada y llevada a concentraciones de solidos suspendidos totales, para utilizarla como condición de contorno del modelo en el río Santa Cruz.

Figura 9.4.1 Turbidez registrada en Isla Pavón (curva negra) y caudal en Charles Fuhr (curva roja). Fechas entre octubre de 2017 y abril de 2018.



9.5. Incidencia de la marea en los niveles de Isla Pavón

Como se presentó en los puntos 7.9 y 7.13 del presente documento, en los registros de niveles del río en Isla Pavón se observan algunas pleamares, otras no y las bajamares observadas en el interior del estuario, no se observan. En los mencionados puntos se hacen explicaciones, que resultan de los análisis con los datos in situ, de los motivos que producen estas observaciones.

Con el objeto de reforzar las explicaciones ya realizadas, se ha utilizado el modelo MIKE 3 Flow Model (HD) calibrado para estudiar el comportamiento de los niveles del río. Con tal fin, el modelo ha sido forzado solamente por la marea astronómica en los bordes offshore, sin el aporte de agua del río Santa Cruz, cómo si éste estuviera seco. Este caso permite observar en qué condiciones llega el agua a las zonas donde existe incidencia de la marea. A continuación se presentan los resultados de las variaciones del nivel del agua durante 28 días, en diferentes partes del río Santa Cruz, desde la altura de Puente Viejo hasta su desembocada. La Figura 9.5.1 muestra la porción del río Santa Cruz considerado en la modelaciones y 8 puntos en los que se analizan los niveles del agua: t1 a t8. La Tabla 9.5.1 presenta las posiciones de los puntos y las profundidades de cada punto referida la NMM en Punta Quilla.

Figura 9.5.1 Porción del río Santa Cruz considerado en la modelaciones y los 8 puntos en los que se analizan los niveles del agua: t1 a t8.

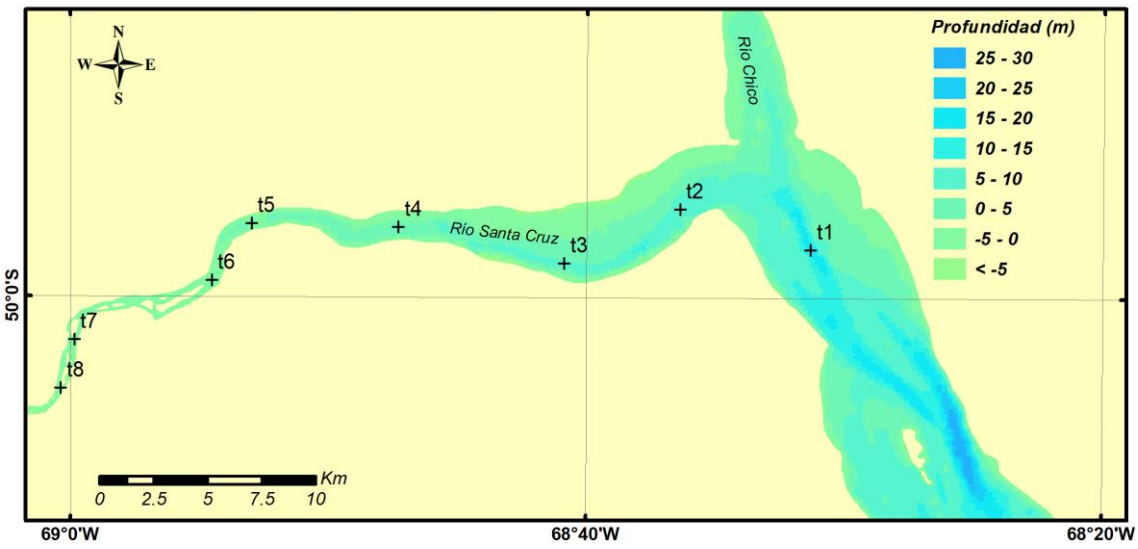


Tabla 9.5.1 Posiciones de los puntos y las profundidades de cada punto referida la NMM en Punta Quilla. Valores positivos de la profundidad indican distancia por debajo del NMM y negativos por sobre el NMM.

Punto	X utm19S (WGS84)	Y utm19S (WGS84)	Profundidad (m) referidos al NMM en Punta Quilla.
t1	534263	4463426	19.2
t2	528224	4465323	8.7
t3	522854	4462838	5.8
t4	515185	4464522	2.7
t5	508398	4464709	0.8
t6	506554	4462090	-0.9
t7	500195	4459338	-2.4
t8	499554	4457093	-4.3

La Figura 9.5.2 presenta la condición inicial de la simulación en la que se observa el nivel en 0 m sobre el NMM. Se observa que los punto t6, t7 y t8 están por sobre el 0 m referidos al NMM. Las Figura 9.5.3 y 9.5.4 presentan 2 instantes en los que la marea ha avanzado sobre el río Santa Cruz incorporando masa de agua en esta parte del dominio. Debe considerarse que las pleamares llevan agua a esta región, pero las bajamares no necesariamente la sacan, porque existen tramos del río con "huecos" que generan "piletas" o "agua atrapada" durante las bajantes.

Figura 9.5.2 Instante inicial de la simulación en la que se observa el nivel en 0 m sobre el NMM (en Punta Quilla).

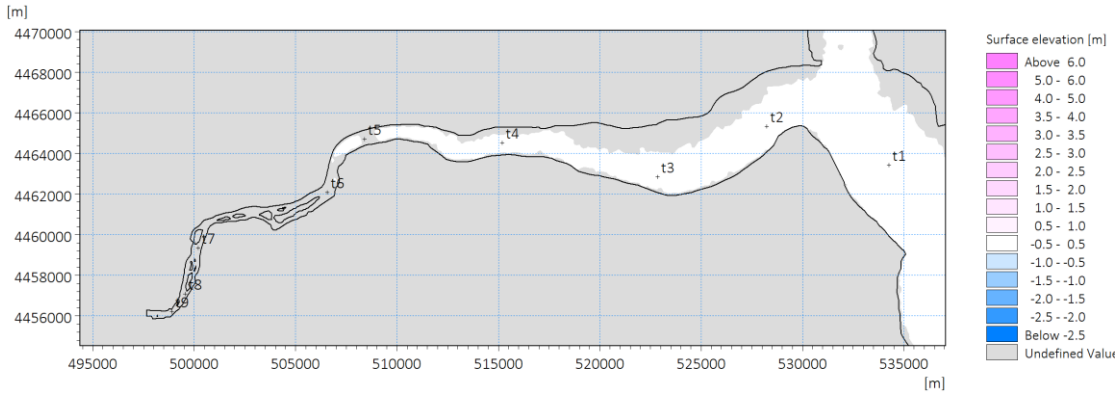


Figura 9.5.3 Un instante posterior al inicial, en el que una pleamar alcanza el punto t6.

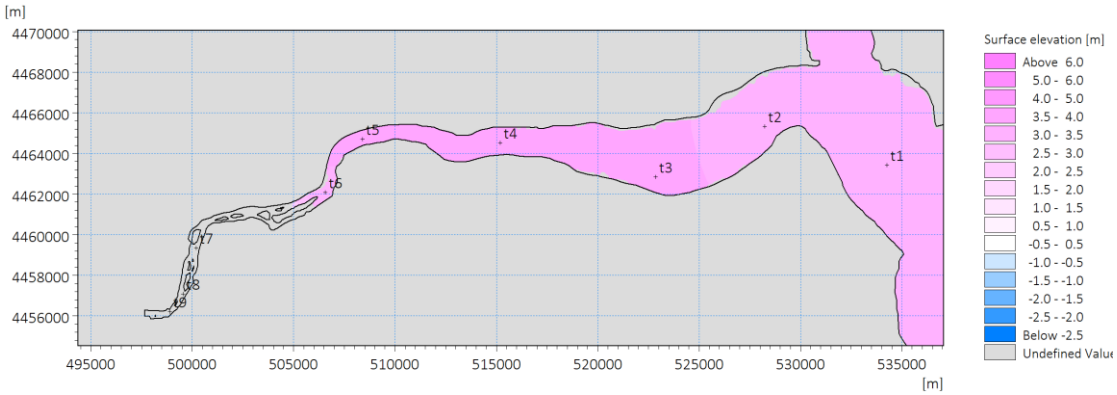
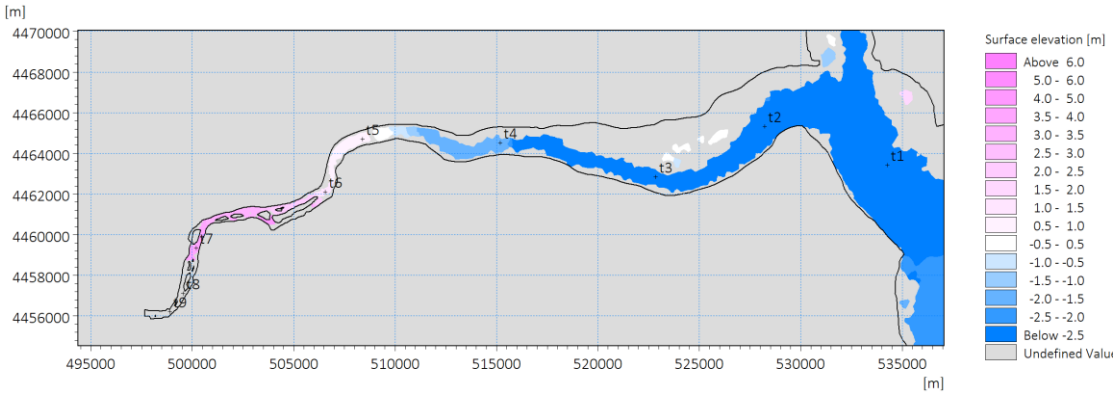


Figura 9.5.4 Un instante posterior al inicial. Se observan niveles de agua altos en los puntos t6 y t7, a pesar de la bajamar en el estuario producto de las piletas o agua atrapada en la parte alta de la grilla.



Las Figuras 9.5.5 y 9.5.6 presentan los niveles del agua (referidos al NMM en Punta Quilla) calculados por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) en los 8 puntos presentados en la Figura 9.5.1. En estas figuras puede verse que cuando más adentro del río están los puntos más tarde les llega el agua y estas situaciones ocurren cuando los niveles sobrepasan algún umbral vinculado a la profundidad del punto y su entorno. En la Figura 9.5.6 se presentan los resultados en el punto t1 y t8, allí puede verse que para que el agua llegue al punto t8 las primeras sicigias no fueron suficientes, ya que el nivel del agua no alcanzó a superar las profundidades (barras en la batimetría) como para que el agua rebalse hacia esta zona. Recién durante las segundas sicigias, de mayor amplitud que las primeras, hubo nivel suficiente como que el agua acceda a esta región.

Figura 9.5.5 Niveles del agua (referidos al NMM en Punta Quilla) calculados por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) en los 8 puntos presentados en la Figura 9.5.1.

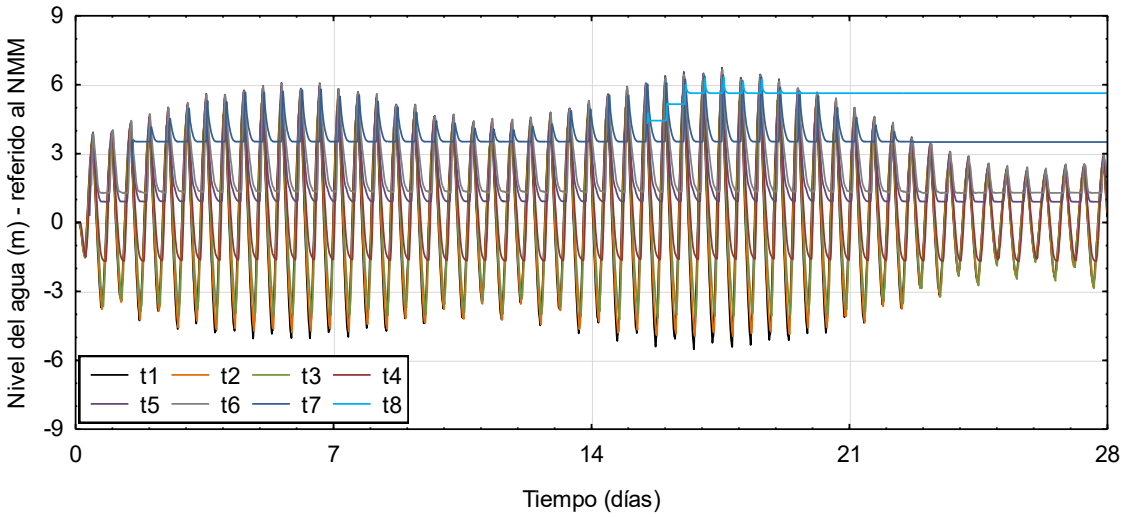
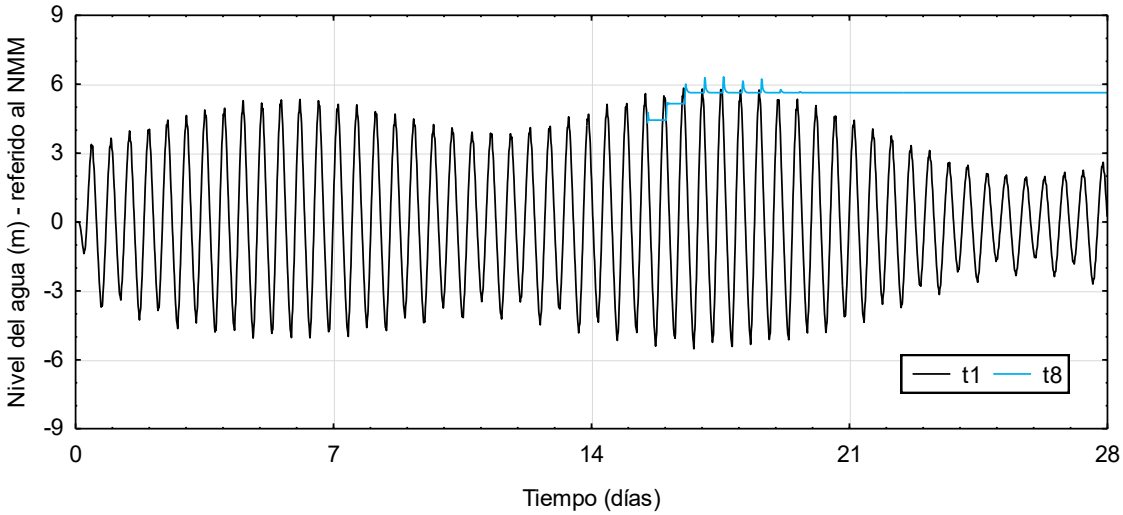


Figura 9.5.6 Niveles del agua (referidos al NMM en Punta Quilla) calculados por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) en los puntos t1 y t8 presentados en la Figura 9.5.1.



Estos resultados confirman que la marea tendrá incidencia en los niveles independientemente del nivel del río, el aporte de la marea estará definido por la batimetría que permitirá el acceso de agua a la región.

Capítulo **10**

Resultados: variables y el efecto de las represas

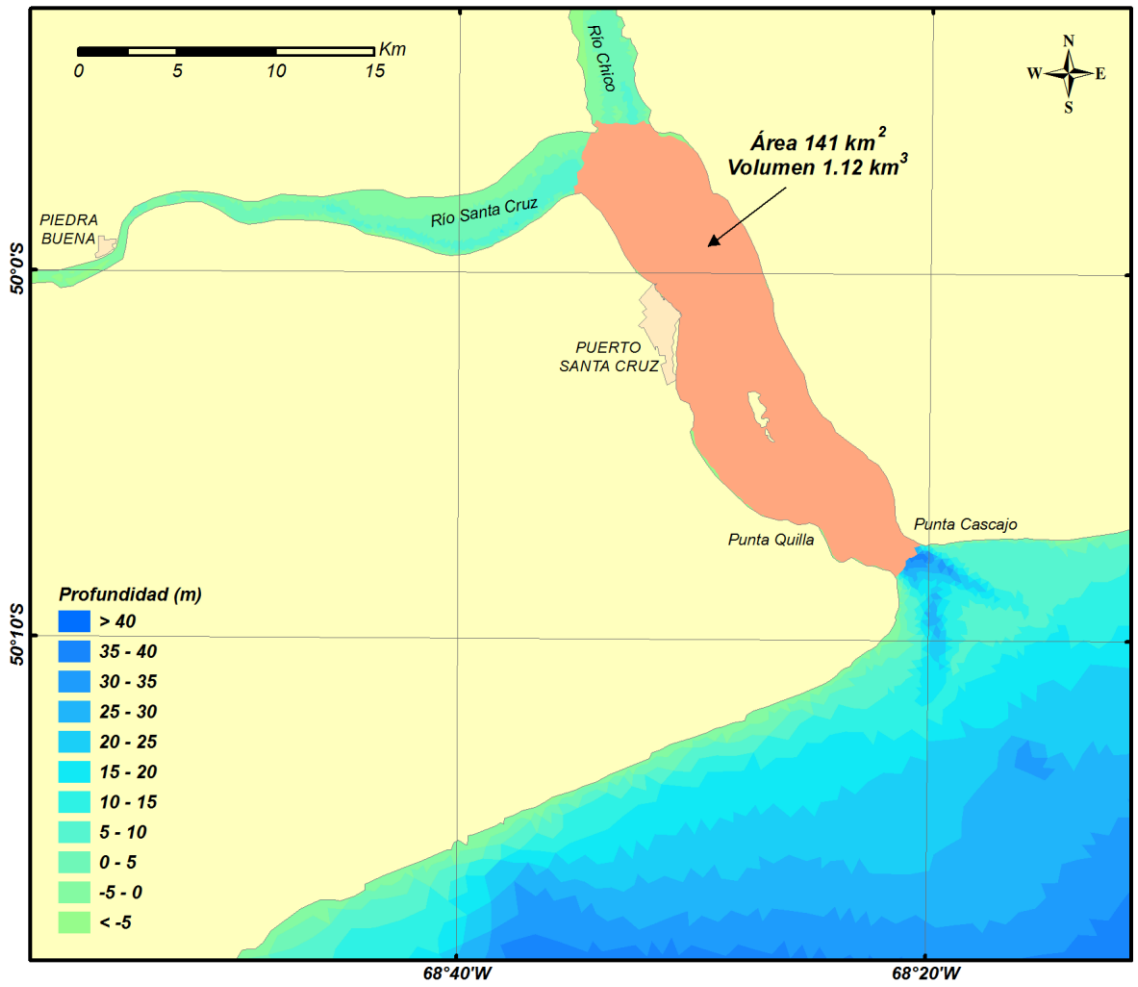
Se ha realizado la calibración del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) que calcula la variación de la superficie del mar y las corrientes asociadas, de su módulo de transporte (TR) que calcula la difusión y dispersión de propiedades como la temperatura y salinidad, y del módulo de transporte de sedimentos (MT) en el estuario del RSC.

Con el modelo funcionando adecuadamente se han estudiado diferentes situaciones que permiten analizar el comportamiento del estuario considerando la presencia y el llenado de las represas. Los resultados se presentan en términos de la elevación de la superficie del mar, temperatura, salinidad y concentración de sedimentos en suspensión.

10.1. Volumen de agua que ingresa y egresa del estuario con la marea

Se ha realizado una estimación de la fracción de agua que ingresa al estuario con cada ciclo de marea, a partir de algunas simplificaciones. El volumen de agua que tiene el estuario al NMM, alcanza unos 1.12 km^3 (1.12 x 10^6 m^3). Este volumen se ha calculado sobre una superficie, de 141 km^2, como se indica en la Figura 10.1.1., a partir de la información batimétrica que usa el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD).

Figura 10.1.1 Superficie del estuario utilizada para la estimación del volumen del estuario al NMM.



La Tabla 10.1.1 muestra la estimación del Prisma de Marea (volumen de agua que ingresa al estuario entre la BM y la PM) para distintas amplitudes de la marea. Estos son cálculos geométricos de utilidad solo a los efectos de caracterizar el estuario.

Tabla 10.1.1 Estimación del volumen de agua que ingresa al estuario entre la BM y la PM (Prisma de Marea) para distintas amplitudes de la marea

Estado de la marea	Amplitud representativa (m)	Volumen de agua que ingresa al estuario entre la BM a la PM (km^3)
Marea de sicigias (mayor amplitud)	12	1.69
Mareas medias (amplitud media)	8	1.12
Marea de cuadratura (menor amplitud)	6	0.85

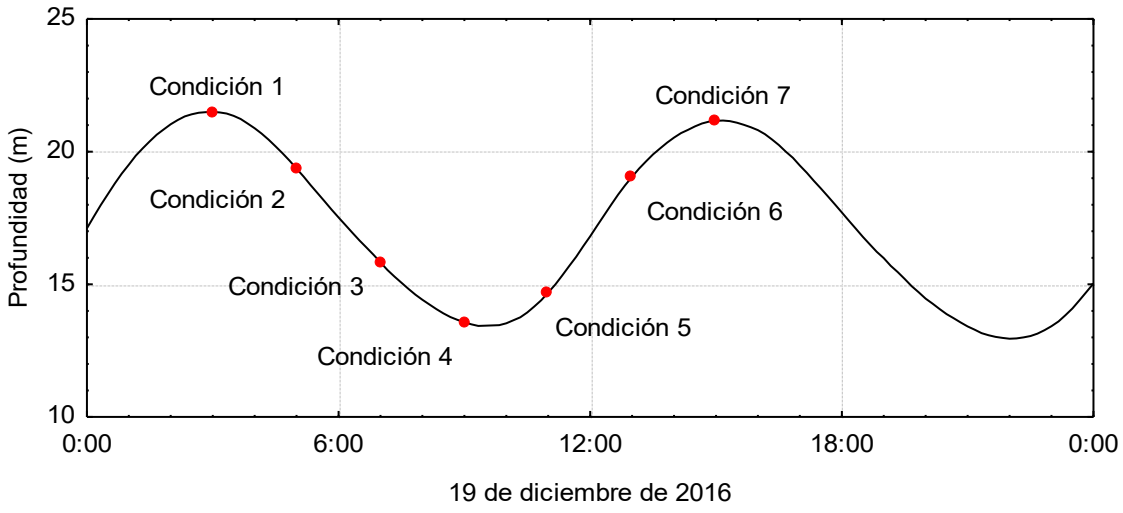
Si se comparan los volúmenes de agua que ingresan para las distintas amplitudes de marea con el volumen de agua del estuario, puede deducirse que, en el término de un ciclo de marea entra y sale un volumen de agua equivalente al del estuario definido hasta el NMM.

10.2. Temperatura cerca del fondo y corrientes de marea

Se ha establecido que las propiedades del agua, como la temperatura y principalmente la salinidad, dependen del estado de la marea.

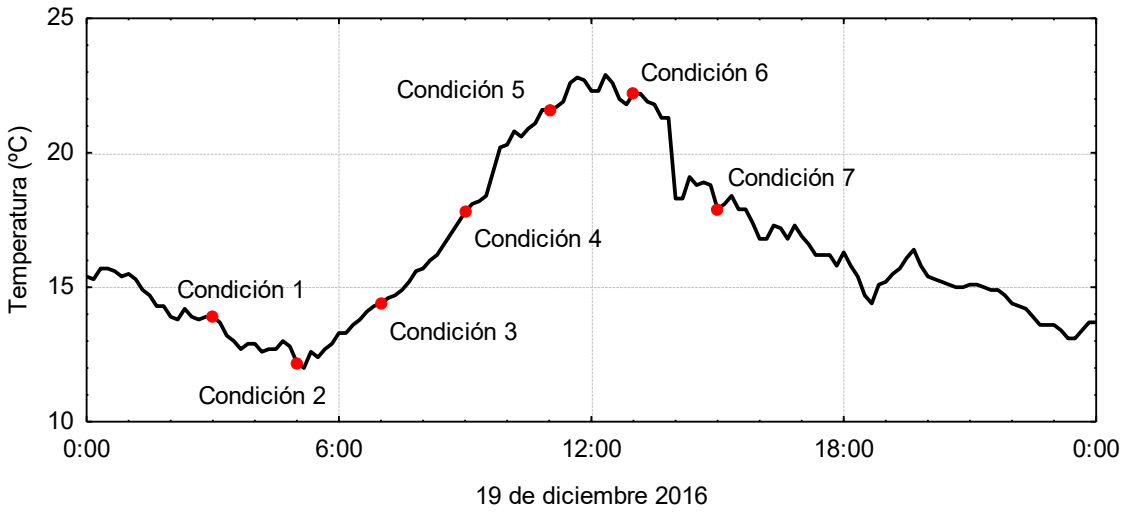
La Figura 10.2.1 presenta el nivel del mar del día 19 de diciembre de 2016 en la boca del estuario (resultado del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD)) y 7 estados de la marea. A modo de ejemplo, la Condición 1 corresponde a la marea bajante (sale agua al estuario) y la Condición 4 marea creciente (entra agua al estuario). Si bien se ha seleccionado un ciclo de marea que corresponde a la época de medición, los resultados pueden generalizarse (de modo conceptual) a cualquier otro ciclo de marea. La Figura 10.2.2 muestra la temperatura ambiente registrada por la estación meteorológica Davis (presentada antes en el punto 7.2 del presente documento) para el día 19 de diciembre de 2016. Se identifican, también los mismos 7 instantes asociados a las condiciones de marea de la Figura 10.2.1. Con estos elementos, se analizarán las distribuciones de temperatura y salinidad asociadas a un ciclo de marea. Para esta época las temperaturas de los ríos Santa Cruz y Chico son superiores a las del mar, como puede verse en las mediciones presentadas.

Figura 10.2.1 Ciclo de marea de unas 12 horas de período y 7 condiciones de la marea en la posición de la Estación Mar (en la boca del estuario).



En el estuario ocurre la mezcla de aguas de los ríos y el mar. Durante este trabajo resultó clara la necesidad de considerar el efecto del intercambio de calor entre el agua y la atmósfera para explicar las variaciones de temperatura del agua del estuario. Los campos de temperatura variables en tiempo y espacio han sido reproducidos por el modelo. En las Figuras 10.2.3 a 10.2.9 se presentan campos de temperatura y velocidades de la capa cercana al fondo del mar para las 7 condiciones de marea y temperatura ambiente de las Figuras 10.2.1 y 10.2.2.

Figura 10.2.2 Temperatura ambiente registrada por la Estación Meteorológica Davis (instalada por ESSA en Puerto Santa Cruz) para el día 19 de diciembre de 2016. Se identifican los instantes de las 7 condiciones de la Figura 10.2.1.



En las figuras puede verse que, en general, la temperatura del agua de mar, relativamente más fría que la de los ríos, ingresa al estuario generando gradiente horizontal de temperatura que varía su posición en función de la condición de marea.

En creciente, se observa agua relativamente más fría en el interior del estuario que en bajante. Además, la temperatura del agua se ve modificada por la temperatura ambiente y en consecuencia, el efecto de la marea (que considera a la temperatura como si fuera conservativa) se ve alterado. Por ejemplo, para la condición 6, puede verse que el agua está ingresando desde el mar (es una condición de creciente como muestra la Figura 10.2.1) pero la temperatura en el interior del estuario aumenta respecto de la condición 5 inmediatamente anterior, a pesar del ingreso de agua relativamente fría. Esto se debe a la transferencia de calor desde la atmósfera hacia el mar. En la Figura 10.2.2 se ve que la temperatura ambiente crece desde la condición 2 a la 6 unos 10 ºC. Un detalle de las variaciones de la temperatura, por condición de marea, se muestra a continuación.

Condición 1 (referencia Figura 10.2.1 y 10.2.2)

La Figura 10.2.3 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones cercanas a la pleamar. El agua está aún entrando al estuario y la temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 2

La Figura 10.2.4 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones de bajante (el agua se está retirando). La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 3

La Figura 10.2.5 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones de bajante (el agua se está retirando) cerca de la bajamar. La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 4

La Figura 10.2.6 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones casi de bajamar (el agua aún se está retirando). La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 5

La Figura 10.2.7 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones de creciente, aunque muy cercanas a la bajamar (el agua comienza a entrar). La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 6

La Figura 10.2.8 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones de creciente (el agua sigue entrando). La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente.

Condición 7

La Figura 10.2.9 representa el campo de velocidades y la distribución de la temperatura en el estuario en condiciones cercanas a la pleamar. La temperatura tiene valores algo mayores a 14.5 ºC y menores a 11.5 ºC, aproximadamente, aproximadamente. Este caso en similar a la Condición 1.

Figura 10.2.3 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 1 de marea (ver Figura 10.2.1)

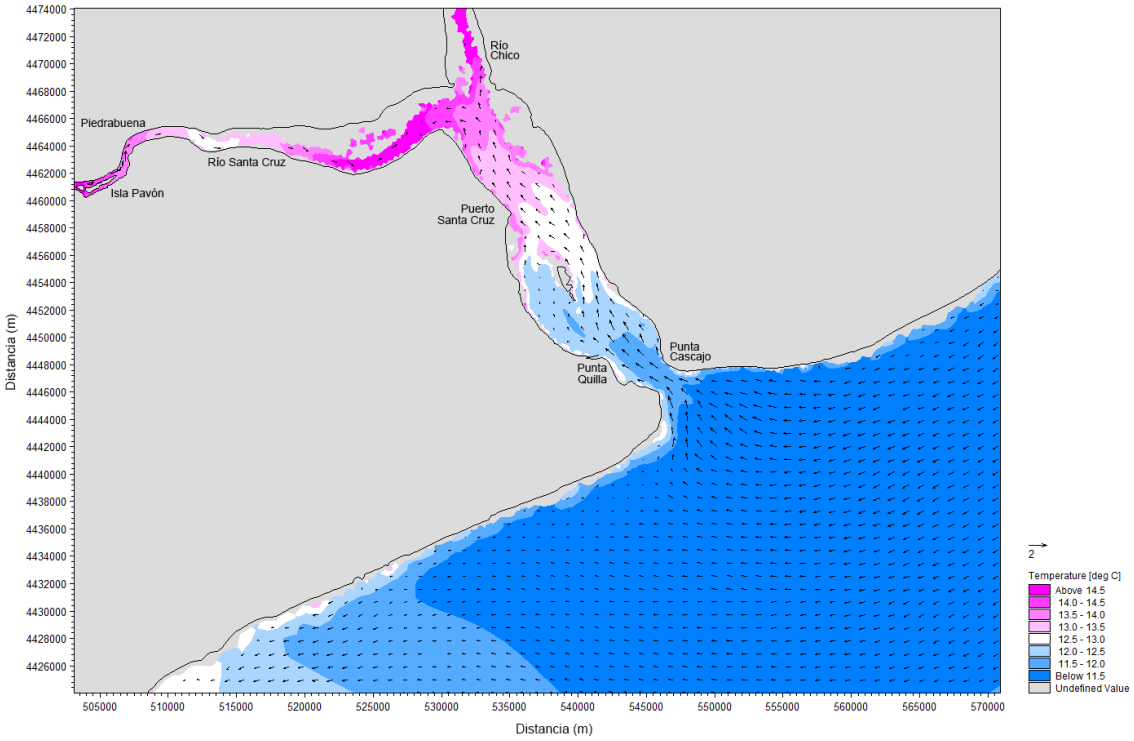


Figura 10.2.4 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 2 de marea (ver Figura 10.2.1)

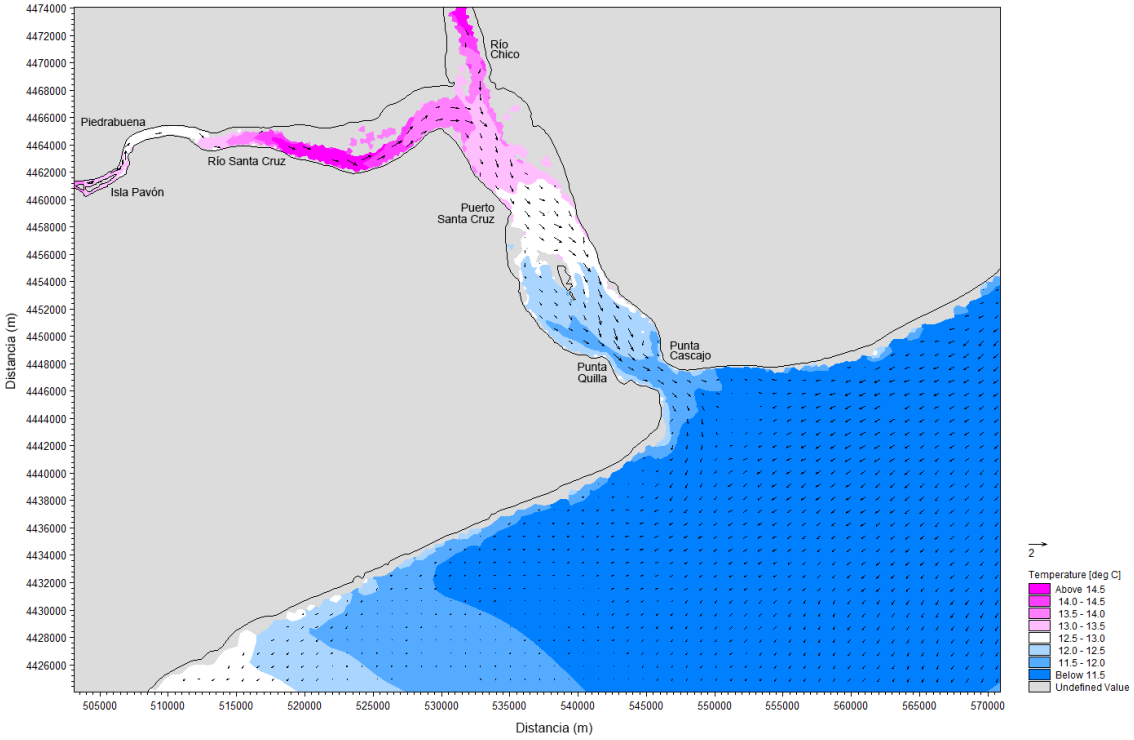


Figura 10.2.5 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 3 de marea (ver Figura 10.2.1)

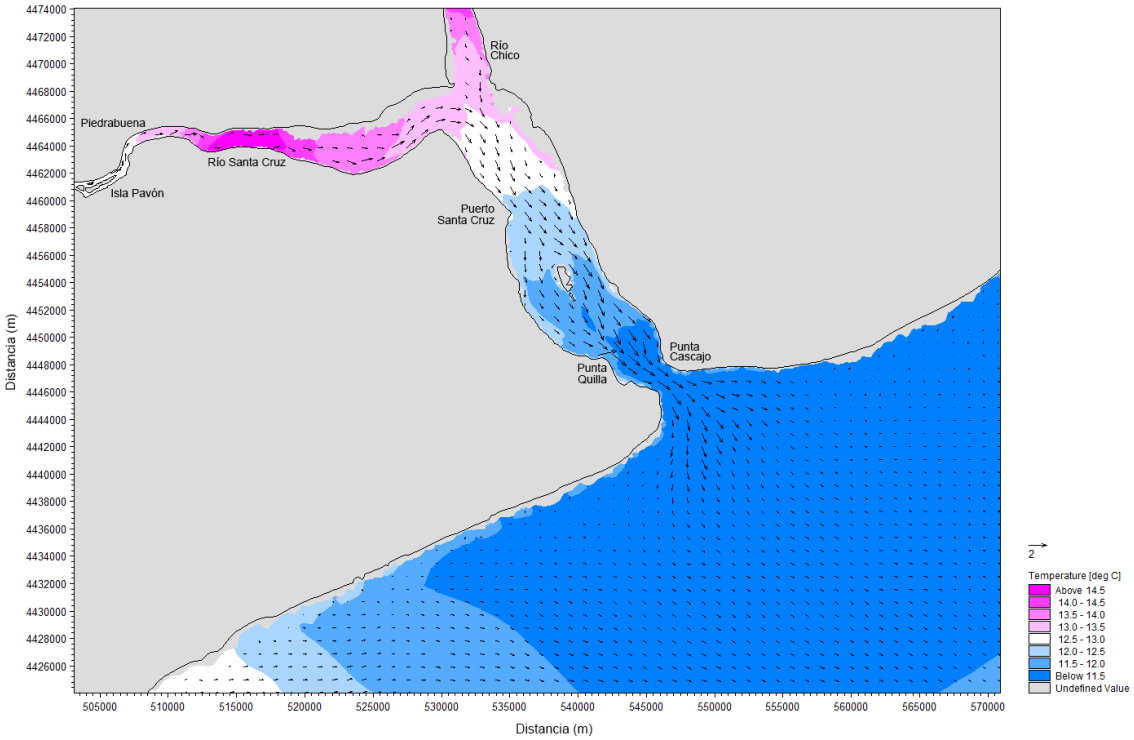


Figura 10.2.6 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 4 de marea (ver Figura 10.2.1)

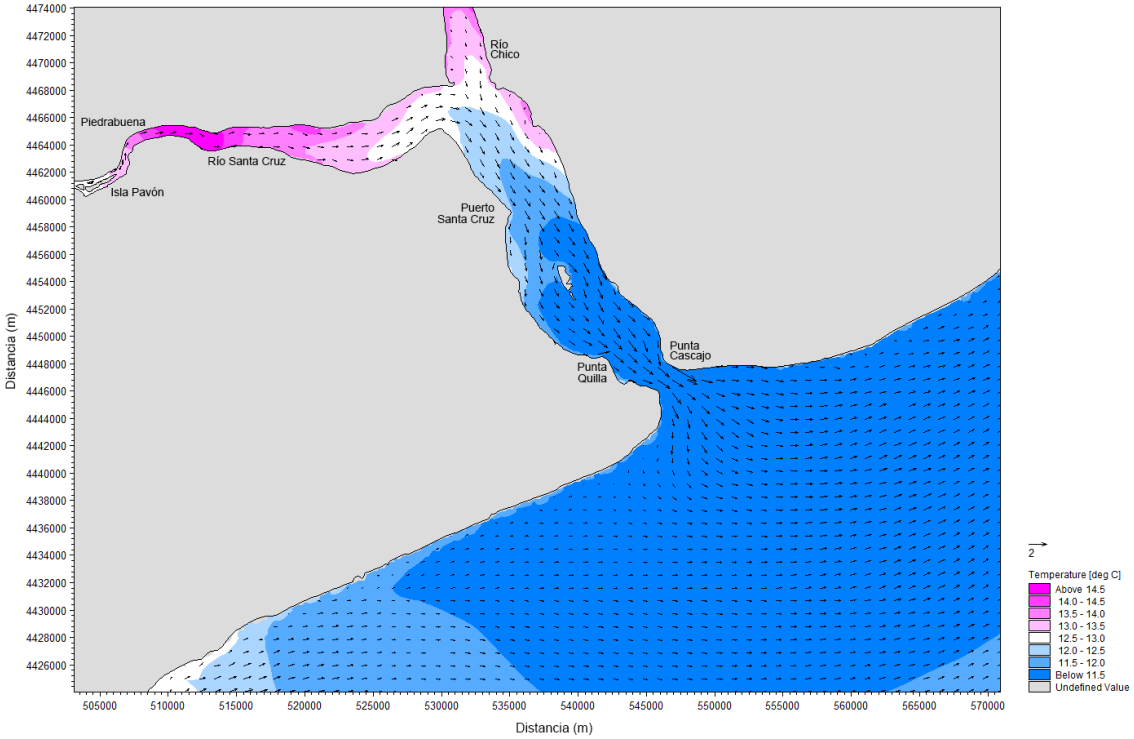


Figura 10.2.7 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 5 de marea (ver Figura 10.2.1)

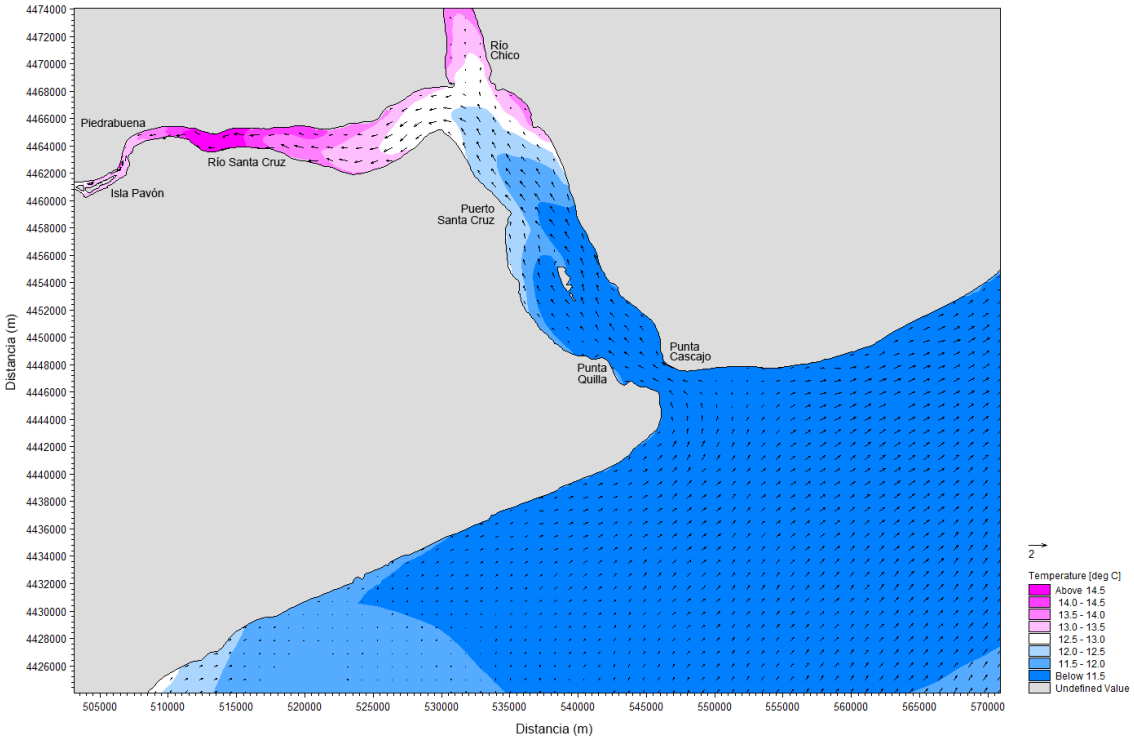


Figura 10.2.8 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 6 de marea (ver Figura 10.2.1)

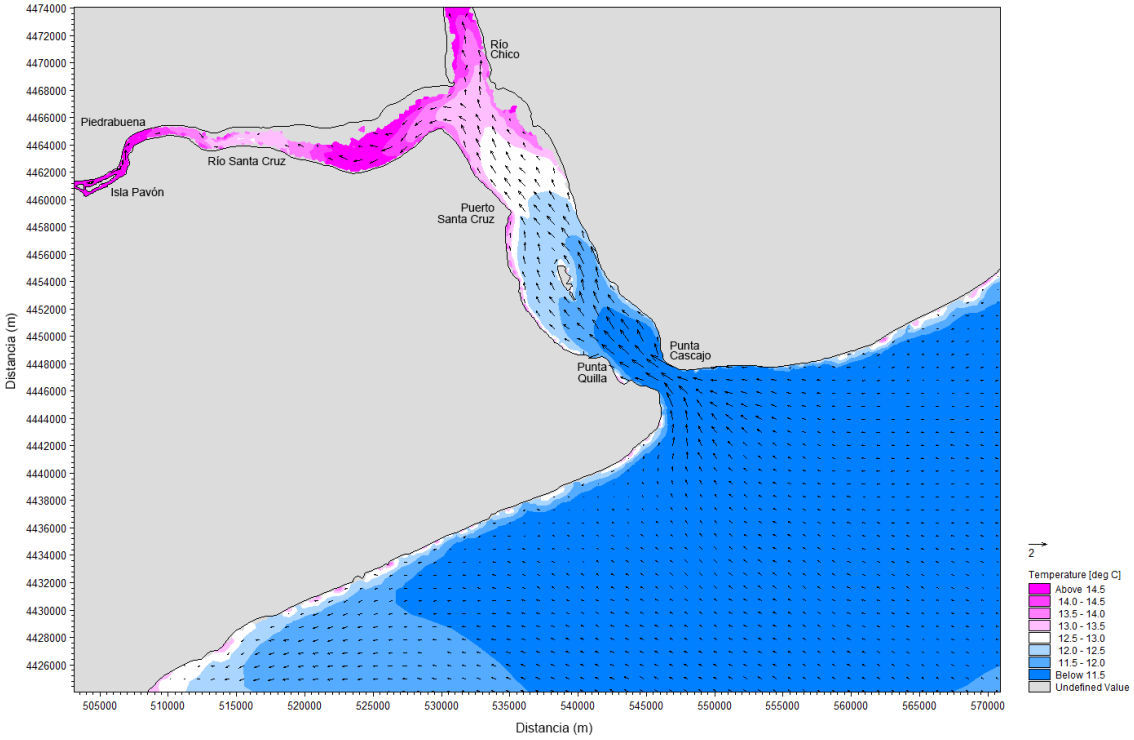
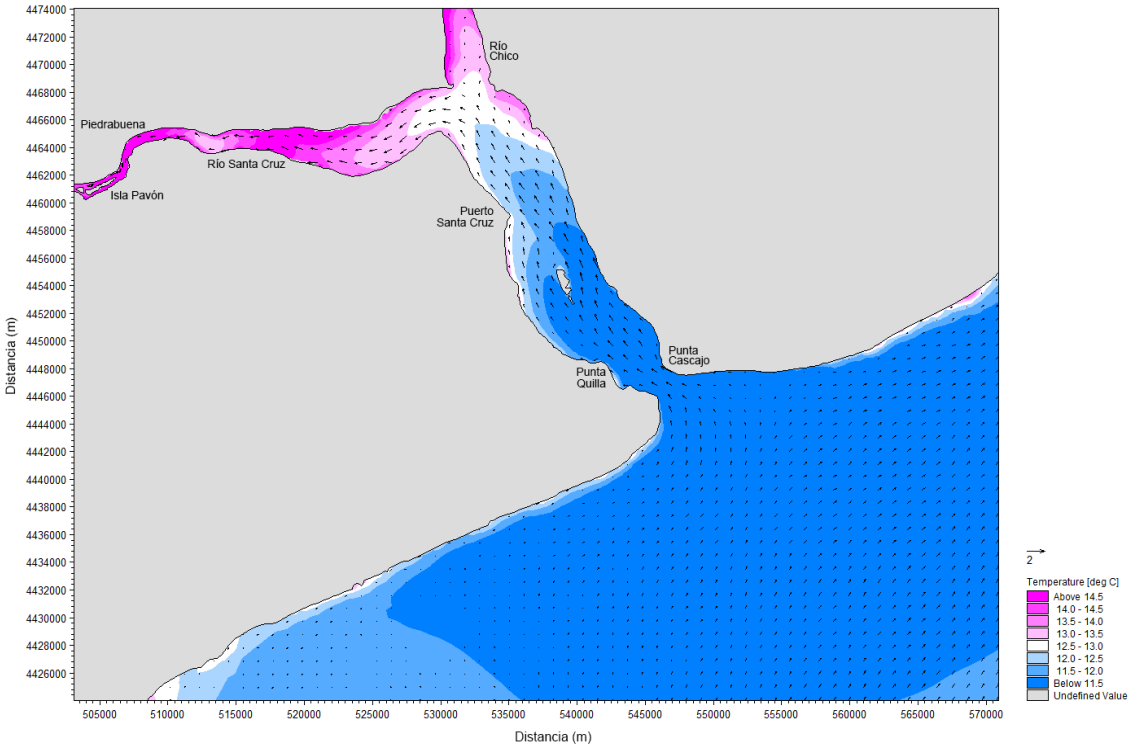


Figura 10.2.9 Campo de temperatura y corrientes para la Condición 7 de marea (ver Figura 10.2.1)



10.3. Temperatura y corrientes de marea para la Condición 6

Se trata de presentar las características del campo de temperaturas en las distintas capas verticales de la grilla del modelo (asociadas a distintas profundidades), para una sola condición de mareas. Las Figuras 10.3.1 a 10.3.5 presentan ejemplos de campos de temperaturas asociadas a las 5 capas que utiliza el modelo para la Condición 6 (ver Figuras 10.2.1 y 10.2.2).

Puede verse que las temperaturas aumentan a medida que las capas son más superficiales, encontrándose los máximos de temperatura en superficie (ver Figura 10.3.5).

En las figuras puede verse que para la condición 6 (1 PM del día 19 de diciembre de 2016) la temperatura ambiente ha trepado desde las 5 AM a 1 PM 10ºC (desde 12ºC a 22ºC). Este aumento de temperatura ambiente se traduce en un incremento notorio de la temperatura superficial de la región modelada que va disminuyendo hacia las capas más profundas, con mayor variación en las capas superficiales.

Figura 10.3.1 Campo de temperatura y corrientes para la Capa 1 (cerca del fondo) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

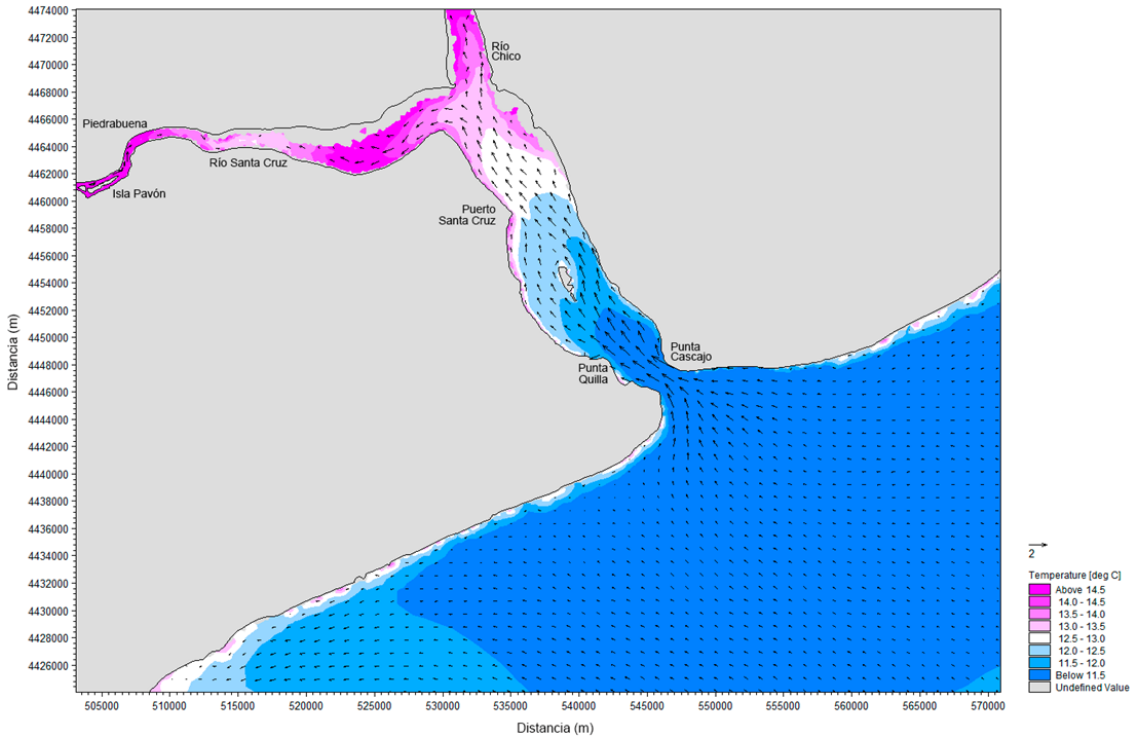


Figura 10.3.2 Campo de temperatura y corrientes para la Capa 2 (entre la capa de fondo y la capa a media agua) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

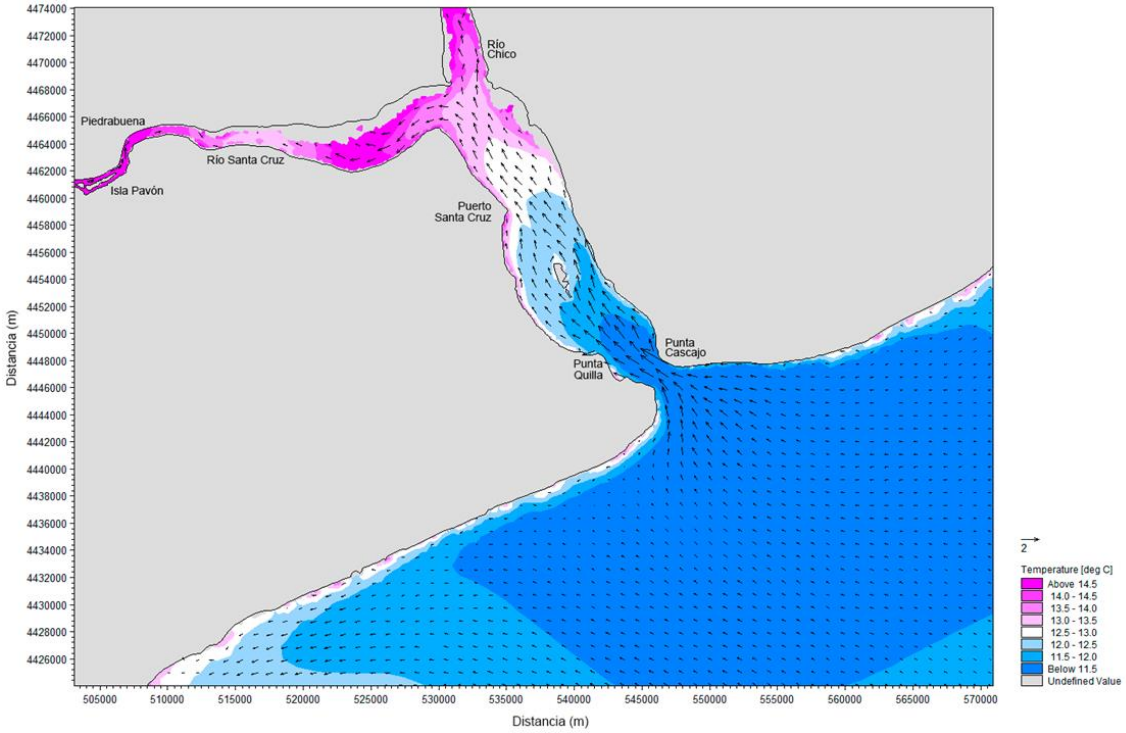


Figura 10.3.3 Campo de temperatura y corrientes para la Capa 3 (a media agua) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

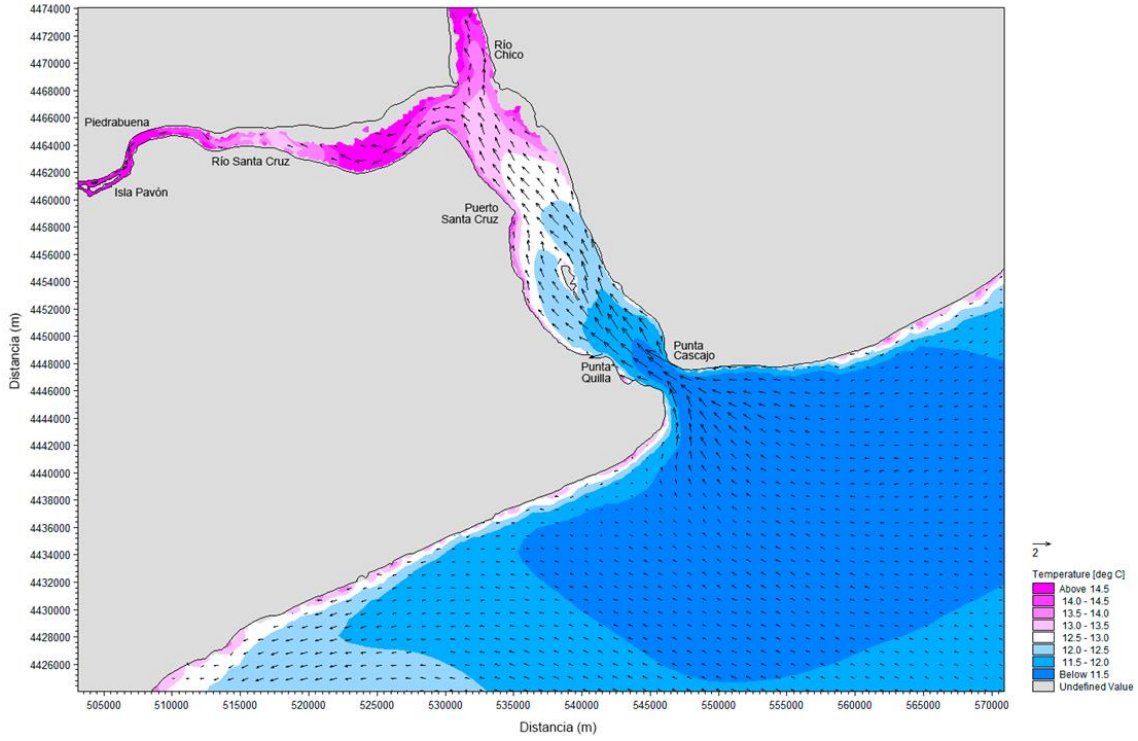


Figura 10.3.4 Campo de temperatura y corrientes para la Capa 4 (entre la capa a media agua y la capa cercana a la superficie) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

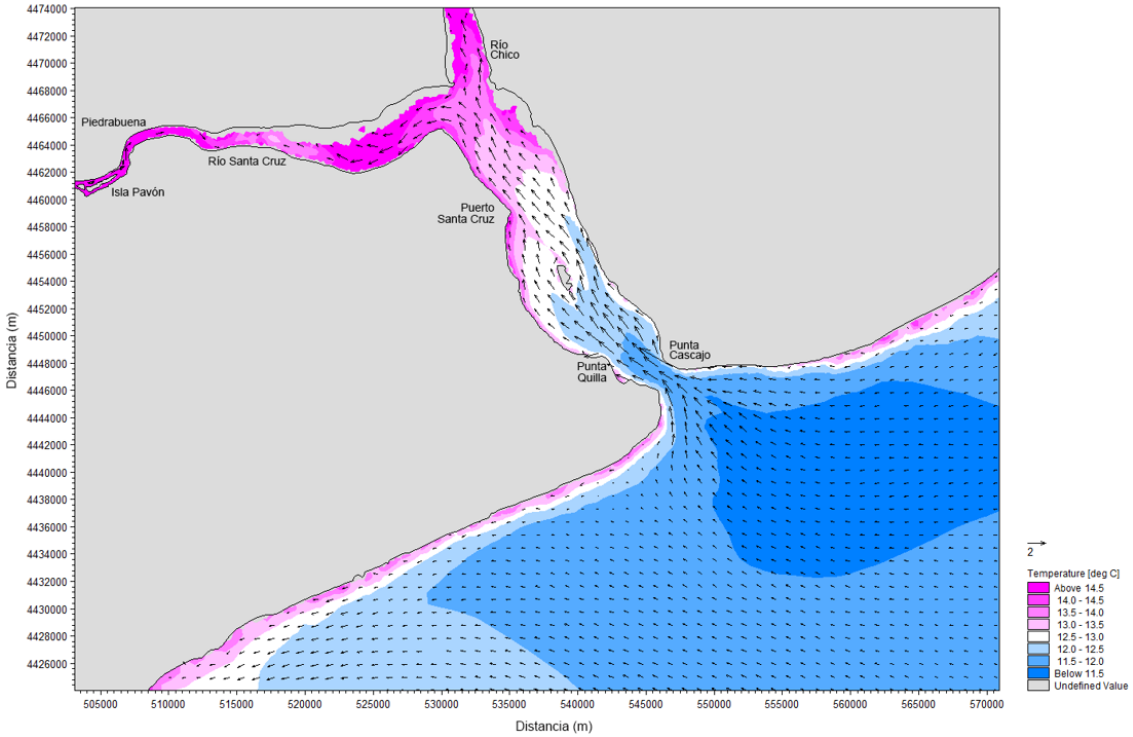
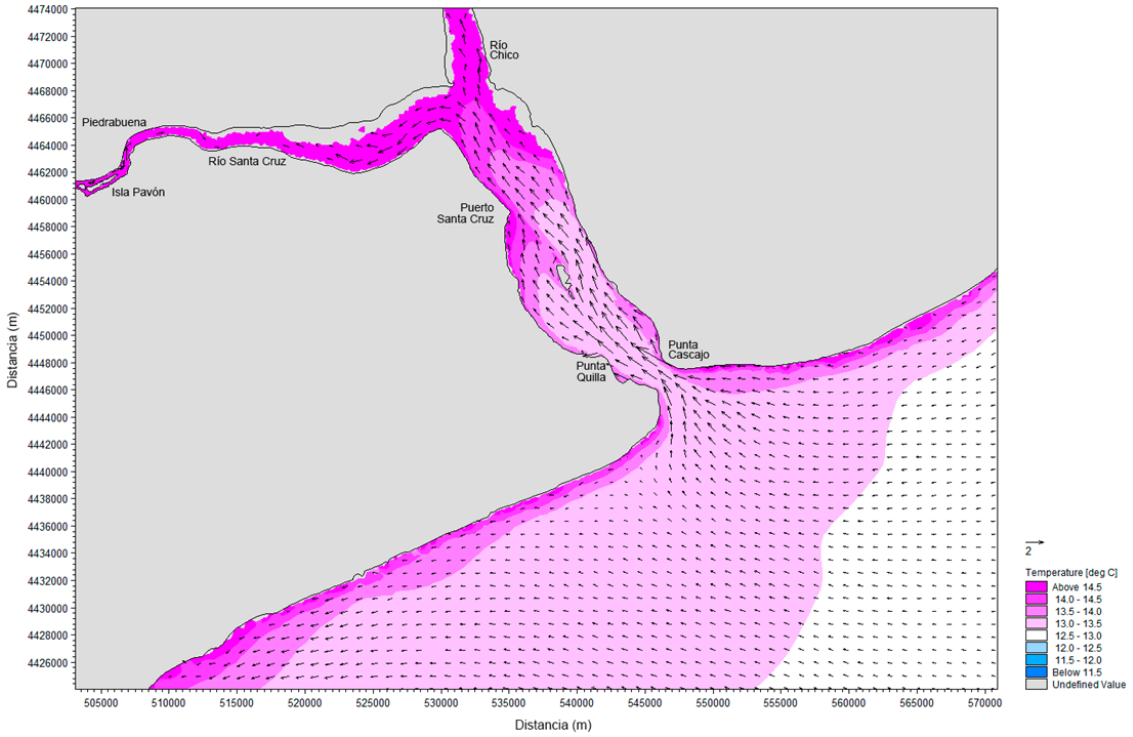


Figura 10.3.5 Campo de temperatura y corrientes para la Capa 5 (capa cercana a la superficie) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)



10.4. Salinidad y corrientes para distintas condiciones de marea

Las mediciones disponibles utilizadas en la calibración del modelo indican salinidades nulas en los ríos Santa Cruz y Chico, y superiores a 32 UPS en el mar, por lo que en el estuario ocurre la mezcla de estas aguas.

Los campos de salinidad variables en el tiempo han sido reproducidos por el modelo para diferentes condiciones de marea y viento. En las Figuras 10.4.1 a 10.4.7 se presentan campos de salinidad y velocidades de la capa cercana al fondo del mar para las 7 condiciones de marea de la Figura 10.2.1, calculados por el MIKE 3 Flow Model FM (HD+TR). De las figuras puede verse que el agua salada del mar ingresa al estuario dominada por las velocidades de marea, generando un importante gradiente horizontal que varía espacialmente en función de la condición de marea. Para el ejemplo de las figuras, puede verse que en creciente el agua salada en el interior del estuario es mayor que en bajante y salinidades del orden de 10 UPS pueden encontrarse a unos 10 km dentro del río Santa Cruz.

En bajante el río Santa Cruz muestra salinidad nula en toda la extensión simulada, desde Isla Pavón hasta su desembocadura en el estuario. Un detalle de las variaciones de la salinidad, por condición de marea, se muestra a continuación.

Condición 1 (referencia Figura 10.2.1)

La Figura 10.4.1 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones cercanas a la pleamar. El agua está aún entrando al estuario y la salinidad tiene valores entre 20 UPS y 32 UPS, aproximadamente.

Condición 2

La Figura 10.4.2 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones de bajante (el agua se está retirando). La salinidad tiene valores entre 20 UPS y 32 UPS, aproximadamente.

Condición 3

La Figura 10.4.3 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones de bajante (el agua se está retirando) cerca de la bajamar. La salinidad tiene valores entre 10 UPS y 28 UPS, aproximadamente, esto es la salinidad disminuye a medida que sale el agua del estuario.

Condición 4

La Figura 10.4.4 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones casi de bajamar (el agua aún se está retirando). La salinidad tiene valores entre 4 UPS y 28 UPS, aproximadamente.

Condición 5

La Figura 10.4.5 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones de creciente, aunque muy cercanas a la bajamar (el agua comienza a entrar). La salinidad tiene valores entre 6 UPS y 28 UPS, aproximadamente.

Condición 6

La Figura 10.4.6 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones de creciente (el agua sigue entrando). La salinidad tiene valores entre 6 UPS y 32 UPS, aproximadamente.

Condición 7

La Figura 10.4.7 representa el campo de velocidades y la distribución de la salinidad en el estuario en condiciones cercanas a la pleamar. El agua está aún entrando al estuario y la salinidad tiene valores entre 20 UPS y 32 UPS, aproximadamente. Este caso es similar a la Condición 1.

Figura 10.4.1 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 1 de marea

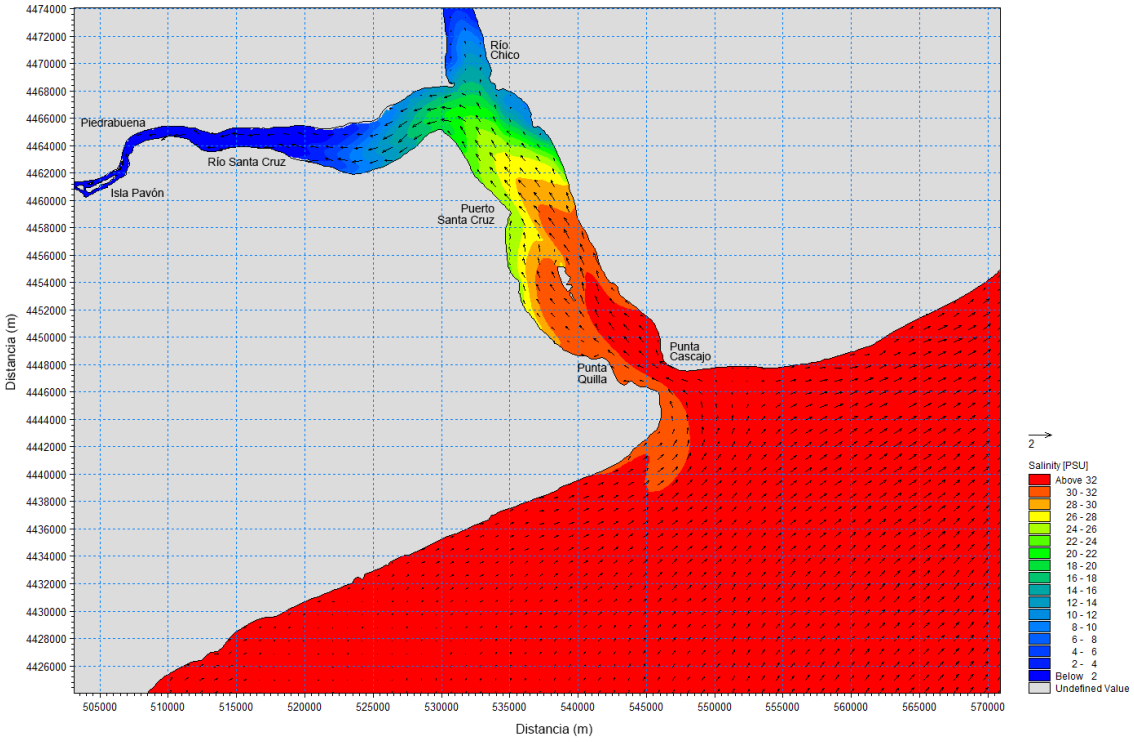


Figura 10.4.2 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 2 de marea

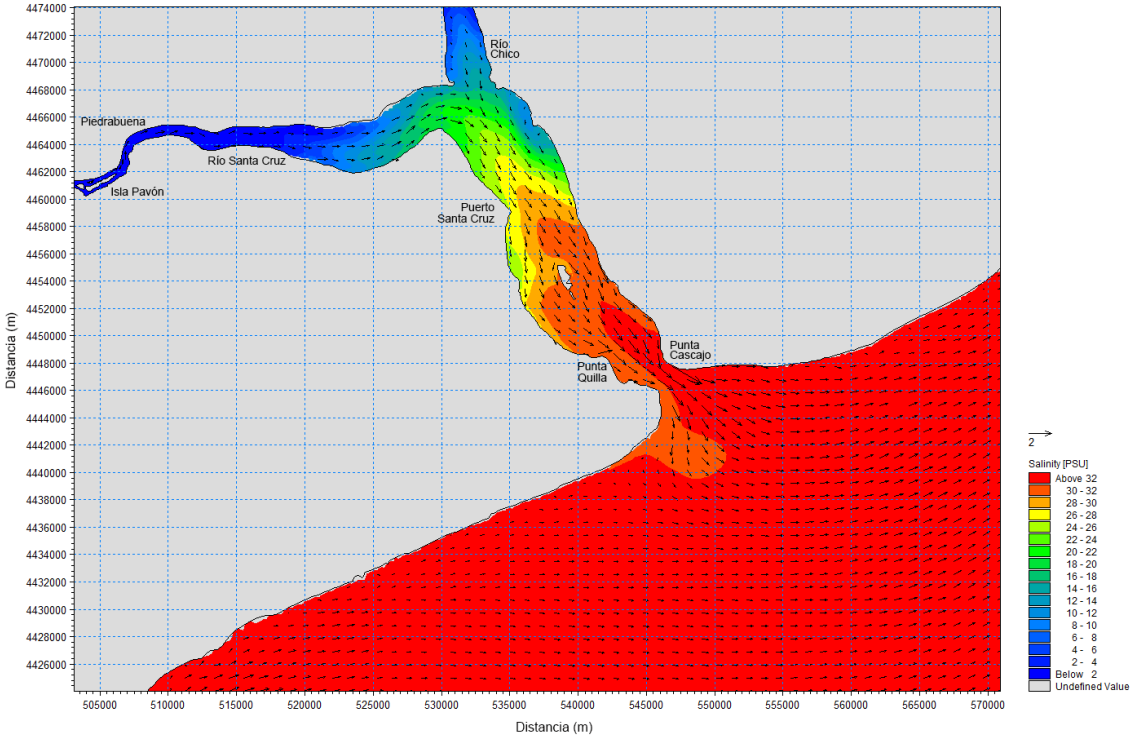


Figura 10.4.3 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 3 de marea

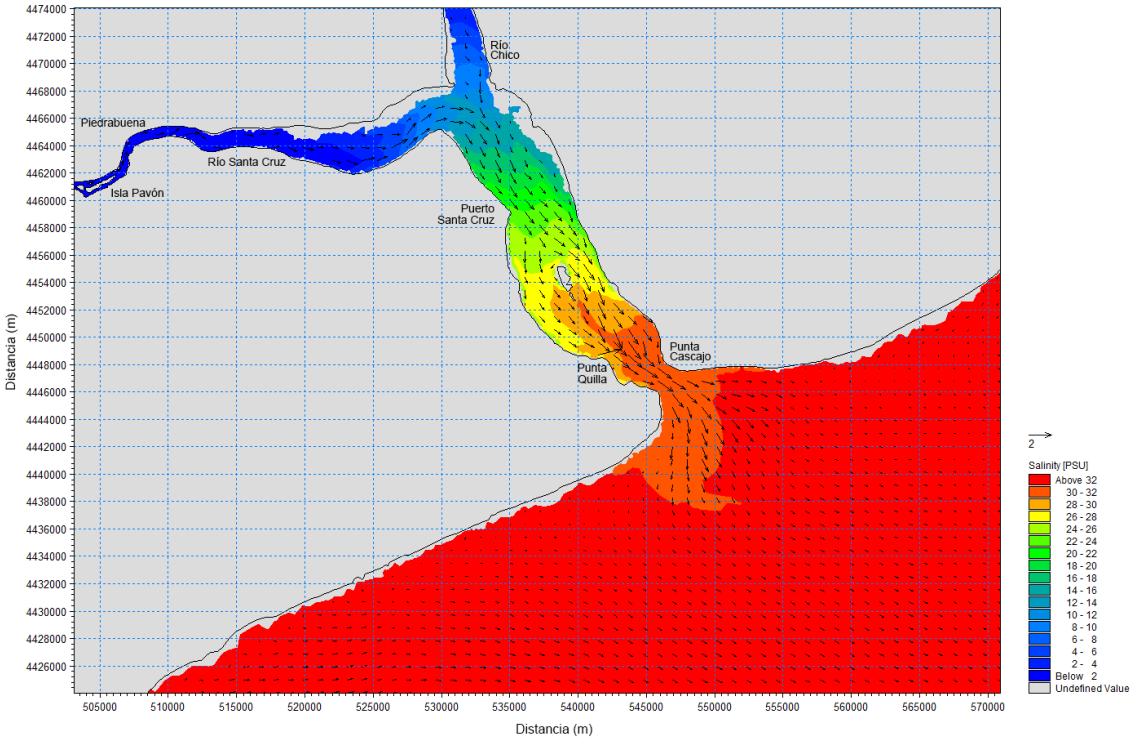


Figura 10.4.4 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 4 de marea

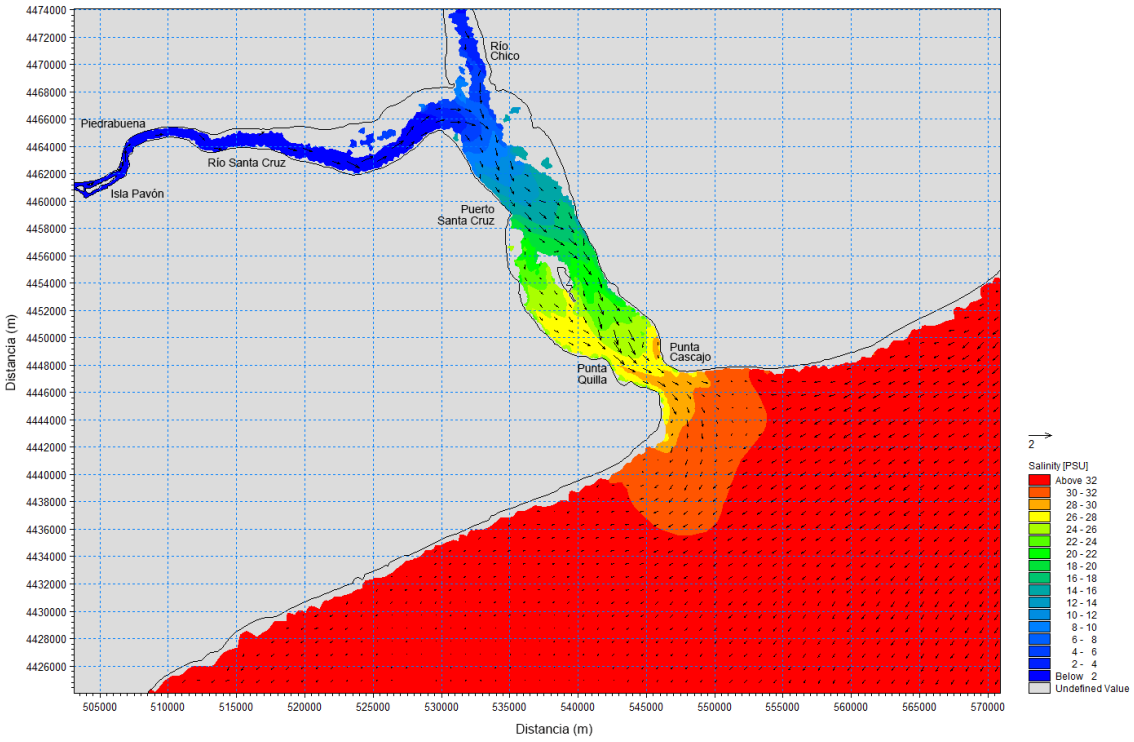


Figura 10.3.5 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 5 de marea

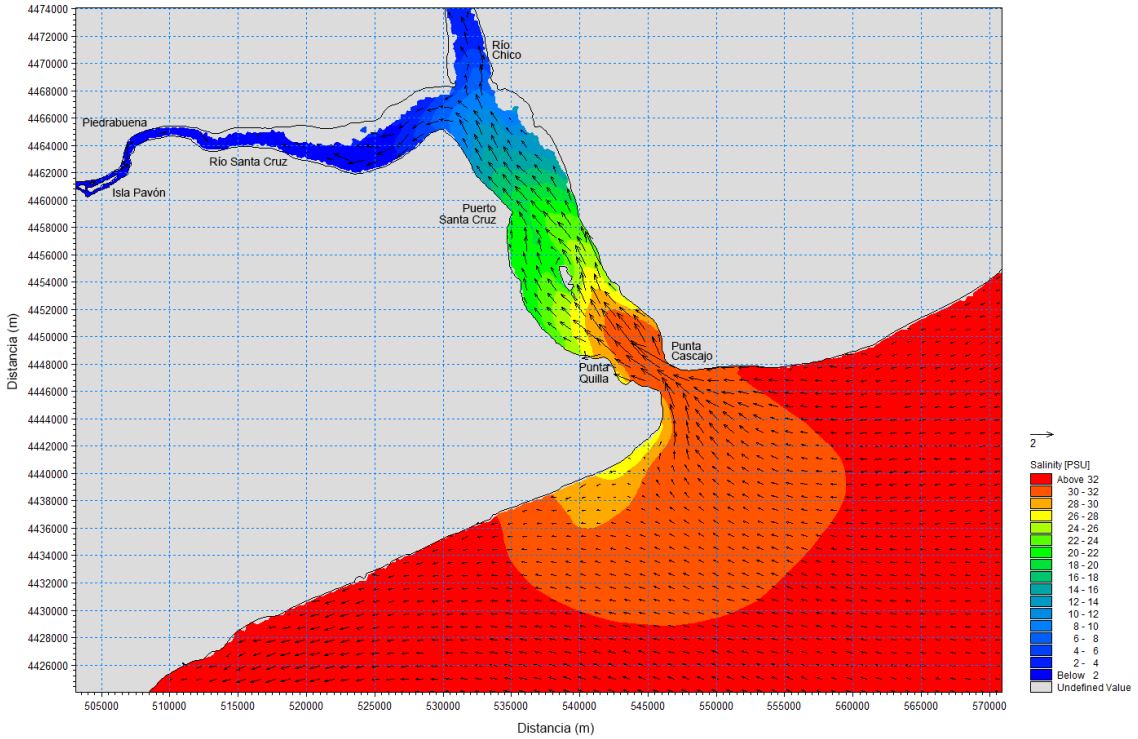


Figura 10.3.6 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 6 de marea

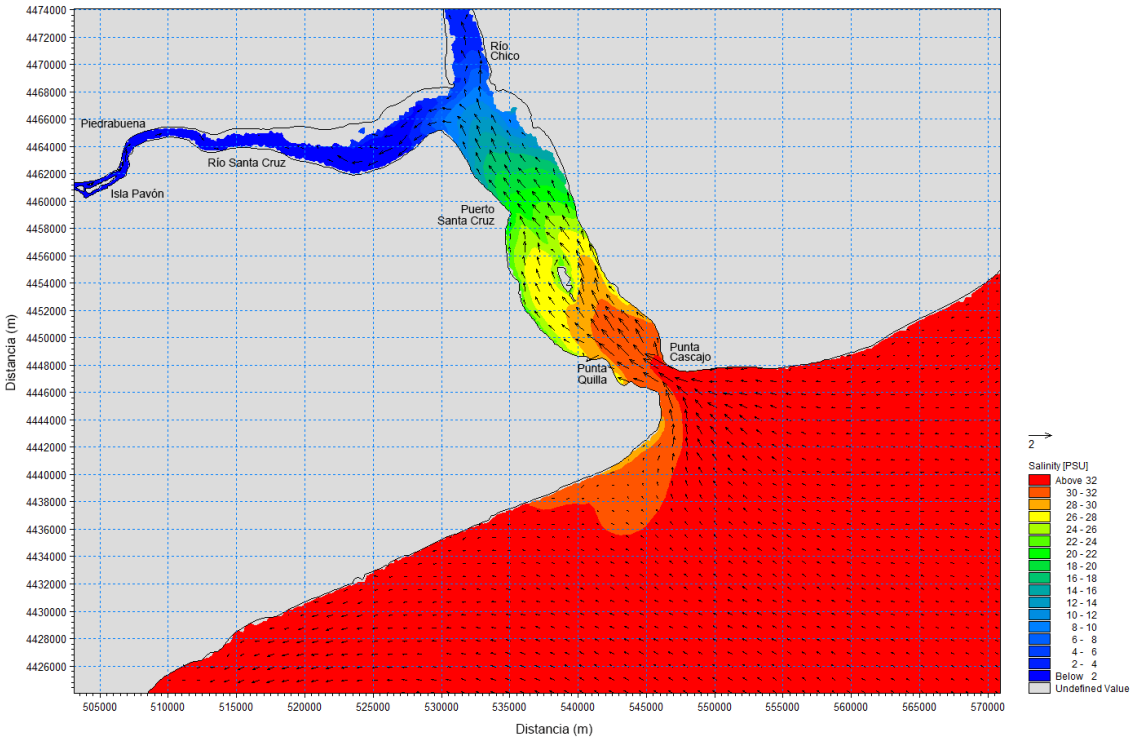
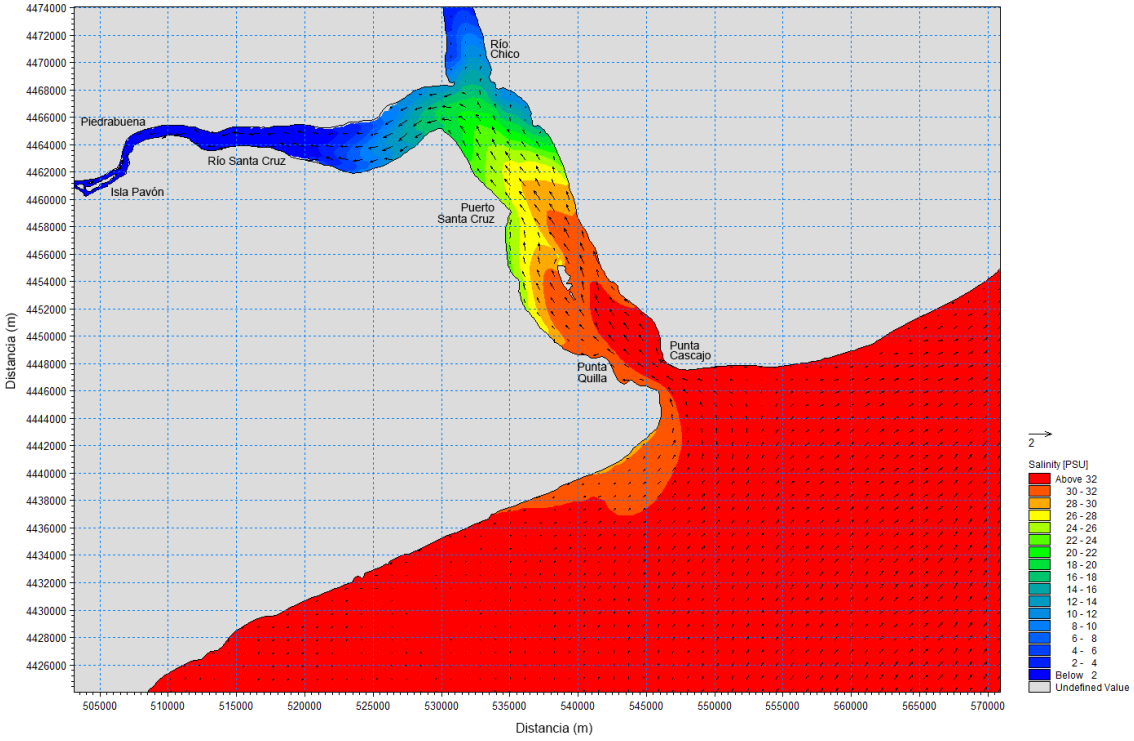


Figura 10.3.7 Campo de salinidad y corrientes para la Condición 7 de marea



10.5. Salinidad y corrientes para la Condición 6

Para ilustrar la distribución de la salinidad en la vertical, se presentan las Figuras 10.5.1 a 10.5.5, para la Condición 6 (Figura 10.2.1), que incluyen los campos de velocidades en las 5 capas de cálculo que utiliza el modelo además de la salinidad. La capa 1 es la cercana al fondo y la 5 es a la superficie, como son consideradas por el MIKE 3 Flow Model FM (HD).

Los campos de salinidad en todas las capas muestran una variación importante con aguas de salinidad nula proveniente de los ríos Santa Cruz y Chico, hasta salinidades superiores a 32 UPS mar adentro. Inversamente a las temperaturas, puede verse que la salinidad en el estuario aumenta a medida que las capas son más profundas, encontrándose los máximos cercanos al fondo (ver Figura 10.5.5). Puede verse que la pluma de agua de relativamente baja salinidad que genera la desembocadura del estuario en el mar es de menor tamaño en la capa 1 (fondo) que en la capa 5 (superficie).

Figura 10.5.1 Campo de salinidad y corrientes para la Capa 1 (cerca del fondo) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

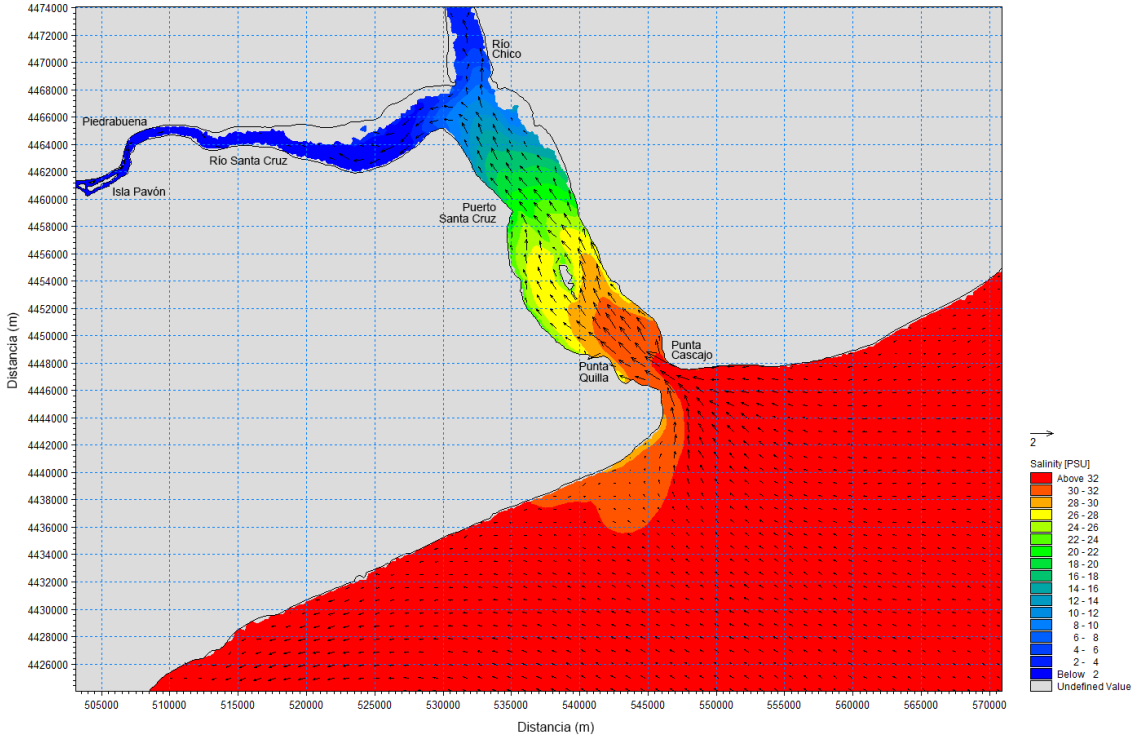


Figura 6.5.2 Campo de salinidad y corrientes para la Capa 2 (entre la capa de fondo y la capa a media agua) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

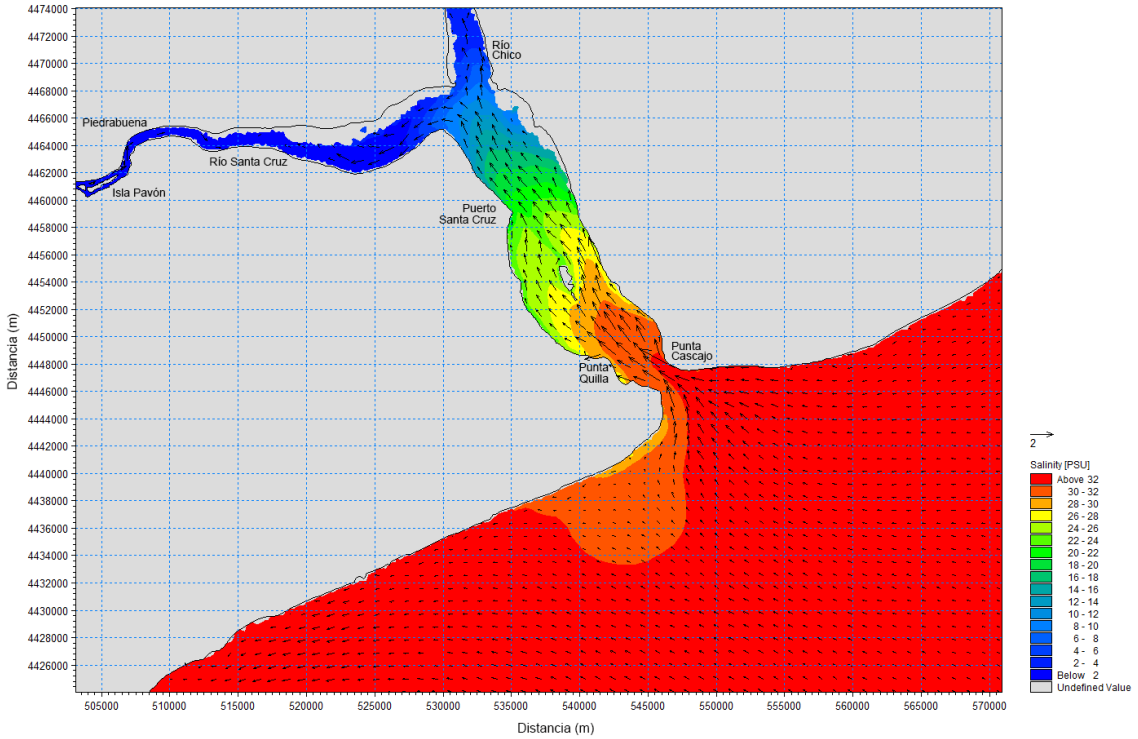


Figura 10.5.3 Campo de salinidad y corrientes para la Capa 3 (a media agua) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

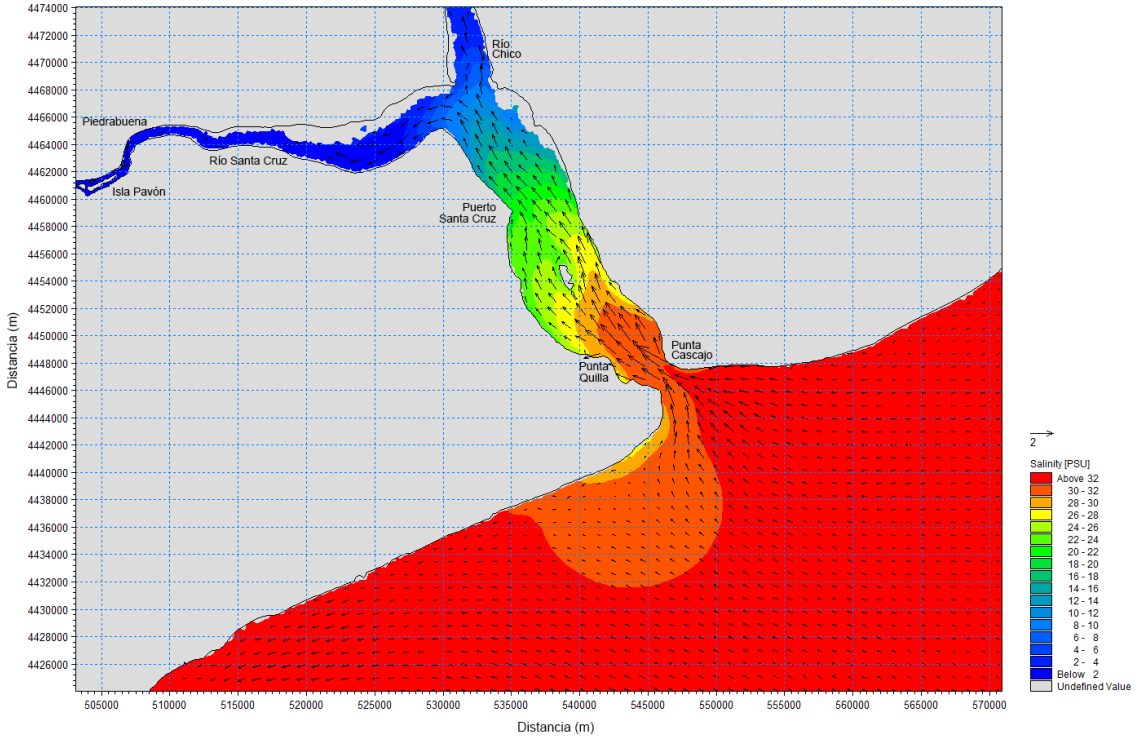


Figura 10.5.4 Campo de salinidad y corrientes para la Capa 4 (entre la capa media agua y la capa cercana a la superficie del mar) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)

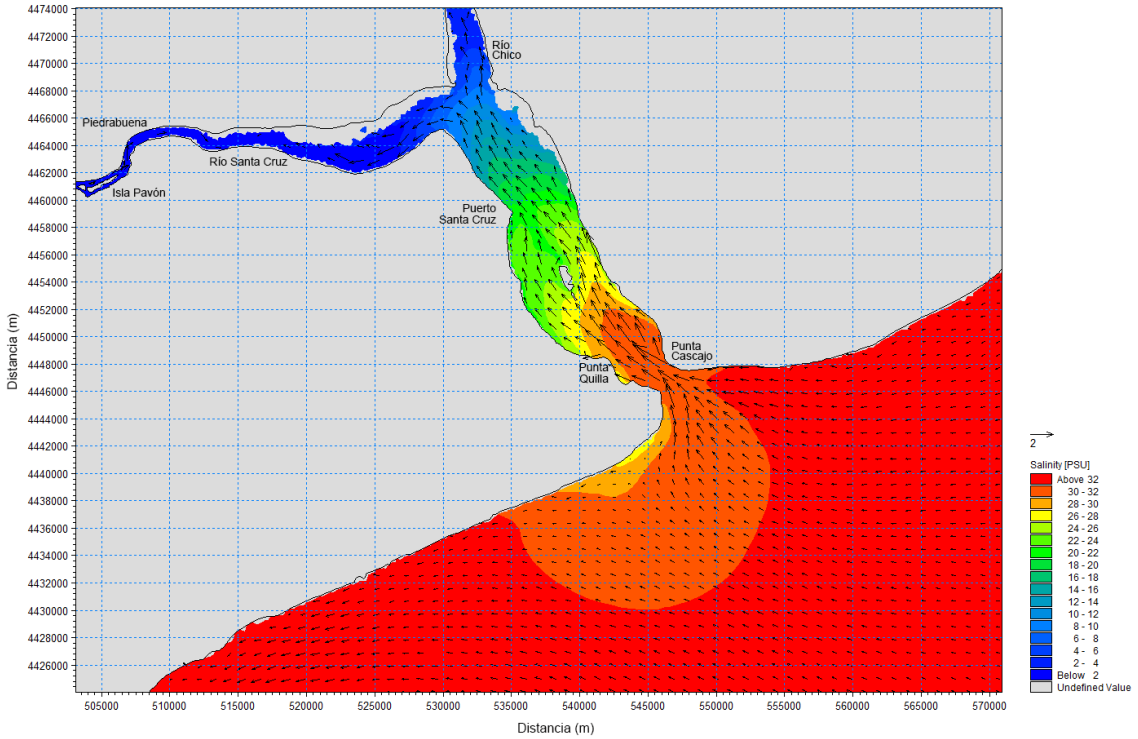
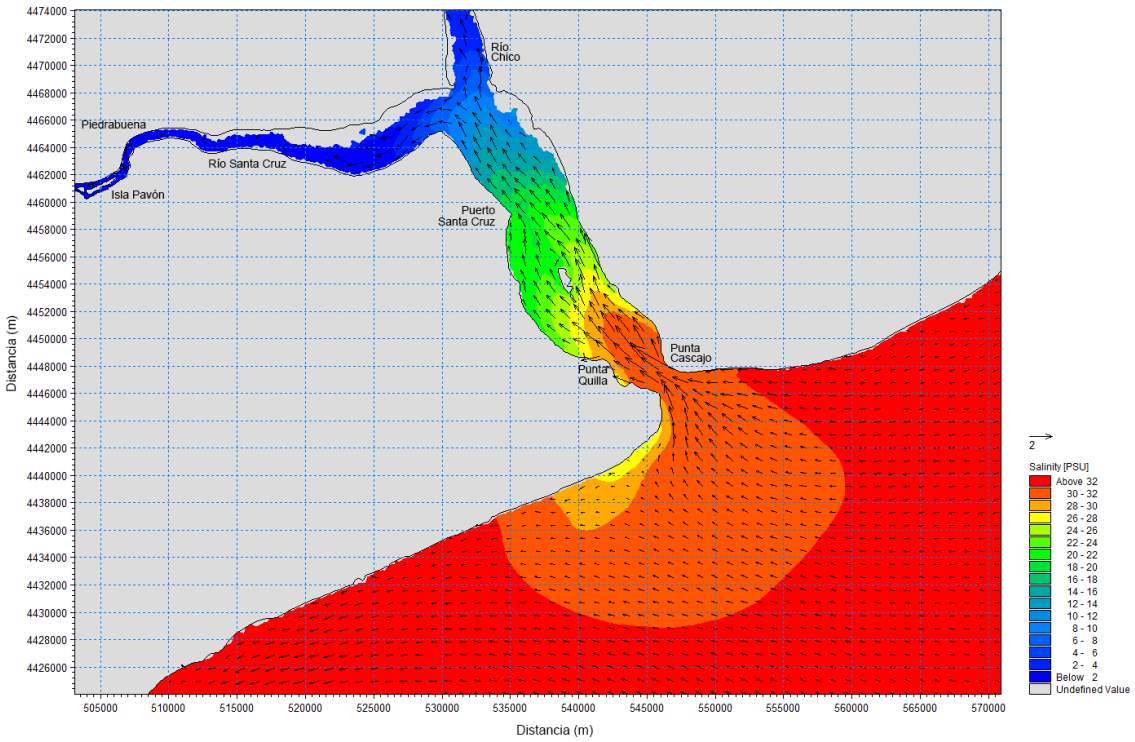


Figura 10.5.5 Campo de salinidad y corrientes para la Capa 5 (capa cercana a la superficie del mar) para la Condición 6 de marea (cerca de la pleamar, creciente)



10.6. Corte longitudinal de salinidad

Como ya fue presentado, los diferentes estados de la marea radican en variaciones importantes de la salinidad en el espacio y tiempo. Para ilustrar acerca de la estructura vertical de la salinidad se presentan las Figuras 10.6.2 a 10.6.8 que muestran la salinidad para 7 condiciones de marea (ver Figura 10.2.1) a lo largo de una curva de posición arbitraria longitudinal del estuario (Figura 10.6.1). Esta curva está conformada por 18 puntos notados IP (17 segmentos) inicia en el río de salinidad nula y llega hasta mar adentro donde la salinidad es la marina (mayor a 32 UPS). En la zona intermedia está el estuario donde la salinidad presenta cambios en la horizontal y la vertical.

Para tomar una referencia, puede seleccionarse un rango de salinidades de 26 a 28 UPS (color amarillo) donde para las 3 AM (Condición 1) se encuentra en el punto IP11 (25 km del eje x) y para las 9 AM (condición 5) en el IP 16 (45 km del eje x). El agua con esta salinidad se ha desplazado unos 20 km en unas 6 horas, el estuario tiene unos 27 km de longitud (entre la boca y la zona del viejo frigorífico).

Respecto la variación vertical de la salinidad puede verse que en la mayoría de los casos ésta aumenta con la profundidad (cuña salina) pero esta condición no se sostiene en el tiempo y se desarma con cada ciclo de marea. Las figuras también ilustran sobre las variaciones de los niveles del mar sobre el eje y las pendientes de la superficie del mar.

Figura 10.6.1 Campo de salinidad (en colores) y eje de los cortes verticales (línea negra con puntos) que identifica la posición de las distribuciones salinidad para distintas condiciones de marea que se presentan en las figuras que siguen.

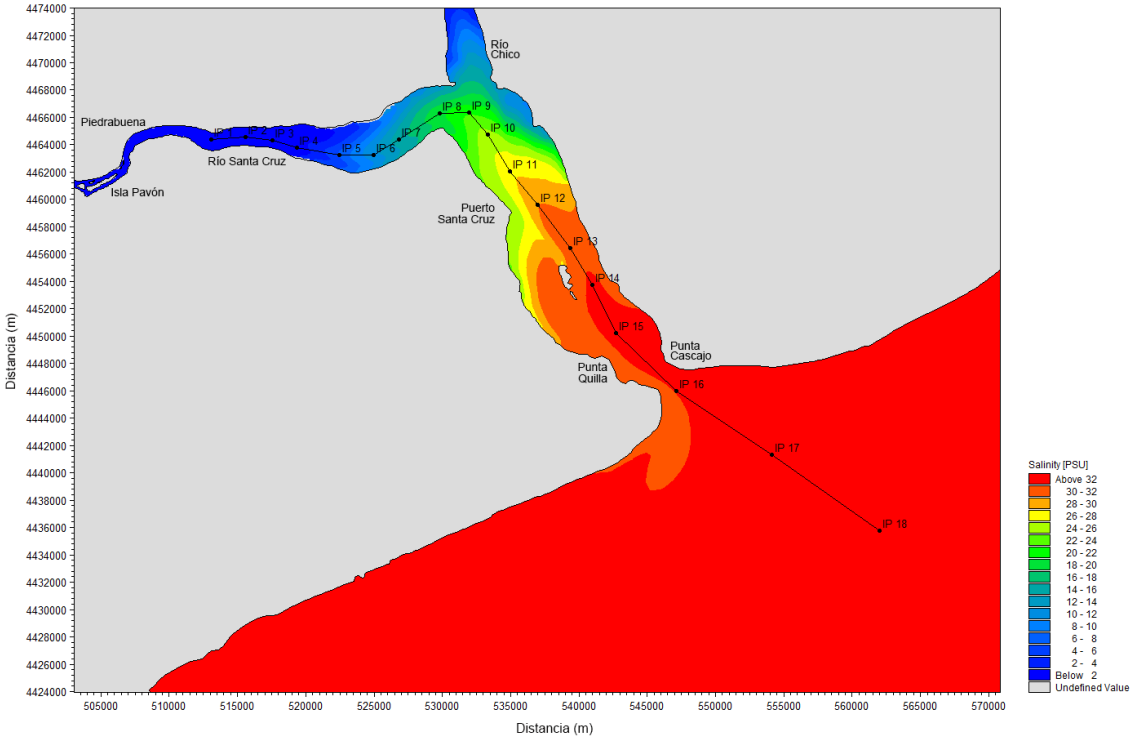


Figura 10.6.2 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 1 de la Figura 10.2.1: pleamar.

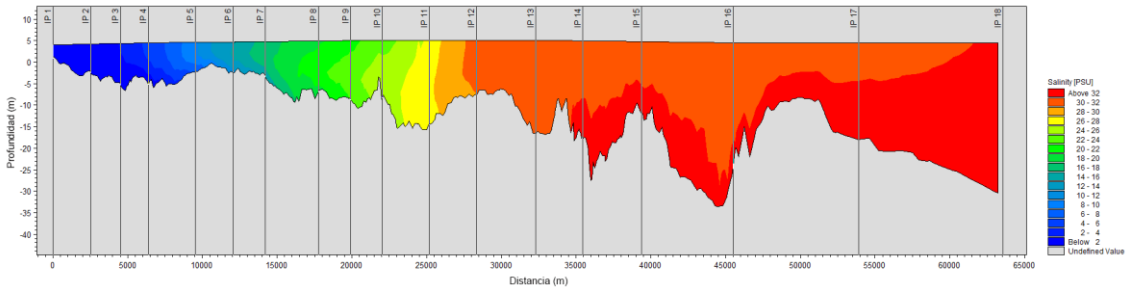


Figura 10.6.3 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 2 de la Figura 10.2.1: marea bajante.

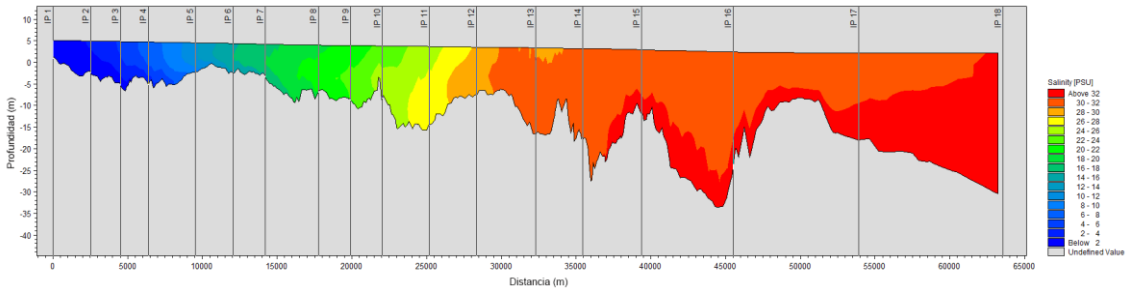


Figura 10.6.4 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 3 de la Figura 10.2.1: marea bajante.

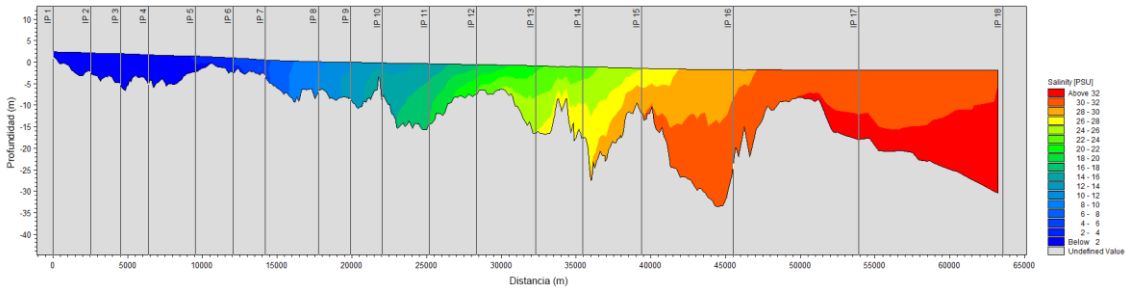


Figura 10.6.5 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 4 de la Figura 10.2.1: bajamar.

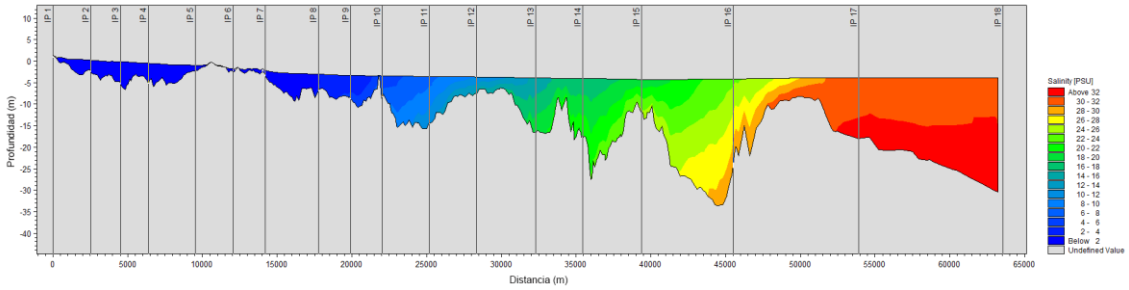


Figura 10.6.6 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 5 de la Figura 10.2.1: marea creciente.

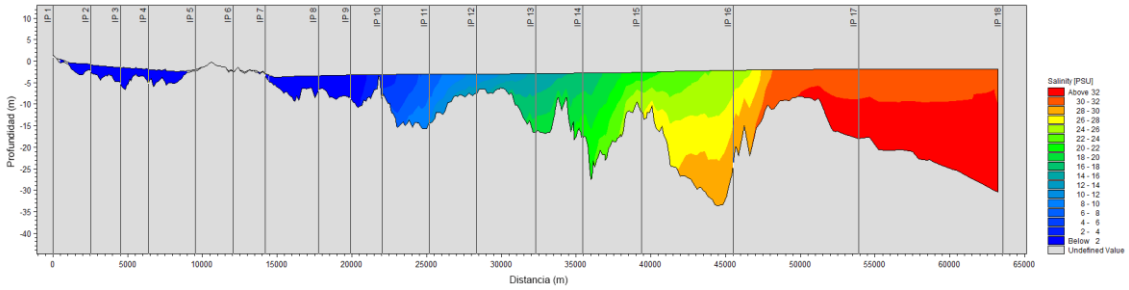


Figura 10.6.7 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 6 de la Figura 10.2.1: marea creciente.

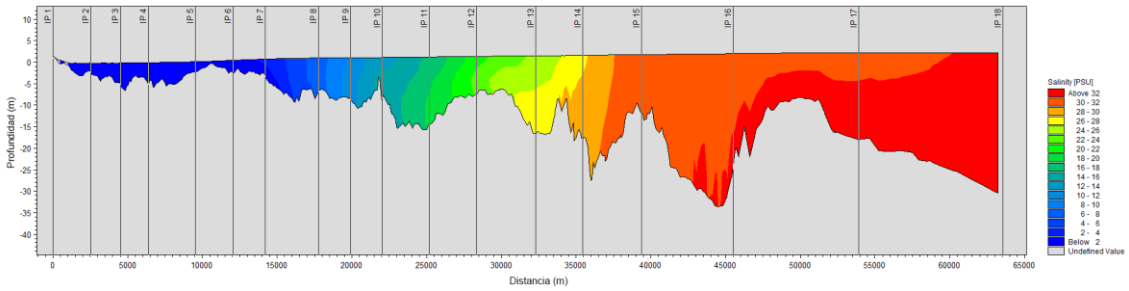
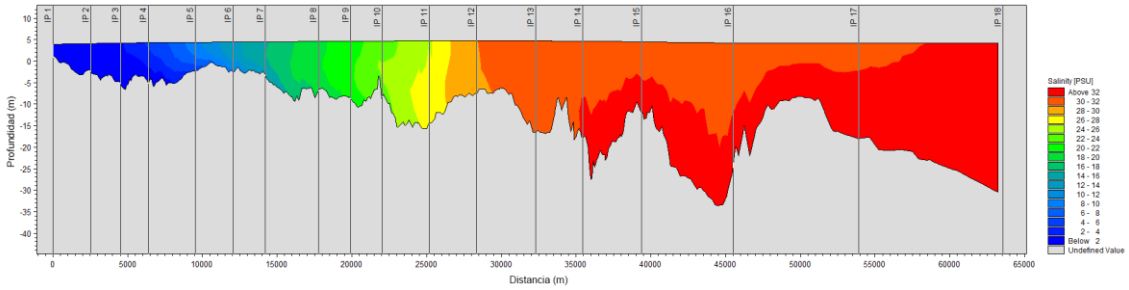


Figura 10.6.8 Corte vertical del campo de salinidad para la Condición 7 de la Figura 10.2.1: pleamar.



10.7. Resultados para diferentes caudales estadísticos del mes de junio

El objetivo de este análisis, y el de los que siguen, es estudiar el comportamiento de las variables oceanográficas bajo las condiciones de llenado de las represas, que representa una disminución de caudal del RSC y un déficit del volumen de agua dulce que llega al estuario. El período establecido por la ingeniería y las autoridades ambientales para el llenado de las represas es, en principio, del 15 de noviembre al 1 de junio, por supuesto para el año en que las represas estén listas para ello. Si bien el mes de junio no está estrictamente en el periodo de llenado, es época de la plena invernada del Maca Tobiano y, que como ya se explicó en este trabajo, esta es una especie que posee particular atención ambiental por su fragilidad ecológica, como indica (Roesler, C. I., 2016). Por tal motivo, y de manera ambientalmente precautoria, se seleccionó a junio para hacer pruebas de la respuesta de las variables del estuario con el modelo ya calibrado. Mas adelante, en este trabajo, se presentarán otras simulaciones para diferentes condiciones de caudales de llenado de las represas. Estos ensayos para junio se hicieron considerando caudales fijos del río Santa Cruz, que resultan de un análisis estadísticos de la serie de tiempo de caudales. Se determinaron los 3 escenarios de interés ambiental que se presentan en la Tabla 10.7.1. presenta los caudales seleccionados para el análisis.

Tabla 10.7.1 Caudales del río para el mes de junio asociados a los escenarios de interés ambiental

Caudal medio histórico para junio (años 1955 – 2016)	691 m^3/s
Caudal Máximo observado para junio (año 1966)	1002 m^3/s
Caudal Mínimo observado para junio (año 1956)	232 m^3/s

En este ensayo, a diferencia de los que siguen, se utilizan algunas condiciones de contornos constantes en el tiempo para simplificar el análisis. Las simulaciones (para el mes de junio) tienen las siguientes características:

- Marea y viento variables ambos de modelos globales.
- Se ha seleccionado una temperatura constante en los dos ríos Santa Cruz y Chico de 4ºC.
- Temperatura del mar constante en los bordes del dominio de simulación de 7.5 °C en base a los datos de WOD18 (ver Figura 8.3.4).
- Temperatura ambiente de datos de la estación meteorológica de Puerto Santa Cruz, el promedio histórico de junio es de 1.7 ºC.
- Salinidad de los ríos Santa Cruz y Chico nula en los bordes del dominio de modelación.
- Salinidad del mar constante de 32.5 UPS en los bordes del dominio de simulación basada en los datos de WOD18 (Figura 8.3.5).

Los resultados de la modelación en términos de la altura de la columna de agua, salinidad, temperatura y velocidad de la corriente, para los 10 puntos de referencia de la Figura 10.7.1 (P1 a P10), para los 3 caudales seleccionados, cerca del fondo, se presentan en la Tablas 10.7.2 a 10.7.5.

Figura 10.7.1 Ubicación de las estaciones de medición. Los puntos P1 a P10 coinciden con la ESTAC 01 a ESTAC 10.

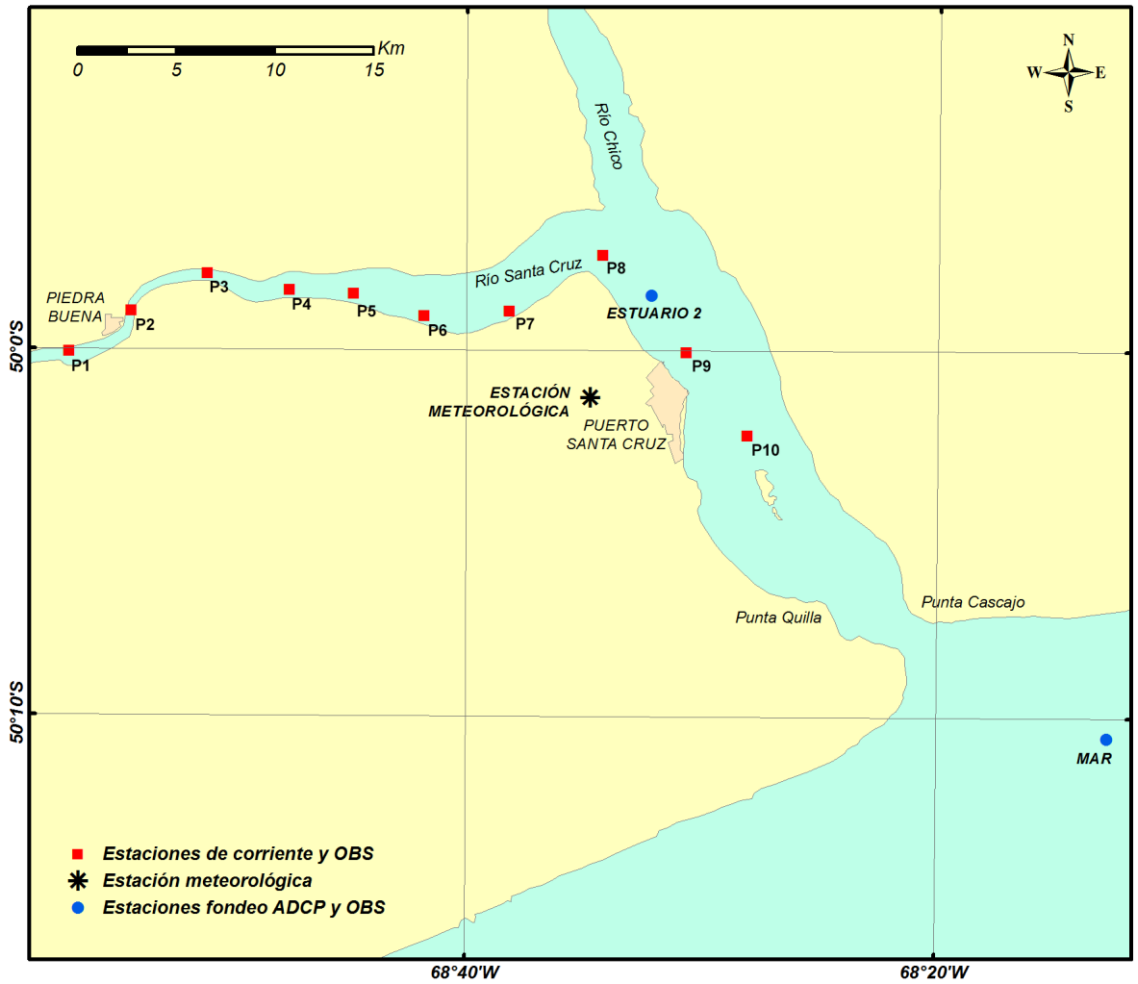


Tabla 10.7.2 Altura de la columna de agua (m) medida desde el fondo (H), en cada punto, expresada en términos de sus valores medios (H_{med}), mínimos (H_{min}) y máximos (H_{max}). Mes representado: junio

Puntos	Q_{min} = 232 m³/s			Q_{med} = 691 m³/s			Q_{max} = 1002 m³/s		
	H_{med}	H_{min}	H_{max}	**H_{med}**	H_{min}	H_{max}	**H_{med}**	H_{min}	H_{max}
P1	**1.8**	1.6	4.8	**2.5**	2.4	5.0	**2.9**	2.8	5.0
P2	**1.9**	1.2	6.5	**2.7**	2.1	6.7	**3.1**	2.7	6.6
P3	**1.9**	0.5	7.0	**2.2**	1.0	7.3	**2.4**	1.2	7.3
P4	**4.1**	1.7	9.8	**4.5**	2.3	9.9	**4.6**	2.6	10.0
P5	**4.7**	1.2	10.6	**5.0**	1.8	10.7	**5.1**	2.2	10.8
P6	**6.8**	2.6	12.8	**6.9**	3.0	12.9	**7.0**	3.3	13.0
P7	**8.5**	3.7	14.8	**8.6**	3.9	14.8	**8.7**	4.1	14.9
P8	**8.4**	2.5	14.9	**8.5**	2.5	14.9	**8.5**	2.6	15.0
P9	**12.0**	5.9	18.5	**12.0**	6.0	18.6	**12.1**	6.0	18.6
P10	**11.1**	5.0	17.6	**11.1**	5.1	17.6	**11.1**	5.1	17.6

- Cerca del extremo oeste del dominio de modelación, en Piedra Buena, el nivel medio del río aumenta con el caudal del RSC (mayor caudal implica mayor nivel del agua). Allí la diferencia entre los niveles del río alcanza un valor de 1.1 m entre los resultados de las simulaciones con caudal mínimo y máximo.

- Prácticamente, a partir del punto P8 el nivel de las aguas, en este punto el resto del estuario es controlado por las mareas sin influencia del caudal que se trate.

Tabla 10.7.3 Salinidad (S), en cada punto, expresada en términos de sus valores medios (S_{med}), mínimos (S_{min}) y máximos (S_{max}). Mes representado: junio

Puntos	Q_{min} = 232 m^3/s			Q_{med} = 691 m^3/s			Q_{max} = 1002 m^3/s		
	S_{med}	S_{min}	S_{max}	**S_{med}**	S_{min}	S_{max}	**S_{med}**	S_{min}	S_{max}
P1	**0.0**	0.0	0.0	**0.0**	0.0	0.0	**0.0**	0.0	0.0
P2	**0.0**	0.0	0.0	**0.0**	0.0	0.0	**0.0**	0.0	0.0
P3	**0.0**	0.0	1.4	**0.0**	0.0	0.0	**0.0**	0.0	0.0
P4	**0.7**	0.0	9.5	**0.0**	0.0	0.4	**0.0**	0.0	0.1
P5	**2.3**	0.0	14.3	**0.1**	0.0	2.5	**0.0**	0.0	0.6
P6	**5.5**	0.0	19.1	**0.7**	0.0	7.3	**0.2**	0.0	3.3
P7	**9.8**	0.1	22.9	**2.5**	0.0	13.1	**1.0**	0.0	8.9
P8	**16.3**	2.1	26.7	**6.3**	0.0	19.9	**3.7**	0.0	16.7
P9	**22.7**	13.0	30.2	**13.6**	1.6	27.3	**10.1**	0.4	25.7
P10	**26.2**	18.4	31.4	**19.3**	6.0	30.0	**16.1**	2.6	29.6

- Bajo las condiciones de modelación, no se observa salinidad en los puntos P1 a P3 y en el punto P4 el modelo ha calculado 0.7 UPS de salinidad para el caudal mínimo, para el mes de junio.

- Dentro de la ría, se observan cambios importantes de la salinidad para los distintos caudales del río. En el punto P10, los valores medios de la salinidad varían entre 26.2 y 16.1 UPS para los caudales mínimo y máximo, respectivamente.

Tabla 10.7.4 Temperatura (ºC) en cada punto (T), expresada en términos de sus valores medios (T_{med}), mínimos (T_{min}) y máximos (T_{max}). Mes representado: junio.

Puntos	Q_{min} = 232 m³/s			Q_{med} = 691 m³/s			Q_{max} = 1002 m³/s		
	T_{med}	T_{min}	T_{max}	**T_{med}**	T_{min}	T_{max}	**T_{med}**	T_{min}	T_{max}
P1	**3.9**	3.8	4.0	**4.0**	4.0	4.0	**4.0**	4.0	4.0
P2	**3.5**	3.1	4.0	**3.9**	3.7	4.0	**4.0**	3.9	4.0
P3	**3.3**	2.7	3.9	**3.7**	3.4	4.0	**3.7**	3.4	4.0
P4	**3.1**	2.2	3.8	**3.8**	3.3	4.0	**3.8**	3.5	4.0
P5	**2.9**	2.2	3.7	**3.7**	2.9	4.0	**3.8**	3.2	4.0
P6	**2.7**	2.1	3.7	**3.5**	2.7	4.0	**3.7**	2.9	4.0
P7	**2.6**	2.0	3.5	**3.3**	2.6	3.9	**3.5**	2.7	4.0
P8	**2.7**	2.1	4.2	**3.2**	2.6	4.1	**3.3**	2.7	4.0
P9	**3.4**	2.1	5.5	**3.4**	2.5	5.3	**3.5**	2.7	5.2
P10	**4.3**	2.6	6.4	**4.1**	2.7	6.5	**4.0**	2.8	6.4

- La temperatura cerca del punto P1 depende de la condición de contorno impuesta al modelo en el borde RSC: 4°C, constante para el mes de junio. La temperatura en el mar se ha considerado constante e igual a 7.5°C, mientras que la temperatura ambiente se la ha considerado igual a 1.7°C.

- Los resultados de la Tabla 10.7.4 deben entenderse de la siguiente manera: a partir del punto P1 la temperatura baja debido a la transferencia de frío desde el aire, que se encuentra unos 2.3°C por debajo de la temperatura del río.

  A partir del punto P8 se ve la influencia de la temperatura más cálida del mar. El fenómeno se repite para todos los caudales. Para obtener resultados más realistas desde el punto de vista de la variación en el tiempo de la temperatura, debería contarse con datos variables en el tiempo el borde del modelo. Datos que sería interesante considerar para las simulaciones finales en la etapa de construcción y operación de las represas. Las variaciones de temperaturas máximas observadas para las simulaciones con máximo y mínimo caudal son de 1°C.

Tabla 10.7.5 Velocidad (m/s) en cada punto, expresada en términos de sus valores medios (V_{med}), mínimos (V_{min}) y máximos (V_{mox}). Mes representado: junio

Puntos	Q_{min} = 232 m³/s			Q_{med} = 691 m³/s			Q_{max} = 1002 m³/s		
	V_{med}	V_{min}	V_{max}	**V_{med}**	V_{min}	V_{max}	**V_{med}**	V_{min}	V_{max}
P1	**0.47**	0.02	0.57	**0.74**	0.03	0.79	**0.87**	0.10	0.91
P2	**0.81**	0.00	1.52	**1.16**	0.01	1.39	**1.30**	0.02	1.51
P3	**0.73**	0.00	1.18	**0.96**	0.00	1.47	**1.00**	0.01	1.71
P4	**0.51**	0.01	1.39	**0.57**	0.03	1.19	**0.61**	0.01	1.10
P5	**0.71**	0.02	1.42	**0.73**	0.03	1.29	**0.75**	0.01	1.21
P6	**0.60**	0.01	1.18	**0.61**	0.00	1.13	**0.61**	0.00	1.10
P7	**0.74**	0.01	1.28	**0.75**	0.01	1.24	**0.75**	0.00	1.22
P8	**0.83**	0.03	1.40	**0.82**	0.05	1.44	**0.82**	0.02	1.47
P9	**0.80**	0.01	1.43	**0.80**	0.01	1.43	**0.80**	0.02	1.42
P10	**0.76**	0.02	1.52	**0.75**	0.02	1.52	**0.75**	0.02	1.52

- El módulo de las velocidades de las corrientes cerca del fondo varía, con alguna significación, con el caudal hasta el punto P5: a mayor caudal mayor velocidad. Desde allí hacia el mar, el módulo de la corriente se hace independiente del caudal y es dominado por las mareas.

Las Figuras 10.7.1 a 10.7.3 muestran cortes, del tramo final del río Santa Cruz y su estuario, con la distribución de la salinidad, para los 3 caudales considerados y 4 estados de la marea: pleamar, bajante, bajamar y creciente. La traza del corte, si bien arbitraria, es eficaz para ver los cambios de salinidad calculada por el modelo. Las marcas referencias de posición a lo largo de la traza del corte, presentes en las figuras siguientes, pueden verse en la Figura 10.6.1.

Como es de esperarse, a mayor caudal, menor presencia salina en el RÍO SANTA CRUZ y su estuario. A modo de ejemplo, valores de salinidad entre 26 y 28 UPS (amarillo en las figuras) se encuentran entre las marcas 7 y 8, y 10 para el caso del mínimo caudal y entre las marcas 11 y 12, y 13 para el máximo caudal. Salinidades menores a 2 UPS se observan para los caudales medio y máximo.

Figura 10.7.1 Cortes transversales de salinidad para el caudal Q_{min} = 232 m^3/s (arriba), Q_{med} = 691 m^3/s (medio) y Q_{max} = 1002 m^3/s (abajo) para la condición de pleamar.

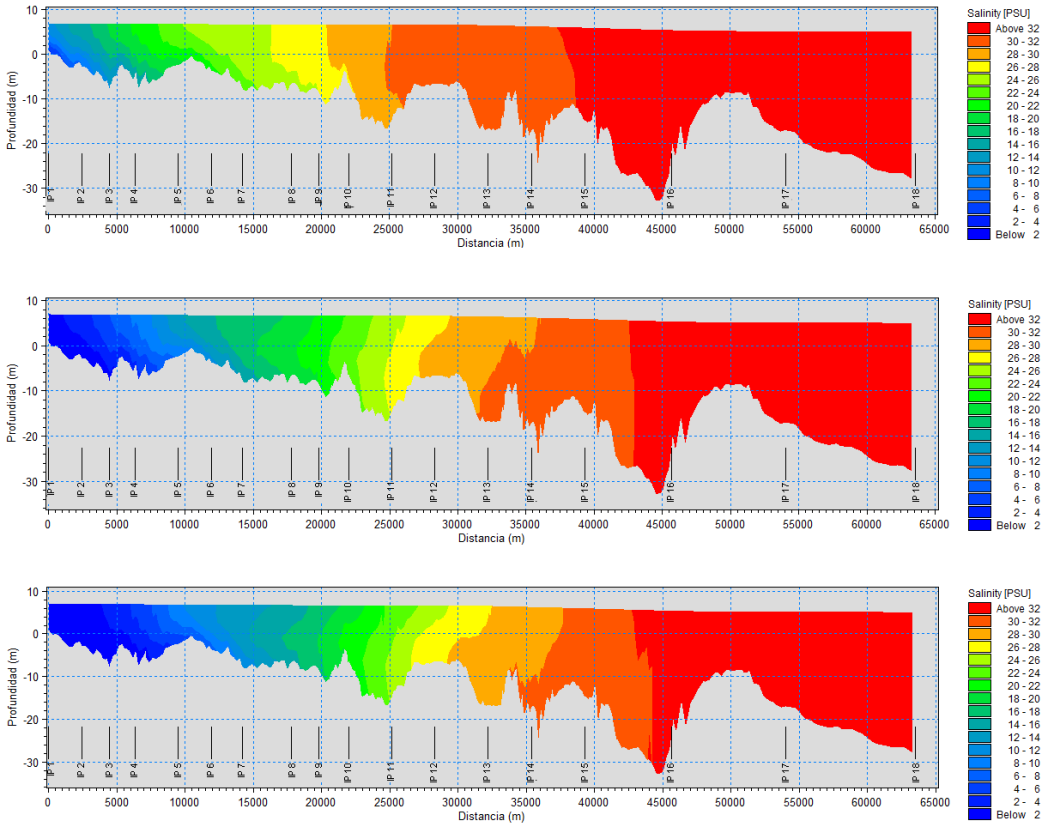


Figura 10.7.2 Cortes transversales de salinidad para el caudal Q_{min} = 232 m^3/s (arriba), Q_{med} = 691 m^3/s (medio) y Q_{max} = 1002 m^3/s (abajo) para la condición de bajante.

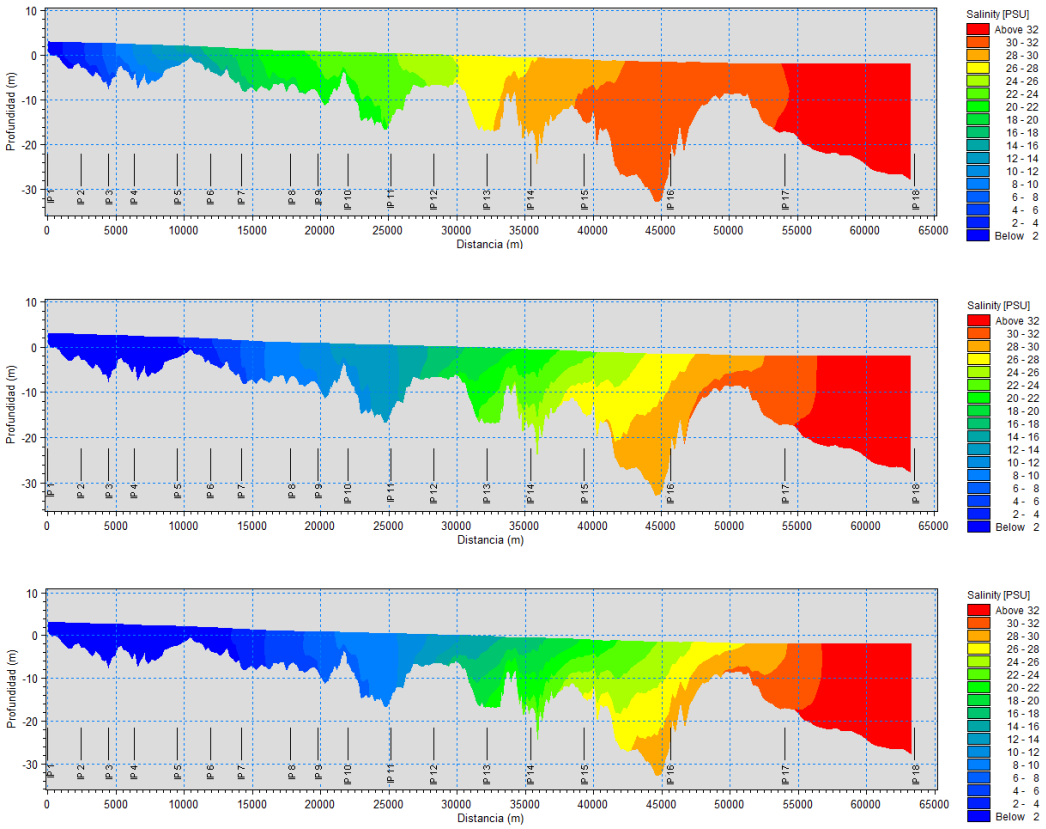


Figura 10.7.3 Cortes transversales de salinidad para el caudal Q_{min} = 232 m^3/s (arriba), Q_{med} = 691 m^3/s (medio) y Q_{max} = 1002 m^3/s (abajo) para la condición de bajamar.

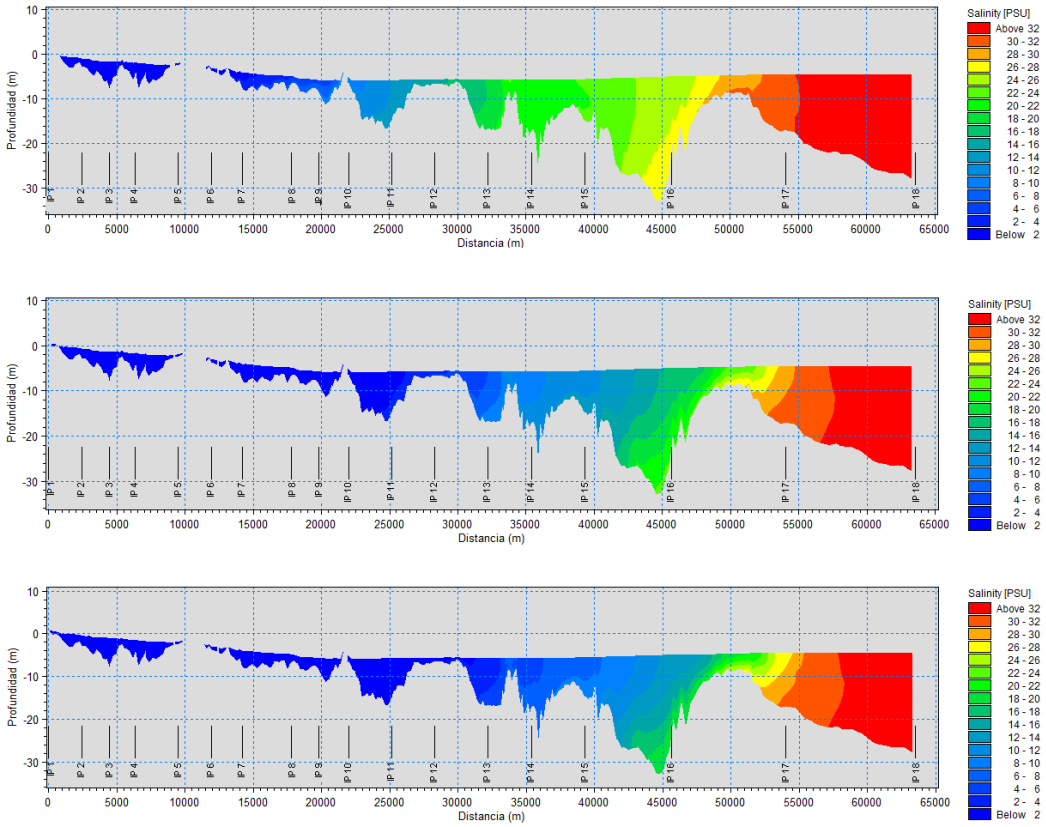
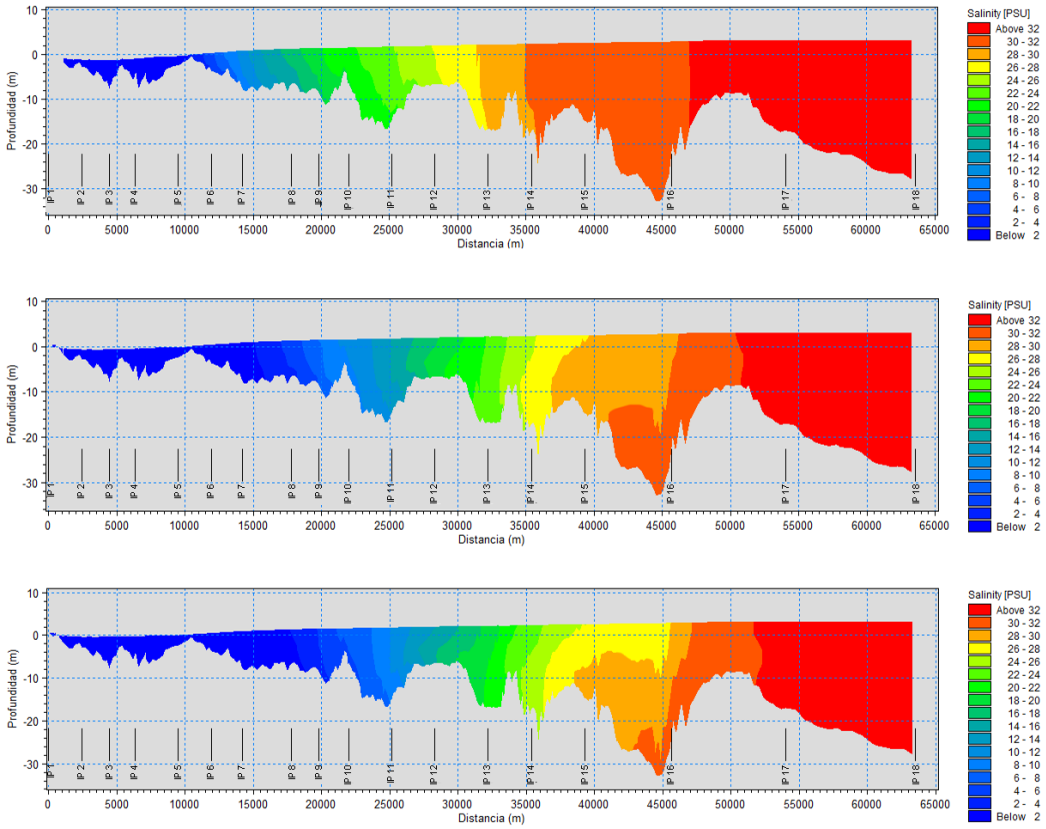


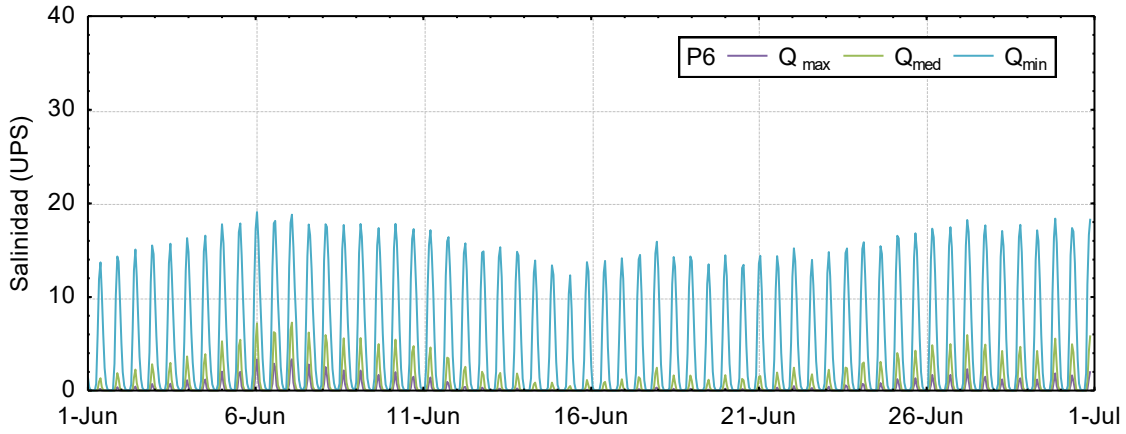
Figura 10.7.4 Cortes transversales de salinidad para el caudal Q_{min} = 232 m^3/s (arriba), Q_{med} = 691 m^3/s (medio) y Q_{max} = 1002 m^3/s (abajo) para la condición de creciente.



Como consecuencia de estas simulaciones, puede verse que hay variaciones muy importantes de la salinidad en un ciclo de marea. Por ejemplo, sólo considerando el caudal medio, salinidades entre 26 y 28 UPS (amarillo en la escala de colores), varían su posición entre las marcas de referencia 11 y 17 durante un ciclo de marea, una distancia de unos 30 km. Lo mismo puede decirse de las zonas con valores de la salinidad menor a 2 UPS, que varían entre la marca 3 hasta la marca 11, algo más de 20 km.

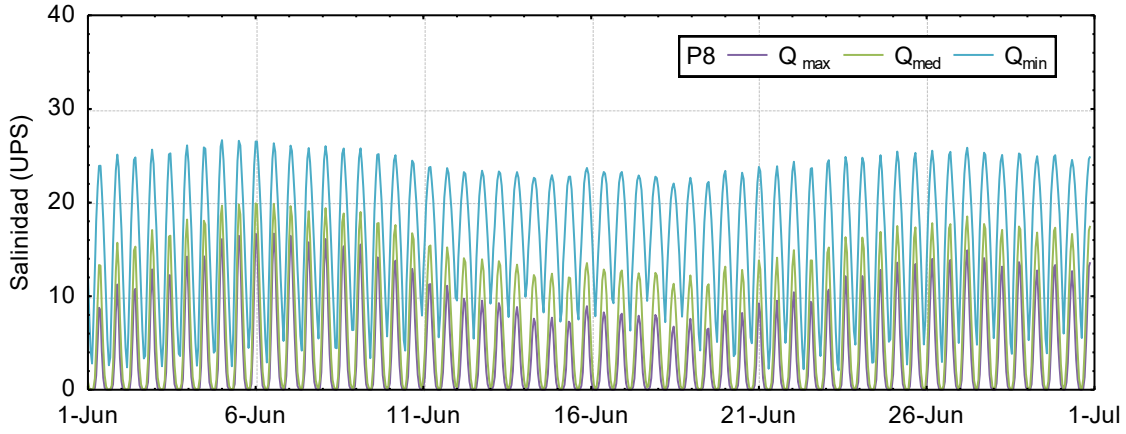
Las Figuras 10.7.5 a 10.7.7 muestran las series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados y para los puntos P6, P8 y P10 de la Figura 10.7.1.

Figura10.7.5 Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P6, a 1 m por sobre el fondo



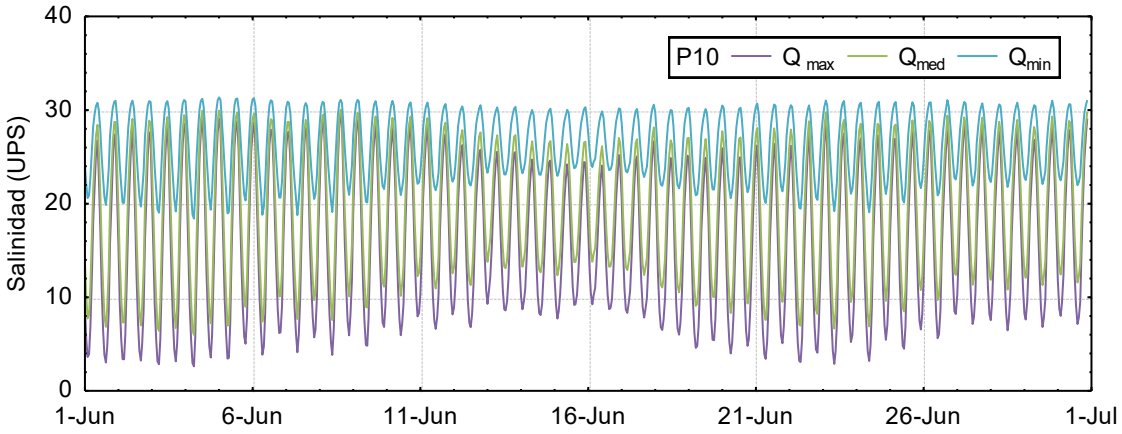
Puede verse que, en todos los casos, la salinidad en el punto P6 varía con la marea, tomando valores nulos con la bajante y es mayor cuando el caudal del río Santa Cruz es menor.

Figura 10.7.6 Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P8, a 1 m por sobre el fondo



En el caso del punto P8, la salinidad varía con la marea tomando valores nulos con la bajante (para los caudales máximos y medios) y es mayor cuando el caudal del río Santa Cruz es menor.

Figura 10.7.7 Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P10, a 1 m por sobre el fondo



Para el punto P10, la salinidad varía con la marea tomando valores mínimos (nunca nulos) con la bajante y mayor cuando el caudal del río Santa Cruz es menor.

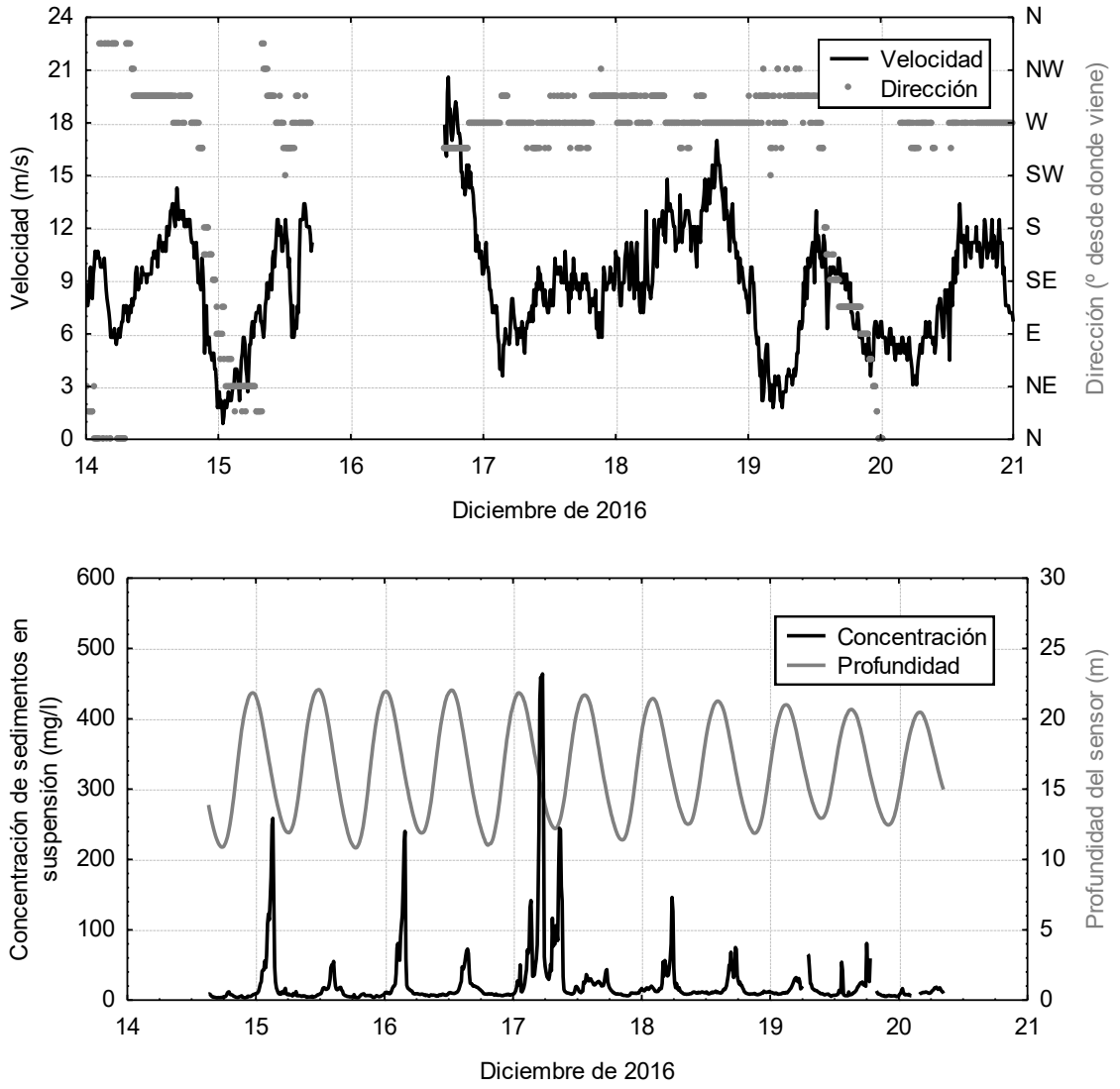
En todos los casos la salinidad es mayor cuando el caudal del río Santa Cruz es menor. Si se comparan las simulaciones que utilizan caudales medios y máximos resultan más parecidas entre sí que si se comparan los resultados de las que usan de caudales medios y mínimos. Esto se debe a que Q_{med} se obtiene multiplicando a Q_{min} por 3, mientras que para llegar a Q_{max} hay que multiplicar a Q_{med} por 1.45.

10.8. Evento con alta turbidez en diciembre de 2016

Durante las mediciones en el campo de diciembre de 2016 en la estación Mar, se observó un incremento de la turbidez coincidente con un evento de fuertes vientos, como indica la Figura 10.8.1. El aumento de la turbidez ocurre unas horas después de haber registrado velocidades del viento de unos 21 m/s, aunque se suponen velocidades algo mayores, ya que la estación meteorológica dejó de funcionar durante el evento. El punto de medición está fuera del estuario, pero el origen del pico de turbidez parece ser en el interior del estuario ya que este máximo ocurre durante la bajante, esto es cuando las aguas escurren hacia el mar.

En líneas generales, los picos de turbidez que se muestran en la figura ocurren en condiciones de bajante. En condiciones de creciente la turbidez es mínima, lo que indica que el origen de la turbidez, como se dijo, no es el mar.

Figura 10.8.1 Velocidad y dirección del viento (arriba) y nivel del mar y turbidez medida durante diciembre de 2017 en la Estación Mar.



Un análisis cualitativo indica que hay más de una posible razón para que ello haya ocurrido:

a) El viento ha incrementado a las ya fuertes corrientes de marea, de modo que han puesto en suspensión una cantidad extra de sedimentos del fondo de la ría que han generado el pico de turbidez.

b) El viento a volado una gran cantidad de sedimentos de la estepa haciendo que una parte de ellos haya precipitado a la ría aumentando la turbidez en la columna de agua.

c) Combinación de las dos anteriores.

El punto a) es considerado por el modelo, ya que el mismo incluye las fuerzas del viento y las mareas, del mismo modo que las descargas de los ríos, y calcula la eventual re-suspensión de sedimentos que agregara turbidez a la columna de agua.

El punto b) no ha sido evaluado hasta ahora y no es motivo de este trabajo hacer esa evaluación. Sin embargo, se han investigado dos trabajos científicos que se dirigen al transporte de sedimentos por viento en la Patagonia y permiten hacer una evaluación preliminar de la magnitud de ese transporte. Los trabajos y las magnitudes del transporte de sedimentos por viento se presentan, brevemente, a continuación:

- Mazzoni y Vázquez (2010) presentan mediciones de la pérdida de arena en un campo ubicado al sur de la provincia de Santa Cruz, que permiten estimar el transporte por viento (en kg/s/m, esto es la masa en kilogramos de sedimentos por segundo por un metro medido en dirección perpendicular a la dirección del viento). Indican que los vientos predominantes fueron del oeste-sudoeste con velocidad constante promedio de 96 km/h (unos 27 m/s) y una máxima absoluta de 122 km/h. Durante un período de observación de 9 días se produjo una pérdida de arena de 49770 m^3 en una zona de 41300 m^2 de superficie.

Significa que los sedimentos fueron retirados a razón de 0.064 m^3/s. Asimilando esa superficie a un cuadrado de lado igual a 203 m, puede estimarse un transporte de sedimentos igual a 0.00032 $m^3/s/m$. Considerado una densidad de la arena seca de 1600 kg/m^3, el transporte en unidades de masa resulta 0.51 kg/s/m.

- Sterk et al. (2012) realizaron mediciones del transporte eólico en la Patagonia, durante las cuales hicieron una granulometría de los sedimentos transportados (capturados con trampas), mediciones de vientos y evaluaron el transporte total. Consideraron 9 eventos caracterizados por velocidades del viento entre 8 y 13 m/s. Los sedimentos capturados se caracterizaron por los diámetros de la Tabla 10.8.1.

Tabla 10.8.1 Distribución de los sedimentos durante el experimento de transporte eólico (Sterk et.al., 2012). Notas: arcillas asociadas a diámetros menores a 2µm, limos: 2-50 µm, arenas finas: 50-250 µm, arenas medianas: 250-500 µm y arenas gruesas: mayores a 500 µm

Arcillas (%)	Limos (%)	Arena fina (%)	Arena mediana (%)	Arena gruesa (%)
3.79	2.13	52.02	34.05	8.01

A partir de la base de datos incluida en el trabajo, se calcularon los siguientes transportes, con un transporte medio igual a 0.00370 kg/s/m (ver Tabla 10.8.2).

Tabla 10.8.2 Transporte eólico de sedimentos en base a Sterk et al. (2012)

Evento	Duración del evento (s) (1)	Masa transportada por unidad de longitud transversal al viento (kg/m) (2)	Transporte eólico de sedimentos (kg/s/m) (3) = (2) / (1)
1	56280	109.3	0.00194
2	19440	32.8	0.00169
3	38640	835.9	0.02163
4	74460	94.7	0.00127
5	22320	44.2	0.00198
6	15840	20.2	0.00128
7	42060	7.9	0.00019
8	24780	30.6	0.00123
9	15420	31.7	0.00206

A los efectos de comparar los aportes de los ríos con los aportes de masa de sedimentos por efecto del viento, en base a la literatura científica presentada, se hará un cálculo simple con referencia en la Figura 10.8.1, donde se puede ver la dirección del viento indicada por la flecha verde. En la misma figura se ha trazado un segmento en color naranja que indica el tramo de 20 km de costa de la ría por la cual pasarán los sedimentos volados por el viento, que podrán ingresar a la ría generando una concentración extra a las aportadas por los ríos.

Figura 10.8.1 Esquema de apoyo para la estimación de la masa de sedimentos que ingresa al estuario por el efecto del viento

Considerando el trabajo de Sterk et al. (2012) el viento puede transportar, en promedio para los eventos analizados, 0.0037 kg/s/m (principalmente arenas). Esto quiere decir que por el segmento A-B de la Figura 10.8.1 pasarán unos 75 kg/s en dirección a la ría con velocidades de vientos entre 8 y 13 m/s con direcciones del W.

Considerando que estos eventos tienen 1 día de duración, solamente a los efectos comparativos, la masa total de sedimentos que ingresarían a la ría por efecto del viento es de unas 6400 tn (toneladas) y para el mismo período los ríos ingresarían 142 tn (río Chico) y 739 tn (río Santa Cruz), para los caudales utilizados en este informe.

Los resultados indican que las magnitudes relativas entre los aportes de sedimentos de los ríos y el potencial del viento para transportar grandes cantidades de sedimentos hacia la ría hacen pensar que el transporte eólico deberá ser considerado al momento de analizar la importancia del déficit de sedimentos del río Santa Cruz en el funcionamiento hidrosedimentológico de la ría, una vez que las obras hayan sido terminadas.

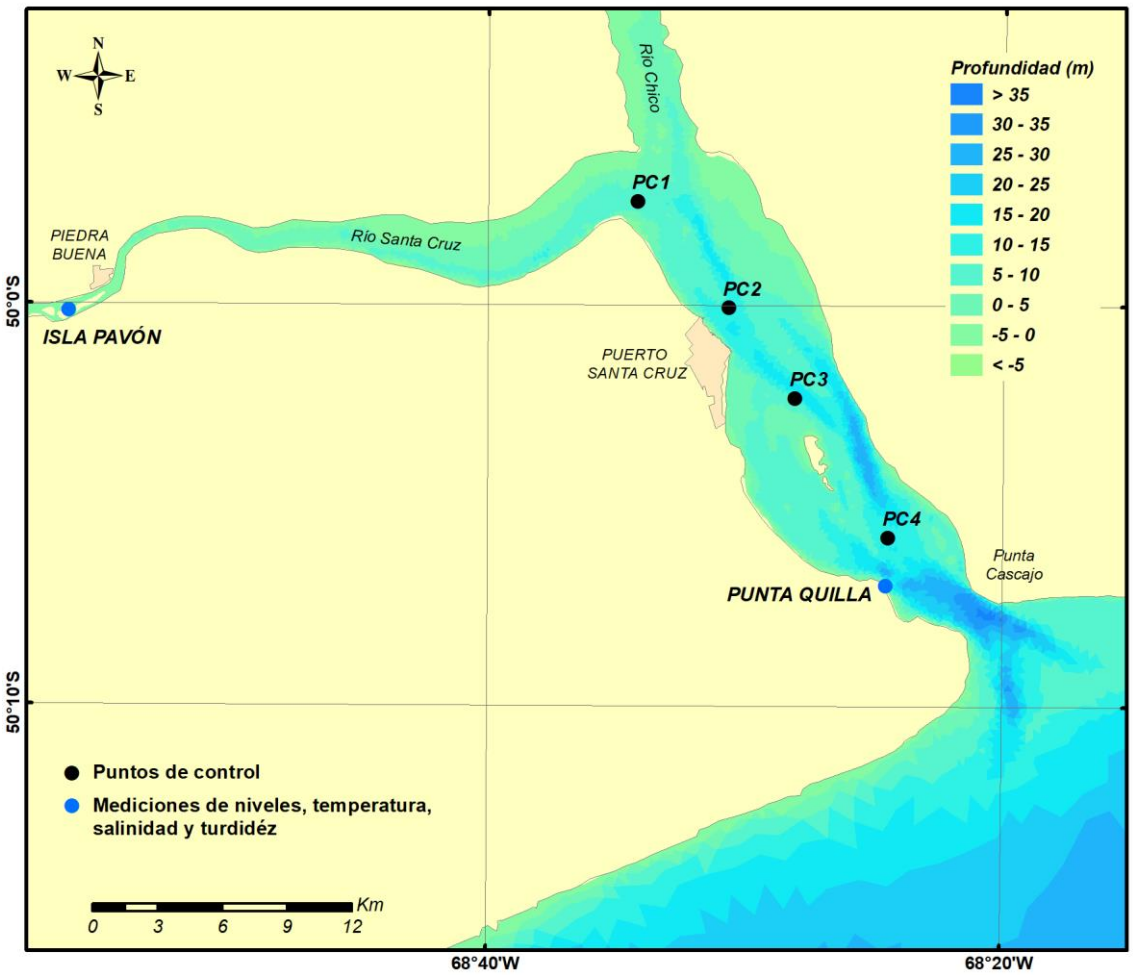
10.9. Comparaciones entre las condiciones con y sin represas

A diferencia del punto del 10.7 del presente trabajo en el que se utilizó al modelo para simular las variables del estuario con un caudal del río Santa Cruz (RSC) constante,

durante un mes, en este punto se presentan los resultados de 6 simulaciones con diferentes caudales estadísticos del río Santa Cruz variables en tiempo: el caudal Q_{50} (caudal mediano que se tomará como referencia para la condición sin represas) y los caudales Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2} (que son posibles caudales de erogación cuando comience en llenado de las represas). Estos caudales han sido presentados en la Figura 9.2.1. En los análisis que se presentan a continuación, también se consideran los aportes del río Chico (RC).

El objetivo es estudiar las diferencias para los niveles del mar, temperatura, salinidad y sedimentos en suspensión entre las simulaciones de la condición sin represas y los 5 caudales de erogación. A los efectos de una comparación numérica entre variables se han seleccionado 4 puntos de control (PC) dentro del estuario (Figura 10.9.1).

Figura 10.9.1 Ubicación de los puntos de control (PC)



Además de las comparaciones en los puntos de control, se construyeron unos mapas con las diferencias entre las variables que ilustran sobre las variaciones espaciales.

El llenado de las represas se ha considerado entre el 15 de noviembre a 1 de junio, período en el que se espera el pico de caudal (en marzo) y que sería suficiente para el acumular el agua necesaria en las represas.

A los efectos de la comparación se computaron 2 indicadores: la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM) y el SESGO, que promedian las diferencias nodo a nodo (todos los nodos de las 5 capas) y tiempo a tiempo (todos los pasos temporales) entre dos simulaciones. Se presentan mapas del SESGO de las diferentes variables y, en particular, se calculan estos indicadores para los 4 puntos de control seleccionados. Las definiciones matemáticas del RECM y del SESGO son las siguientes:

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(VQerogación_i - VQ50_i)^2}$$

$$SESGO = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(VQerogación_i - VQ50_i)}$$

Donde:

- $VQ_{erogación}$ corresponde a cada una de 4 variables analizadas, temperatura, salinidad, nivel del mar y concentraciones de sedimentos, que resulta de las simulaciones con los 5 caudales de erogación considerados (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}).
- VQ_{50} corresponde a cada una de 4 variables analizadas, temperatura, salinidad, nivel del mar y concentraciones de sedimentos, que resulta de las simulaciones con el caudal mediano (sin represas).

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones con un análisis detallado de cada variable. En el Punto 11.9.1 se presenta la comparación entre las temperaturas generadas por el caudal mediano y los diferentes caudales de erogación en términos de la temperatura, en el Punto 11.9.2 la correspondiente a la salinidad y en el Punto 11.9.3 se analizan los niveles del mar.

Para la comparación de las concentraciones de sedimentos en suspensión entre los diferentes caudales de erogación y el caudal mediano, se consideraron varios casos que aportan solidez al análisis realizado. Debe contemplarse que, las simulaciones con caudales de erogación no solo presentan una disminución del caudal sino, que también, una disminución en las concentraciones de los sedimento en suspensión por la retención esperada en los embalses. Los casos que se analizaron son:

- Punto 11.9.4. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes del RSC y del RC. En este punto se analizan las diferencias en las concentraciones de los sedimentos en suspensión en el interior del estuario entre en ausencia de las represas (caracterizado por Q_{50}) y los diferentes caudales de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}). El análisis tiene cierta complejidad porque el río Santa Cruz no es el único aportante de sedimentos al estuario, existe el río Chico que tiene poco caudal pero altas concentraciones de sedimentos en suspensión. Entonces, una disminución en el caudal del río Santa Cruz disminuye la cantidad de sedimentos que ingresan al estuario pero también disminuye la cantidad de agua que este aporta al estuario, reduciendo, en consecuencia, la capacidad del diluir el aporte del río Chico. Por este motivo no siempre una disminución del caudal del río Santa Cruz genera una caída de las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario.

- Punto 11.9.5. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes de RSC solamente. En este punto se realiza un análisis similar a punto anterior pero se elimina como fuente de sedimentos al río Chico. En este caso, si ocurre una disminución en los caudales de erogación, entonces sí resulta en una disminución de las concentraciones de sedimentos en suspensión en el interior del estuario.

- Punto 11.9.6. Análisis de las concentraciones de los sedimentos en suspensión usando Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$. Aportes de RSC+RC y RSC solamente. En este tercer caso se analizan las concentraciones de sedimentos en suspensión para el caudal mediano (Q_{50}) y el mínimo histórico ($Q_{55\text{-}56}$), pero sin la presencia de las represas (concentraciones del río Santa Cruz no son disminuidas por la sedimentación en los embalses), con y sin el aporte de sedimentos del río Chico. Este caso permite analizar la influencia de las represas en condiciones de caudales pobres.

10.9.1.1. Comparaciones entre temperaturas

Las Tablas 10.9.1.1 a 10.9.1.4 muestran un resumen de los resultados, basados en promedios, desvíos estándar y errores que permiten analizar los resultados de las simulaciones en base a las diferencias esperadas entre las temperaturas del agua, con y sin la presencia de las represas.

Tabla 10.9.1.1 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (T_{med}), mínimo (T_{min}) y máximo (T_{max}) de la temperatura generada en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	Q_{50}			Q_{75}			Q_{95}		
		T_{med}	T_{min}	T_{max}	T_{med}	T_{min}	T_{max}	T_{med}	T_{min}	T_{max}
Temperatura (°C)	PC1	11.67	4.44	18.78	11.73	4.40	18.76	11.84	4.10	18.80
	PC2	11.80	3.71	19.24	11.84	3.72	19.30	11.92	3.82	19.42
	PC3	11.71	4.09	18.94	11.74	4.15	18.96	11.80	4.30	19.02
	PC4	11.36	5.01	18.49	11.37	5.06	18.50	11.40	5.15	18.54

Tabla 10.9.1.2 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (T_{med}), mínimo (T_{min}) y máximo (T_{max}) de la temperatura generada en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	$Q_{55\text{-}56}$			Q_{H1}			Q_{H2}		
		T_{med}	T_{min}	T_{max}	T_{med}	T_{min}	T_{max}	T_{med}	T_{min}	T_{max}
Temperatura (°C)	PC1	11.97	3.70	19.02	11.89	4.10	18.81	11.88	4.10	18.81
	PC2	12.01	4.09	19.53	11.93	3.82	19.41	11.93	3.82	19.41
	PC3	11.86	4.47	19.11	11.80	4.30	19.04	11.80	4.30	19.04
	PC4	11.44	5.20	18.62	11.40	5.15	18.61	11.40	5.15	18.61

Las Tablas 10.9.1.1 y 10.9.1.2 muestran que las diferencias entre las temperaturas medias generadas por los diferentes caudales de erogación y el Q_{50} están por debajo de 0.6°C, mientras que el rango de variación (diferencias entre mínimo y máximo) en cada punto es siempre superior a 10°C.

Una buena medida promedio del valor absoluto del error es el RECM, pero no indica si la serie considerada presenta errores por exceso o por defecto. El SESGO, en cambio, permite ver el error promedio entre las series considerando el signo del error. Estos resultados se presentan en las Tablas 10.9.1.3 y 10.9.1.4.

*Tabla 10.9.1.3 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del RECM entre la **temperatura** generada por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación en los 4 puntos de control.*

Variable	Punto	T producto del Q_{50}		RECM entre T producto del Q_{50} y T producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Temperatura (°C)	PC1	11.67	2.86	0.11	0.32	0.54	0.40	0.39
	PC2	11.80	2.85	0.07	0.23	0.38	0.26	0.26
	PC3	11.71	2.86	0.06	0.17	0.28	0.19	0.19
	PC4	11.36	2.81	0.04	0.11	0.18	0.12	0.12

Tabla 10.9.1.4 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del SESGO entre la temperatura generada por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación en los 4 puntos de control.

Variable	Punto	T producto del Q_{50}		SESGO entre T producto del Q_{50} y T producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Temperatura (°C)	PC1	11.67	2.86	0.05	0.15	0.27	0.19	0.19
	PC2	11.80	2.85	0.03	0.11	0.20	0.12	0.12
	PC3	11.71	2.86	0.02	0.08	0.14	0.08	0.08
	PC4	11.36	2.81	0.01	0.04	0.07	0.04	0.04

- Para el Q_{50} (sin represas) las temperaturas medias para los 4 puntos variaron entre 11.36 y 11.80°C, correspondiendo la menor temperatura media al punto más cercano al mar (PC4). Los desvíos para cada punto variaron entre 2.81°C y 2.86°C, por lo que es esperable variaciones de la amplitud de la temperatura entre 4°C y 6°C, aproximadamente, para el período de llenado.

- Para los caudales de erogación de las represas ($Q_{75\%}$, $Q_{95\%}$, $Q_{55\text{-}56}$. Q_{H1}, Q_{H2}) los errores cuadráticos medios (RECM) de temperatura entre Q_{50} y esos caudales varió entre 0.04°C y 0.54°C. Los RECM aumentan a medida que los caudales disminuyen.

- El SESGO indica que, en promedio y para el período del año considerado, la presencia de las represas produce un aumento leve de la temperatura del estuario.

- Las diferencias entre el caudal mediano (sin represas) y los 5 caudales erogados no modifican (a los efectos prácticos) la temperatura del agua en ninguno de los puntos de control.

- La mayor diferencia se observa para el $Q_{55\text{-}56}$, con valores de 0.54°C, aunque muy por debajo del desvío estándar en este punto de 2.86°C.

Las Figuras 10.9.1.1 a 10.9.1.10 presentan los mapas de diferencias medias (SESGO) entre las temperaturas generadas por cada caudal de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$. Q_{H1}, Q_{H2}) y el

caudal mediano Q_{50}. Para calcularlo se toma el campo de temperaturas generadas por cada caudal de erogación en cada instante de simulación y se le resta su correspondiente asociado al caudal mediano. Luego por cada volumen de la grilla se promedian los resultados de la resta. Se discriminan los resultados para la capa superficial y la del fondo.

Figura 10.9.1.1 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{75} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

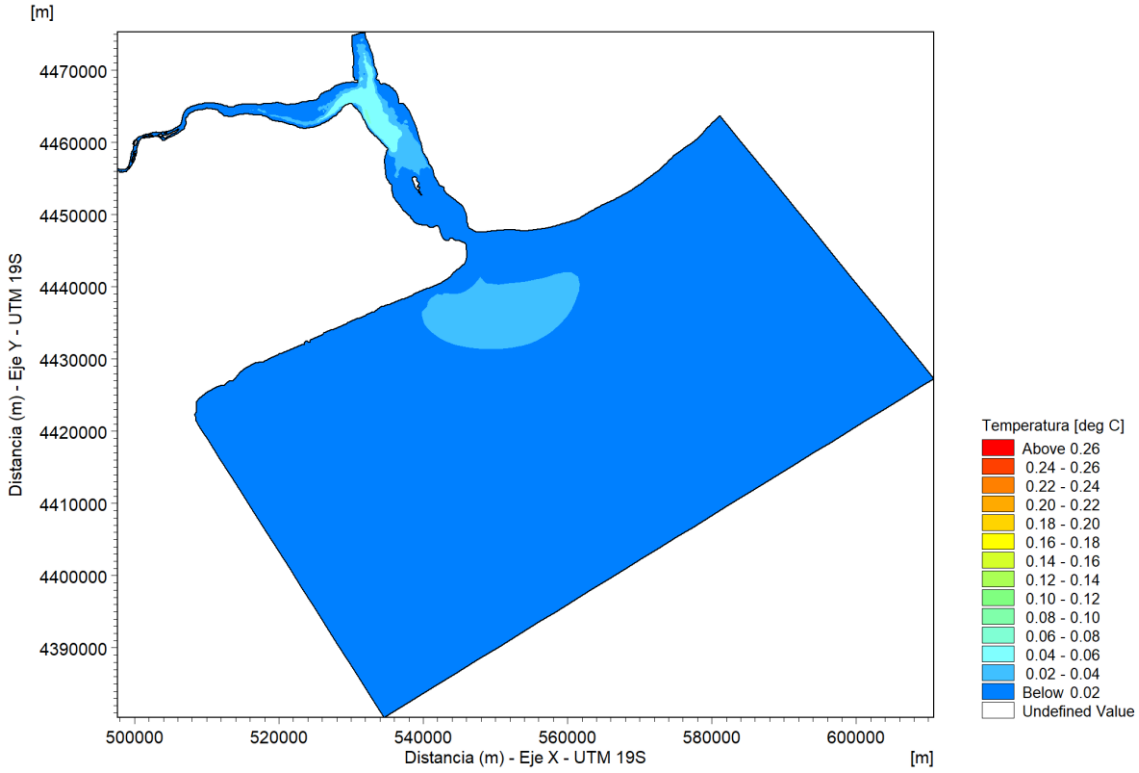


Figura 10.9.1.2 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{75} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

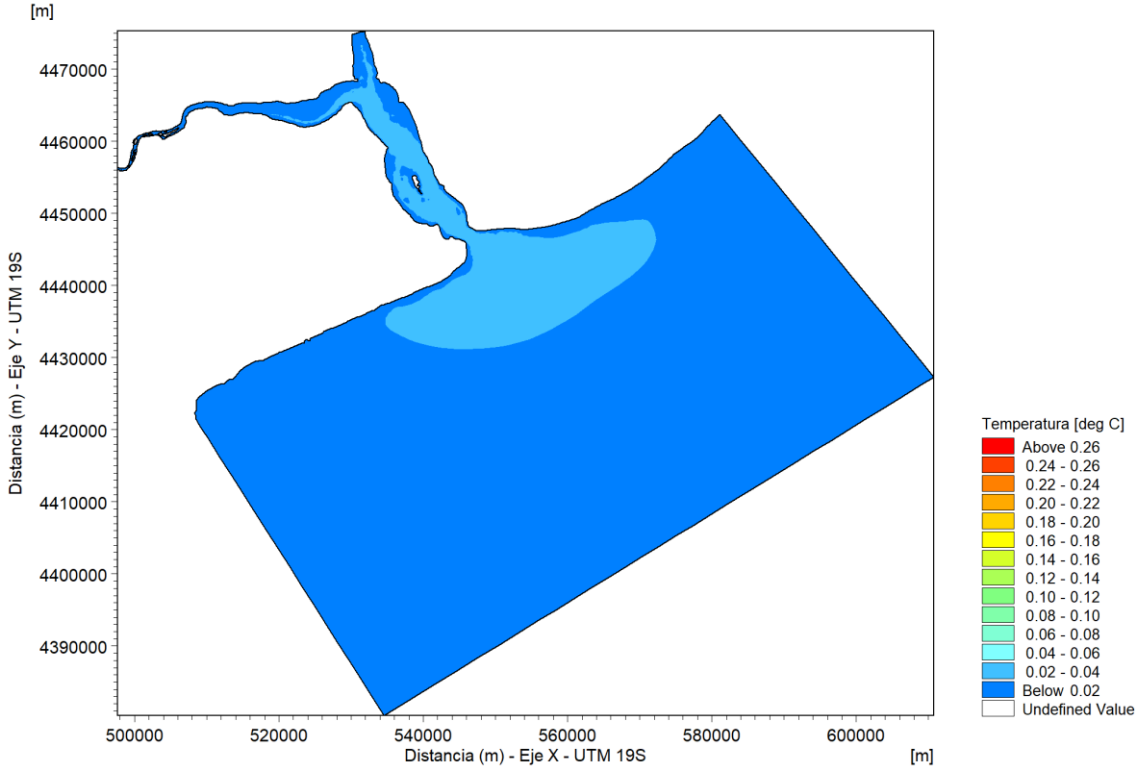


Figura 10.9.1.3 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{95} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

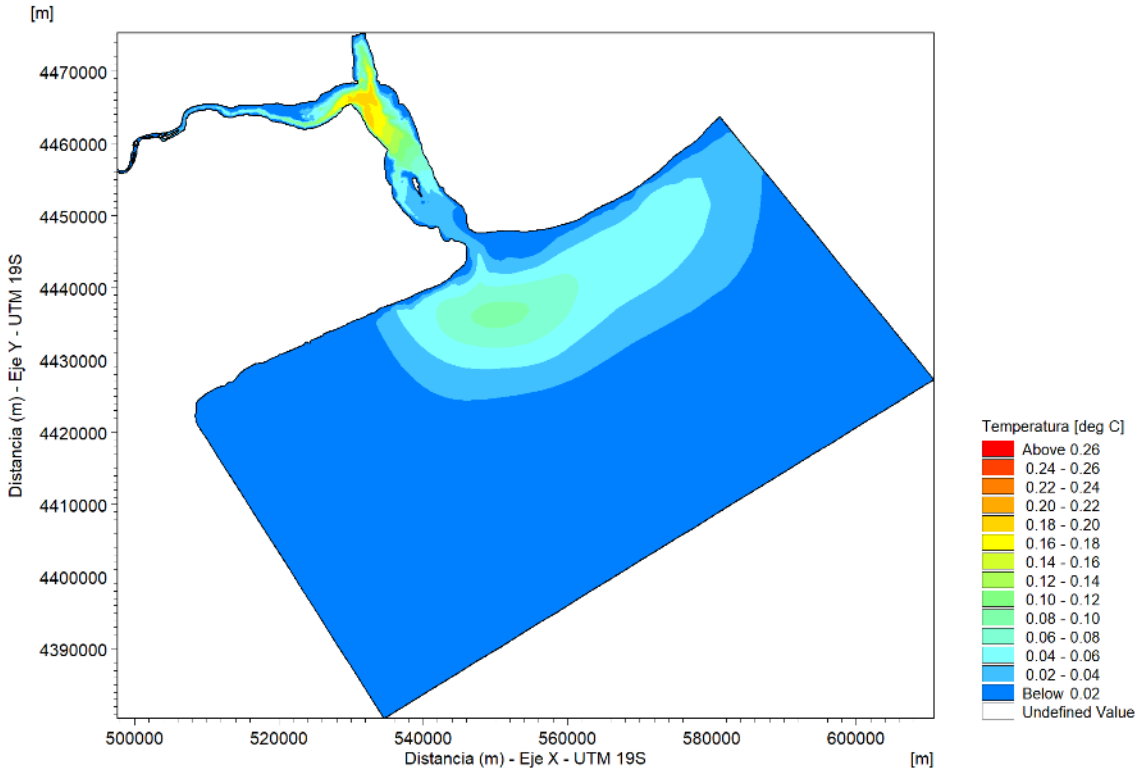


Figura 10.9.1.4 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{95} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

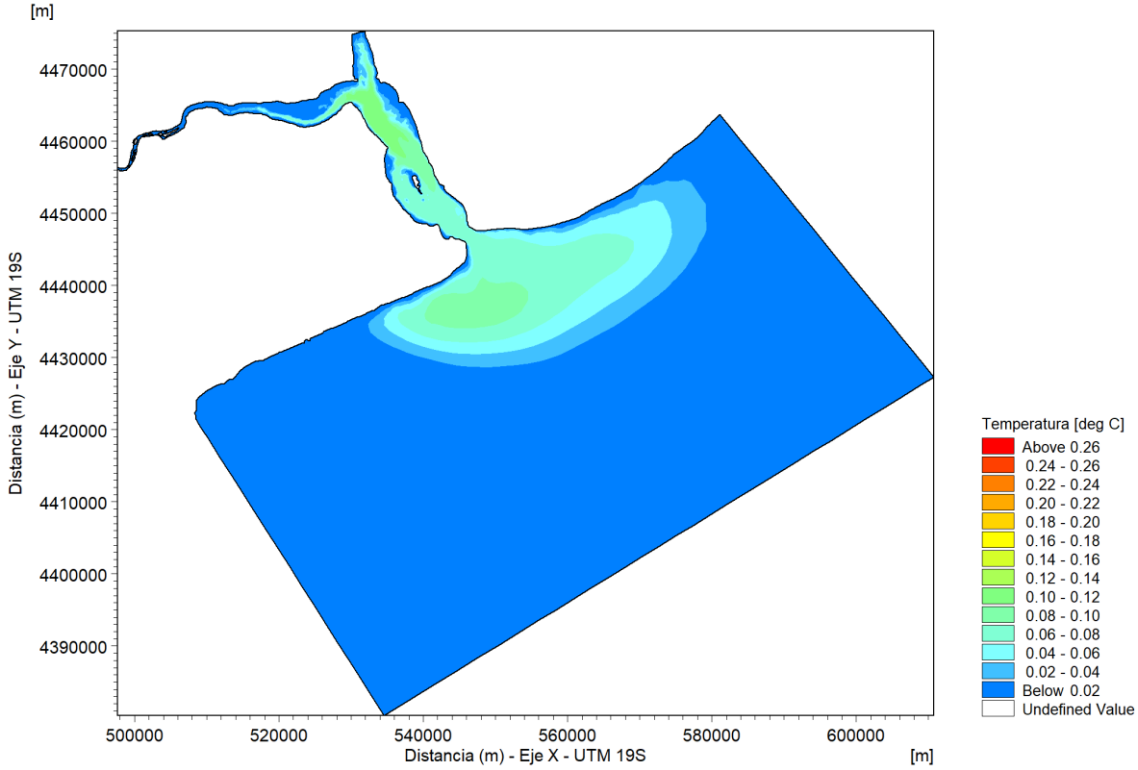


Figura 10.9.1.5 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el $Q_{55\text{-}56}$ y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

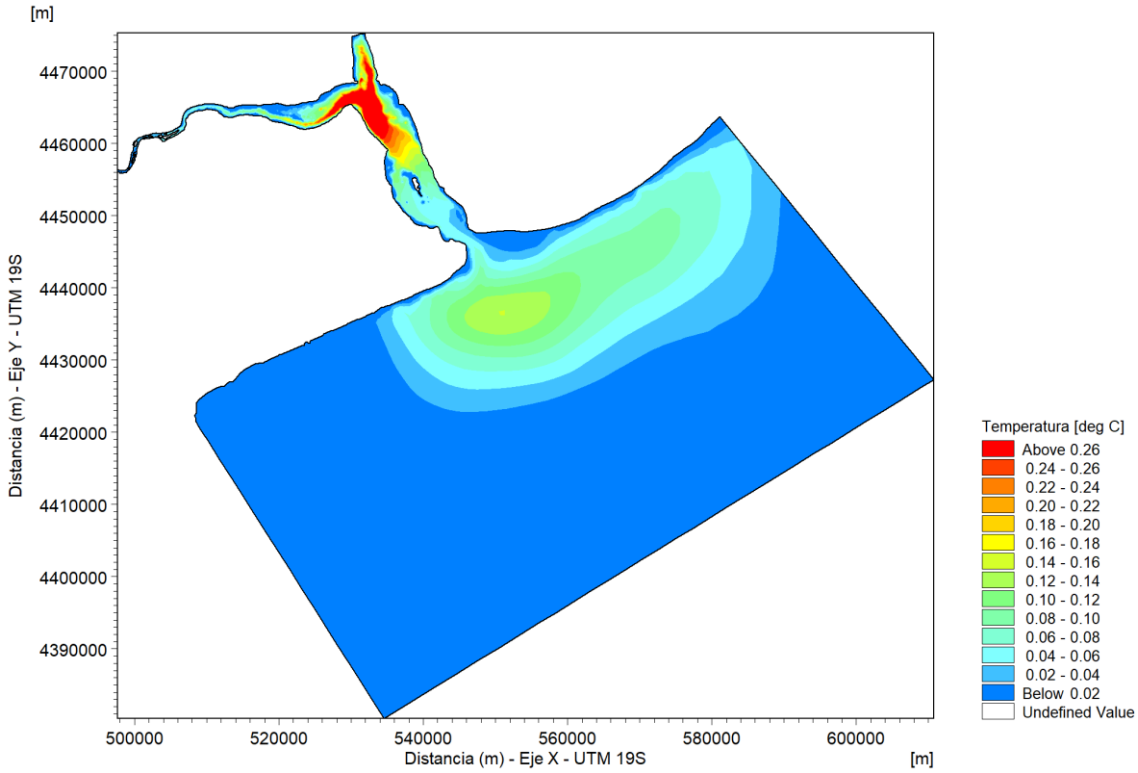


Figura 10.9.1.6 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el $Q_{55\text{-}56}$ y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

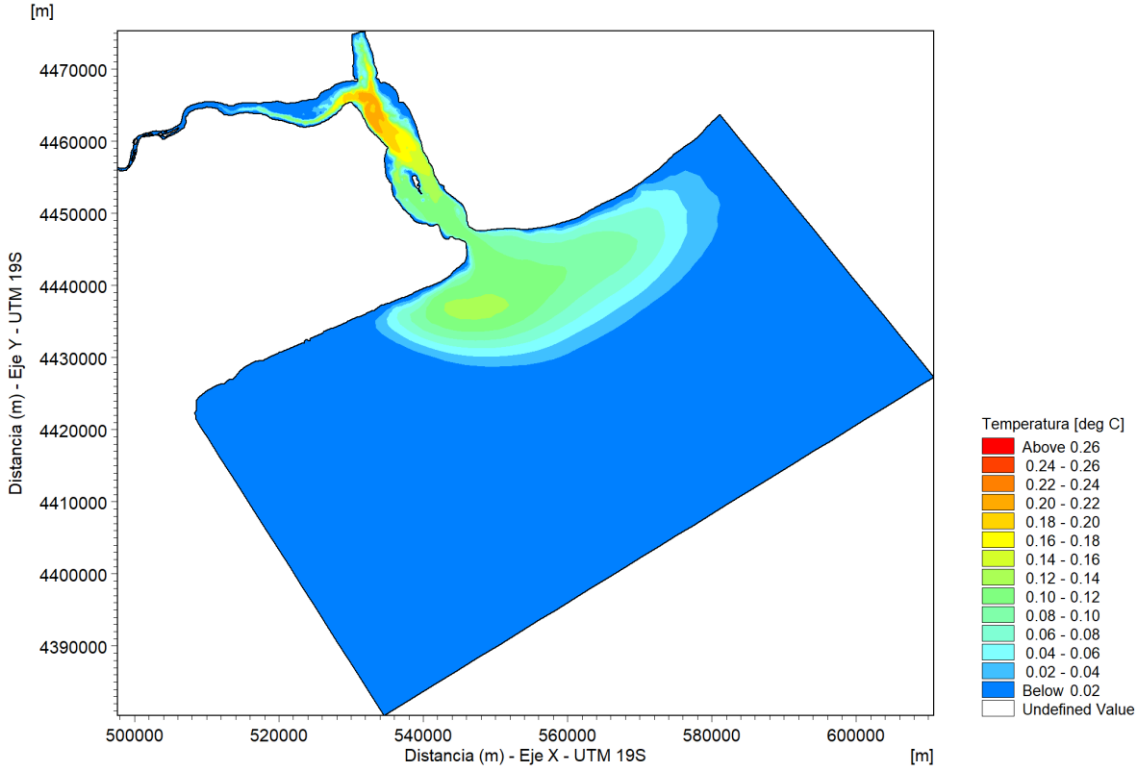


Figura 10.9.1.7 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{H1} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

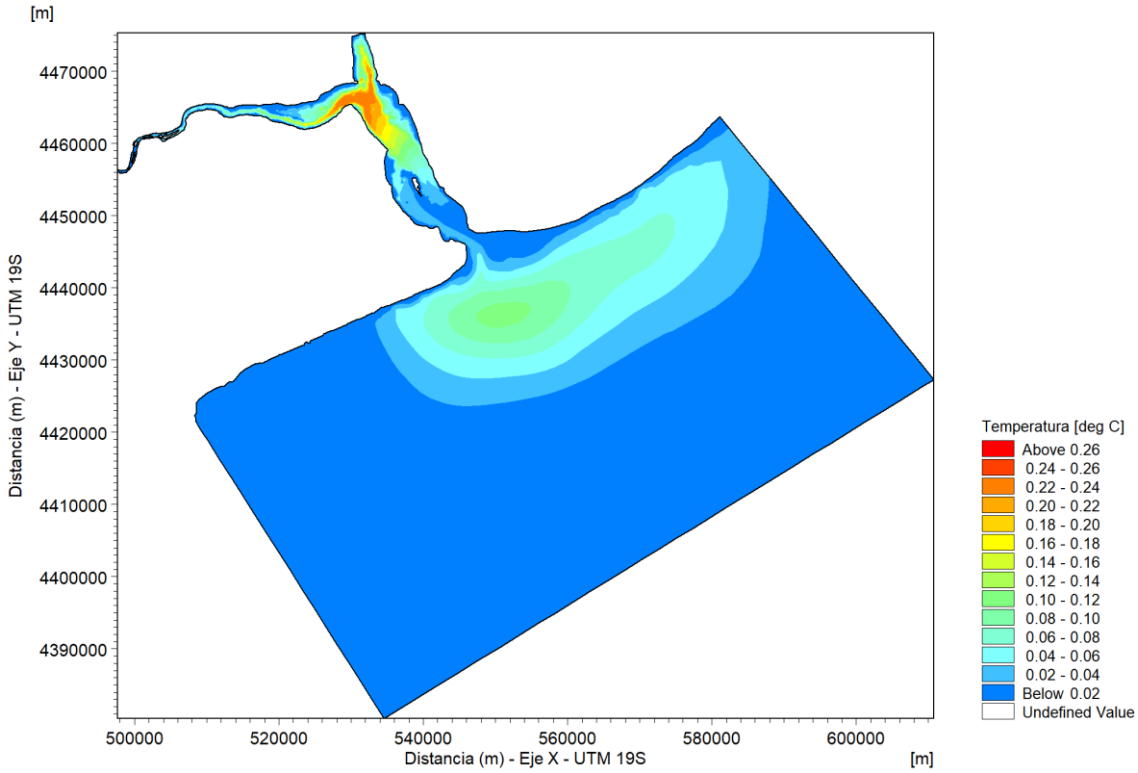


Figura 10.9.1.8 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{H1} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

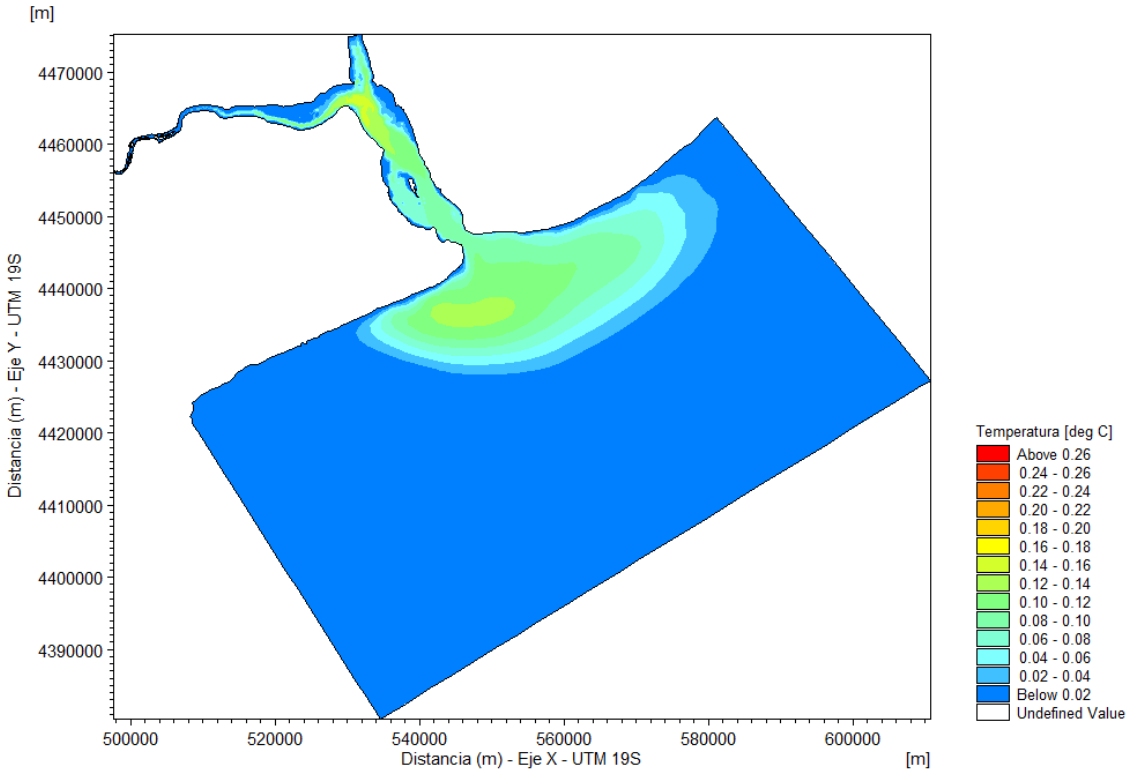


Figura 10.9.1.9 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{H2} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

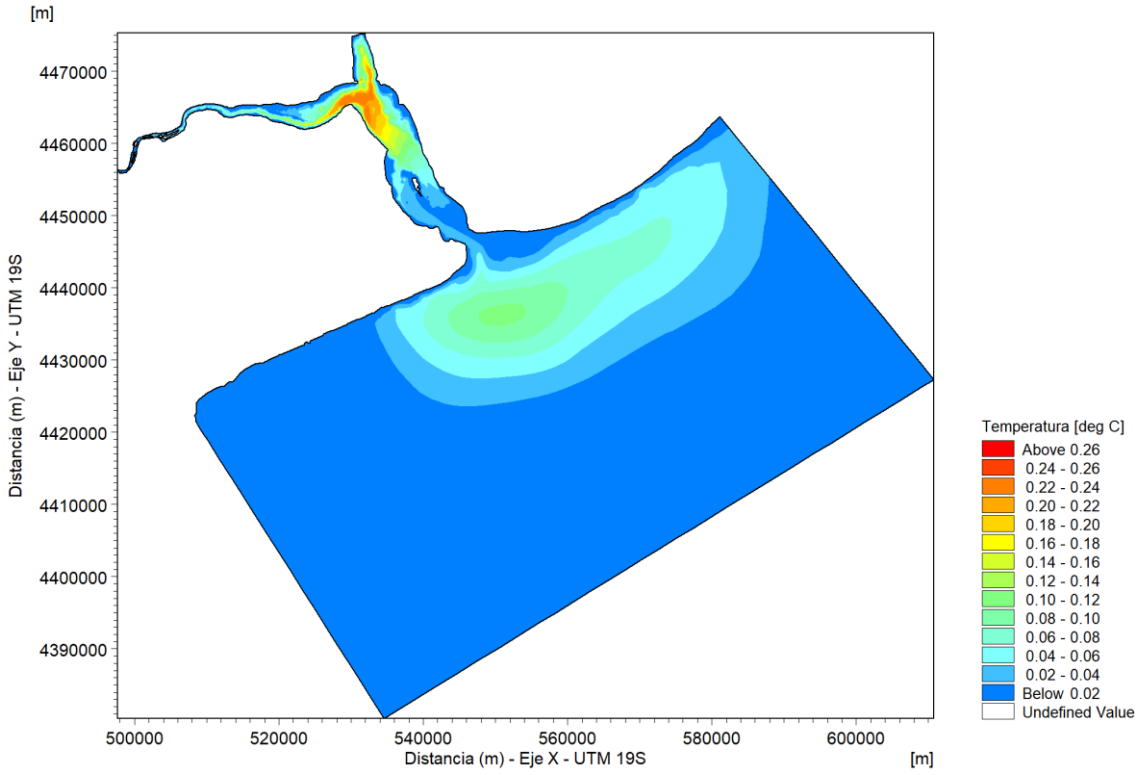
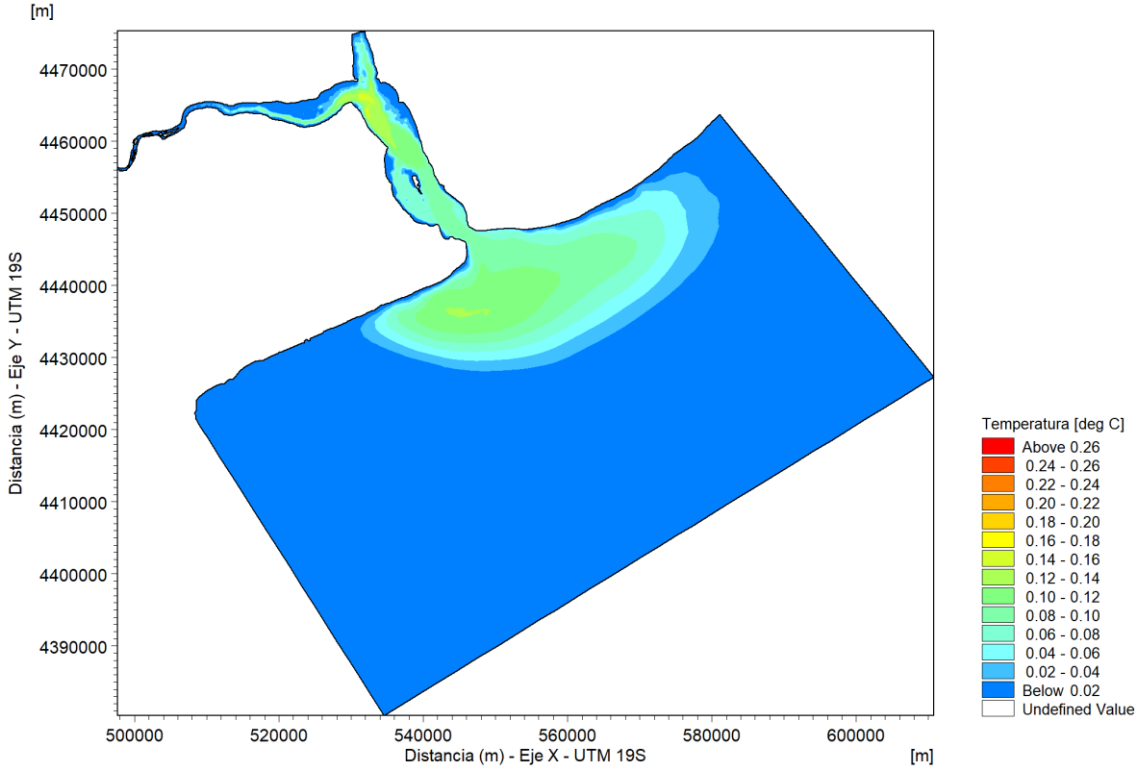


Figura 10.9.1.10 Diferencias medias de temperatura (°C) producto de la resta entre los campos de temperaturas generados por el Q_{H2} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.



En este caso el SESGO resulta útil para estudiar series cuyas diferencias mantienen cierto exceso o defecto. Si el error entre ambas series es similar hacia los positivos y negativos el SESGO puede dar cero, pero el error medio puede ser muy diferente.

Como ejemplo de la aplicación de los indicadores RECM y SESGO puede verse que, en punto PC1, el RECM entre las simulaciones con Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$ es de 0.54°C y el SESGO es 0.27°C. Esto representa un corrimiento del valor medio hacia valores positivos.

Dado que, en promedio para el período analizado, el río Santa Cruz aporta aguas relativamente frías al estuario, la disminución en el caudal del río genera un aumento, leve, de la temperatura media en el interior del estuario. Desde ya, cuanto mayor es la diferencia entre el caudal de erogación respecto del caudal mediano, mayores son las diferencias de temperatura. Las diferencias más importantes (SESGO) se encuentran cerca del fondo y alcanzan valores de 0.55°C, asociadas al caudal mínimo $Q_{55\text{-}56}$. Otro aspecto que verse en estas figuras es que las mayores diferencias ocurren en la parte alta del interior del estuario y el último tramo del ríos, en la zona del PC1. También puede observarse un máximo secundario en la desembocadura del estuario al mar.

En todos los casos, las diferencias máximas entre las temperaturas computadas por el modelo bajo condiciones naturales sin represas y con represas (solo durante el llenado), son menores a 0.6°C y están muy por debajo de las variaciones naturales del medio. Numéricamente, las variaciones naturales pueden representarse por los desvíos estándar de las temperaturas generadas por el caudal mediano (sin represas), con valores entre 2.8°C y 2.9°C, para los 4 puntos considerados.

10.9.1.2. Comparaciones entre salinidades

Las Tablas 10.9.2.1 y 10.9.2.2 muestran las salinidades (S) medias, mínimas y máximas en el período de llenado 15 de noviembre y 1 de junio. El rango de variación (diferencias entre mínimo y máximo) en cada punto es siempre superior a 20 UPS.

Tabla 10.9.2.1 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (S_{med}), mínimo (S_{min}) y máximo (S_{max}) de la salinidad generada en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	Q_{50}			Q_{75}			Q_{95}		
		S_{med}	S_{min}	S_{max}	S_{med}	S_{min}	S_{max}	S_{med}	S_{min}	S_{max}
Salinidad (UPS)	PC1	2.8	0.0	21.8	3.4	0.0	23.4	4.7	0.0	25.8
	PC2	7.4	0.0	27.8	8.3	0.0	28.7	10.3	0.1	29.9
	PC3	12.1	0.1	30.7	13.1	0.1	30.9	15.3	0.7	31.4
	PC4	19.8	0.9	32.6	20.7	1.5	32.7	22.5	3.4	32.8

Tabla 10.9.2.2 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (S_{med}), mínimo (S_{min}) y máximo (S_{max}) de la salinidad generada en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	$Q_{55\text{-}56}$			Q_{H1}			Q_{H2}		
		S_{med}	S_{min}	S_{max}	S_{med}	S_{min}	S_{max}	S_{med}	S_{min}	S_{max}
Salinidad (UPS)	PC1	7.0	0.0	26.6	5.4	0.0	26.6	5.2	0.0	25.8
	PC2	13.2	0.5	30.4	11.1	0.1	30.4	10.9	0.1	29.9
	PC3	18.2	2.3	31.6	16.1	0.7	31.6	15.9	0.7	31.4
	PC4	24.6	6.4	32.9	23.0	3.4	32.9	22.9	3.4	32.8

Al igual que para la temperatura se presentan las diferencias entre los resultados de las simulaciones para el caudal mediano (Q_{50}) y los 5 caudales de erogación, en términos del RECM y el SESGO en las Tablas 10.9.2.3 y 10.9.2.4.

Tabla 10.9.2.3 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del RECM entre la salinidad generada por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación en los 4 puntos de control.

Variable	Punto	S producto del Q_{50}		RECM entre S producto del Q_{50} y S producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	Q_{55-56}	Q_{H1}	Q_{H2}
Salinidad (UPS)	PC1	2.8	4.3	0.6	2.0	4.3	2.7	2.5
	PC2	7.4	7.2	0.9	2.9	5.7	3.7	3.4
	PC3	12.1	8.5	1.0	3.1	6.0	3.9	3.7
	PC4	19.8	9.1	0.8	2.5	4.5	3.0	2.9

Tabla 10.9.2.4 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del SESGO entre la salinidad generada por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación en los 4 puntos de control.

Variable	Punto	S producto del Q_{50}		SESGO entre S producto del Q_{50} y S producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	Q_{55-56}	Q_{H1}	Q_{H2}
Salinidad (UPS)	PC1	2.8	4.3	0.9	2.7	5.4	3.7	3.3
	PC2	7.4	7.2	1.1	3.2	6.3	4.1	3.8
	PC3	12.1	8.5	1.1	3.3	6.4	4.2	4.0
	PC4	19.8	9.1	0.9	2.9	5.4	3.5	3.4

- Para el caudal mediano (condición que representa la ausencia de las represas) las salinidades medias para los 4 puntos variaron entre 2.8 y 19.8, correspondiendo la menor salinidad media al punto más lejano al mar (PC1).
- Los desvíos para cada punto variaron entre 4.3 y 9.1, por lo que es esperable variaciones de la amplitud de la salinidad entre 8 y 18, para el período de llenado. Los mayores errores y sesgos se observan en los PC2 y PC3, donde se espera un cambio mayor de la salinidad por estar alejados de los ríos y el mar.
- Para los caudales de erogación de las represas (Q_{75}, Q_{95}, Q_{55-56}, Q_{H1}, Q_{H2}) los RECM de salinidad entre Q_{50} y esos caudales varió entre 0.6 y 6.0. Los RECM aumentaron a medida que los caudales disminuyeron.
- El SESGO entre el caudal mediano y los 5 caudales de erogación indica que la presencia de las represas aumenta la salinidad en el estuario y parte de su desembocadura. Pero el aumento de la salinidad está por debajo del desvío estándar, como puede verse para los diferentes cálculos en los puntos de control.
- La mayor diferencia ocurre en la zona del punto PC3 y para el menor caudal de erogación (Q_{55-56}). El caudal Q_{75} (más cercano al caudal medio) muestra los RECM más

bajos, entre 0.6 y 1.0, muy por debajo de los desvíos estándar que genera el caudal mediano sin represas (Q_{50}), que variaron entre 4.3 y 9.1.

En todos los casos, los errores medios son menores o parecidos a los desvíos estándar de la salinidad para las condiciones naturales, representadas por el caudal mediano (sin represas).

Las Figuras 10.9.2.1 a 10.9.2.10 presentan los mapas de SESGO entre las salinidades generadas por cada caudal de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56.}$ $Q_{H1,}$ Q_{H2}) y el caudal mediano Q_{50}. El procedimiento de cálculo es el mismo ya descripto para la temperatura. También se discriminan los resultados para la capa superficial y la del fondo.

El río Santa Cruz aporta agua dulce al estuario por lo que menores caudales generarán condiciones algo más salinas en este. Por lo tanto, dado que los caudales de erogación son menores que el caudal mediano, los mapas de las Figuras 10.9.2.1 a 10.9.2.10, presentan valores positivos de diferencia media de salinidad. Naturalmente, el caudal mínimo analizado ($Q_{55\text{-}56}$) es el que genera las mayores diferencias de salinidades. También se observa que en todos los casos las diferencias alcanzan un espacio mayor cerca de la superficie que en el fondo, la explicación de esta variación puede deberse a dos factores:

- La estratificación vertical (cuña salina). En la capa superficial se ubica el agua menos densa (menos salina) allí está “el agua del río”, los resultados del modelo indican que una disminución en el volumen de estas aguas devendrá en un aumento de la salinidad en la región, y que éste se extenderá espacialmente más en superficie que en el fondo.
- Las corrientes superficiales son mayores y por lo tanto, tendrán un alcance mayor fuera del estuario.
- A diferencia de la temperatura que presenta las mayores variaciones en la parte del alta del estuario (zona del PC1), para la salinidad éstas se observan en la parte media del estuario (zona de los PC2 y PC3). Este no es un efecto sencillo de explicar, he aquí algunas consideraciones que permiten entender la diferencia:

- Las temperaturas de los ríos, la del mar y la atmosférica son variables y los procesos que las relacionan están activos en el modelo, definiendo la temperatura del estuario. Por el contrario, la salinidad no es variable en sus bordes, ya que la salinidad de los ríos es constante y nula, el agua de mar es, en la práctica, constante en relación con las variaciones observadas en la región (como muestran en las Figuras 8.3.3 y 8.3.4) y si bien la evaporación y lluvias están permitidas en el modelo, sus efectos son irrelevantes.
- En el período simulado todas estas temperaturas varían suficientemente como para darse todas las combinaciones entre ellas, esto es, la temperatura de los ríos mayor a la del estuario y a la atmosférica, la temperatura de los ríos menor a la del estuario y a la atmosférica y así. Pero los resultados indican que el efecto final es como si la temperatura del río Santa Cruz fuese inferior a la que tiene estuario.
- La temperatura no es una variable conservativa y el modelo considera el intercambio de calor entre las aguas de diferentes temperaturas y también con la atmósfera.
- Los períodos en que la atmósfera está más caliente que las aguas de los ríos y el estuario, son dominantes entre el 15 de noviembre y el 1 de junio.
- El calentamiento por la entrega de calor desde la atmósfera al estuario y a los ríos parece definir los cambios cerca de la desembocadura. Por supuesto, este efecto no es observado para la salinidad.
- La salinidad posee un comportamiento más sencillo, puede considerarse conservativa (porque los efectos de la evaporación y las lluvias en la región son irrelevantes desde el punto de vista de esta concentración), y lo que se observa en los resultados de las simulaciones es que el frente en el interior del estuario se desplaza algo hacia el interior cuando disminuye el caudal del río Santa Cruz que posee salinidad igual a 0 UPS.
- También puede verse que las salinidades varían más en superficie que en el fondo y que en superficie las diferencias son observadas más hacia la desembocadura de los río en el mar. Efecto que puede relacionarse con que el déficit de agua dulce asociado a los caudales de erogación será levemente más notorio sobre la

superficie que en el fondo, porque allí, en superficie, es donde se establece el agua menos densa.

Figura 10.9.2.1 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{75} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

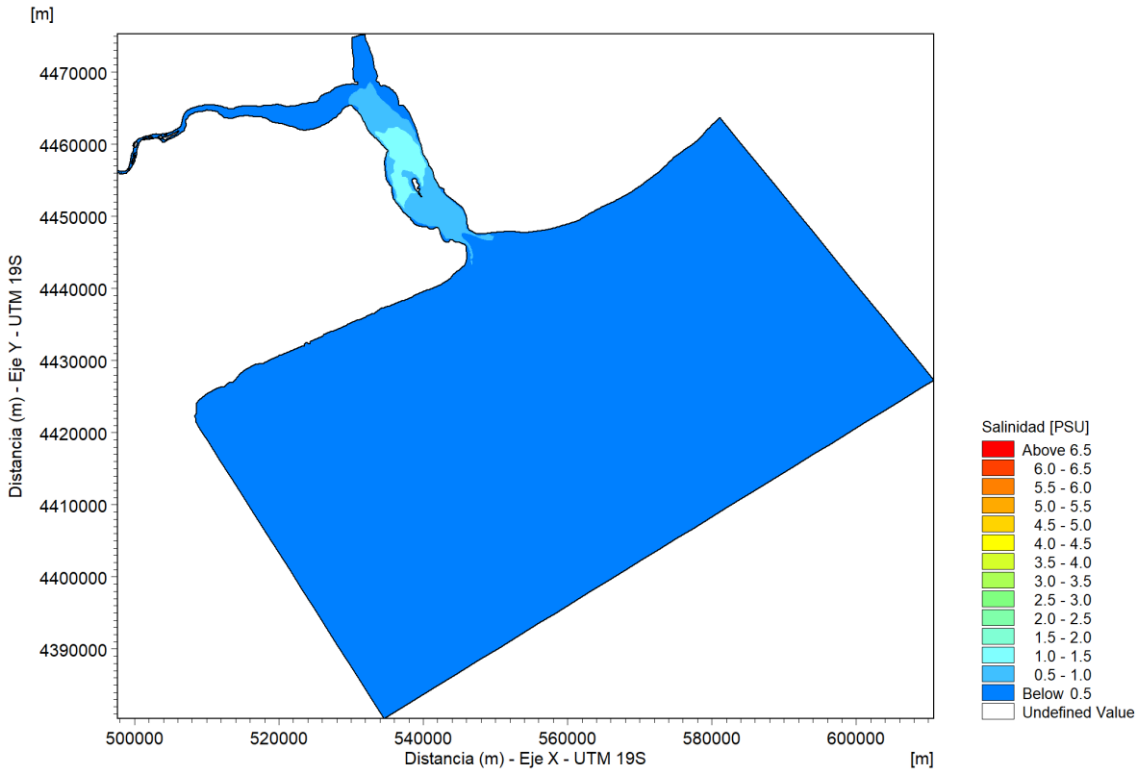


Figura 10.9.2.2 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{75} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

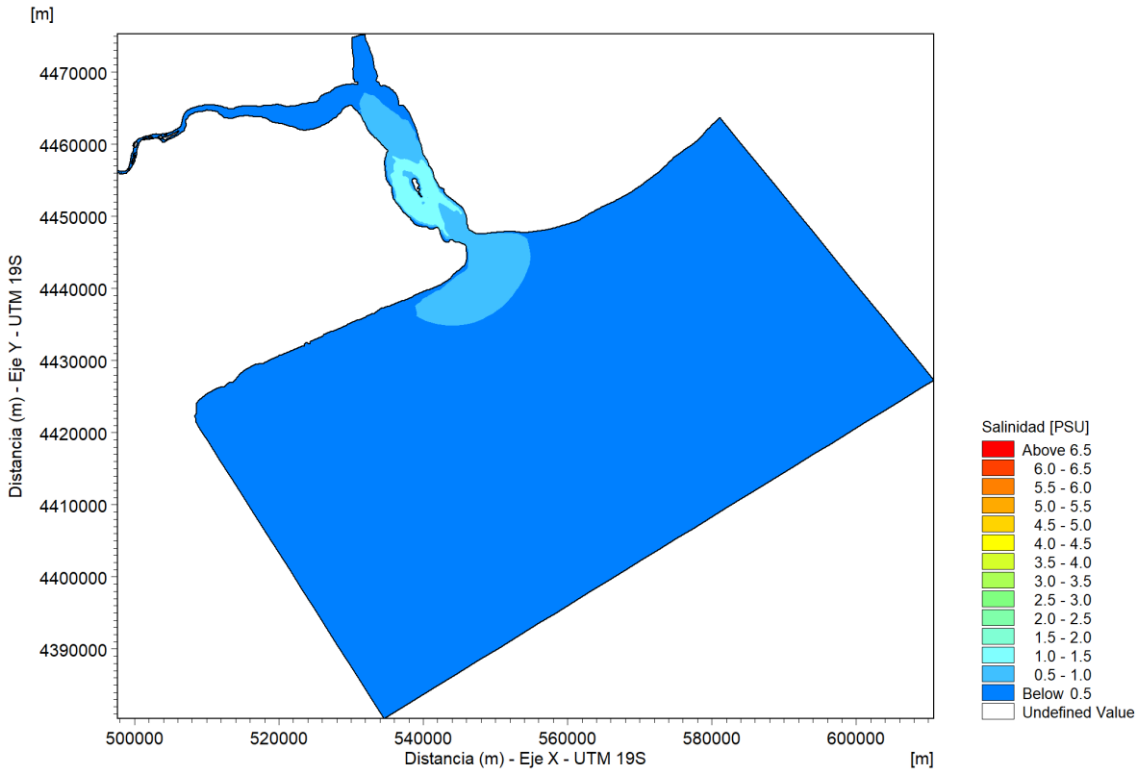

[m]
4470000
4460000
4450000
4440000
4430000
4420000
4410000
4400000
4390000
Distancia (m) - Eje Y - UTM 19S
500000
520000
540000
560000
580000
600000
Distancia (m) - Eje X - UTM 19S
[m]
Salinidad [PSU]
Above 6.5
6.0 - 6.5
5.5 - 6.0
5.0 - 5.5
4.5 - 5.0
4.0 - 4.5
3.5 - 4.0
3.0 - 3.5
2.5 - 3.0
2.0 - 2.5
1.5 - 2.0
1.0 - 1.5
0.5 - 1.0
Below 0.5
Undefined Value

Figura 10.9.2.3 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{95} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

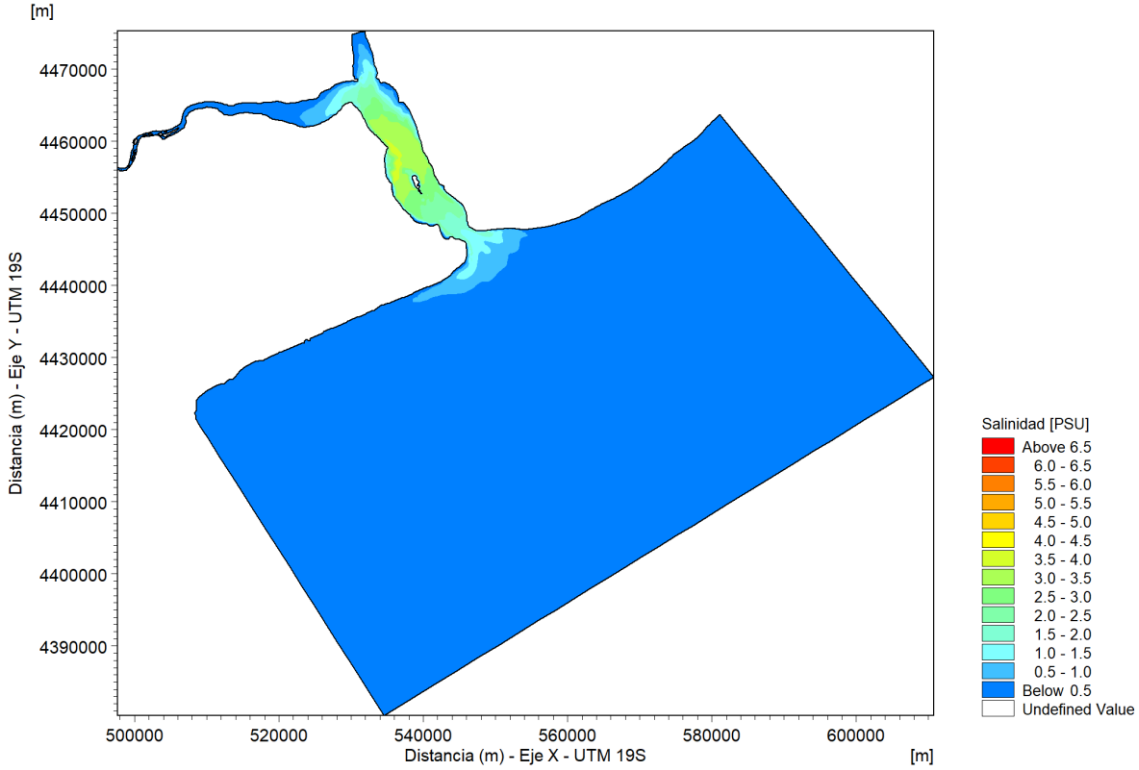


Figura 10.9.2.4 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{95} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

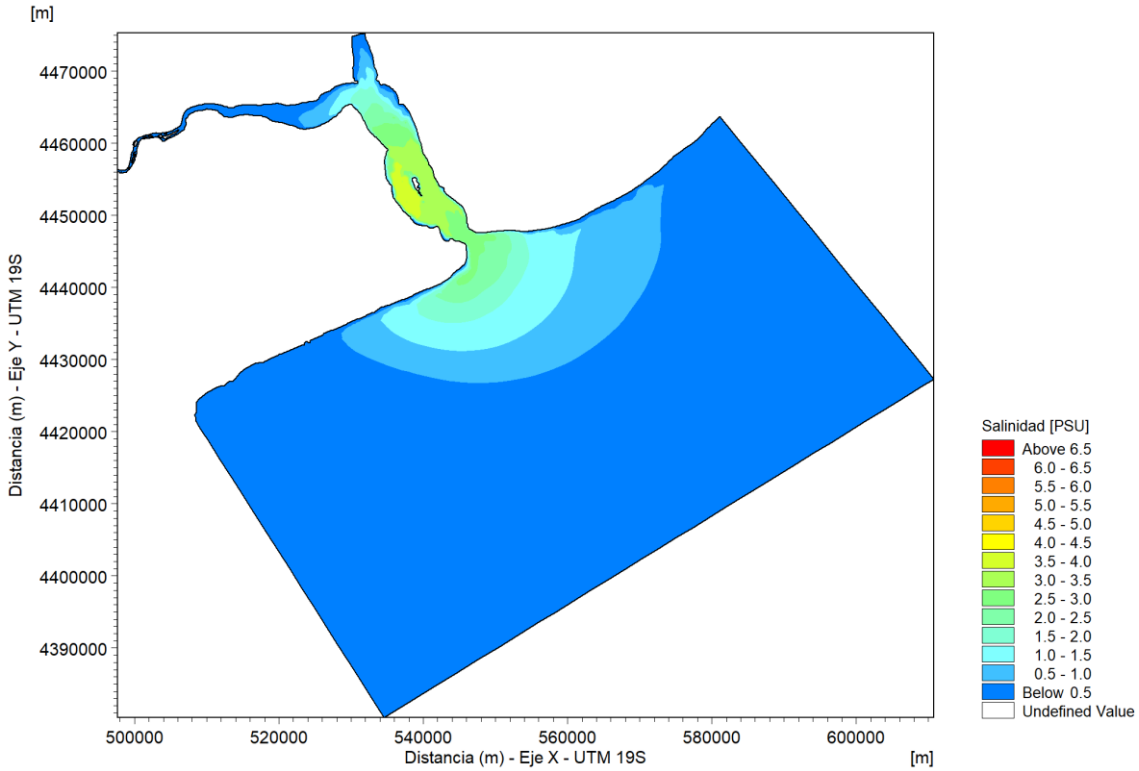


Figura 10.9.2.5 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el $Q_{55\text{-}56}$ y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

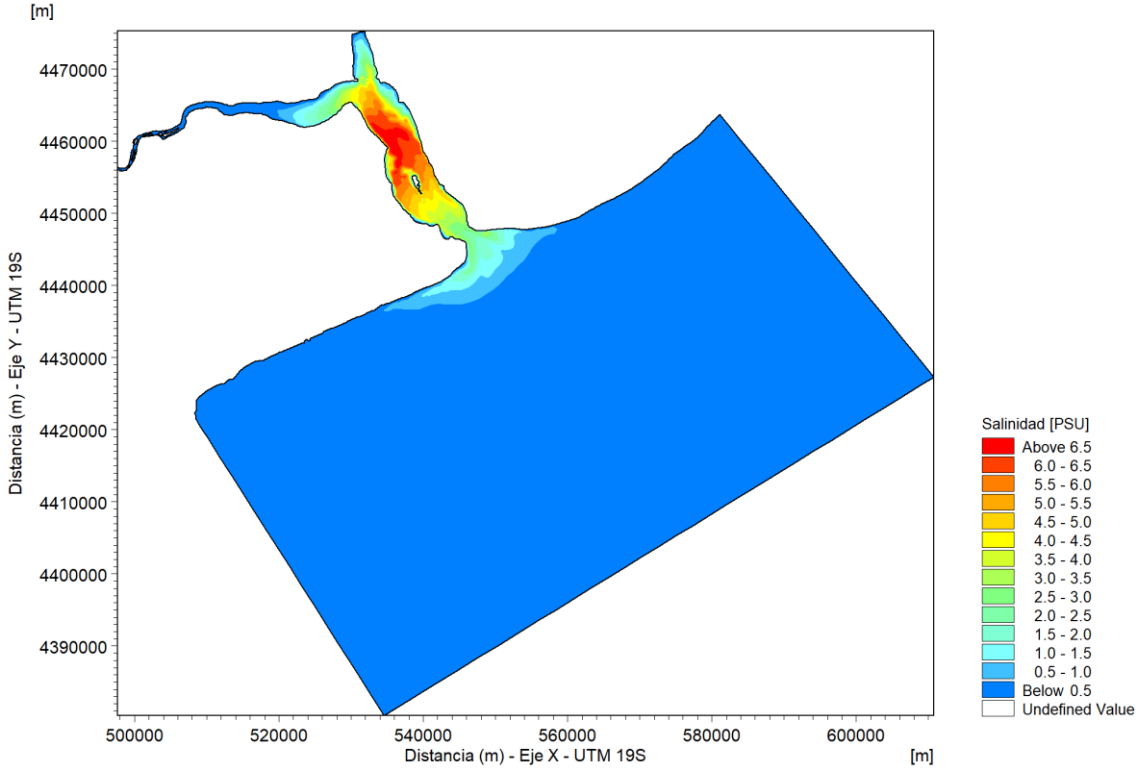


Figura 10.9.2.6 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el $Q_{55\text{-}56}$ y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

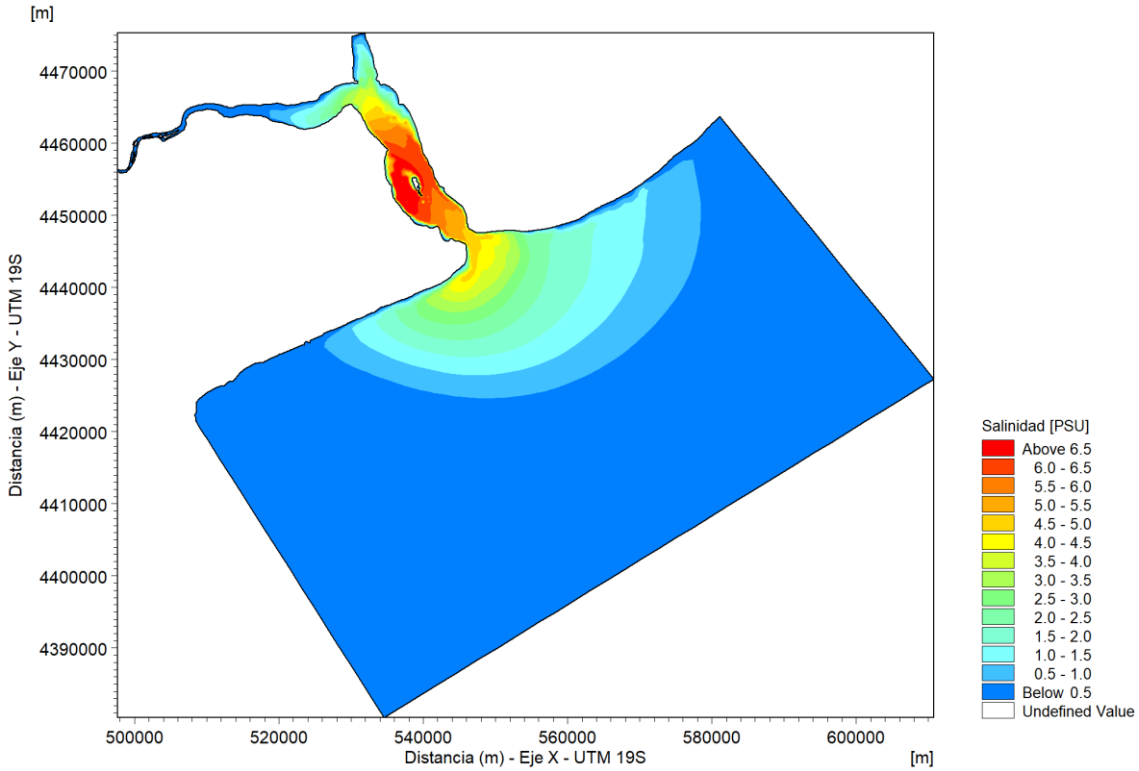


Figura 10.9.2.7 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{H1} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

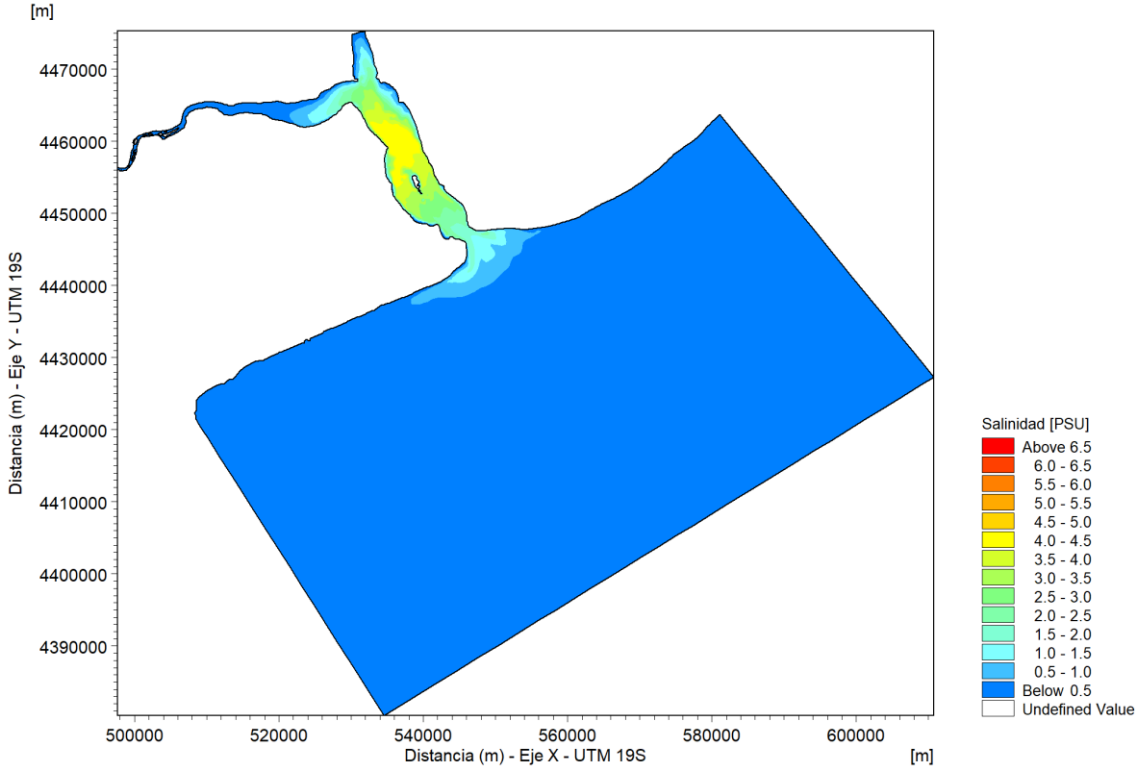


Figura 10.9.2.8 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{H1} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.

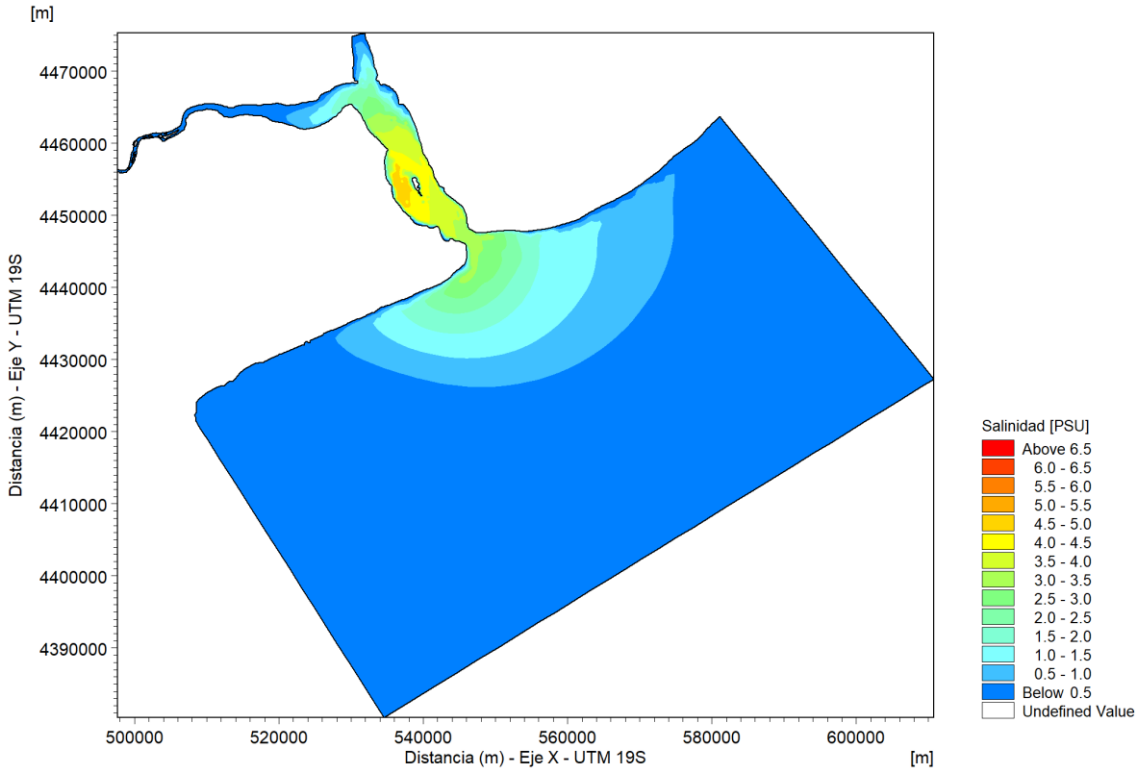


Figura 10.9.2.9 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{H2} y por el Q_{50}, en la capa de fondo.

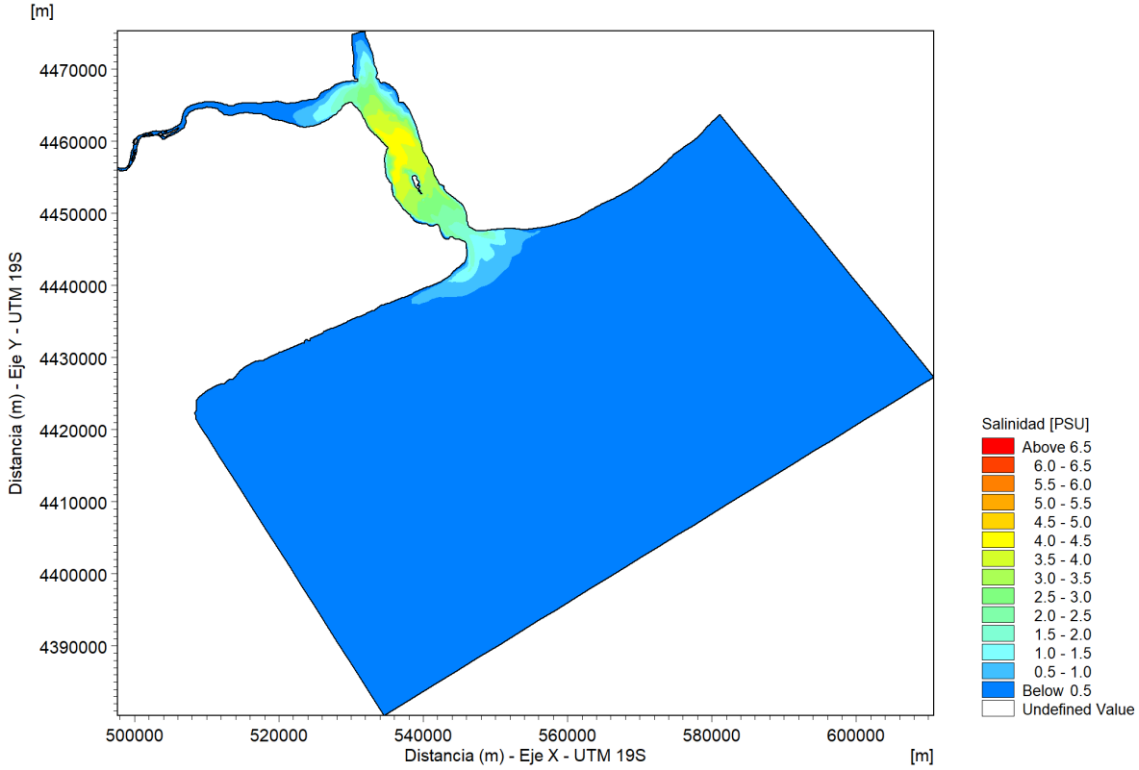
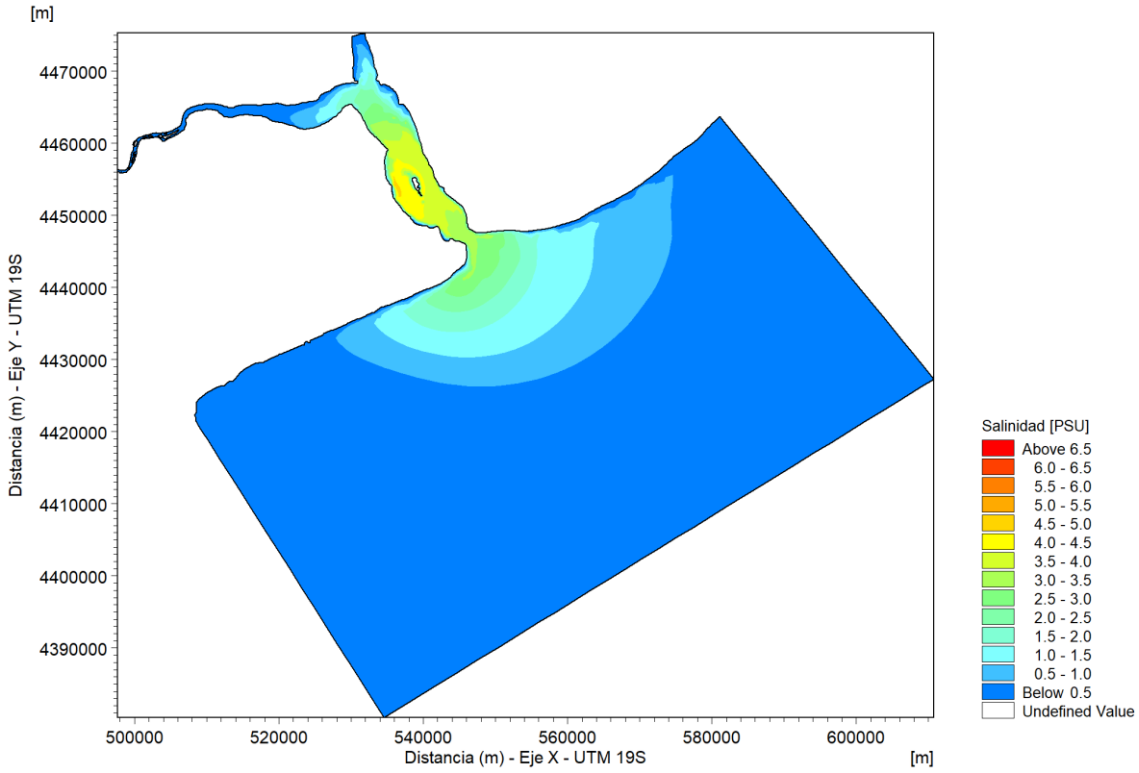


Figura 10.9.2.10 Diferencias medias de Salinidad producto de la resta entre los campos de salinidades generados por el Q_{H2} y por el Q_{50}, en la capa de superficial.



10.9.1.3. Comparaciones entre niveles del mar

Las Tablas 10.9.3.1 y 10.9.3.2 muestran los niveles del mar referidos al NMM en Punta Quilla (h), medios, mínimos y máximos en el período de llenado: 15 de noviembre y 1 de junio, para los 4 puntos de control.

Tabla 10.9.3.1 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (h_{med}), mínimo (h_{min}) y máximo (h_{max}) del nivel del mar referidos al NMM en Punta Quilla, generados en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	Q_{50}			Q_{75}			Q_{95}		
		h_{med}	h_{min}	h_{max}	h_{med}	h_{min}	h_{max}	h_{med}	h_{min}	h_{max}
Nivel del mar (m)	PC1	0.31	-5.64	6.27	0.30	-5.65	6.25	0.28	-5.66	6.22
	PC2	0.28	-5.53	6.25	0.28	-5.53	6.24	0.26	-5.54	6.22
	PC3	0.23	-5.57	6.12	0.22	-5.58	6.12	0.21	-5.58	6.10
	PC4	0.06	-5.81	5.61	0.06	-5.82	5.60	0.04	-5.83	5.59

Tabla 10.9.3.2 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del valor medio (h_{med}), mínimo (h_{min}) y máximo (h_{max}) del nivel del mar referidos al NMM en Punta Quilla, generados en los 4 puntos de control para 3 de los 6 caudales considerados.

Variable	Punto	$Q_{55\text{-}56}$			Q_{H1}			Q_{H2}		
		h_{med}	h_{min}	h_{max}	h_{med}	h_{min}	h_{max}	h_{med}	h_{min}	h_{max}
Nivel del mar (m)	PC1	0.26	-5.67	6.20	0.27	-5.67	6.22	0.28	-5.67	6.22
	PC2	0.24	-5.56	6.20	0.25	-5.55	6.21	0.25	-5.55	6.21
	PC3	0.19	-5.60	6.08	0.20	-5.59	6.09	0.20	-5.59	6.09
	PC4	0.03	-5.84	5.58	0.04	-5.84	5.59	0.04	-5.83	5.59

Para los niveles también han sido calculados el RECM y el SESGO. Estos resultados se presentan en las Tablas 10.9.2.3 y 10.9.2.4, en unidades de milímetros (mm) para observar detalles en los resultados de las simulaciones.

Tabla 10.9.3.3 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del RECM entre los niveles (en mm) generados por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación en los 4 puntos de control.

Variable	Punto	h producto del Q_{50}		RECM entre h producto del Q_{50} y h producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nivel del mar (mm)	PC1	308	2847	10	30	56	36	35
	PC2	284	2907	9	26	50	32	31
	PC3	232	2746	8	26	48	31	30
	PC4	63	2385	7	21	38	24	24

Tabla 10.9.3.4 Resumen estadístico de los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio), en términos del SESGO entre los niveles (en mm) generados por el Q_{50} y los 3 caudales de erogación en los 4 puntos de control.

Variable	Punto	h producto del Q_{50}		SESGO entre h producto del Q_{50} y h producto del				
		Media	Desvío	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nivel del mar (mm)	PC1	308	2847	-9	-28	-51	-34	-32
	PC2	284	2907	-8	-25	-46	-30	-29
	PC3	232	2746	-8	-24	-45	-29	-28
	PC4	63	2385	-6	-19	-34	-23	-22

- Las diferencias entre los niveles medios del mar son muy pobres, No superan los 0.06 m, con amplitudes del nivel en el estuario 2 órdenes mayor.

- El nivel medio del mar varía para los distintos puntos de control. Por ejemplo, se encuentra 308 mm (en PC1) por encima del nivel medio del mar fuera del estuario y cae hasta 63 mm en el PC4 más cercano al mar.

- El desvío de los niveles del mar para el caudal medio varía entre 2385 y 2907 mm por el efecto de la marea. Los RECM alcanzan un valor máximo de 56 mm ($Q_{55\text{-}56}$) que, comparado con los desvíos de los niveles del mar para el caudal medio, resulta insignificante.

- El SESGO permite ver que los caudales erogados bajan el nivel en el estuario (respecto a los producidos por Q_{50}) en valores despreciables, la mayor diferencia ocurre con el $Q_{55\text{-}56}$, con valores de -51 mm en el caso del PC1.

- Las modificaciones de los niveles del mar asociadas al llenado de las represas resultan despreciables comparadas con las variaciones naturales de niveles en el estuario.

10.9.1.4. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes del RSC y del RC

Se presentan a continuación los resultados de las simulaciones numéricas de sedimentos en suspensión en tablas que resumen las series de tiempo de concentraciones para el período del 15 de noviembre al 1 de junio, para los 4 puntos de control (PC1 a PC4), para el caudal mediano (Q_{50}) y los 5 caudales de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}).

En el borde del RSC para el Q_{50} se impone las concentraciones de sedimentos en suspensión medida y presentada en la Figura 7.18.3, pero dado que se espera que las

represas modifiquen esta concentración para los caudales de erogación se modifica este valor en base al estudio de Menéndez et al. (2017). Este informe presenta los resultados de una modelación hidrosedimentológica del río Santa Cruz (sin el estuario) para condiciones naturales, sin las represas, y con la presencia de estas. La Tabla 10.9.4.1 muestra los resultados de las simulaciones.

Tabla 10.9.4.1 Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas (Menéndez et al. 2017)

Condición	Lugar	Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	Lago Argentino	3.85	3.84	7.69	-
	Presa NK	4.97	3.84	8.81	-
	Presa JC	6.00	3.84	9.84	-
	Tramo inferior	8.16	3.84	12.00	-
Con presas	Lago Argentino	3.85	3.84	7.69	0%
	Presa NK	0.75	3.84	4.59	-48%
	Presa JC	0.32	3.84	4.16	-58%
	Tramo inferior	2.48	3.84	6.32	-47%

Algunas de sus conclusiones del estudio de Menéndez et al. (2017), relativas a la caída de concentraciones de sedimentos sedimentables por la presencia de las represas, son las siguientes:

- El río Santa Cruz recibe partículas sólidas generadas por erosión hídrica y eólica. La erosión hídrica (incluyendo la proveniente del descongelamiento de los glaciares) es preponderante en la cuenca alta, pero una parte significativa de estos sedimentos es atrapada por el Lago Argentino. Aguas abajo de este predomina la erosión hídrica lateral y la erosión eólica.
- Los sólidos incorporados como fase particulada (SST), que determinan la turbidez de las aguas, son transportados en suspensión hacia el estuario del río Santa Cruz. Incluyen una fracción sedimentable y una coloidal. Al emplazar las presas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic parte de la fracción sedimentable será atrapada en los respectivos embalses, reduciendo la concentración de sedimento suspendido que alcanza el estuario y, en consecuencia, la turbidez de las aguas.

- Por el efecto de atrapamiento de los dos embalses, el valor de concentración media anual de los sólidos sedimentables en suspensión en la desembocadura del río Santa Cruz caerá a prácticamente la mitad del correspondiente al escenario natural.

En resumen, los sedimentos en suspensión que ingresan al estuario se componen de dos fracciones: sedimentables y coloides. Las represas retendrán el 68% de los sedimentables y 0% de coloides. Estas son las condiciones impuestas en borde del RSC para realizar las simulaciones con los caudales de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}). Para las simulaciones sin represas (Q_{50}), no hay pérdida de concentraciones. Esto significa que el aporte del río Santa Cruz al estuario, considerando los caudales de erogación, no solo tendrán una disminución en su caudal, sino que también lo tendrá en las concentraciones de sedimentos en suspensión. Las Tablas 10.9.4.2 y 10.9.4.3 muestran un resumen de los resultados discriminados por mes.

Tabla 10.9.4.2 Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). En términos del valor medio (C_{med}), mínimo (C_{min}) y máximo (C_{max}) de las concentraciones de sedimentos en suspensión generadas en los 4 puntos de control y los 6 caudales considerados.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del Q_{50}			C (mg/l) producto del Q_{75}			C (mg/l) producto del Q_{95}		
		C_{med}	C_{min}	C_{max}	C_{med}	C_{min}	C_{max}	C_{med}	C_{min}	C_{max}
Nov	PC1	18	9	27	14	5	20	15	5	22
	PC2	18	9	27	15	8	21	15	8	23
	PC3	15	6	22	12	5	17	12	5	18
	PC4	9	2	18	8	2	14	8	2	15
Dic	PC1	18	5	26	13	3	20	15	3	21
	PC2	18	6	27	15	5	22	16	5	24
	PC3	15	3	24	12	3	19	13	3	20
	PC4	9	1	20	8	1	16	8	1	16
Ene	PC1	16	7	27	10	4	16	10	4	17
	PC2	15	6	24	10	5	17	11	5	19
	PC3	13	4	21	9	3	16	9	3	18
	PC4	9	2	18	6	1	15	6	1	16
Feb	PC1	19	8	33	10	4	18	10	5	17
	PC2	17	6	29	9	4	15	9	4	14
	PC3	15	4	26	8	3	13	8	3	12
	PC4	10	2	22	6	2	11	5	1	10
Mar	PC1	24	13	36	13	7	20	13	6	19
	PC2	22	7	34	12	4	19	11	4	19
	PC3	19	5	32	10	3	17	9	3	17
	PC4	13	3	28	7	2	15	6	2	14
Abr	PC1	25	10	42	17	5	37	20	5	43
	PC2	28	11	49	21	6	43	23	5	50
	PC3	24	7	41	17	4	36	18	4	41
	PC4	16	4	37	12	2	32	11	2	35
May	PC1	13	2	38	11	1	34	14	1	39
	PC2	17	4	38	15	3	36	19	4	44
	PC3	16	5	37	15	4	34	17	4	40
	PC4	12	3	37	11	2	32	12	3	35
Valor medio (mg/l)		**17**	**6**	**30**	**12**	**4**	**22**	**12**	**4**	**24**

Tabla 10.9.4.2 Continuación. Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario, para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). En términos del valor medio (med), mínimo (min) y máximo (max) de las concentraciones de sedimentos en suspensión generadas en los 4 puntos de control y los 6 caudales considerados.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del $Q_{55\text{-}56}$			C (mg/l) producto del Q_{H1}			C (mg/l) producto del Q_{H2}		
		C_{med}	C_{min}	C_{max}	C_{med}	C_{min}	C_{max}	C_{med}	C_{min}	C_{max}
Nov	PC1	16	6	23	16	6	23	15	5	22
	PC2	16	8	23	16	8	23	15	8	23
	PC3	12	5	18	12	5	18	12	5	18
	PC4	8	2	15	8	2	15	8	2	15
Dic	PC1	15	4	22	15	4	22	15	4	22
	PC2	16	5	25	16	5	25	16	5	25
	PC3	13	3	20	13	3	20	13	3	20
	PC4	8	1	17	8	1	17	8	1	17
Ene	PC1	11	5	19	11	5	19	11	5	19
	PC2	11	5	20	11	5	20	11	5	20
	PC3	10	3	19	10	3	19	10	3	19
	PC4	6	1	17	6	1	17	6	1	17
Feb	PC1	10	5	17	10	5	17	10	5	17
	PC2	9	4	14	9	4	14	9	4	14
	PC3	7	3	11	8	3	12	8	3	12
	PC4	5	1	10	5	1	10	5	1	10
Mar	PC1	12	6	19	13	6	19	13	6	19
	PC2	10	3	19	11	4	19	11	4	19
	PC3	8	2	16	9	3	17	9	3	17
	PC4	6	2	12	6	2	14	6	2	14
Abr	PC1	24	7	57	20	5	43	20	5	43
	PC2	25	4	66	23	5	50	23	5	50
	PC3	18	3	50	18	4	41	18	4	41
	PC4	10	2	39	11	2	35	11	2	35
May	PC1	23	3	56	14	1	39	14	1	39
	PC2	27	8	62	19	4	44	19	4	44
	PC3	22	5	50	17	4	40	17	4	40
	PC4	13	3	39	12	3	35	12	3	35
Valor medio (mg/l)		**13**	**4**	**28**	**12**	**4**	**25**	**12**	**4**	**25**

Tabla 10.9.4.3 Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). Los aportes de sedimentos al estuario son del río Chico y el Santa Cruz. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración promedio para un caudal Q_{50} es 18 mg/l, y que el error con el caudal de Q_{75} es de 4 mg/l.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del Q_{50}				RECM entre C (mg/l) producto del Q_{50} y C (mg/l) producto del				
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	18	4	9	27	4	3	3	3	3
	PC2	18	4	9	27	3	3	2	2	3
	PC3	15	4	6	22	3	2	2	2	2
	PC4	9	5	2	18	2	2	2	2	2
Dic	PC1	18	4	5	26	4	3	3	3	3
	PC2	18	5	6	27	3	3	2	2	2
	PC3	15	5	3	24	3	3	2	2	3
	PC4	9	6	1	20	2	2	2	2	2
Ene	PC1	16	3	7	27	6	6	5	5	5
	PC2	15	3	6	24	5	5	4	4	4
	PC3	13	4	4	21	4	4	4	4	4
	PC4	9	5	2	18	3	3	3	3	3
Feb	PC1	19	4	8	33	9	9	9	9	9
	PC2	17	4	6	29	8	8	9	8	8
	PC3	15	5	4	26	7	8	8	8	8
	PC4	10	5	2	22	5	5	6	5	5
Mar	PC1	24	5	13	36	11	12	13	12	12
	PC2	22	5	7	34	10	11	12	11	11
	PC3	19	6	5	32	9	10	12	10	10
	PC4	13	7	3	28	7	8	9	8	8
Abr	PC1	25	8	10	42	7	6	9	6	6
	PC2	28	8	11	49	7	6	8	6	6
	PC3	24	8	7	41	7	6	7	6	6
	PC4	16	9	4	37	5	6	7	6	6
May	PC1	13	8	2	38	3	3	13	3	3
	PC2	17	8	4	38	2	3	12	3	3
	PC3	16	8	5	37	2	2	8	2	2
	PC4	12	8	3	37	2	1	4	1	1
Valor medio (mg/l)		**17**	**6**	**6**	**30**	**5**	**5**	**6**	**5**	**5**

Tabla 10.9.4.4 Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario, para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). Los aportes de sedimentos al estuario son del río Chico y el Santa Cruz. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración promedio para un caudal Q_{50} es 18 mg/l, que disminuye 4 mg/l (déficit) para Q_{75}.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del Q_{50}				SESGO entre C (mg/l) producto del Q_{50} y C (mg/l) producto del				
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	18	4	9	27	-4	-3	-2	-2	-3
	PC2	18	4	9	27	-3	-3	-2	-2	-3
	PC3	15	4	6	22	-3	-2	-2	-2	-2
	PC4	9	5	2	18	-1	-2	-2	-2	-2
Dic	PC1	18	4	5	26	-4	-3	-2	-2	-2
	PC2	18	5	6	27	-3	-3	-2	-2	-2
	PC3	15	5	3	24	-3	-3	-2	-2	-2
	PC4	9	6	1	20	-2	-2	-2	-2	-2
Ene	PC1	16	3	7	27	-6	-5	-5	-5	-5
	PC2	15	3	6	24	-5	-4	-4	-4	-4
	PC3	13	4	4	21	-4	-4	-4	-4	-4
	PC4	9	5	2	18	-2	-2	-2	-2	-2
Feb	PC1	19	4	8	33	-9	-9	-9	-9	-9
	PC2	17	4	6	29	-8	-8	-8	-8	-8
	PC3	15	5	4	26	-6	-7	-7	-7	-7
	PC4	10	5	2	22	-4	-5	-5	-5	-5
Mar	PC1	24	5	13	36	-11	-11	-12	-11	-11
	PC2	22	5	7	34	-10	-11	-12	-11	-11
	PC3	19	6	5	32	-9	-10	-11	-10	-10
	PC4	13	7	3	28	-6	-7	-8	-7	-7
Abr	PC1	25	8	10	42	-7	-5	-1	-5	-5
	PC2	28	8	11	49	-7	-5	-3	-5	-5
	PC3	24	8	7	41	-6	-6	-6	-6	-6
	PC4	16	9	4	37	-5	-5	-6	-5	-5
May	PC1	13	8	2	38	-2	1	10	1	1
	PC2	17	8	4	38	-2	1	10	1	1
	PC3	16	8	5	37	-2	1	6	1	1
	PC4	12	8	3	37	-2	-1	1	-1	-1
Valor medio (mg/l)		**17**	**6**	**6**	**30**	**-5**	**-4**	**-3**	**-4**	**-4**

La Tabla 10.9.4.2 muestra que la presencia de los embalses (simulaciones con los caudales de erogación) genera menores concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario. La Tabla 10.9.4.3 muestra que el SESGO para todos los meses es negativo, menos para el mes de mayo, para el caudal $Q_{55\text{-}56}$. Esto indica que, en general, hay un déficit de concentraciones de sedimentos en suspensión para los distintos caudales de erogación, cuando se comparan las concentraciones con el caudal sin represas (Q_{50}).

La magnitud de ese déficit cambia con los meses, dependiendo de los caudales y concentraciones de sedimentos (aportes) de los ríos tributarios. En términos de las concentraciones de sedimentos en suspensión, el déficit disminuye hacia el mar acompañando a la caída de las concentraciones medias asociadas a Q_{50}.

Las concentraciones generadas por el Q_{50} y los 5 caudales de erogación no muestran diferencias significativas entre sí, para ninguno de los meses considerados. Por ejemplo, en diciembre el déficit de concentraciones en PC1 es de 4 mg/l (para Q_{75}) y de 2 mg/l (para $Q_{55\text{-}56}$); mientras que en marzo es de 11 mg/l (para Q_{75}) y de 12 mg/l (para $Q_{55\text{-}56}$). Mayores diferencias en las concentraciones se observan al comparar diferentes meses que al comparar diferentes caudales de erogación.

En promedio, para todos los meses y todos los puntos de control, la disminución en las concentraciones es de 5 mg/l, mientras que el desvío estándar generado por el caudal Q_{50} (variaciones naturales) es de 6 mg/l (Tabla 10.9.4.4).

Aun comparando por punto y por mes, las diferencias de concentraciones entre los caudales de erogación y el Q_{50} son menores al rango de variación natural esperado (diferencias entre máximos y mínimos generados por el caudal Q_{50}).

Las concentraciones de sedimentos en suspensión, registradas en Punta Quilla (no resultados de modelo), tienen un valor medio de unos 30 mg/l, con variaciones diarias de unos 26 mg/l (Tabla 8.8.2).

Con las condiciones de Q_{50} (sin represas) las concentraciones medias, para los 4 puntos y para todos los meses variaron, entre 9 y 28 mg/l, correspondiendo la menor concentración media al punto más cercano al mar (PC4), en las proximidades de Punta Quilla. Los desvíos para cada punto variaron entre 3 y 9 mg/l para el período de llenado (Tabla 10.9.4.4). Estos valores de concentraciones se generan por los aportes del río Santa Cruz y el río Chico.

La Tabla 10.9.4.5 muestra los resultados de las Tabla 10.9.4.3 y 10.9.4.4 en porcentajes. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración generada por el caudal Q_{50} de 18 mg/l, ha disminuido un 25% (déficit) respecto de la generada por el caudal Q_{75}. La Tabla 10.9.4.6 muestra caudales y

concentraciones promediadas en el período de modelación. El río Chico posee altas concentraciones de sedimento en suspensión y caudal pobre, relación que se invierte para el río Santa Cruz, de caudal importante y bajas concentraciones de sedimentos en suspensión.

Tabla 10.9.4.5 Resultados de las Tabla 10.9.4.3 y 7.1.4.4 en porcentajes de los cambios en las concentraciones (C). Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración para Q_{50} es 18 mg/l, que ha disminuido 25% (déficit) para Q_{75}.

Mes	Punto	RECM (%) entre la C producto del Q_{50} y la C producto del					SESGO (%) entre la C producto del Q_{50} y la C producto del				
		Q_{75}	Q_{95}	Q_{55-56}	Q_{H1}	Q_{H2}	Q_{75}	Q_{95}	Q_{55-56}	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	25	19	16	16	19	-24	-17	-12	-12	-17
	PC2	19	15	14	14	15	-18	-15	-13	-13	-15
	PC3	19	17	17	17	17	-18	-16	-16	-16	-16
	PC4	18	19	20	20	19	-16	-17	-18	-18	-17
Dic	PC1	24	19	16	16	17	-23	-17	-13	-13	-14
	PC2	19	15	13	13	14	-19	-15	-12	-12	-13
	PC3	20	18	16	16	17	-19	-17	-15	-15	-16
	PC4	22	21	21	21	22	-19	-19	-18	-18	-19
Ene	PC1	39	37	35	35	35	-36	-33	-29	-29	-29
	PC2	34	32	30	30	30	-31	-29	-25	-25	-25
	PC3	33	32	31	31	31	-30	-28	-27	-27	-27
	PC4	34	34	35	35	35	-28	-28	-29	-29	-29
Feb	PC1	47	49	50	49	49	-46	-47	-48	-47	-47
	PC2	47	50	52	50	50	-45	-48	-50	-48	-48
	PC3	47	51	54	51	51	-44	-48	-51	-48	-48
	PC4	49	55	59	55	55	-41	-47	-50	-47	-47
Mar	PC1	47	49	52	49	49	-46	-48	-50	-48	-48
	PC2	48	51	56	51	51	-46	-49	-54	-49	-49
	PC3	49	54	60	54	54	-46	-51	-57	-51	-51
	PC4	51	58	66	58	58	-45	-52	-58	-52	-52
Abr	PC1	30	26	35	26	26	-29	-21	-3	-21	-21
	PC2	25	22	30	22	22	-24	-18	-10	-18	-18
	PC3	28	27	31	27	27	-27	-24	-24	-24	-24
	PC4	32	34	41	34	34	-29	-31	-36	-31	-31
May	PC1	19	24	101	24	24	-18	5	78	5	5
	PC2	12	17	71	17	17	-11	8	56	8	8
	PC3	12	13	50	13	13	-12	4	34	4	4
	PC4	15	12	32	12	12	-13	-6	6	-6	-6
Valor medio (%)		**31**	**31**	**39**	**31**	**31**	**-29**	**-26**	**-19**	**-25**	**-25**

Tabla 10.9.4.6 Caudales, concentraciones de sedimentos y flujo de masa en suspensión promediadas en el período de modelación para los ríos Chico y Santa Cruz

Río	Caudal (m^3/s)	Concentración (mg/l)	Masa (kg/s)
Chico	22	197	4.3
Santa Cruz	946	19	18.0

Las Figuras 10.9.4.1 a 10.9.4.3 presentan las series de tiempo de caudal y concentraciones de sedimentos en suspensión en río Chico, de caudales en río Chico y Santa Cruz por separado y juntas; y la concentración de sedimentos en suspensión por separado y juntas. Estas figuras permiten comprender los análisis que se presentan a continuación.

Figura 10.9.4.1 Series de tiempo de caudal y concentración de sedimentos en suspensión en base a las mediciones mensuales en río Chico.

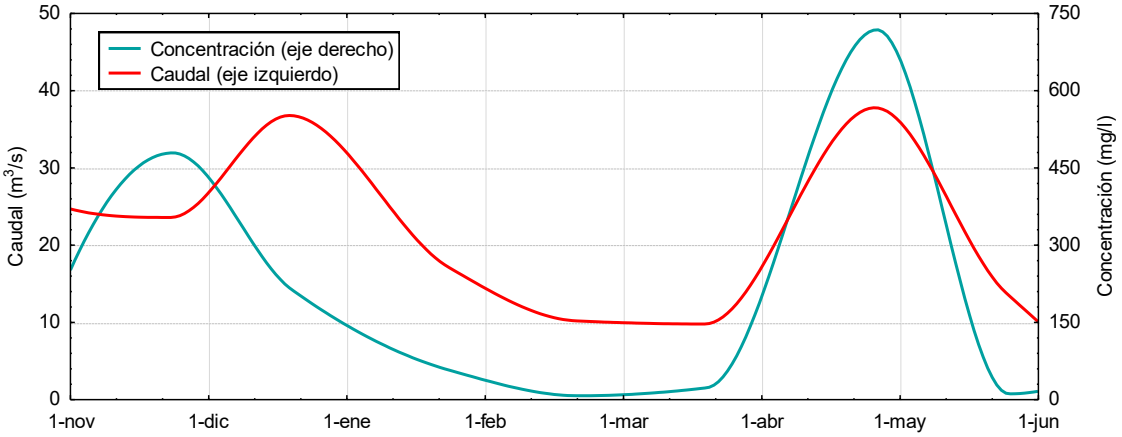


Figura 10.9.4.2 Series de tiempo de caudales en río Santa Cruz y río Chico. Se presenta el caso de caudal Q_{50} utilizado para las simulaciones sin las represas.

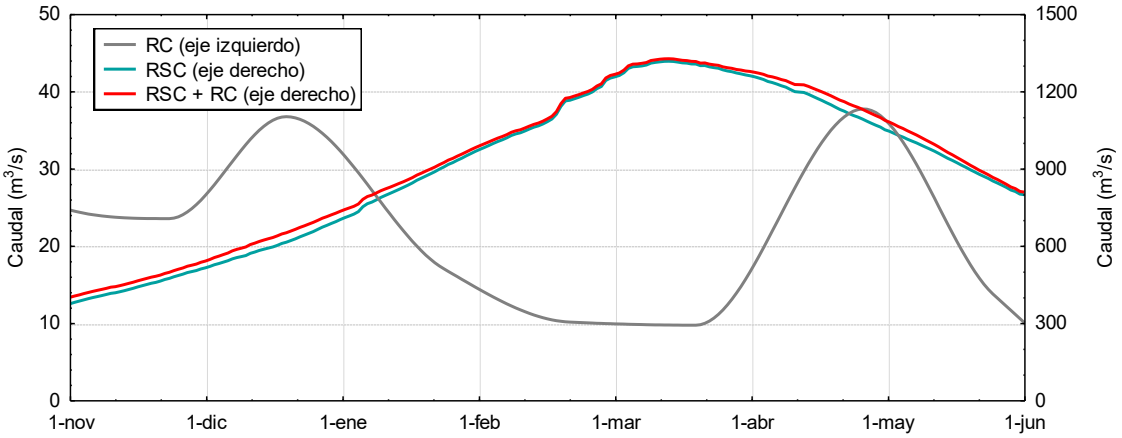
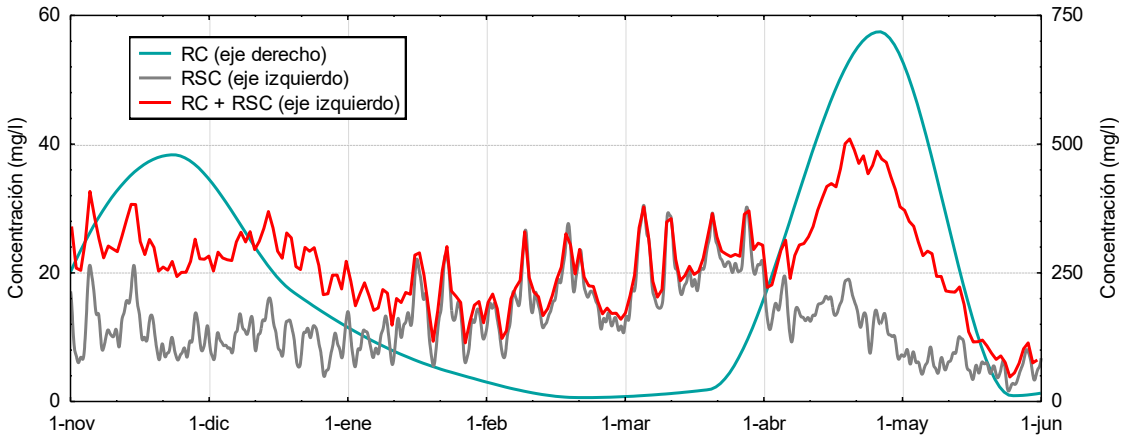


Figura 10.9.4.3 Series de tiempo de concentración de sedimentos en suspensión en base a las mediciones mensuales en río Chico (RC), a las registradas en Isla Pavón basadas en la turbidez (RSC) y a la suma relativa al caudal de cada río.



Las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario deben explicarse considerando el aporte de ambos ríos. Para ello, se consideran los siguientes 3 casos agrupados por meses:

- noviembre - diciembre – enero
- febrero – marzo
- abril – mayo

Estos casos combinan caudales y concentraciones de ambos ríos. Se analizan las concentraciones en PC1 (más cercano a la desembocadura de ambos ríos en el estuario) que es el que presenta mayores diferencias con la condición de referencia (Q_{50}).

Noviembre y diciembre

- Las condiciones medias del río Chico son representadas por los meses de noviembre y diciembre (ver Figura 10.9.4.1).
- Para el mes de noviembre, el déficit de concentraciones varió entre 1 mg/l y 4 mg/l para los 5 caudales erogados y para todos los puntos de control, esto es entre 12% y 34%, con un promedio (para los 5 caudales y los 4 puntos) de 16%.
- Puede decirse algo similar para el mes de diciembre. En este caso, el déficit de concentraciones varió entre 2 mg/l y 4 mg/l para los 5 caudales erogados y para todos los puntos de control, esto es entre 12 % y 23%, con un promedio (para los 5 caudales y los 4 puntos) de 16%.

Febrero y marzo

- En el mes de febrero se registraron caudales y concentraciones bajas en el río Chico (Figura 10.9.4.1). En el punto de control PC1, el déficit de concentraciones es de 9 mg/l (Tabla 10.9.4.3), correspondiente al 47% del valor medio (Tabla 10.9.4.5).
- Para el mes de marzo puede decirse algo similar. Se registraron los caudales y concentraciones bajos en el río Chico. En el punto de control PC1, el déficit de concentraciones varió entre 11 mg/l y 12 mg/l (Tabla 10.9.4.4). El mayor de ellos correspondió con el caudal menor ($Q_{55\text{-}56}$). Esto es, el déficit de concentraciones varió entre el 46% y el 50% del valor medio (Tabla 10.9.4.5).
- Para los meses de febrero y marzo, la Figura 10.9.4.3 muestra que la concentración total (producto de la descarga de ambos ríos) es muy parecida a la concentración de los sedimentos que trae el río Santa Cruz, pues casi no hay aporte del río Chico. Por lo tanto, es esperable que el déficit sea mayor (para los meses de febrero y marzo, el déficit promedio para los 4 puntos de control es del 49%).

Abril y mayo

- En el mes de abril se registraron caudales y concentraciones altas en el río Chico (Figura 10.9.4.1). En el punto de control PC1, el déficit de concentraciones varío entre 1 mg/l y 7 mg/l (Tabla 10.9.4.4). El mayor de ellos correspondió con el caudal de erogación mayor (Q_{75}). El déficit de concentraciones varió entre el 3% y el 29% del valor medio, menor que para los meses de febrero y marzo (Tabla 10.9.4.5).
- Para el mes de mayo en el río Chico se registraron caudales y concentraciones muy altas hacia principio de mes, y muy bajas finalizándolo (Figura 10.9.4.2). Con respecto al RSC, este mes muestra concentraciones bajas asociadas al Q_{50}, por lo que relativamente es más importante la influencia del río Chico en las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario. Esto genera que, dependiendo del caudal de erogación, se observe déficit y superávit de concentraciones para este mes. En el punto de control PC1 el sesgo de concentraciones varió entre -2 mg/l (déficit) y 10 mg/l (superávit), ver Tabla 10.9.4.4. El déficit corresponde al mayor caudal de erogación (Q_{75}) y el superávit al menor ($Q_{55\text{-}56}$).

- Para los meses de abril y mayo, la Figura 10.6.4.3 muestra que la concentración total (producto de la descarga de ambos ríos) es influenciada por el río Chico alterando las concentraciones que trae el río Santa Cruz. Por lo tanto, es razonable que el déficit sea menor en PC1 y que el superávit sea el mayor en este punto.

Respecto del déficit de concentraciones para los distintos caudales de erogación, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- En los meses de febrero y marzo cuando el río Chico tiene un bajo aporte de sedimentos, se observa que con menores caudales del río Santa Cruz (por ejemplo, de Q_{75} a $Q_{55\text{-}56}$) hay un mayor déficit de concentraciones. En febrero, por ejemplo, puede verse que el déficit de concentraciones en el punto PC3 es de 9 mg/l (para Q_{75}) y de 11 mg/l ($Q_{55\text{-}56}$).
- Pero no siempre una disminución en el caudal del Río del Santa Cruz (por ejemplo, de Q_{75} a $Q_{55\text{-}56}$) produce un aumento en el déficit de concentraciones en el estuario.
- En los meses de abril y mayo en los que el río Chico aporta muchos sedimentos, a menor caudal de erogación ($Q_{75} > Q_{95} > Q_{H2} > Q_{H1} > Q_{55\text{-}56}$) menor es el déficit de concentraciones en el estuario incluso en mayo se observa superávit para el caudal $Q_{55\text{-}56}$ principalmente. Esto se observa de manera más clara cerca de la fuente (puntos PC1 y PC2). En mayo, por ejemplo, puede verse que hay un déficit de concentraciones en el punto PC1 de 2 mg/l (para Q_{75}) y que hay superávit de 10 mg/l (para $Q_{55\text{-}56}$).

El río Chico tiene mayor incidencia en las concentraciones del estuario cuando el caudal erogado del río Santa Cruz es menor. Esto implica que a menor caudal del río Santa Cruz hay menos cantidad de agua para diluir los sedimentos que aporta el río Chico.

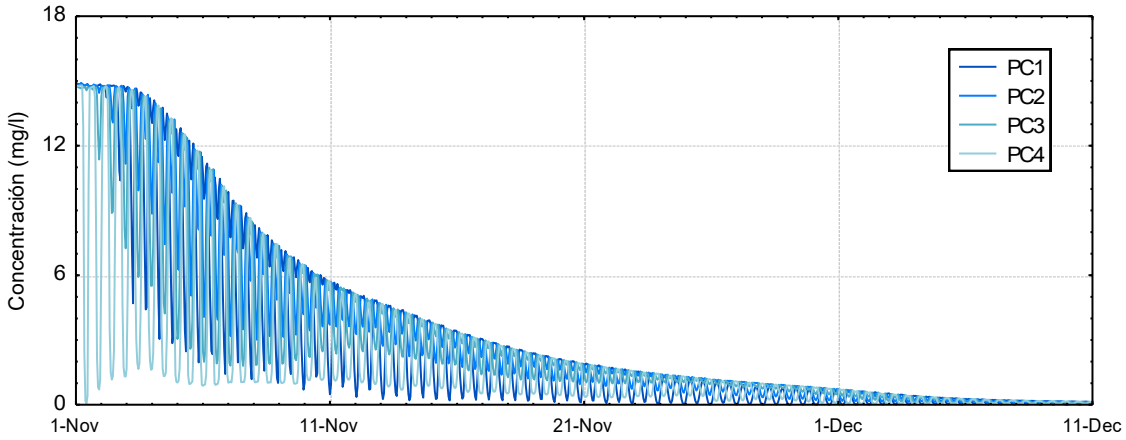
Tiempo de residencia

Se realizó una simulación para calcular el tiempo de residencia de los sedimentos en el estuario. Se inicia con el río Santa Cruz, río Chico y estuario con una concentración de 15 mg/l que se dejó evolucionar para identificar las concentraciones en el dominio de simulación. Se utilizó el caudal mediano (Q_{50}) durante noviembre y parte de diciembre (caudales relativamente pobres) y en los bordes del RSC y RC (fuentes de sedimentos hacia el estuario) la concentración de sedimentos en suspensión fue cero. Los resultados

se presentan en la Figura 10.9.4.4 donde se muestran las de series de tiempo de las concentraciones de sedimentos en suspensión en los puntos de control.

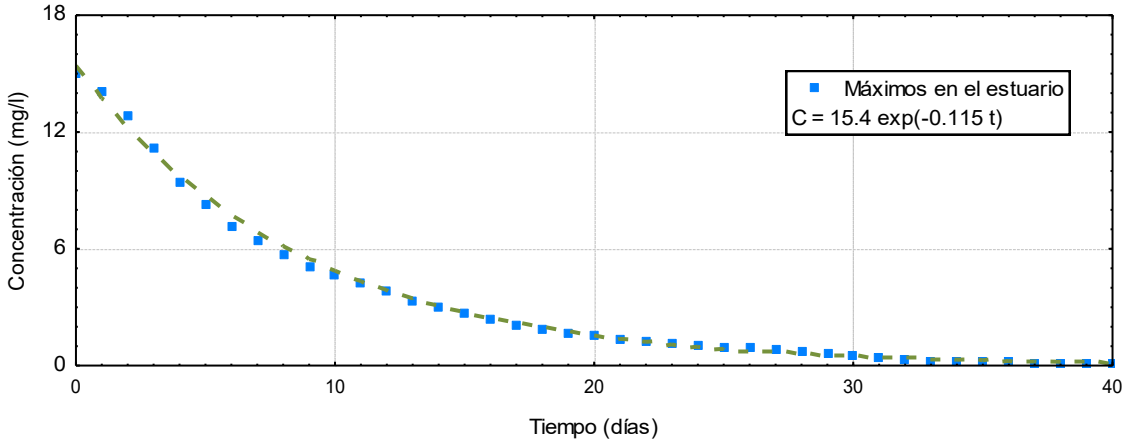
Puede verse que, al cabo de 10 días, las concentraciones máximas en el estuario cayeron a valores de unos 5 mg/l, a los 20 días los máximos están por debajo de 2 mg/l, a los 30 días por debajo de 0.7 mg/l y a los 40 días por debajo de 0.2 mg/l (Figura 10.9.4.4).

Figura 10.9.4.4 Evolución temporal de las concentraciones de los sedimentos en suspensión en los puntos de control durante algo más de un mes de simulación para un escenario de turbidez cero en las aguas de los ríos.



Si se analiza la caída exponencial de los máximos, el ajuste es muy bueno con una formulación de C(mg/l) = 15.4 exp(-0.115 t), con el tiempo (t) en días. La Figura 10.9.4.5 presenta los máximos diarios de concentración de sedimentos en suspensión en el interior del estuario (que como se observa en la Figura 10.9.4.4 son iguales independientemente del punto) y el ajuste de la exponencial.

Figura 10.9.4.5 Máximos diarios de concentración de sedimento en suspensión en el interior del estuario (que como se observa en la Figura 10.9.4.4 son iguales independientemente del punto) y el ajuste de la exponencial.



10.9.1.5. Comparaciones entre concentraciones de sedimentos. Aportes de RSC solamente

Con el modelo funcionando y calibrado es posible estudiar aspectos no realistas que permiten un mejor entendimiento del sistema, en este caso se utilizará para simular el comportamiento de los sedimentos en suspensión cuando la fuente al estuario es solamente el río Santa Cruz. Esto es, se impone que el borde del río Chico tenga un caudal (pobre, como fue mostrado antes) con concentración de sedimentos en suspensión igual a 0 mg/l. A continuación se presentan los resultados de las mismas simulaciones que en el punto anterior pero ahora sin el aporte de los sedimentos del río Chico. De esta forma es posible establecer la importancia relativa de ambos ríos en las concentraciones de sedimentos en suspensión. Las Tablas 10.9.5.1 y 10.9.5.2 muestran los resultados discriminados por mes, para los puntos de control utilizados antes.

Tabla 10.9.5.1 Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). El aporte de sedimentos lo hace el río Santa Cruz solamente. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración promedio para un caudal Q_{50} es 12 mg/l, y que el error con el caudal de Q_{75} es de 5 mg/l.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del Q_{50}		RECM entre C (mg/l) producto del Q_{50} y C (mg/l) producto del				
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	12	3	5	5	5	5	5
	PC2	11	2	4	4	4	4	4
	PC3	9	2	3	3	3	3	3
	PC4	7	3	2	2	2	2	2
Dic	PC1	11	2	5	5	5	5	5
	PC2	9	2	4	4	4	4	4
	PC3	8	2	3	4	4	4	4
	PC4	5	3	2	2	2	2	2
Ene	PC1	13	4	6	7	7	7	7
	PC2	11	4	6	6	6	6	6
	PC3	10	4	5	5	6	6	6
	PC4	6	4	3	3	4	4	4
Feb	PC1	18	5	9	9	10	9	9
	PC2	17	4	8	9	9	9	9
	PC3	14	5	7	8	8	8	8
	PC4	10	5	5	6	6	6	6
Mar	PC1	24	5	11	12	13	12	12
	PC2	22	5	10	11	12	11	11
	PC3	19	6	9	10	12	10	10
	PC4	13	7	7	8	9	8	8
Abr	PC1	17	3	8	8	9	8	8
	PC2	16	3	8	8	9	8	8
	PC3	15	4	7	7	8	7	7
	PC4	11	5	5	6	7	6	6
May	PC1	7	2	3	3	3	3	3
	PC2	7	2	3	3	3	3	3
	PC3	7	2	3	3	3	3	3
	PC4	6	3	2	3	3	3	3
Valor medio (mg/l)		**12**	**4**	**5**	**6**	**6**	**6**	**6**

Con las condiciones de Q_{50} (sin represas) las concentraciones medias, para los 4 puntos y para todos los meses, variaron entre 5 mg/l y 24 mg/l, correspondiendo la menor concentración media al punto más cercano al mar (PC4), en las proximidades de Punta Quilla. Los desvíos estándar variaron entre 2 mg/l y 7 mg/l para el período de llenado (Tabla 10.9.5.1). Estos valores de concentraciones se generan por los aportes del río Santa Cruz solamente.

Tabla 10.9.5.2 Resumen estadístico, mensual, de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para los 6.5 meses de modelación (15 de noviembre a 1 de junio). El aporte de sedimentos lo hace el río Santa Cruz solamente. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración promedio para un caudal Q_{50} es 12 mg/l, que disminuye 5 mg/l (déficit) para Q_{75}.

Mes	Punto	C (mg/l) producto del Q_{50}		SESGO entre C (mg/l) producto del Q_{50} y C (mg/l) producto del				
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	12	3	-5	-5	-4	-4	-5
	PC2	11	2	-4	-4	-3	-3	-4
	PC3	9	2	-3	-3	-3	-3	-3
	PC4	7	3	-1	-2	-2	-2	-2
Dic	PC1	11	2	-5	-5	-5	-5	-5
	PC2	9	2	-4	-4	-4	-4	-4
	PC3	8	2	-3	-3	-3	-3	-3
	PC4	5	3	-2	-2	-2	-2	-2
Ene	PC1	13	4	-6	-6	-7	-7	-7
	PC2	11	4	-5	-5	-6	-6	-6
	PC3	10	4	-4	-5	-5	-5	-5
	PC4	6	4	-3	-3	-3	-3	-3
Feb	PC1	18	5	-9	-9	-9	-9	-9
	PC2	17	4	-8	-8	-9	-8	-8
	PC3	14	5	-7	-7	-8	-7	-7
	PC4	10	5	-4	-5	-5	-5	-5
Mar	PC1	24	5	-11	-12	-12	-12	-12
	PC2	22	5	-10	-11	-12	-11	-11
	PC3	19	6	-9	-10	-11	-10	-10
	PC4	13	7	-6	-7	-8	-7	-7
Abr	PC1	17	3	-8	-8	-8	-8	-8
	PC2	16	3	-7	-8	-8	-8	-8
	PC3	15	4	-7	-7	-8	-7	-7
	PC4	11	5	-5	-5	-6	-5	-5
May	PC1	7	2	-3	-3	-3	-3	-3
	PC2	7	2	-3	-3	-3	-3	-3
	PC3	7	2	-3	-3	-3	-3	-3
	PC4	6	3	-2	-2	-3	-2	-2
Valor medio (mg/l)		**12**	**4**	**-5**	**-6**	**-6**	**-6**	**-6**

El SESGO para todos los meses es negativo. Esto indica que hay menores concentraciones de sedimentos en suspensión para las simulaciones con de los distintos caudales de erogación, comparadas con el caudal sin represas (Q_{50}). La magnitud de ese déficit cambia con los meses, dependiendo del caudal y concentraciones de sedimentos

(aportes) del río Santa Cruz. En términos de concentraciones, el déficit disminuye hacia el mar acompañando a la caída de las concentraciones medias asociadas a Q_{50}.

Tabla 10.9.5.3 Resultados de las Tabla 10.9.5.1 y 10.9.5.2 en porcentajes. Para el mes de noviembre y para el punto de control PC1, debe leerse que la concentración para Q_{50} es 18 mg/l, que ha disminuido 25% (déficit) para Q_{75}.

Mes	Punto	RECM (%) entre la C producto del Q_{50} y la C producto del					SESGO (%) entre la C producto del Q_{50} y la C producto del				
		Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	PC1	42	42	41	41	42	-40	-39	-38	-38	-39
	PC2	36	35	34	34	35	-34	-33	-33	-33	-33
	PC3	31	31	31	31	31	-29	-29	-29	-29	-29
	PC4	27	27	28	28	27	-22	-23	-24	-24	-23
Dic	PC1	46	48	48	48	48	-45	-46	-47	-47	-47
	PC2	45	46	47	47	47	-43	-44	-45	-45	-45
	PC3	43	45	46	46	46	-40	-42	-43	-43	-43
	PC4	42	44	46	46	46	-35	-37	-39	-39	-39
Ene	PC1	49	51	55	55	55	-47	-48	-51	-51	-51
	PC2	49	52	57	57	57	-46	-48	-53	-53	-53
	PC3	49	52	58	58	58	-45	-48	-53	-53	-53
	PC4	50	55	62	62	62	-41	-45	-50	-50	-50
Feb	PC1	48	50	52	50	50	-46	-48	-50	-48	-48
	PC2	48	52	56	53	53	-46	-50	-53	-51	-51
	PC3	49	54	58	55	55	-46	-51	-55	-51	-51
	PC4	51	58	63	59	59	-43	-50	-54	-51	-51
Mar	PC1	48	50	53	50	50	-47	-48	-51	-48	-48
	PC2	48	52	58	52	52	-47	-50	-55	-50	-50
	PC3	49	54	61	54	54	-47	-52	-58	-52	-52
	PC4	52	59	67	59	59	-46	-52	-59	-52	-52
Abr	PC1	47	48	50	48	48	-46	-47	-48	-47	-47
	PC2	46	48	52	48	48	-46	-47	-51	-47	-47
	PC3	47	49	55	49	49	-45	-47	-53	-47	-47
	PC4	48	52	60	52	52	-43	-47	-55	-47	-47
May	PC1	47	46	46	46	46	-45	-44	-41	-44	-44
	PC2	45	44	44	44	44	-43	-42	-41	-42	-42
	PC3	44	44	46	44	44	-41	-41	-42	-41	-41
	PC4	44	46	52	46	46	-38	-40	-45	-40	-40
Valor medio (%)		**45**	**48**	**51**	**49**	**49**	**-42**	**-44**	**-47**	**-45**	**-45**

Para estas simulaciones (sin el aporte de sedimentos del río Chico) se observa que, a menores caudales del río Santa Cruz ($Q_{75} > Q_{95} > Q_{H2} > Q_{H1} > Q_{55\text{-}56}$), mayores déficits de concentraciones para todos los puntos y para todos los meses (Tablas 10.9.5.1 y 10.9.5.2).

Los déficits de concentraciones para los 5 caudales de erogación difieren más entre los meses considerados que entre los diferentes caudales de erogación.

Sin el aporte del río Chico, las caídas en las concentraciones están asociadas a la disminución del 68% de los sedimentables en las represas.

Tabla 10.9.5.4 Diferencias entre las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para los casos que los aportes sean de ambos ríos o solamente el río Santa Cruz

Mes	Punto	Aporte de sedimentos de los Ríos Chico y Santa Cruz		Aporte de sedimentos del río Santa Cruz		Diferencia entre valores medios (mg/l)
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	
Nov	PC1	18	4	12	3	6
	PC2	18	4	11	2	7
	PC3	15	4	9	2	6
	PC4	9	5	7	3	2
Dic	PC1	18	4	11	2	7
	PC2	18	5	9	2	9
	PC3	15	5	8	2	7
	PC4	9	6	5	3	4
Ene	PC1	16	3	13	4	3
	PC2	15	3	11	4	4
	PC3	13	4	10	4	3
	PC4	9	5	6	4	3
Feb	PC1	19	4	18	5	1
	PC2	17	4	17	4	0
	PC3	15	5	14	5	1
	PC4	10	5	10	5	0
Mar	PC1	24	5	24	5	0
	PC2	22	5	22	5	0
	PC3	19	6	19	6	0
	PC4	13	7	13	7	0
Abr	PC1	25	8	17	3	8
	PC2	28	8	16	3	12
	PC3	24	8	15	4	9
	PC4	16	9	11	5	5
May	PC1	13	8	7	2	6
	PC2	17	8	7	2	10
	PC3	16	8	7	2	9
	PC4	12	8	6	3	6

El río Chico hace un aporte a las concentraciones de sedimentos en el estuario, variable para los distintos meses dependiendo de los aportes de cada uno de los ríos. La influencia del río Chico se observa en todas las concentraciones asociadas al Q_{50} con una contribución media de unos 5 mg/l (ver Tablas 10.9.5.4 y 10.9.5.5).

Los déficits de concentraciones son similares con y sin río Chico salvo en los meses de abril y mayo, cuando el aporte de sedimentos del río Chico es muy importante. La Tabla 10.9.5.5 muestra las diferencias de concentraciones promedio para los 4 puntos de control de la condición Q_{50} (aportes de ambos ríos) y las condiciones con los 5 caudales erogados por las represas (aportes de ambos ríos). Además, muestra las mismas diferencias con los aportes del río Santa Cruz solamente.

Tabla 10.9.5.5 Síntesis de los resultados de concentraciones de sedimentos en suspensión (C) medias mensuales (promedio sobre los 4 puntos de control) para la condición Q_{50} (sin represas) cuando los aportes los hacen los dos ríos o el río Santa Cruz solamente

Mes	C (mg/l) producto del Q_{50} con aportes de sedimentos de los ríos Chico y Santa Cruz		C (mg/l) producto del Q_{50} con aportes de sedimentos del río Santa Cruz		Diferencia entre valores medios (mg/l)
	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	
Nov	15	6	10	5	5
Dic	15	4	8	3	7
Ene	13	5	10	3	3
Feb	15	5	15	5	0
Mar	20	7	19	7	0
Abr	23	8	15	6	8
May	15	3	7	3	8
Valor Medio	**17**	**6**	**12**	**5**	**5**

Tabla 10.9.5.6 Síntesis de los resultados de concentraciones medias mensuales (promedio sobre los 4 puntos de control) para la condición Q50 (sin represas) cuando los aportes los hacen los dos ríos o el río Santa Cruz solamente, en términos del SESGO.

Mes	Aporte de sedimentos de los ríos Chico y Santa Cruz					Aporte de sedimentos del río Santa Cruz				
	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}	Q_{75}	Q_{95}	$Q_{55\text{-}56}$	Q_{H1}	Q_{H2}
Nov	-3	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3
Dic	-3	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-4
Ene	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-5
Feb	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-8	-7	-7
Mar	-9	-10	-11	-10	-10	-9	-10	-11	-10	-10
Abr	-6	-5	-4	-5	-5	-7	-7	-8	-7	-7
May	-2	0	7	0	0	-3	-3	-3	-3	-3
Valor Medio	**-5**	**-4**	**-3**	**-4**	**-4**	**-5**	**-5**	**-6**	**-6**	**-6**

La Tabla 10.9.5.6 presenta los promedios mensuales de los sesgos entre las concentraciones generadas por Q_{50}, para el aporte de ambos ríos y el del río santa cruz solamente. Durante febrero y marzo, las contribuciones del río Chico son muy pobres y, por lo tanto, casi no hay diferencias entre las simulaciones con y sin río Chico.

En resumen, puede verse que las diferencias encontradas en las concentraciones de sedimentos en suspensión dentro del estuario, entre el caudal de Q_{50} (sin represas) y los diferentes caudales de erogación Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H2} y Q_{H1} (con represas), en promedio durante los 6.5 meses de llenado, disminuyen entre 3 mg/l a 5 mg/l (con el aporte del río Chico) y entre 5 y 6 mg/l (sin el aporte del río Chico).

10.9.1.6. Análisis de las concentraciones de los sedimentos en suspensión usando Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$. Comparación entre los aportes de RSC+RC y RSC solamente

Ahora se estudia el comportamiento de las concentraciones de sedimentos en suspensión para 2 caudales: el mediano (Q_{50}) y el mínimo histórico ($Q_{55\text{-}56}$), pero sin la presencia de las represas (esto significa que las concentraciones del río Santa Cruz no son disminuidas por la sedimentación en los embalses). Se han realizado las mismas simulaciones anteriores, con y sin el aporte del río Chico para el caudal mínimo histórico ($Q_{55\text{-}56}$). Las simulaciones con Q_{50} ya estaban disponibles de ensayos previos. Estos resultados y los encontrados para el caudal mediano (Q_{50}) se presentan en las Tablas 10.9.6.1 y 10.9.6.2.

En general, se observa que las diferencias entre las simulaciones sin las represas (no existe déficit de sedimentos producto de la presencia de los diques), son pobres. Indicando que, aún con caudales del río Santa Cruz muy pobres ($Q_{55\text{-}56}$), las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario no parecen cambiar significativamente.

Los resultados indican que, si no se considera el aporte del río Chico, en todos los casos las concentraciones que genera Q_{50} son mayores a las que genera $Q_{55\text{-}56}$, en promedio unos 3 mg/l.

Tabla 10.9.6.1 Valores medios y desvíos estándar de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para Q_{50} y Q_{55-56} considerando los aportes de sedimentos de ambos ríos y solamente del río Santa Cruz

Mes	Punto	Aporte de sedimentos de los ríos Chico y Santa Cruz				Aporte de sedimentos del río Santa Cruz			
		C (mg/l) producto del Q_{50}		C (mg/l) producto del Q_{55-56}		C (mg/l) producto del Q_{50}		C (mg/l) producto del Q_{55-56}	
		Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)
Nov	PC1	18	4	20	4	12	3	11	3
	PC2	18	4	18	5	11	2	8	2
	PC3	15	4	14	4	9	2	6	2
	PC4	9	5	8	4	7	3	5	2
Dic	PC1	18	4	20	4	11	2	10	2
	PC2	18	5	19	6	9	2	8	2
	PC3	15	5	15	6	8	2	6	2
	PC4	9	6	9	6	5	3	4	2
Ene	PC1	16	3	16	3	13	4	11	3
	PC2	15	3	15	4	11	4	8	3
	PC3	13	4	12	4	10	4	7	3
	PC4	9	5	8	5	6	4	4	3
Feb	PC1	19	4	17	4	18	5	15	5
	PC2	17	4	14	4	17	4	13	4
	PC3	15	5	12	4	14	5	10	4
	PC4	10	5	7	4	10	5	6	4
Mar	PC1	24	5	22	5	24	5	20	6
	PC2	22	5	18	5	22	5	17	4
	PC3	19	6	14	5	19	6	12	5
	PC4	13	7	9	5	13	7	7	5
Abr	PC1	25	8	31	12	17	3	14	4
	PC2	28	8	31	15	16	3	12	4
	PC3	24	8	23	12	15	4	10	3
	PC4	16	9	13	10	11	5	6	4
May	PC1	13	8	26	14	7	2	5	2
	PC2	17	8	30	14	7	2	5	2
	PC3	16	8	24	12	7	2	4	1
	PC4	12	8	14	10	6	3	3	2

Con el aporte de sedimentos del río Chico, el análisis se complica, los resultados pueden explicarse de la siguiente manera:

- Para los meses de noviembre, diciembre y enero, Q_{50} genera concentraciones similares que Q_{55-56}.

- Para los meses de febrero y marzo, Q_{50} genera concentraciones algo mayores que $Q_{55\text{-}56}$. Como ya se ha explicado el río Chico para estos meses posee muy pobre caudal, y $Q_{55\text{-}56}$, genera concentraciones, en promedio para estos meses y los 4 puntos, de 3 mg/l menos que Q_{50}.
- Para los meses de abril y mayo, Q_{50} genera concentraciones algo menores que $Q_{55\text{-}56}$, producto de la importante cantidad de sedimentos aportados por el río Chico durante esta época. $Q_{55\text{-}56}$, genera concentraciones, en promedio para estos meses en los 4 puntos, de 5 mg/l más que Q_{50}.

Tabla 10.9.6.2 Valores medios y desvíos estándar (promedios de todos los puntos de control) de las concentraciones de sedimentos en suspensión (mg/l) en el estuario (C), para Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$ considerando los aportes de sedimentos de ambos ríos y solamente del río Santa Cruz.

Mes	Aporte de sedimentos de los ríos Chico y Santa Cruz				Aporte de sedimentos del río Santa Cruz			
	C (mg/l) producto del Q_{50}		C (mg/l) producto del $Q_{55\text{-}56}$		C (mg/l) producto del Q_{50}		C (mg/l) producto del $Q_{55\text{-}56}$	
	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)	Media (mg/l)	Desvío Estándar (mg/l)
Nov	15	4	15	4	10	3	8	2
Dic	15	5	16	6	8	2	7	2
Ene	13	4	13	4	10	4	8	3
Feb	15	5	13	4	15	5	11	4
Mar	20	6	16	5	20	6	14	5
Abr	23	8	25	12	15	4	11	4
May	15	8	24	13	7	2	4	2
Media	**17**	**6**	**17**	**7**	**12**	**4**	**9**	**3**

Capítulo **11**

Resultados: imágenes satelitales

11.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de estudiar la pluma de descarga del estuario del río Santa Cruz, en términos de la turbidez y temperatura, utilizando información de imágenes satelitales. Para ambas variables el análisis se ha realizado en 2D y en forma de serie temporal, en un punto.

Los objetivos de esta parte han sido:

- Comparar los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM con las imágenes satelitales, en términos de la pluma de turbidez producida por la descarga del estuario del río Santa Cruz en el mar.
- Comparar los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM con datos de los sensores en satélites en términos de la temperatura superficial del mar (TSM).
- Estudiar, con las imágenes de color, las variaciones de la turbidez en la zona de la desembocadura del estuario en relación con los estados de la marea, utilizando las mediciones de turbidez registradas en Punta Quilla.

Para cumplir con los objetivos se han considerado 3 fuentes de información de sensores instalados en satélites: 2 de color y 1 de TSM. Esta información ha sido comparada con las mediciones in situ y con los resultados del modelo para el periodo de análisis de este trabajo: entre noviembre de 2017 y mayo de 2019.

Las imágenes de color con alta resolución espacial (pixel de 30 m de lado), como las **Landsat 8** (USGS. https://earthexplorer.usgs.gov/), tienen escasa resolución temporal, y las que poseen buena resolución temporal (suficiente para la comparación con los datos

disponibles, aunque limitada en invierno por las presencia de nubes), como las disponibles en el sitio de GlobColour (https://hermes.acri.fr/?class=archive), poseen relativamente pobre resolución espacial (pixel de 4 km de lado). En consecuencia, se han utilizado ambos paquetes de imágenes satelitales para conseguir buena cobertura espacial y temporal.

Las imágenes de color para la zona de interés del presente estudio tienen el insalvable problema de la nubosidad que impide un registro adecuado. Por lo que, se observan períodos con información reducida o nula dependiendo de los meses disponibles para la comparación.

Las imágenes de temperatura superficial del mar (TSM) se han obtenido de sitio LAS de PODAAC https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/las/UI.vm. Este producto corresponde al nivel 4 de procesamiento de MUR y se nota como: GHRSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1).

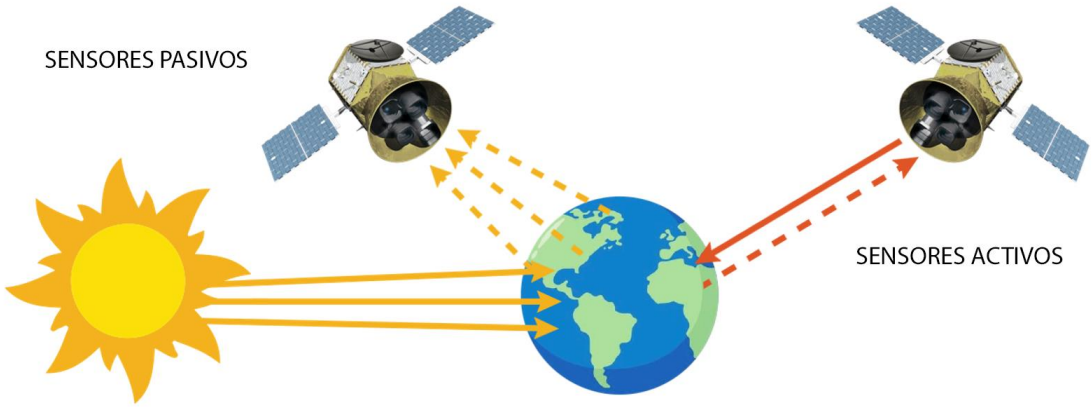
El sensoramiento remoto de la Tierra se puede definir como el "uso de la radiación electromagnética (REM) para adquirir información del océano, la tierra y la atmósfera sin estar en contacto físico con el objeto, la superficie o el fenómeno bajo investigación".

Los satélites llevan sensores que son capaces de capturar ondas electromagnéticas emitidas o reflejadas por sectores del planeta. Los sensores particionan el espectro en bandas de diferentes longitudes de onda (λ).

Existen sensores pasivos que detectan la radiación ambiente (emitida o naturalmente reflejada). Por ejemplo: los radiómetros (sensores de ondas electromagnéticas) en el espectro visible e Infra-Rojo (IR) detectan la luz y el calor generado naturalmente por el sol y reflejados por la tierra.

También existen sensores activos que emiten, y reciben lo reflejado (lo que no ha sido absorbido). Los procesamientos de las imágenes son enormes para filtrar y obtener la información deseada. La Figura 11.1.1 ilustra acerca de la diferencia entre estos sensores.

Figura 11.1.1 Definiciones de sensores pasivos y activos en satélites



En este trabajo se procesan diferentes bandas de Rrs(λ) que componen imágenes de sensores pasivos: turbidez del agua de mar y la TSM.

La reflectancia tele detectada (Rrs(λ) - Remote Sensing Reflectance), es la energía electromagnética recibida por el sensor con algunos procesamientos, en función de la longitud de onda. Esta es la medida fundamental de la que se derivan los productos del color oceánico, como la concentración de clorofila del fitoplancton, la turbidez y otras propiedades ópticas inherentes al mar (Franz, 2016).

11.2. Imágenes Landsat 8

Se utilizaron imágenes de Landsat 8 para analizar cualitativamente la forma de la pluma y su alcance espacial. Cada una de la imágenes obtenidas y procesadas se han comparado con los resultados del modelo MIKE 3 Flow Model FM ya calibrado con datos de la región.

Las imágenes se obtuvieron del sitio de USGS (https://www.usgs.gov/). En base al software disponible en la web se bajaron 62 imágenes con parte en la zona de interés del proyecto. Luego, en base a la posición de la imagen y a la cantidad de nubes presentes en la mismas se seleccionaron 6 imágenes que resultaron adecuadas para la comparación con los resultados del modelo.

Las imágenes se obtienen en formato “TIF” para cada una de bandas disponibles. La construcción de las imágenes “true color” se realizó procesando las imágenes con rutinas en Matlab para obtener una buena representación de la pluma en el mar. La Tabla 11.2.1

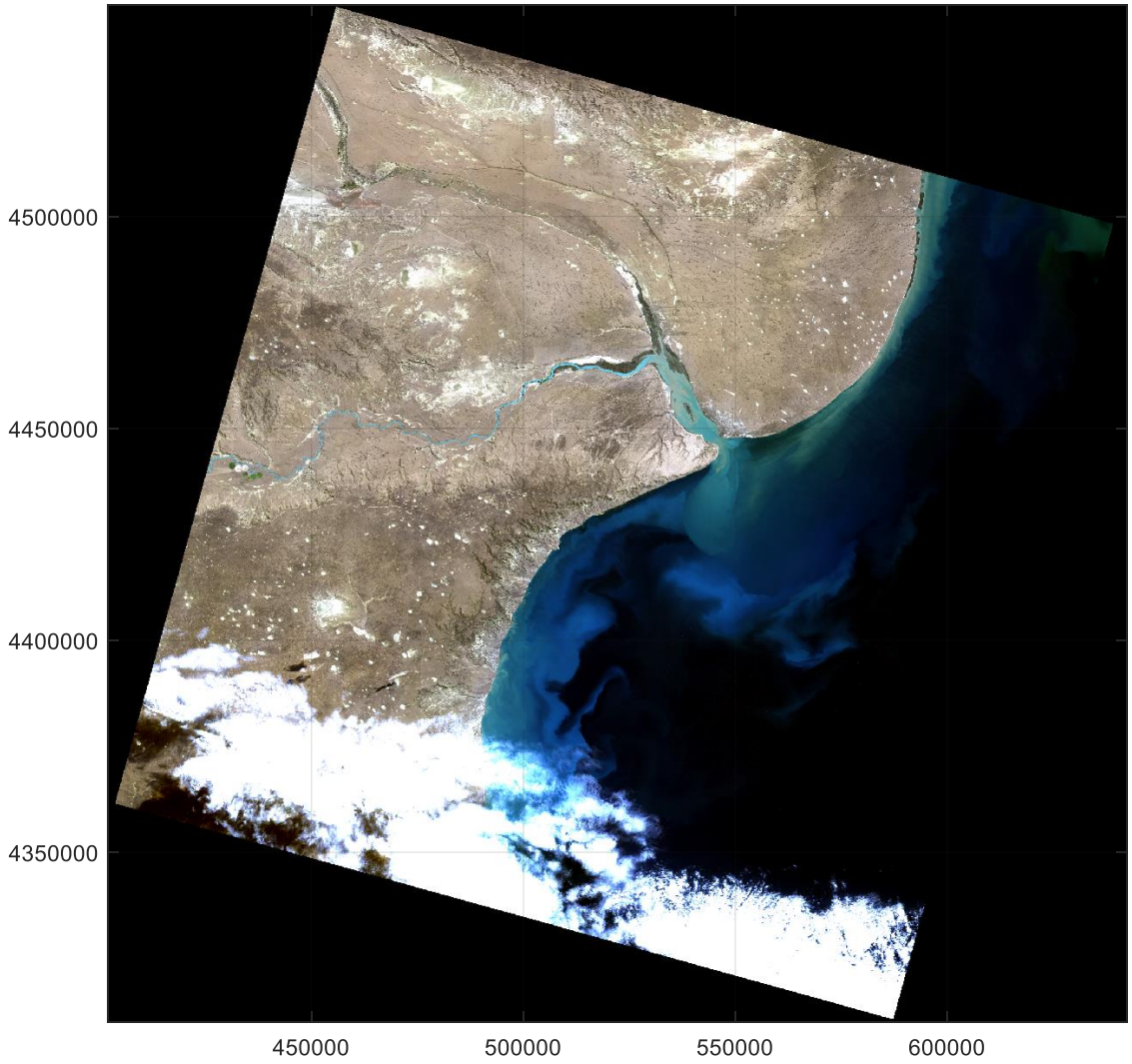
presenta las bandas de longitudes de ondas de los sensores (OLI y TIRS) a bordo de Landsat 8 con la resolución espacial asociada.

Tabla 11.2.1 Bandas de longitudes de ondas de los sensores (OLI y TIRS) a bordo del satélite Landsat 8 con la resolución espacial asociada. Fuente: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8

Sensor	*Bandas*	*Longitud de onda (µm)*	*Resolución (m)*
Generador Operativo de Imágenes Terrestres Operational Land Imager – OLI	*Banda 1 - Aerosol costero*	*0.43 – 0.45*	*30*
	Banda 2 - Azul	*0.45 – 0.45*	*30*
	Banda 3 - Verde	*0.53 – 0.45*	*30*
	Banda 4 - Roja	*0.64 – 0.45*	*30*
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	*0.85 – 0.45*	*30*
	Banda 6 - Infrarrojo de onda corta - SWIR 1	*1.57 – 1.65*	*30*
	Banda 7 - Infrarrojo de onda corta - SWIR 2	*2.11 – 2.29*	*30*
	Banda 8 - Pancromático	*0.50 – 0.68*	*15*
	Banda 9 - Cirrus	*1.36 – 1.38*	*30*
Sensor infrarrojo térmico Thermal Infrared Sensor - TIRS	*Banda 10 - Infrarrojo térmico 1*	*10.60 – 11.19*	*100*
	Banda 11 - Infrarrojo térmico 2	*11.50 – 12.51*	*100*

La cobertura espacial de las imágenes con código 22809 (que captura la zona de interés del presente estudio) se presenta en la Figura 11.2.1. En la imagen puede verse cobertura nubosa en la porción sur de esta imagen. En el análisis presentado en este trabajo se realizó un acercamiento a la zona de interés (Estuario del Río santa Cruz y su desembocadura).

Figura 11.2.1 Cobertura espacial de las imágenes 22809 (código de la captura de la Landsat 8). Día 6 de marzo de 2018 11:07 (UTC-3). Coordenadas UTM 19S - WGS84



11.3. Imágenes MUR

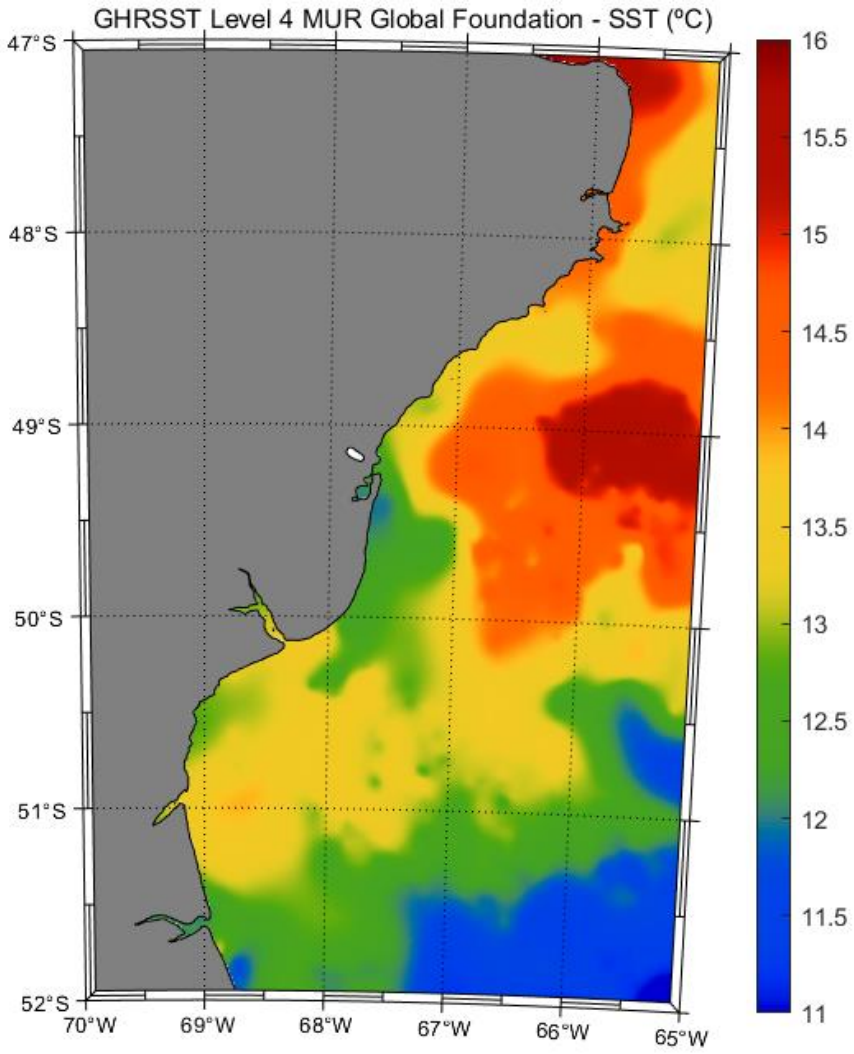
Del sitio LAS de PODAAC https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/las/UI.vm se obtuvieron 3 años completos (2017, 2018 y 2019) de SST nivel 4 de MUR (GHRSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1)), para la zona de interés de este trabajo. En base a estas imágenes de 1 km de resolución espacial y 1 día de resolución temporal se realizaron comparaciones con las mediciones in situ y con los resultados de del modelo. La Figura 11.3.1 ilustra cerca de la cobertura espacial de las imágenes obtenidas.

Los datos del Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSST) de nivel 4 se producen en base a un conjunto de datos retrospectivos (latencia de cuatro días) y a un conjunto de datos en tiempo casi real (latencia de un día) en el JPL Physical Oceanography DAAC. En el procesamiento se utilizan wavelets como funciones de base para una interpolación óptima en una cuadrícula global de 0.01º.

El análisis L4 de resolución ultra alta (MUR) versión 4 se basa en las observaciones nocturnas de la “skin” y “subskin” de la TSM del GHRSST L2P de varios instrumentos, entre ellos:

- NASA Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E)
- JAXA Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 on GCOM-W1
- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS) en las plataformas de NASA Aqua y Terra
- US Navy microwave WindSat radiometer
- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) en los satélites NOAA
- Y también mediciones in situ de SST del proyecto iQuam de NOAA iQuam

Figura 11.3.1 SST (ºC) del 1 de febrero de 2018 para la cobertura obtenida de la imágenes de MUR. UTM 19 S – WGS84



11.4. Imágenes GlobColour

Se extrajo la información de Rrs(λ) de diferentes sensores obtenidas del sitio GlobColour (https://hermes.acri.fr/?class=archive). La información se restringió a la región presentada la Figura 11.4.1 (será mencionada como "caja"). La intención es quedarse con información de las reflectancias representativas de la zona interface entre el estuario y el mar. La resolución espacial de estas imágenes es de 4 km, y resulta para detectar el punto de medición de manera precisa. La ventaja de esta base de datos es la resolución temporal que permite cubrir con eficacia aceptable el período con información de la turbidez registrada in situ. Por la selección realizada, cada imagen cuenta con mucha información enmascarada como tierra pero también datos de Rrs. Se realizó el cálculo de la posición media de los píxeles con información de Rrs(λ), es: 50º14'22.61"S –

68º16'14.07"W. Este valor se construyó con 216709 valores y por su ubicación este punto es representativo de las condiciones medias de la pluma. La tabla 11.4.1 presenta las referencias de los sensores que aportan la información para el presente trabajo.

Tabla 11.4.1 Sensores de los que se ha obtenido información del sitio de GlobColour. Se incluye resolución y cobertura temporal de los datos y la versión del re-procesamiento

Sensor	*Resolución*	*Fecha de inicio*	*Fecha de finalización*	*Versión de re-procesamiento*
SeaWiFS	*GAC 4 km*	*1997-09-04*	*2010-12-11*	*NASA R2018.0*
MERIS	*RR 1 km*	*2002-04-28*	*2012-04-08*	*ESA 3rd reprocessing*
MODIS AQUA	*1 km*	*2002-07-03*	*presente*	*NASA R2018.0*
VIIRS NPP	*1 km*	*2012-01-02*	*presente*	*NASA R2018.0.1*
OLCI-A	*RR 1 km*	*2019-04-25*	*presente*	*ESA PB 2.16 to 2.55*
VIIRS JPSS-1	*1 km*	*2017-11-29*	*presente*	*NASA R2018.0*
OLCI-B	*RR 1 km*	*2019-03-25*	*presente*	*ESA PB 1.14 to 1.27*

Se obtuvieron 3 años de datos entre el 1 de enero de 2017 y el 31 de diciembre de 2019 del sitio de GlobColour (https://hermes.acri.fr/index.php?class=archive). Esta información permitió obtener las Rrs para diferentes bandas de longitudes de onda. Rrs(λ) es la cantidad fundamental que se obtiene de los sensores de color del océano, ya que proporciona la información básica para muchos algoritmos de productos derivados, como la clorofila-a, la atenuación difusa o las propiedades ópticas inherentes (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/rrs/). La Tabla 11.4.2 presenta el número de imágenes disponibles por cada banda de longitudes de onda.

La Figura 11.4.2 ilustra acerca de la manera en que se obtuvo la información de las imágenes de los diferentes sensores que GlobColour tiene disponibles. En estos ejemplos son datos de OLCI-A de Sentinel A para la Rrs de 670 nm y del Modis Aqua para la Rrs de 555 nm. Los colores indican Rrs en cada longitud de onda y las zona en blanco indican ausencia de datos. Para los análisis que se realizan en este estudio se promediaron y obtuvieron valores máximos de los píxeles con datos.

Figura 11.4.1 Imagen Landsat 8 de la zona de estudio e identificación de la región donde se obtuvieron los datos de GlobColour.

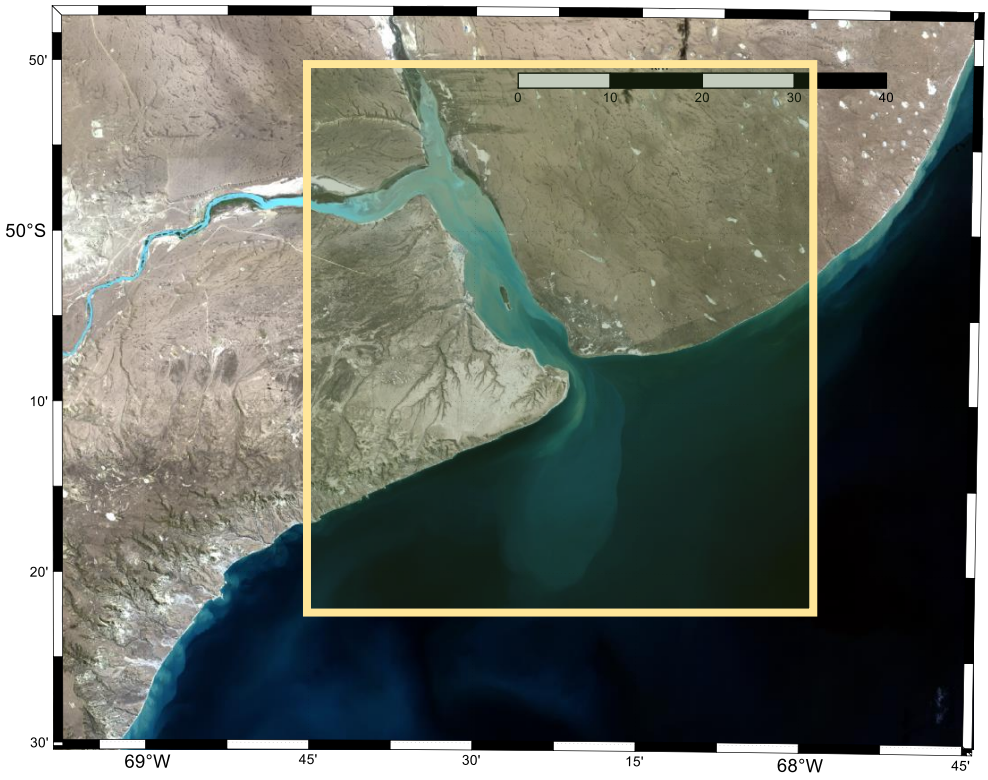


Figura 11.4.2 Rrs(670) del día 20 de noviembre de 2018 del sensor OLCI-A (izquierda) y Rrs(555) del sensor Modis Aqua, para la zona de estudio (derecha).

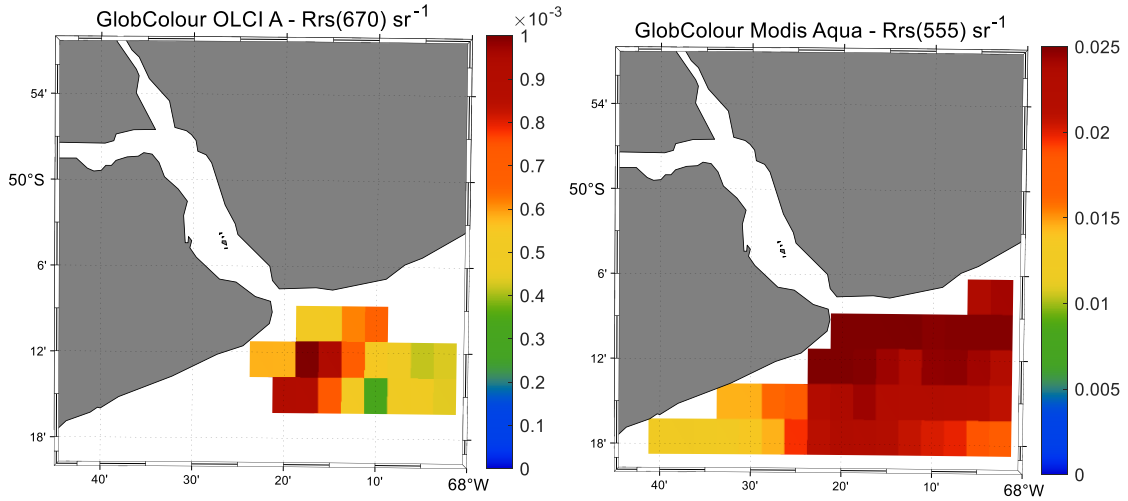


Tabla 11.4.2 Número de imágenes disponibles por cada banda de longitudes de onda

Longitud de onda (nm)	Números de imágenes
400	187
412	1005
469	281
490	1005
510	187
531	281
547	281
555	998
560	187
620	187
645	281
670	1004
674	187
678	281
681	187
709	187
754	187
779	187
865	187
885	187
Total	7474

11.5. Metodología

Tratamiento sobre las imágenes Landsat 8

Con el objetivo de comparar la pluma calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM hidrodinámico + transporte de sedimentos (HD+MT), con las imágenes de alta resolución de Landsat 8, se trabajó sobre las imágenes de 30 m de resolución para obtener buenas representaciones de color verdadero. Para ello se realizaron diferentes ajustes del rango de colores asociado a cada de color (rojo, verde y azul). En el caso de algunas imágenes con presencia de nubes sobre la pluma se analizaron algunas composiciones para ver si la representación mejoraba. Las imágenes Landsat 8 se construyeron utilizando programación en Matlab. La base de los programas utilizados para la construcción de las imágenes RGB fue L8read, que es un función escrita por Chad A. Greene http://www.chadagreene.com.

Tratamiento sobre las imágenes de MUR

Los 3 años obtenidos de las imágenes de SST cubren temporalmente los 19 meses de las mediciones in situ en Punta Quilla y las salidas del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD+MT). La resolución espacial de las imágenes de MUR parece adecuada para ver la variación de SST en la posición de Punta Quilla.

Para la comparación entre los datos de MUR y las mediciones de temperatura en Punta Quilla, hay que considerar que la profundidad del instrumento es de 10.4 m por debajo del NMM y la información entregada por MUR está en la superficie del mar. Por este motivo, es aconsejables tomar esta comparación como indicativa.

Para las simulaciones numéricas y para las imágenes de MUR de TSM se generaron promedios mensuales, y se presentan más adelante en este capítulo en formato de mapas. Estas figuras permiten un análisis cualitativo de las diferencias espaciales.

Tratamiento sobre las imágenes de GlobColour

Los registros in situ de niveles del mar y turbidez sugieren que en los períodos de sicigias se genera mayor turbidez en la zona de la desembocadura del río Santa Cruz, que en los períodos de cuadraturas. Con intenciones de corroborar si los sensores remotos de color también detectaban este patrón, se generaron series de tiempo turbidez basadas en Rrs(λ).

Dada la frecuencia de las mediciones de turbidez in situ (1 dato por hora) se los trató de manera que sean comparables con las mediciones satelitales. Para ello se calcularon los valores mínimos y medios diarios de la turbidez registrada in situ. La Figura 11.5.1 presenta las series de niveles del mar, la turbidez medida (1 dato cada hora), la media y mínima diaria.

En base al número de imágenes disponibles para cada longitud de onda, se decidió utilizar las bandas de 412 nm, 490 nm, 555 nm y 670 nm en la exploración de que una relación entre estas bandas sea capaz de explicar la variabilidad encontrada en las mediciones de turbidez.

Con las Rrs(λ) disponibles en la caja seleccionada (Figura 11.4.1) se obtuvieron las máximas y medias por imagen. La diferencia entre ambas series es clara y sus patrones de variabilidad muestran un acuerdo general. Para los cálculos que se realizaron en este estudio se consideraron las máximas. Para ilustrar acerca de los valores máximos y medios de Rrs, se presenta la Figura 11.5.2 con las series tiempos de Rrs(555). Las Figuras 11.5.3 a 11.5.5 presentan las relaciones entre las Rrs de las diferentes bandas mencionadas para ilustrar acerca de las relaciones entre ellas.

Figura 11.5.1 presenta las series de niveles del mar, la turbidez medida (1 dato cada 10 min), la media y mínimo diario

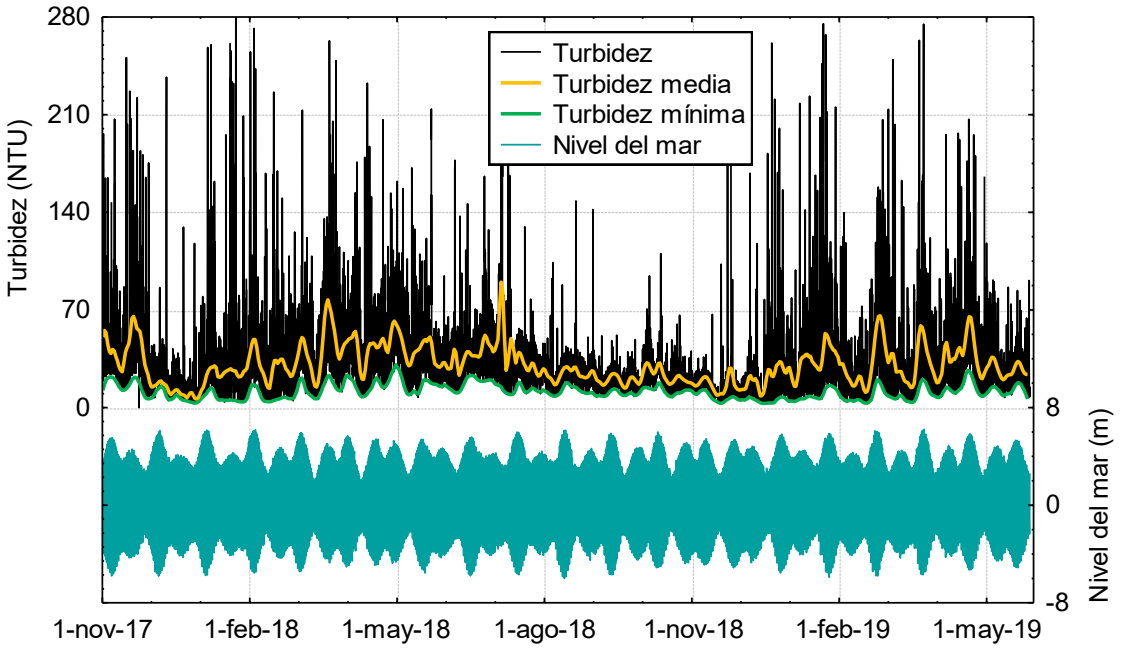


Figura 11.5.2 Series de tiempo entre la Rrs(555) media y máxima en la caja de selección y para el período de interés del presente estudio.

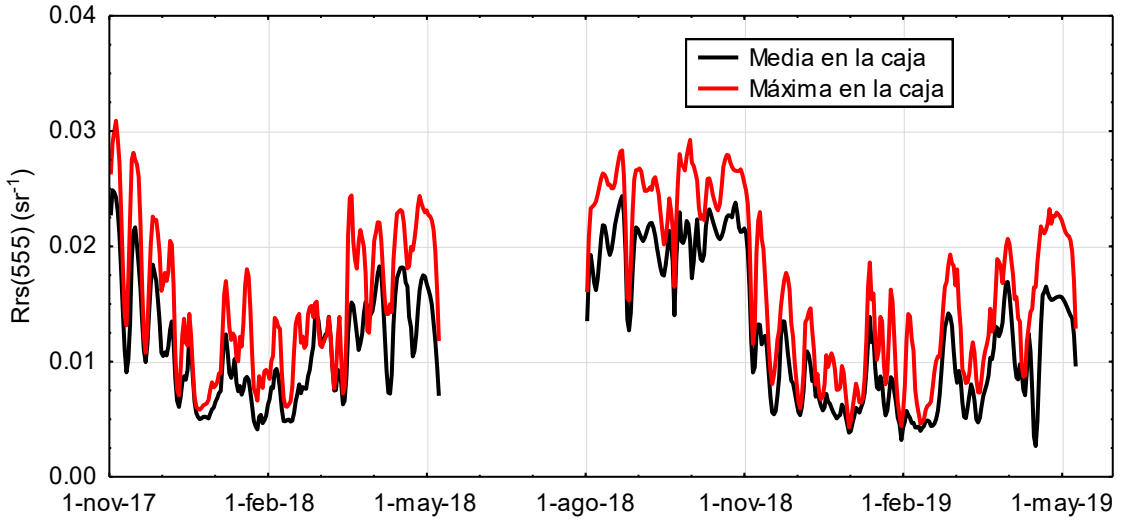


Figura 11.5.3 Izquierda. Diagrama de dispersión entre Rrs(490) y Rrs(555), se observa una relación lineal entre ellas. Derecha. Diagrama de dispersión entre Rrs(412) y Rrs(555), se observa una relación exponencial entre ellas.

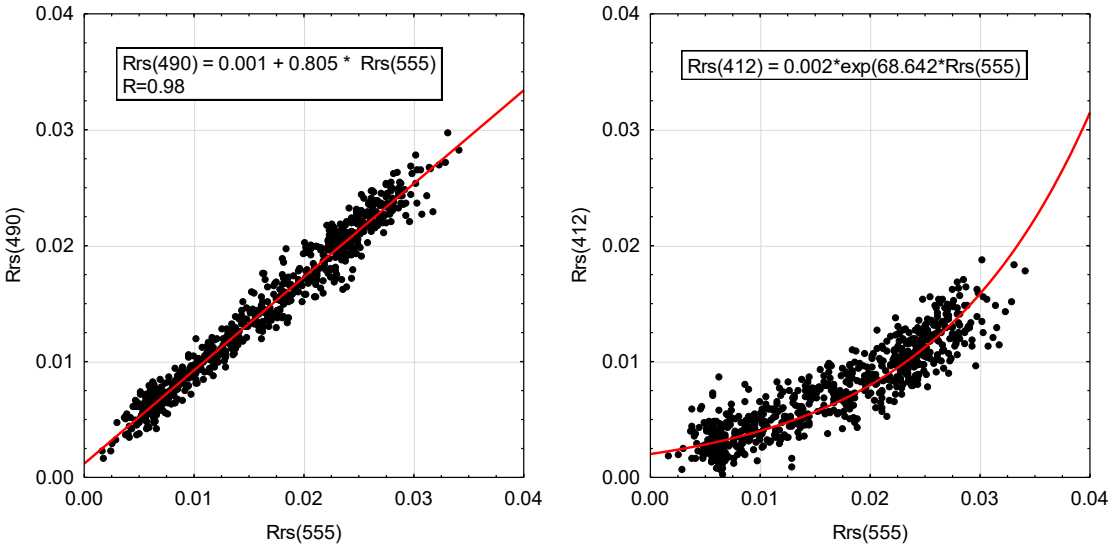
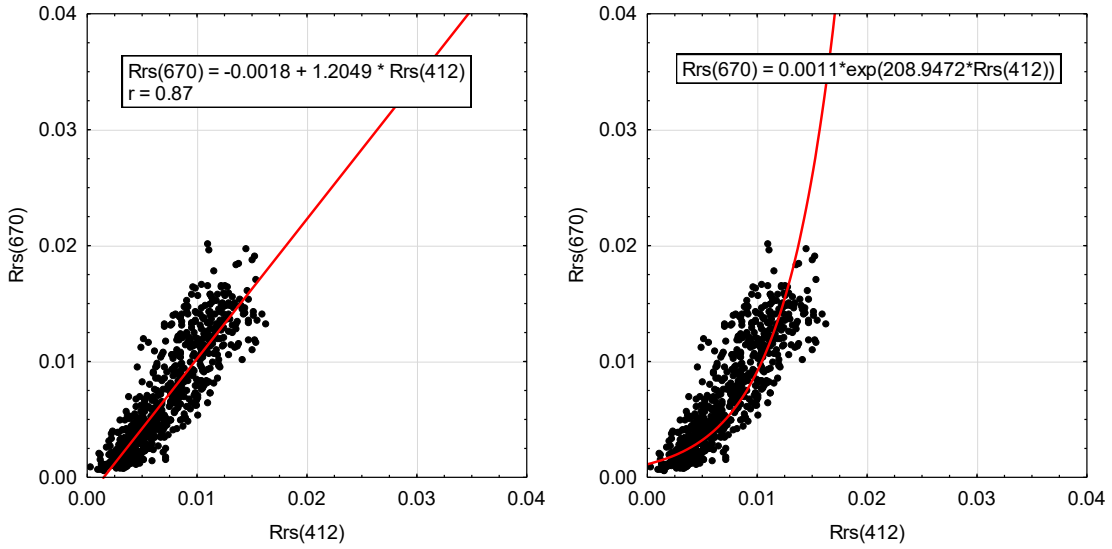
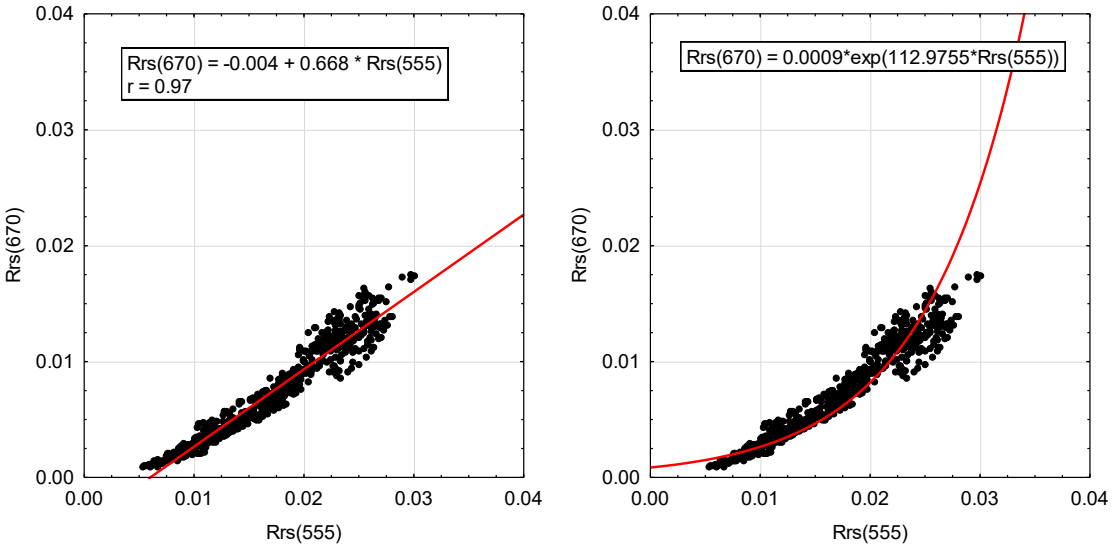


Figura 11.5.4 Izquierda. Diagrama de dispersión entre Rrs(470) y Rrs(412), se ajusta una relación lineal entre ellas. Derecha. Diagrama de dispersión entre Rrs(470) y Rrs(412), se ajusta una relación exponencial entre ellas.



Para la turbidez mínima y media diaria se ajustaron diferentes algoritmos basados en relaciones de Rrs(λ), en búsqueda del menor error cuadrático medio (RMSE). Entre los algoritmos se utilizó el sugerido por Dogliotti et al. (2015) y las formulaciones presentes en Moon et al. (2016). Debe considerarse que la serie temporal de turbidez en la estación Punta Quilla se encuentra a una profundidad promedio de 10.4 m en un sitio de 16 m de profundidad referida al NMM.

Figura 11.5.5 Izquierda. Diagrama de dispersión entre Rrs(670) y Rrs(555), se ajusta una relación lineal entre ellas. Derecha. Diagrama de dispersión entre Rrs(670) y Rrs(555), se ajusta una relación exponencial entre ellas.



11.6. Resultados en base a las imágenes Landsat 8

Se presentan a continuación las imágenes obtenidas de Landsat 8 y los resultados del modelo para la fecha y hora de la toma de cada una de las imágenes. Entre los resultados del modelo se presentan los campos de concentración de sedimentos en suspensión, salinidad y corrientes superficiales. Estas últimas ayudan a la interpretación de la forma de la pluma para las diferentes situaciones.

El acuerdo observado indica que la física resuelta por los modelos, hidrodinámico y de transporte de sedimentos, es adecuada para la zona de interés del proyecto. Este resultado sustenta las condiciones de borde y parámetros utilizados en las simulaciones, y si bien no representa una validación estricta del modelo, la falta de incoherencias entre las imágenes aumenta la confianza sobre la performance del MIKE 3 Flow Model (HD+MT).

Figura 11.6.1 Arriba. Día 18 febrero de 2018 11:07 (UTC-3) UTM-19S (WGS84). Se grafican las bandas 432 en RGB.

Figura 11.6.2 Día 18 febrero de 2018 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

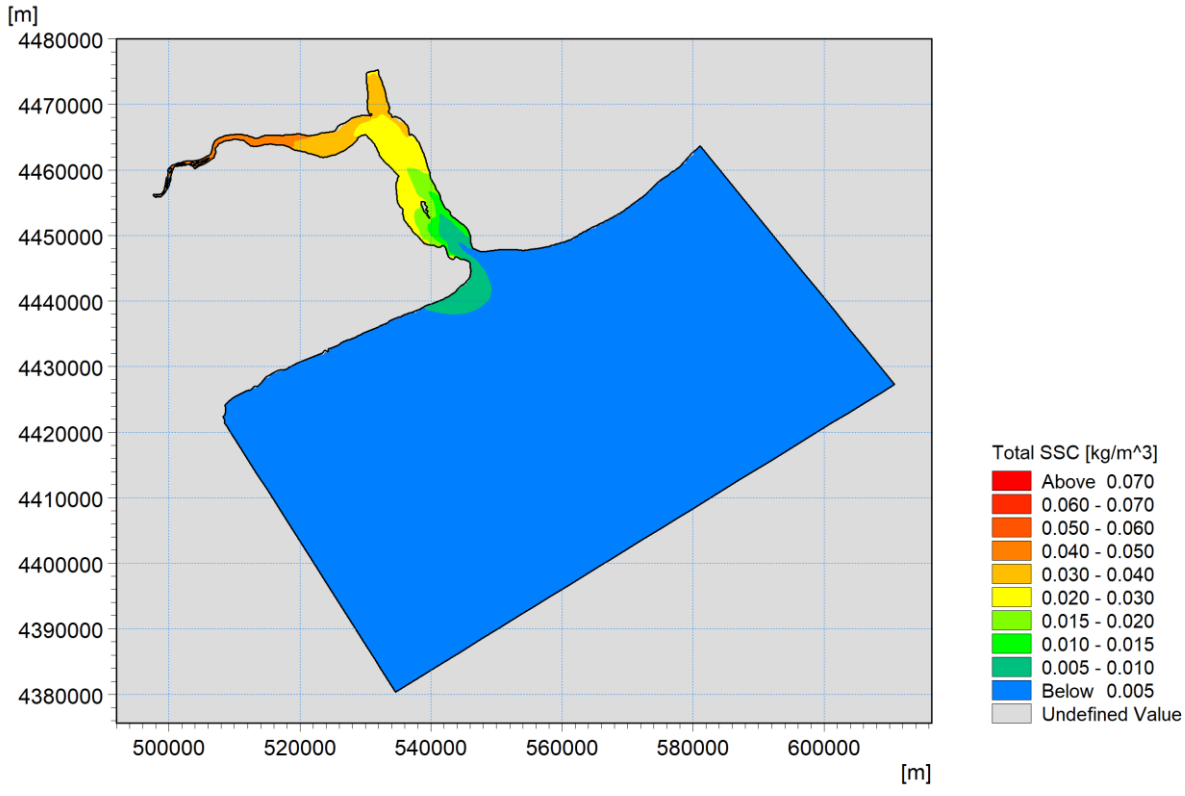


Figura 11.6.3 Día 18 febrero de 2018 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD), en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

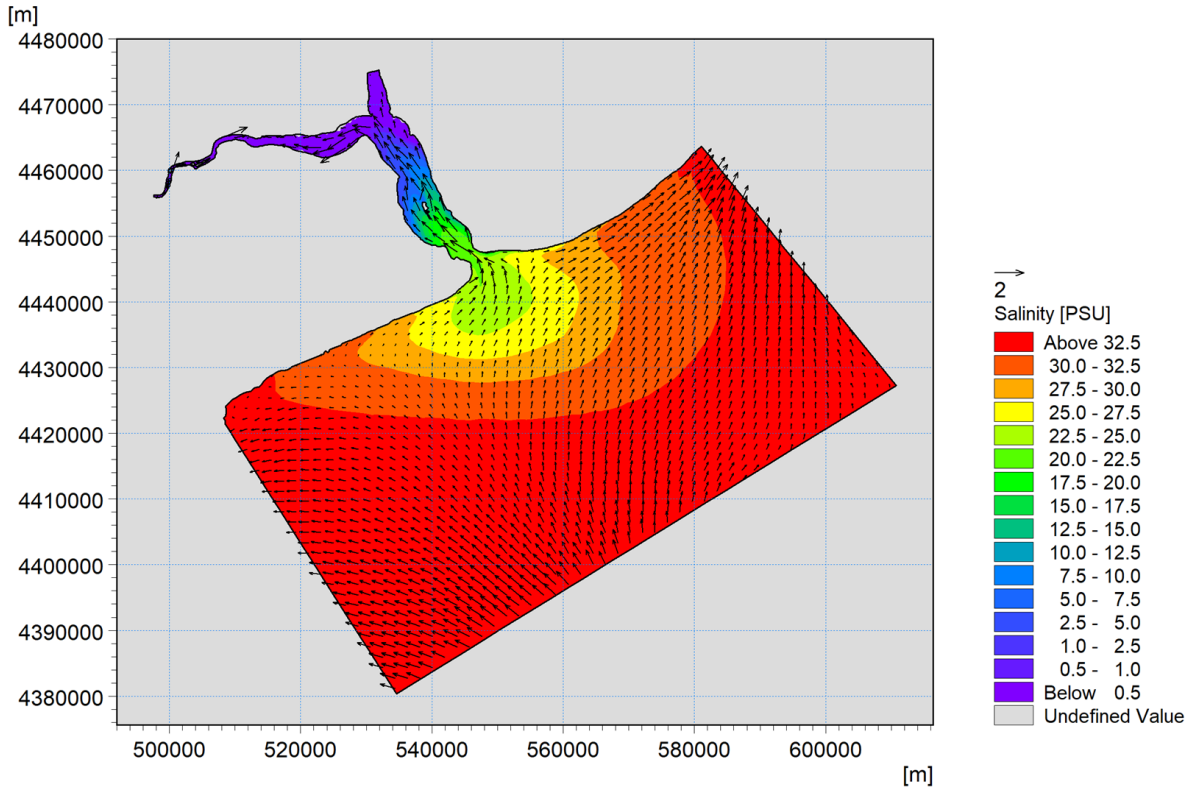


Figura 11.6.4 Día 6 de marzo de 2018 11:07 (UTC-3). Se grafican las bandas 432 en RGB.

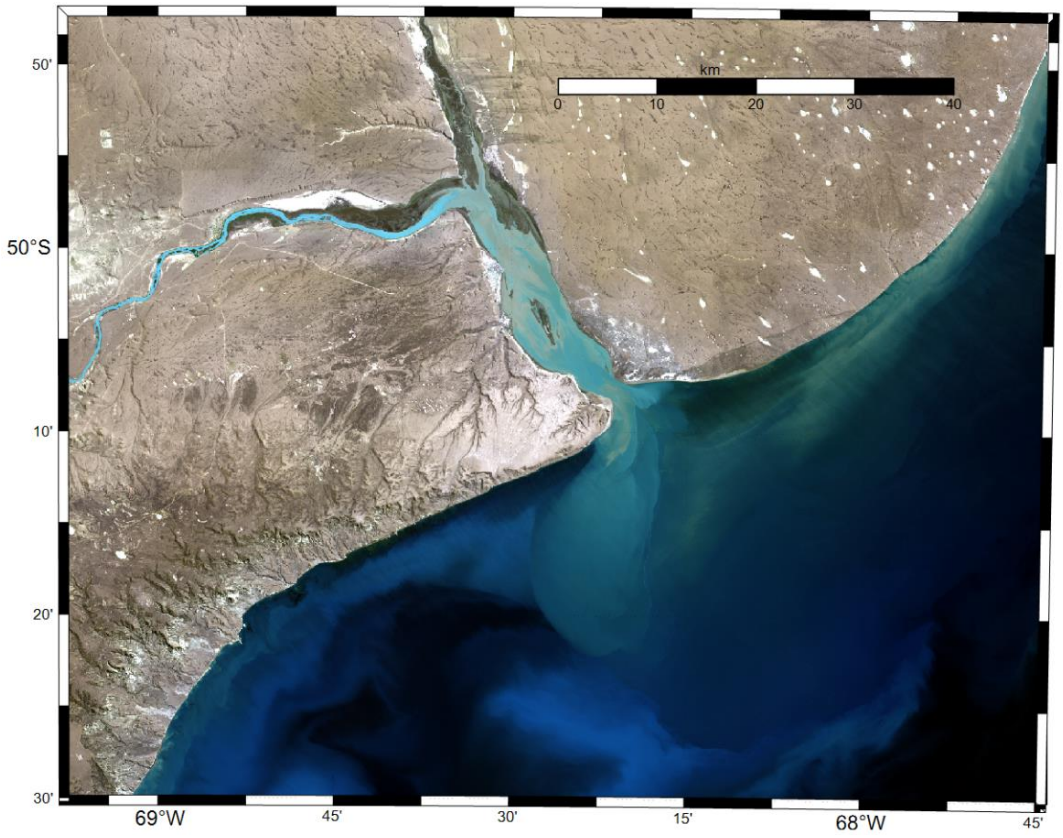


Figura 11.6.5 Día 6 de marzo de 2018 11:07 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

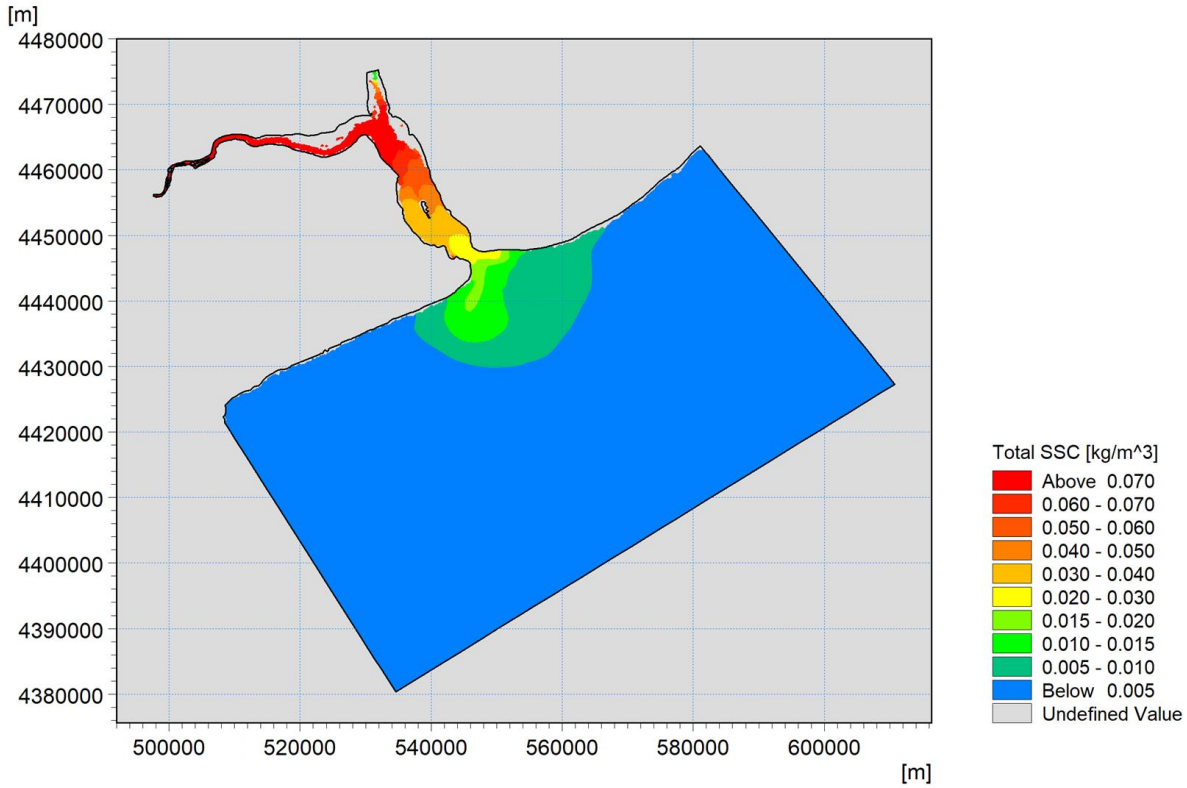


Figura 11.6.6 Día 6 de marzo de 2018 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD) en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

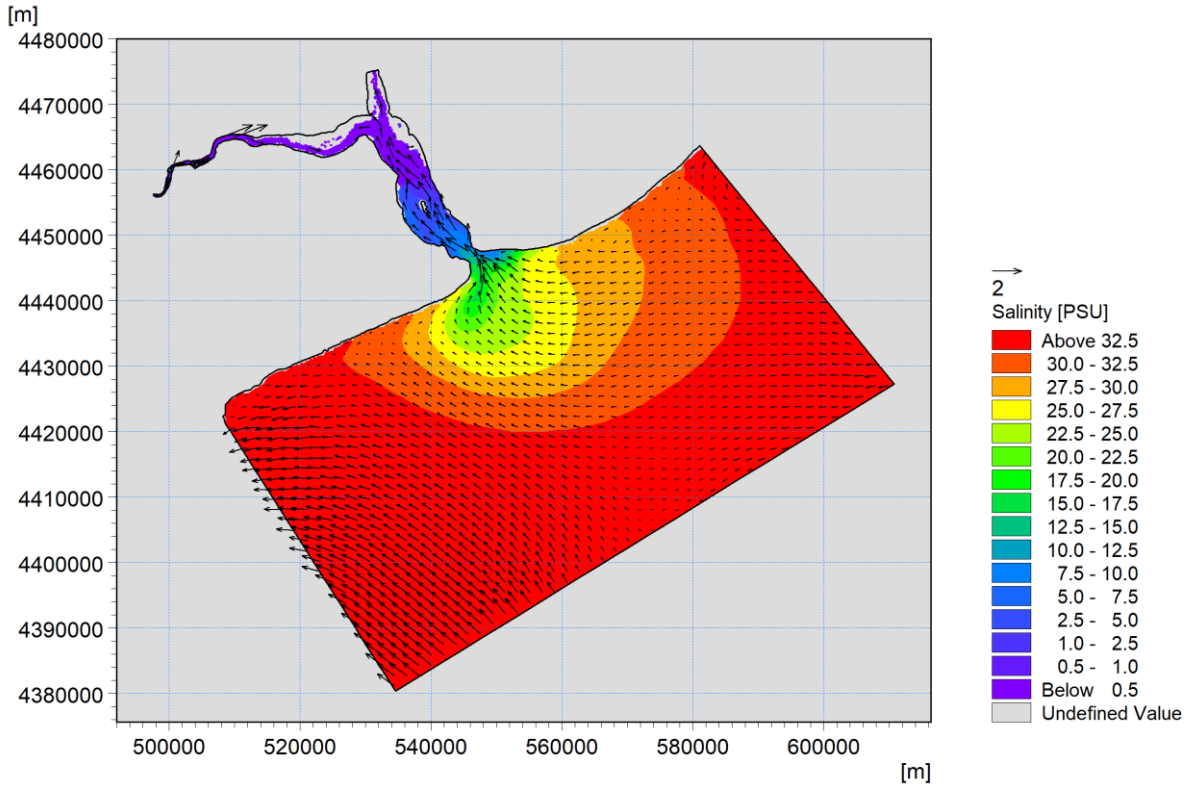


Figura 11.6.7 Día 29 de agosto de 2018 11:07 (UTC-3) UTM-19S (WGS84). Se grafican las bandas 432 en RGB menos la banda 4.

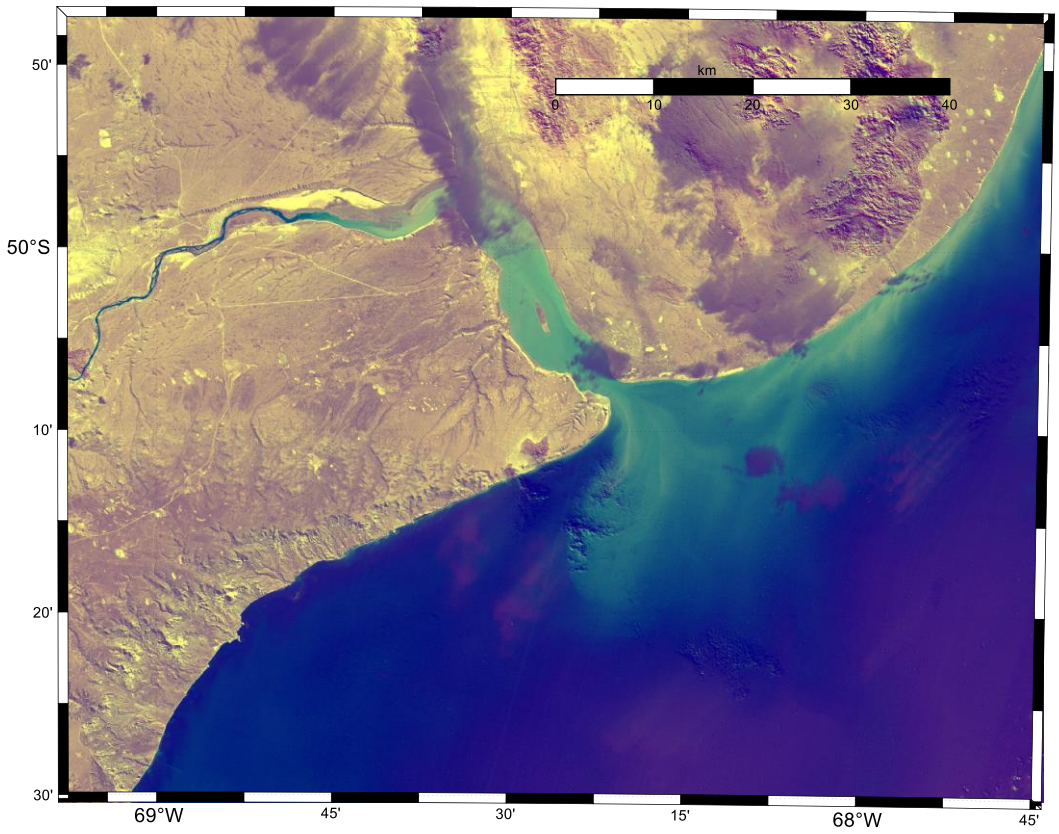


Figura 11.6.8 Día 29 de agosto de 2018 11:07 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

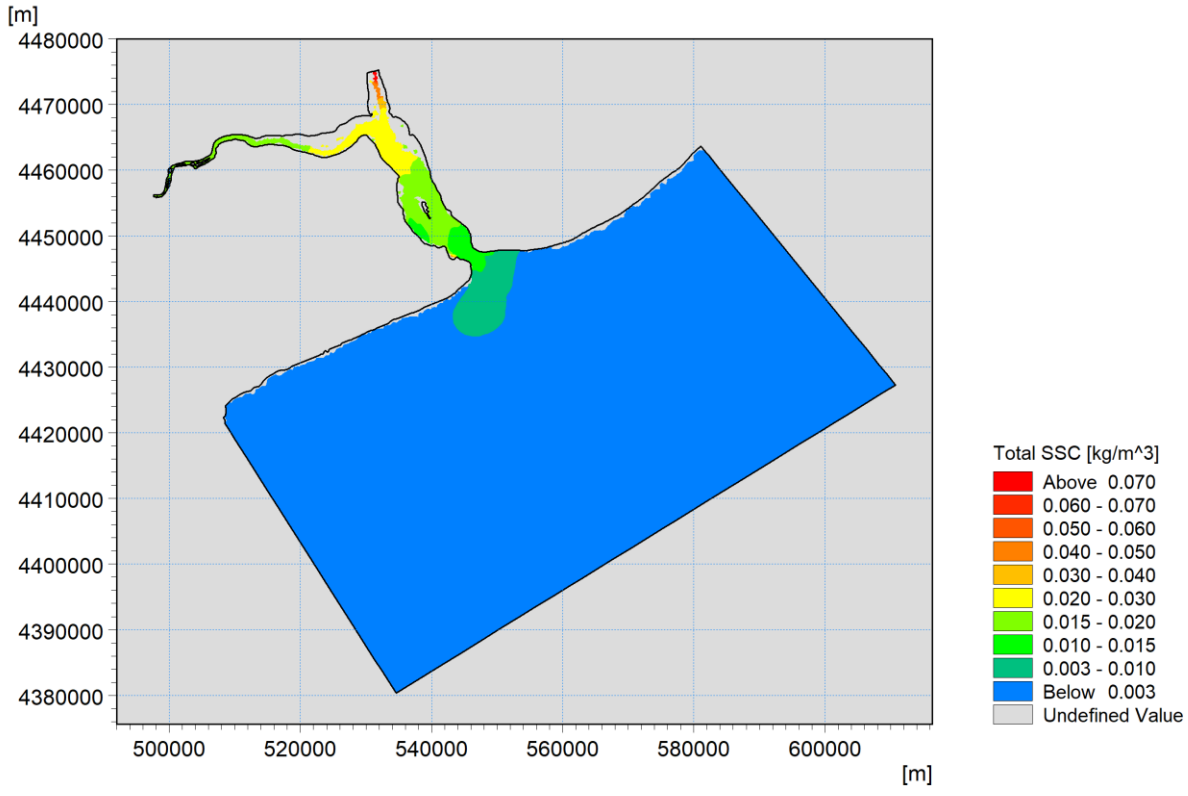


Figura 11.6.9 Día 29 de agosto de 2018 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 HD en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

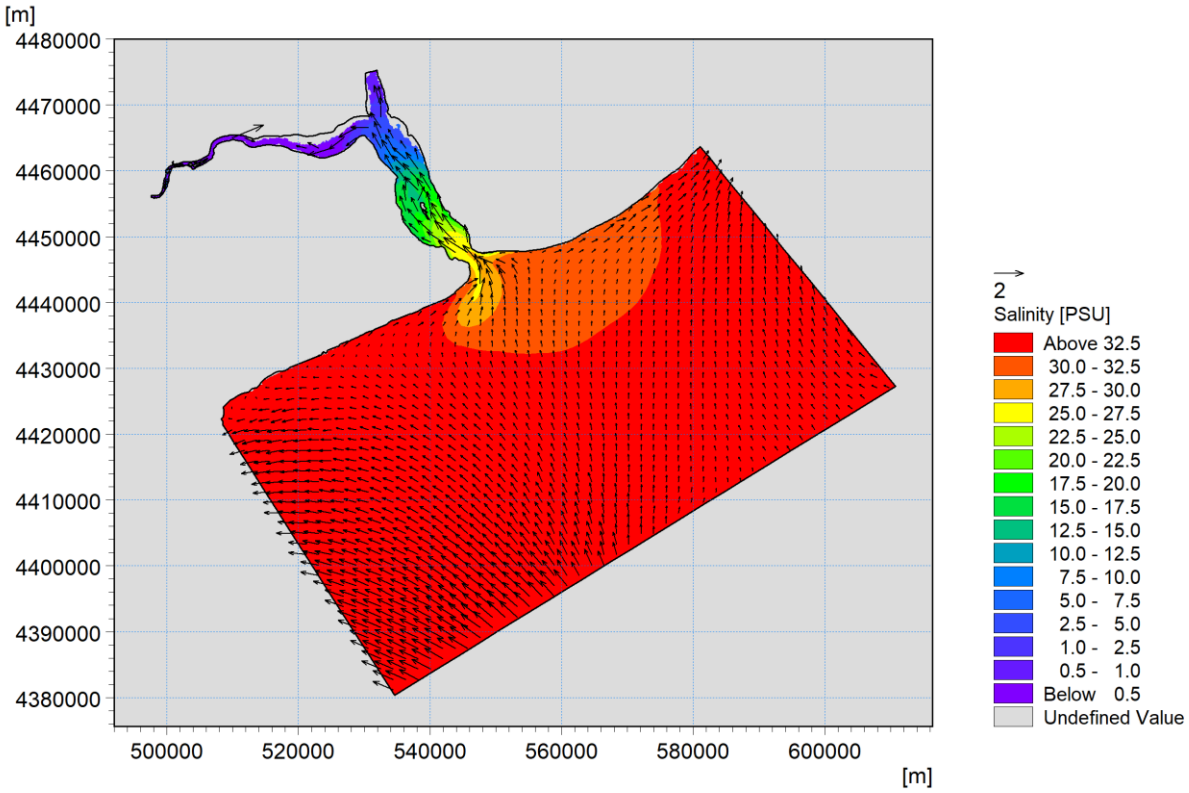


Figura 11.6.10 Día 5 de febrero de 2019 11:07 (UTC-3). Se grafican las bandas 432 en RGB.

Figura 11.6.11 Día 5 de febrero de 2019 11:07 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

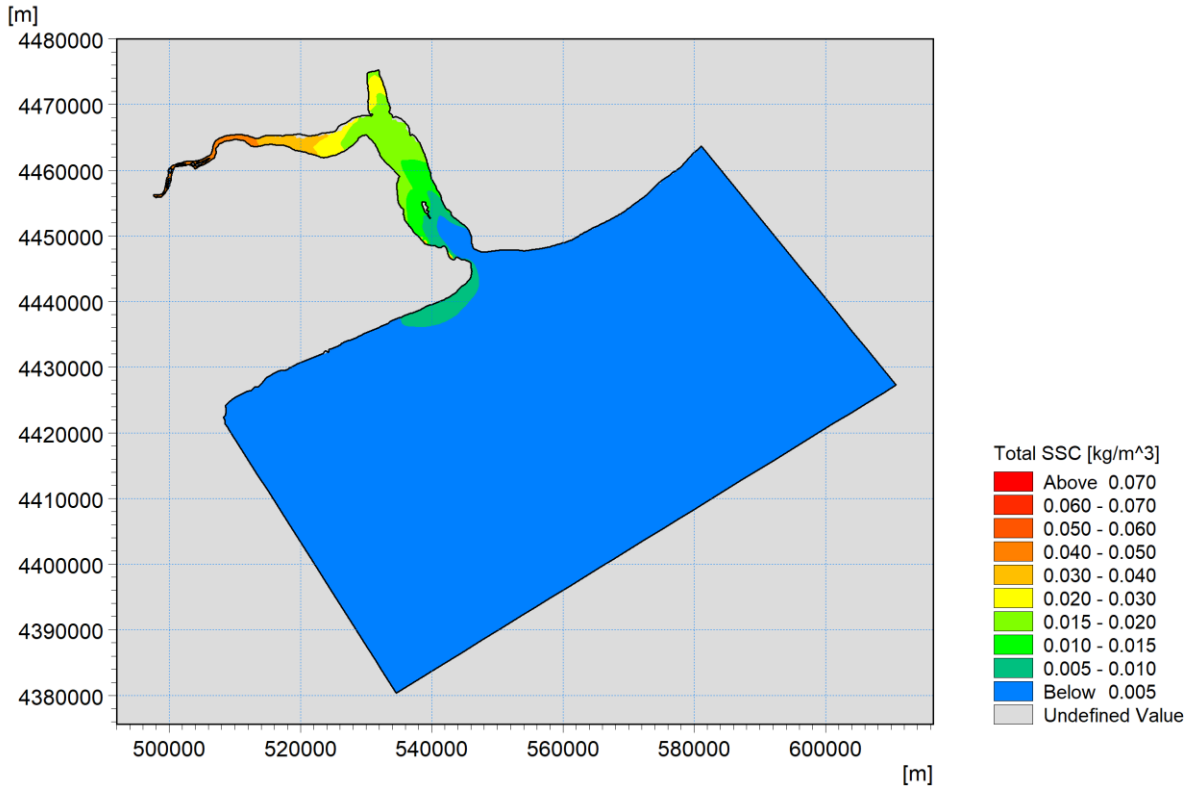


Figura 11.6.12 Día 5 de febrero de 2019 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD), en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

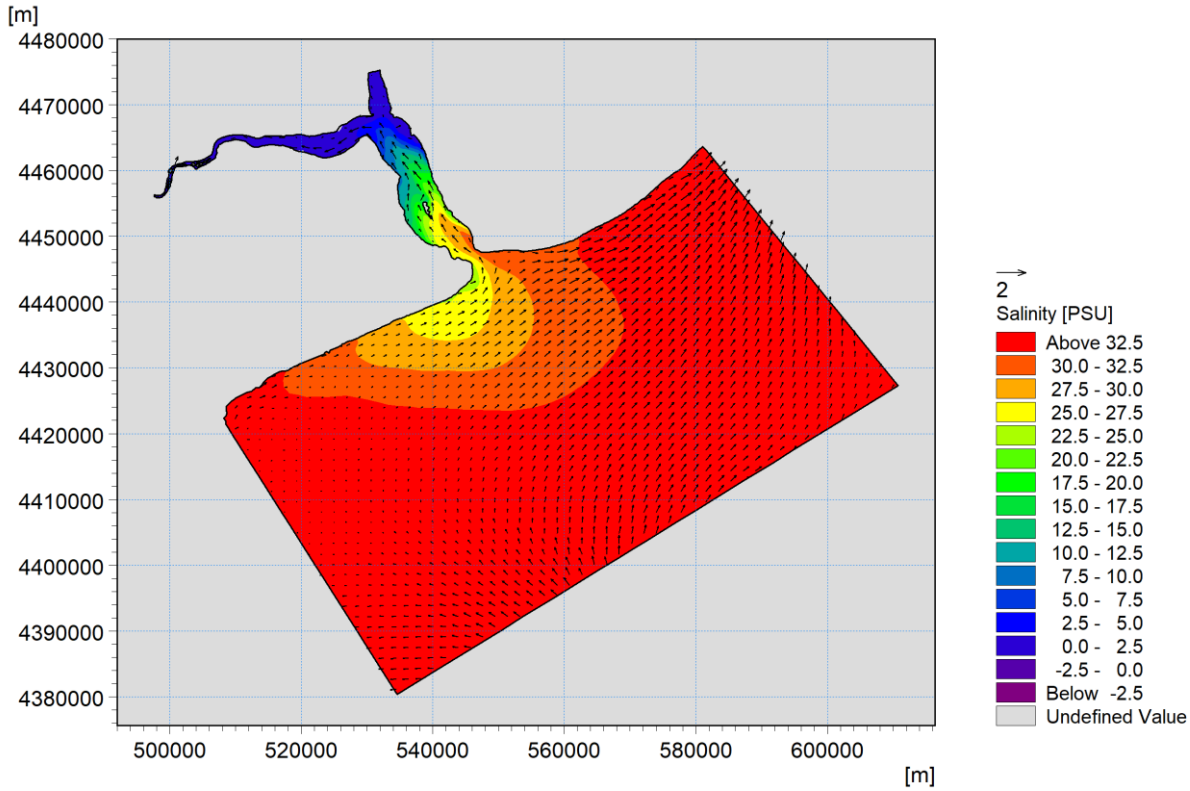


Figura 11.6.13 Día 10 de abril de 2019 11:07 (UTC-3). Se grafican las bandas 432 en RGB menos la banda 4.

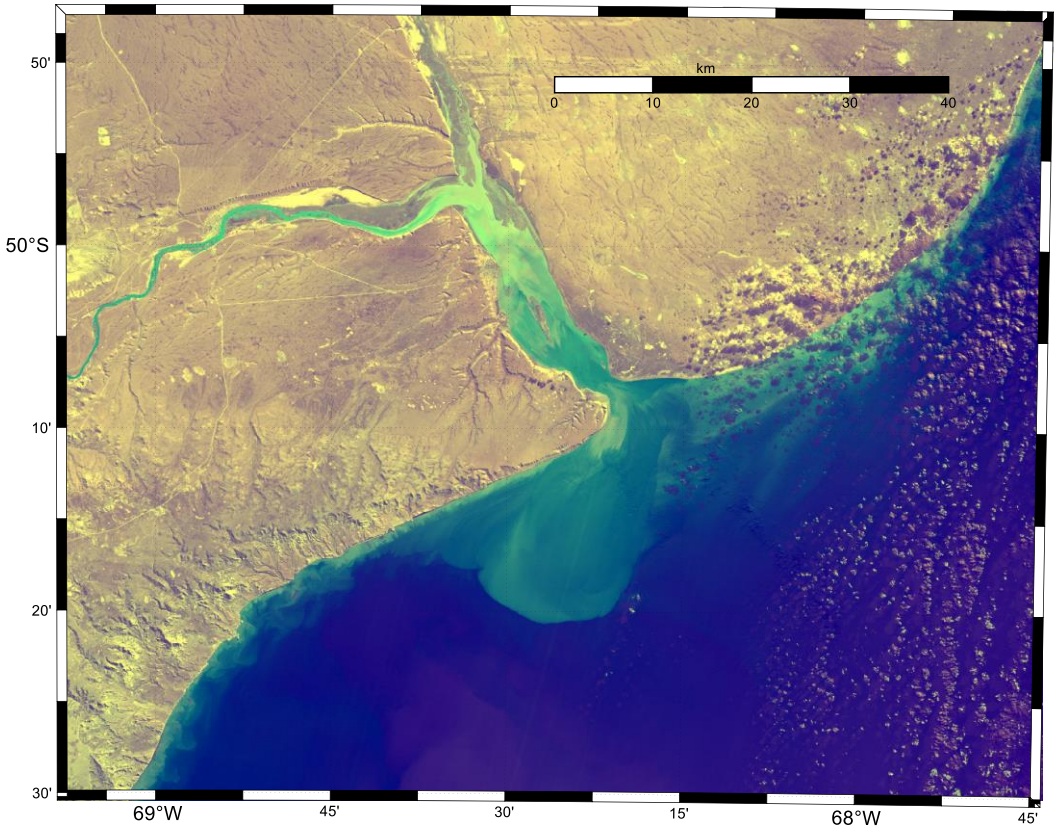


Figura 11.6.14 Día 10 de abril de 2019 11:07 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

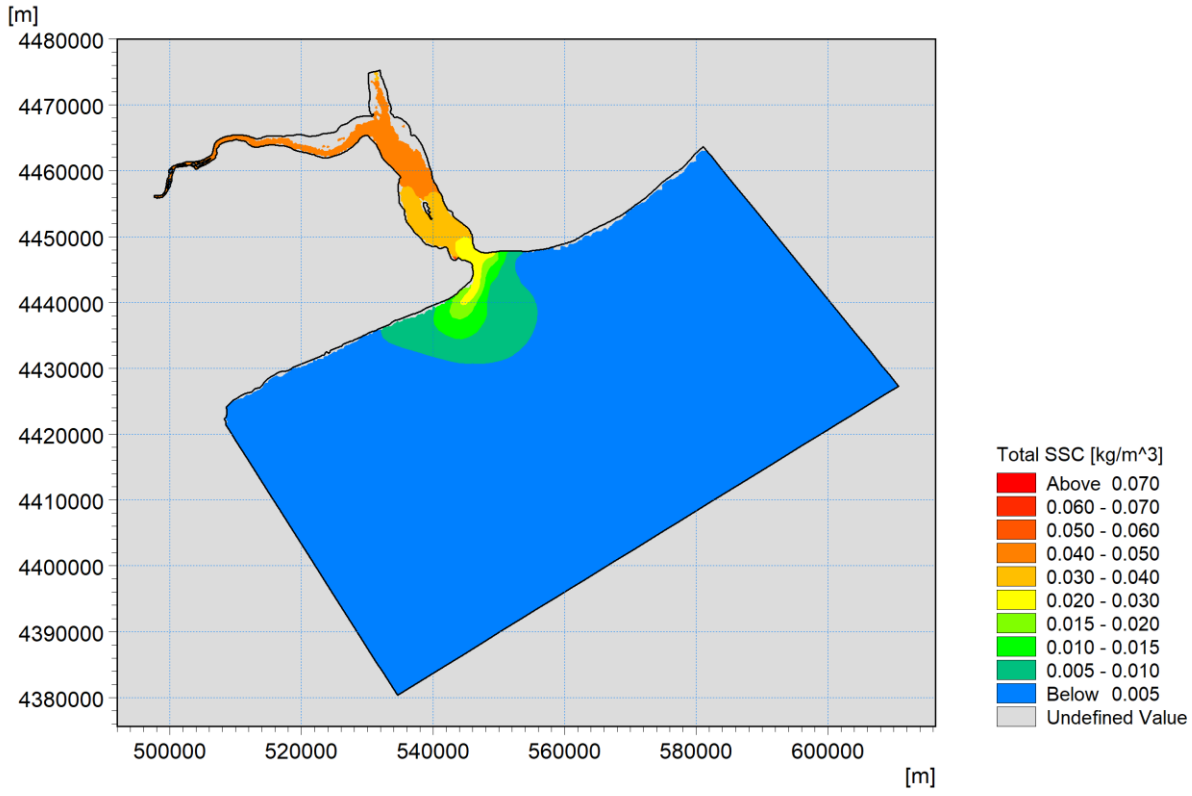


Figura 11.6.15 Día 10 de abril de 2019 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD), en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

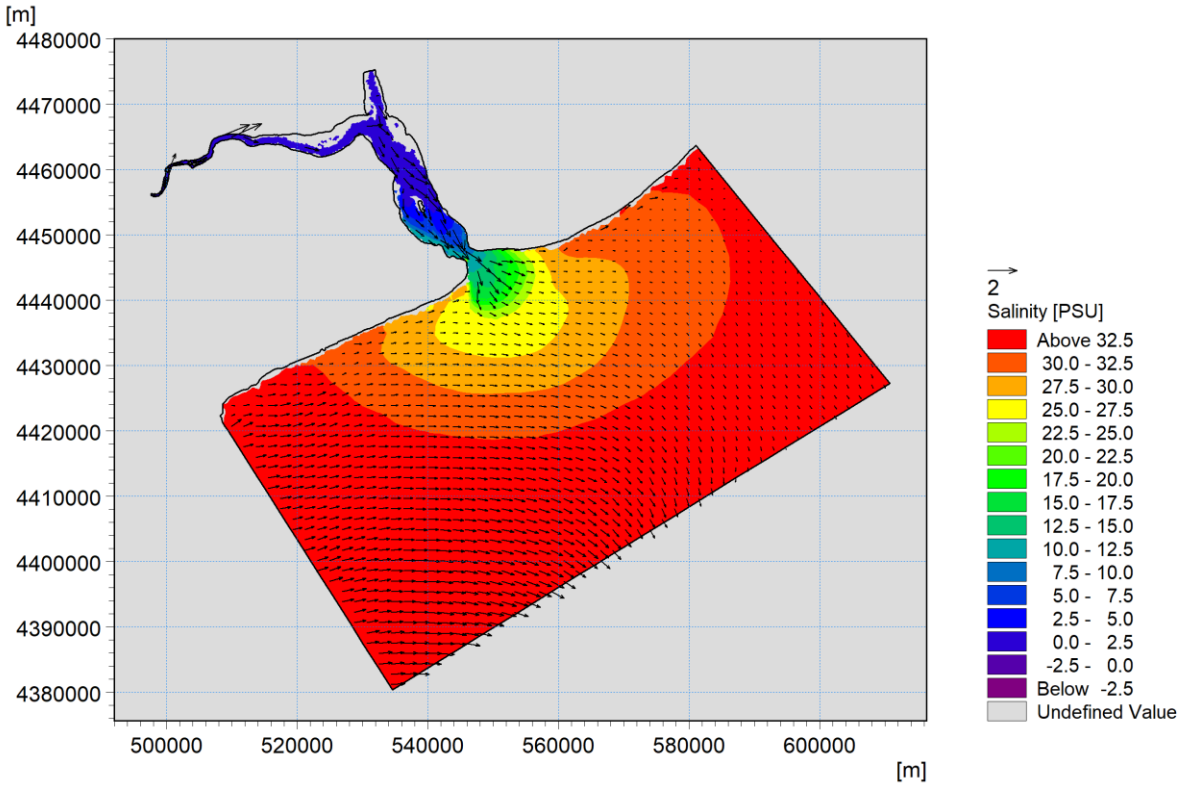


Figura 11.6.16 Día 12 de mayo de 2019 11:07 (UTC-3). Se grafican las bandas 432 en RGB.

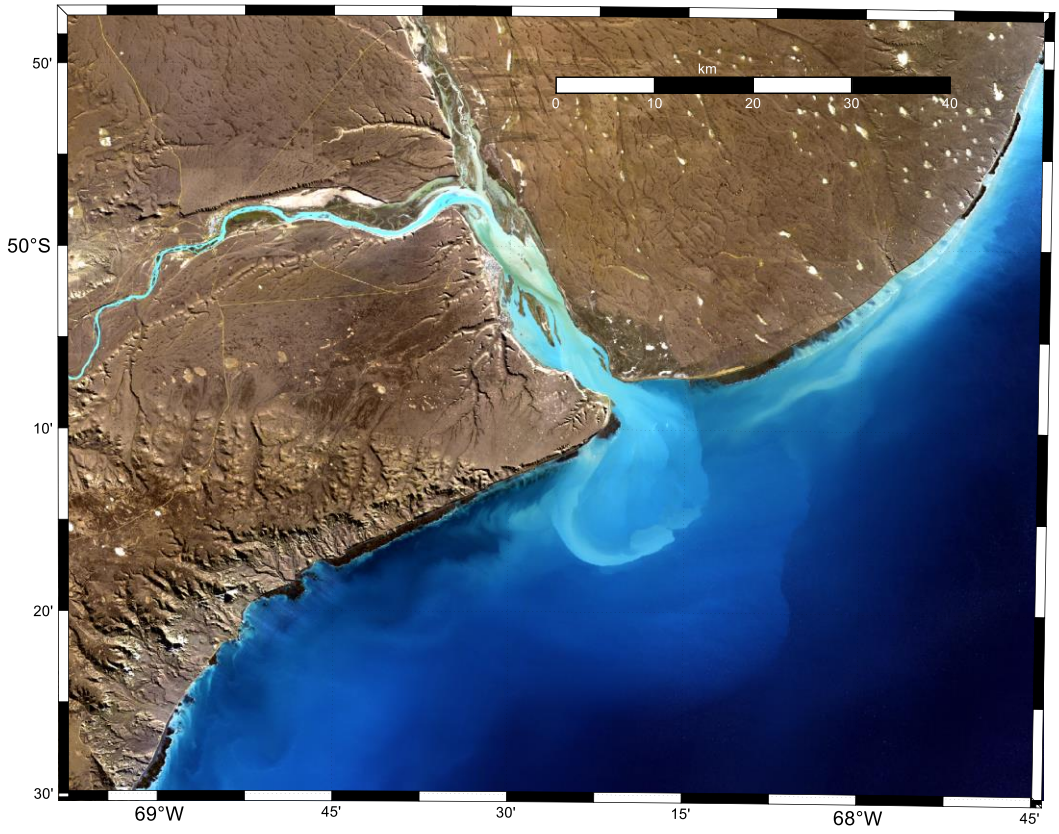


Figura 11.6.17 Día 12 de mayo de 2019 11:07 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD+MT), en términos de la concentración de sedimentos en suspensión.

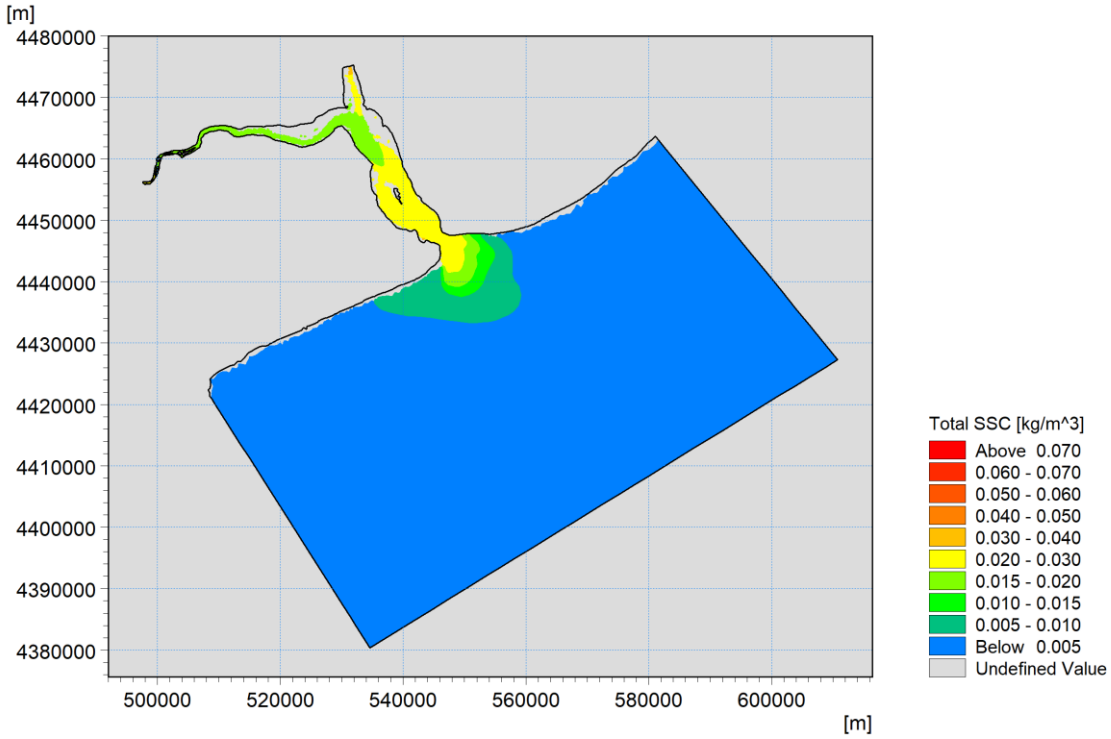
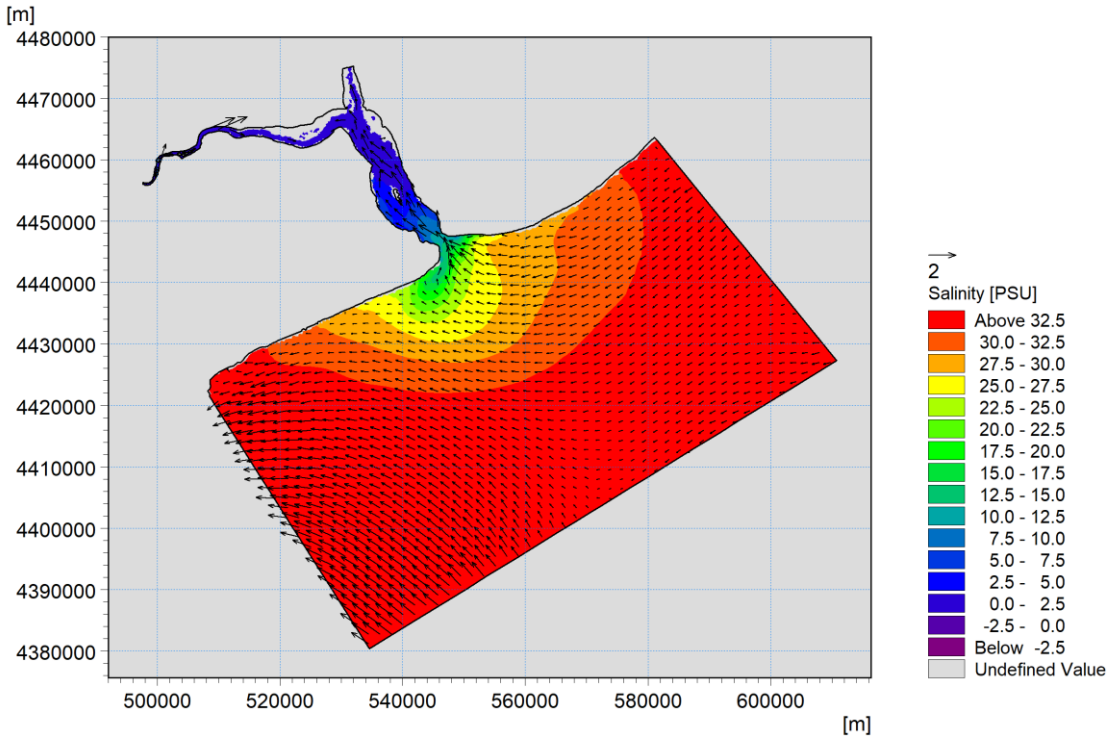


Figura 11.6.18 Día 12 de mayo de 2019 11:00 (UTC-3). Resultado del modelo regional MIKE 3 Flow Model (HD), en términos del campo de salinidad en UPS y el corrientes superficiales.

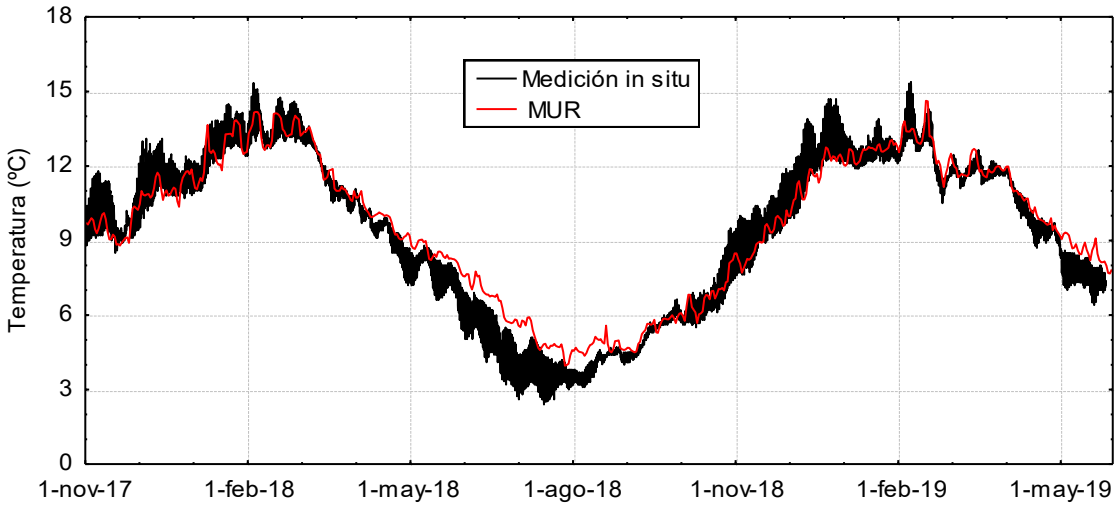


11.7. Resultados en base a las imágenes MUR

Se presentan a continuación las comparaciones entre los datos de las imágenes de MUR (datos diarios) y las mediciones in situ en Punta Quilla (1 dato por hora) a 10.4 m de profundidad y con los resultados de las corridas del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD).

La serie temporal registrada in situ y la serie obtenida de las imágenes de MUR se presentan en la Figura 11.7.1. La figura muestra un adecuado ajuste entre las mediciones in situ y el producto de MUR. Es interesante observar un mayor alejamiento entre los datos durante los meses fríos.

Figura 11.7.1 Series temporales de mediciones de temperatura in situ (a 10.4 m de profundidad en un sitio de 16 m ambos referidos al NMM) y datos diarios de MUR.



Las Figuras 11.7.2 a 11.7.13 presentan las comparaciones en 2D entre la temperatura superficial del mar (TSM) de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), usando promedios mensuales de ambos datos. El modelo está calibrado con los datos de temperatura, entre otras variables.

Figura 11.7.2 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante enero de 2018.

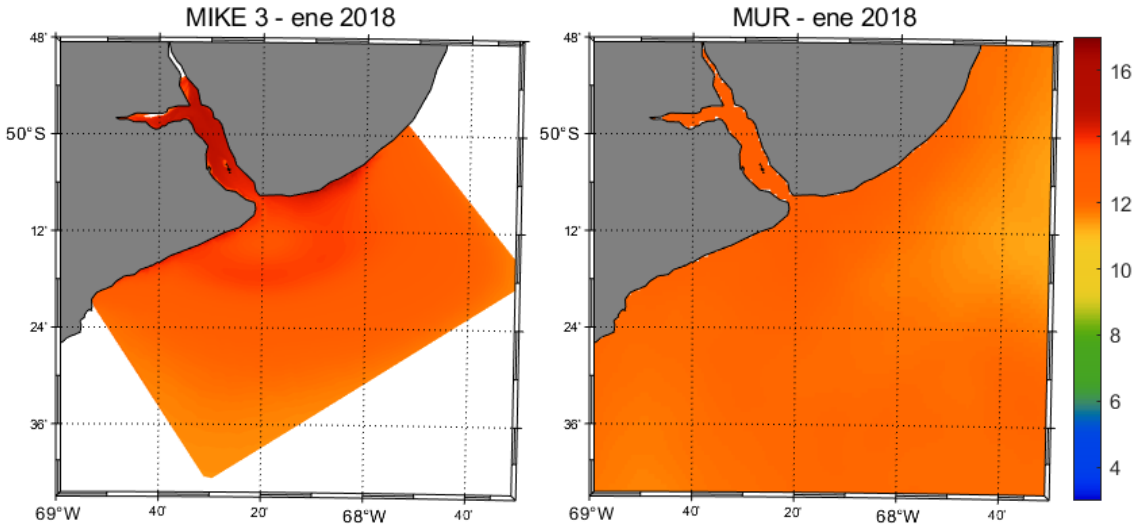


Figura 11.7.3 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante febrero de 2018.

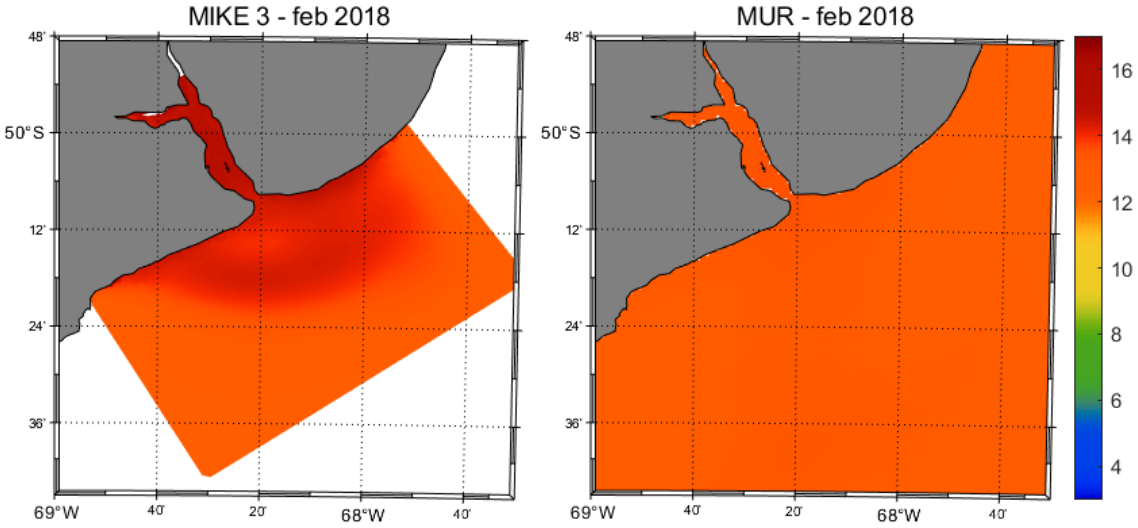


Figura 11.7.4 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante marzo de 2018.

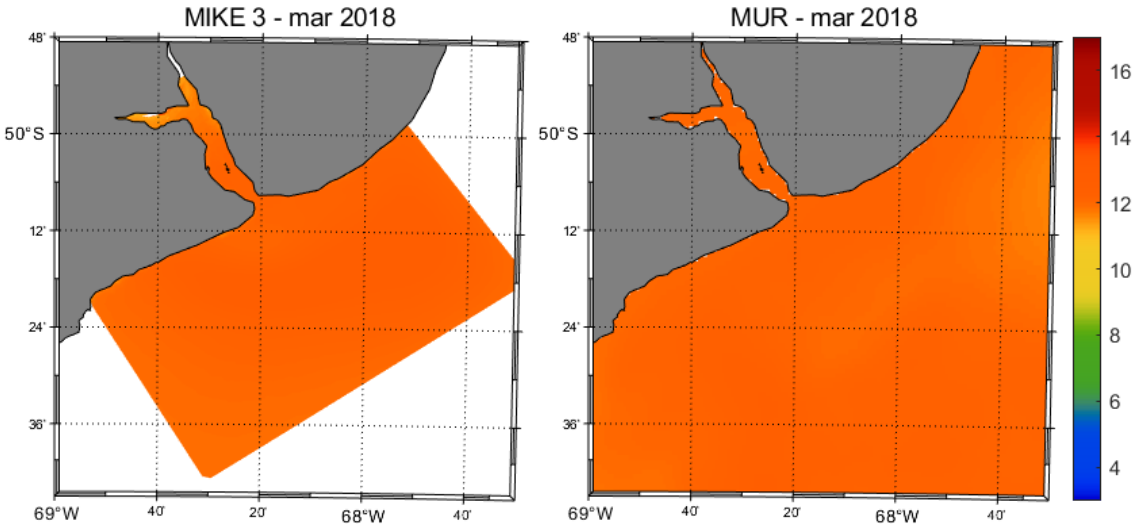


Figura 11.7.5 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante abril de 2018.

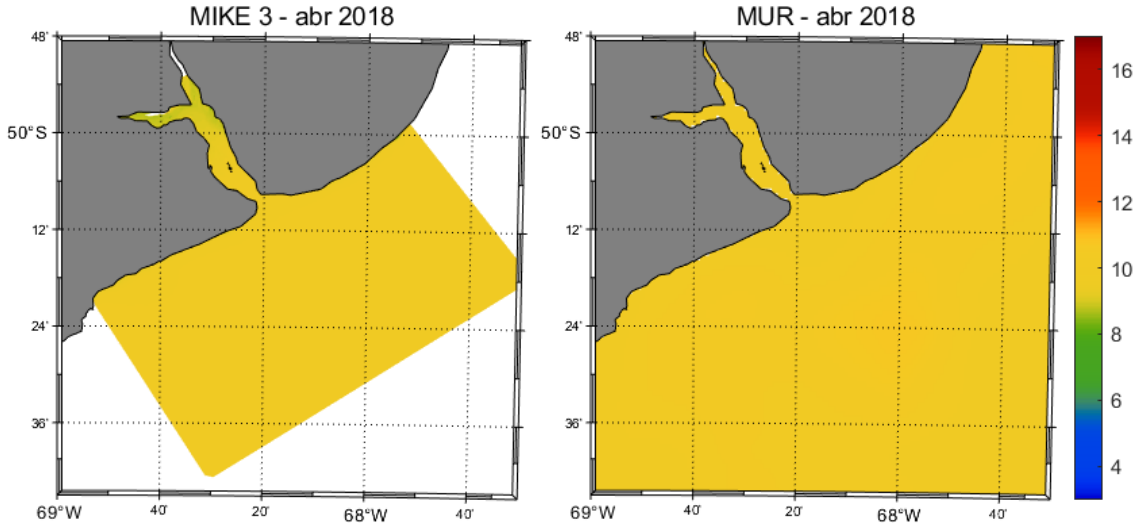


Figura 11.7.6 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante mayo de 2018.

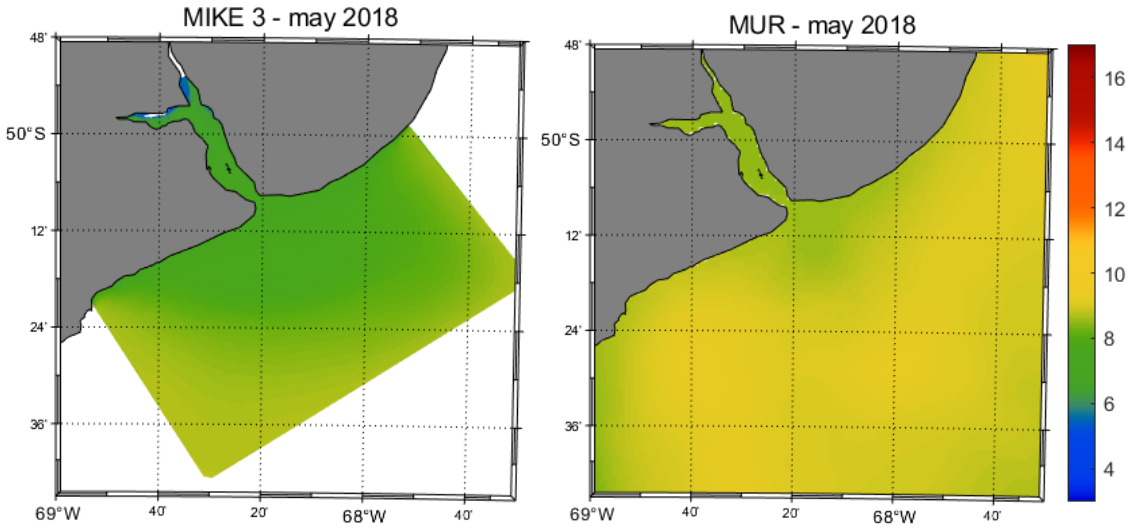


Figura 11.7.7 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante junio de 2018.

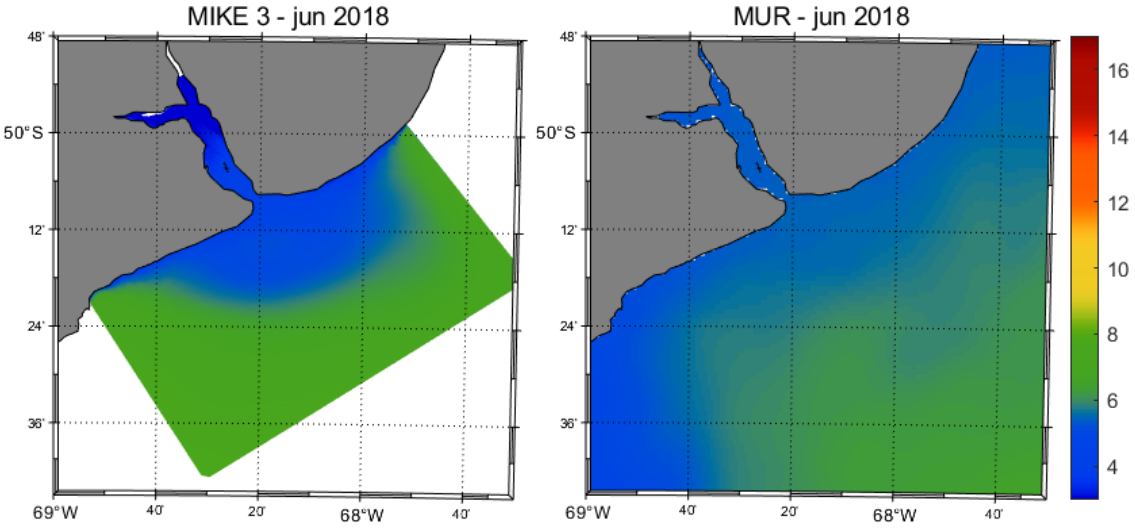


Figura 11.7.8 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante julio de 2018.

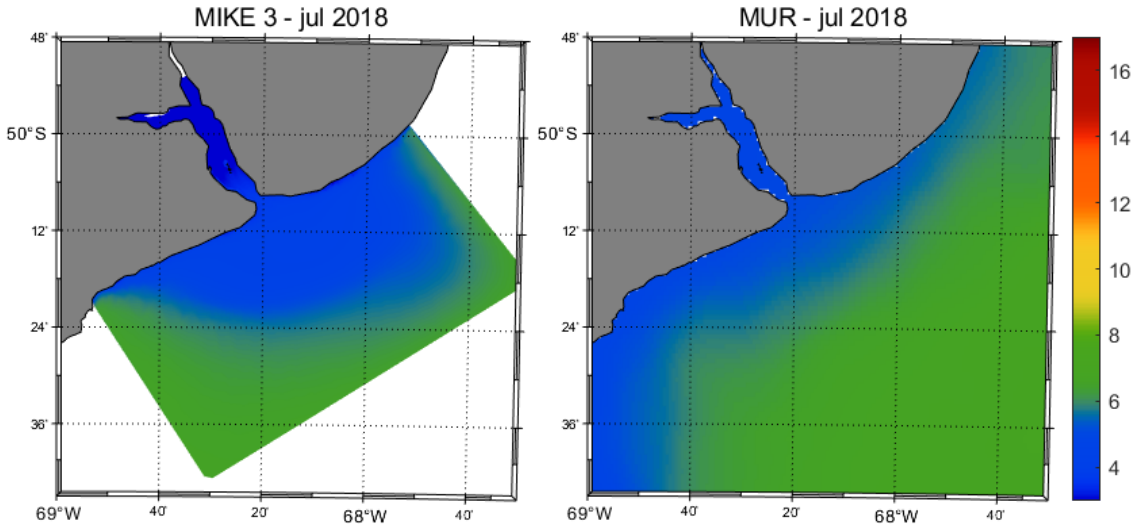


Figura 11.7.9 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante agosto de 2018.

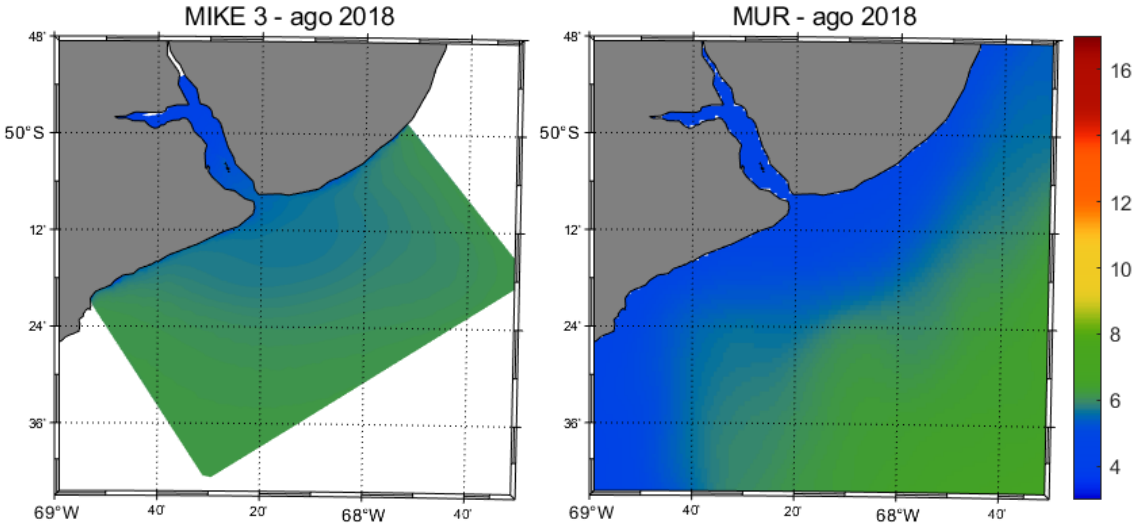


Figura 11.7.10 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante septiembre de 2018.

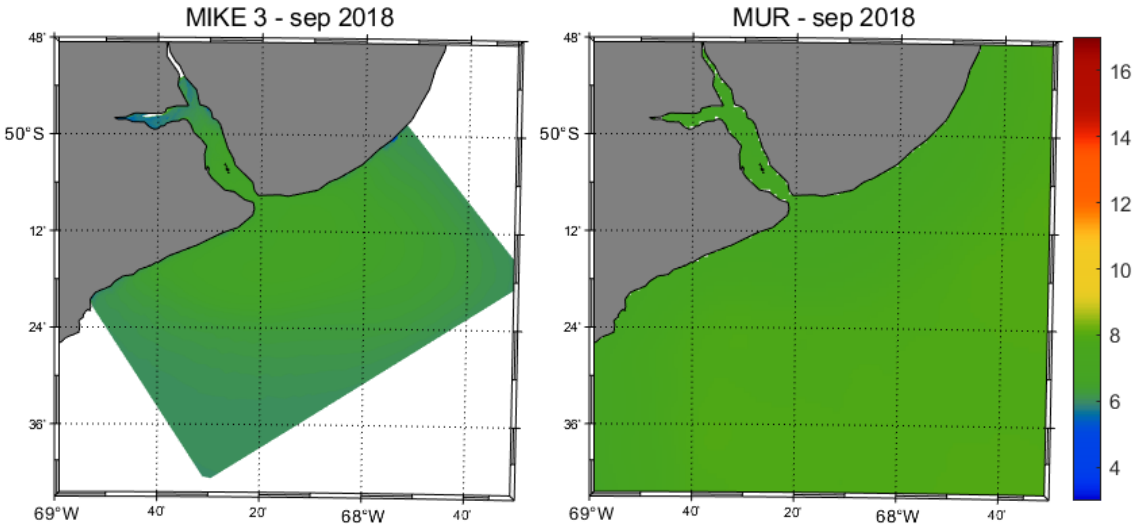


Figura 11.7.11 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante octubre de 2018.

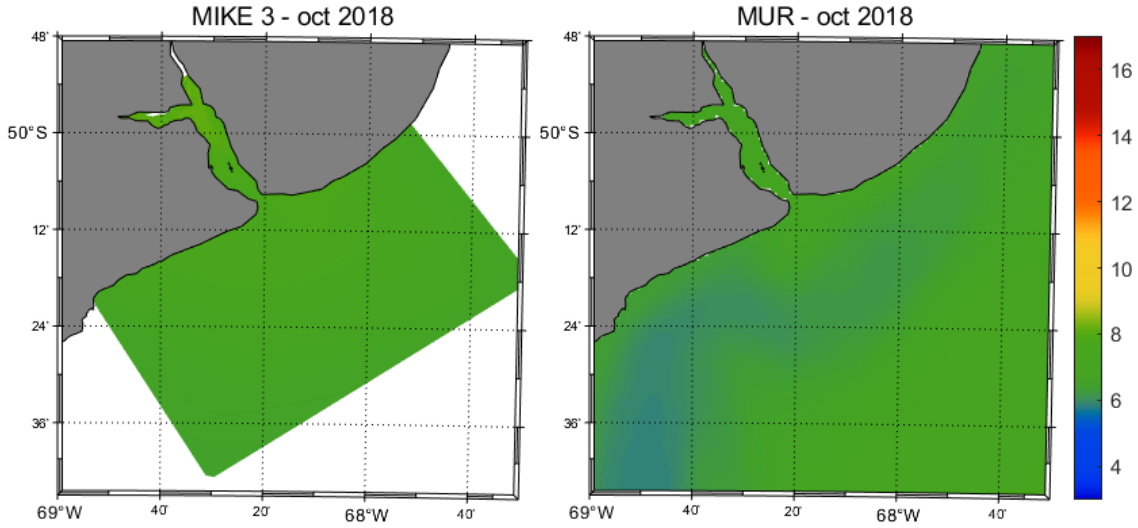


Figura 11.7.12 Comparación de la SST del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 HD, promedio durante noviembre de 2018.

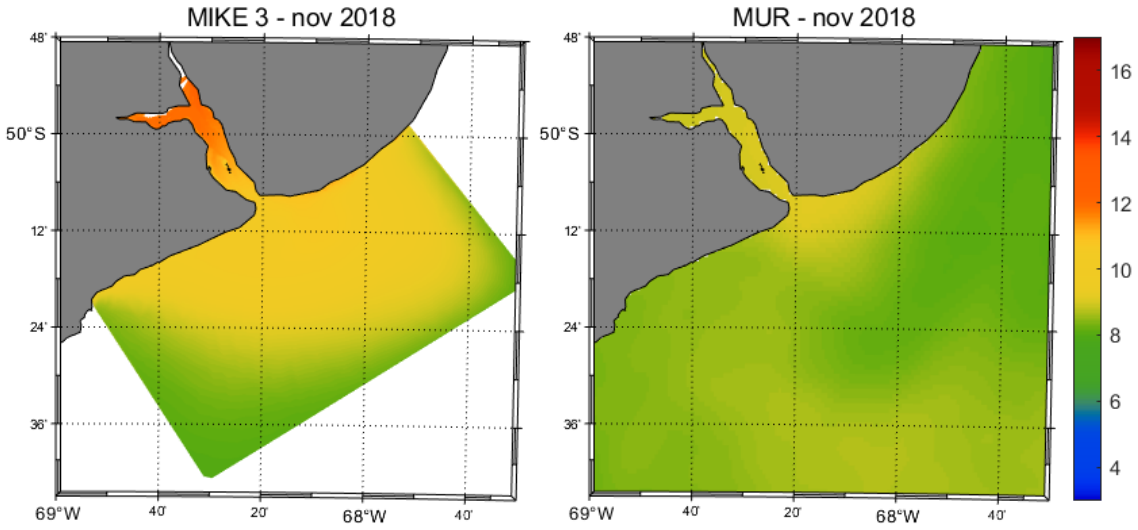
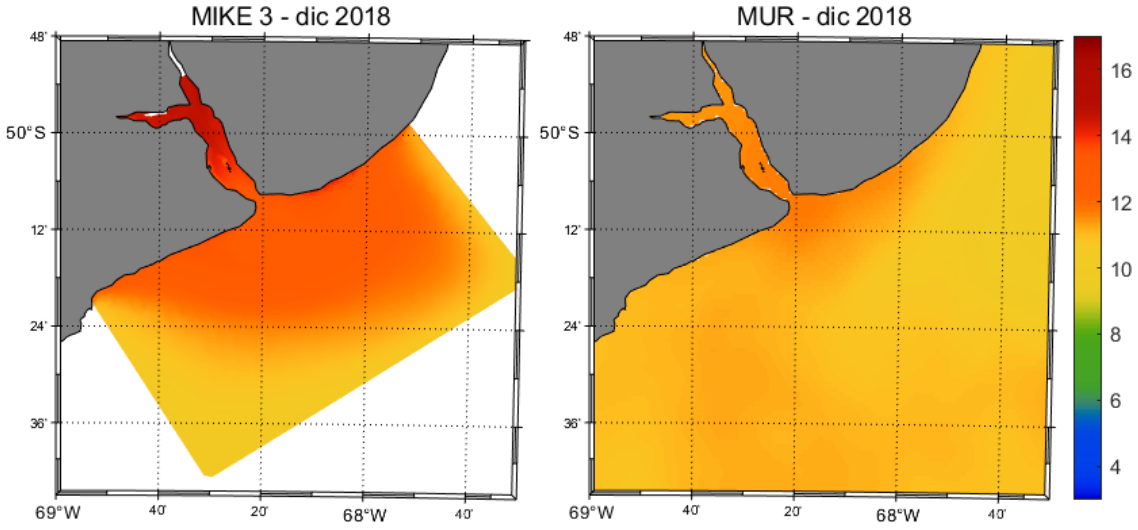


Figura 11.7.13 Comparación de la TSM del producto del nivel 4 de procesamiento de MUR y la calculada por el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD), promedio durante diciembre de 2018.



En el interior de estuario los datos de MUR se muestran más homogéneos que los resultados del modelo. Tanto en los meses de invierno como de verano, el MIKE presenta temperaturas más extremas en el interior del estuario.

La calibración del modelo en el interior del Estuario y parte del río Santa Cruz es muy buena, pero en las cercanías de los bordes offshore, donde el MIKE 3 Flow Model (HD) se alimenta de las temperaturas calculadas por el modelo global HYCOM, hay cierto alejamiento de los mapas de MUR. Por lo que se podría intentar incluir estos datos como

bordes del modelo, extrapolándolos con algún criterio, desde la superficie a toda la columna de agua.

11.8. Resultados en base a las imágenes de GlobColour

Los registros satelitales confirman las características de una onda de unos 14 días de período que presenta máximos de turbidez en sicigias y mínimos en cuadraturas.

Entre las diferentes relaciones de Rrs (λ), los algoritmos que mejor ajustaron a las mediciones in situ de turbidez se basan en el cociente Rrs(670)/Rrs(412). Para la turbidez mínima diaria se ajustaron diferentes algoritmos basados en relaciones de Rrs(λ) en búsqueda del menor RMSE, (Hongyan Xi et al., 2020). El mejor de los resultados se obtuvo con el siguiente algoritmo:

$$Turbidez\ mínima = 14.4\frac{Rrs(670)}{Rrs(412)} - 2$$

Al igual que para la turbidez mínima, para la media diaria se ajustaron diferentes algoritmos basados en relaciones de Rrs(λ) en búsqueda del menor RMSE, (Hongyan Xi et al., 2020). En este caso el uso del caudal del río Santa Cruz (Q) fue incluido en la ecuación. La formulación que minimizó el error es la siguiente:

$$Turbidez\ media = \frac{\frac{Rrs(670)}{\left(1-\frac{Rrs(670)}{0.04}\right)}}{Rrs(412)} \cdot \left(\frac{Q}{47}\right) + 2$$

Las Figuras 11.8.1 y 11.8.3 presentan la representación de la turbidez asociadas a los algoritmos presentados en comparación con las medias y mínimas diarias de la turbidez in situ. Las Figuras 11.8.2 y 11.8.4 presentan con la turbidez registrada in situ (1 dato por hora) y los niveles del mar, para completar el análisis. La Figura 11.8.5 presenta los diagramas de dispersión entre mediciones y resultados de algoritmos.

Si bien los ajustes no alcanzan valores altos de correlación, es posible identificar tanto en las serie media como la mínima que la turbidez calculada en base a Rrs(λ) presenta variaciones asociadas a condiciones de sicigias y cuadraturas.

Figura 11.8.1 Serie de tiempo turbidez mínima diaria de los registros in situ y calculada en base a Rrs (λ). RMSE: raíz del error cuadrático medio.

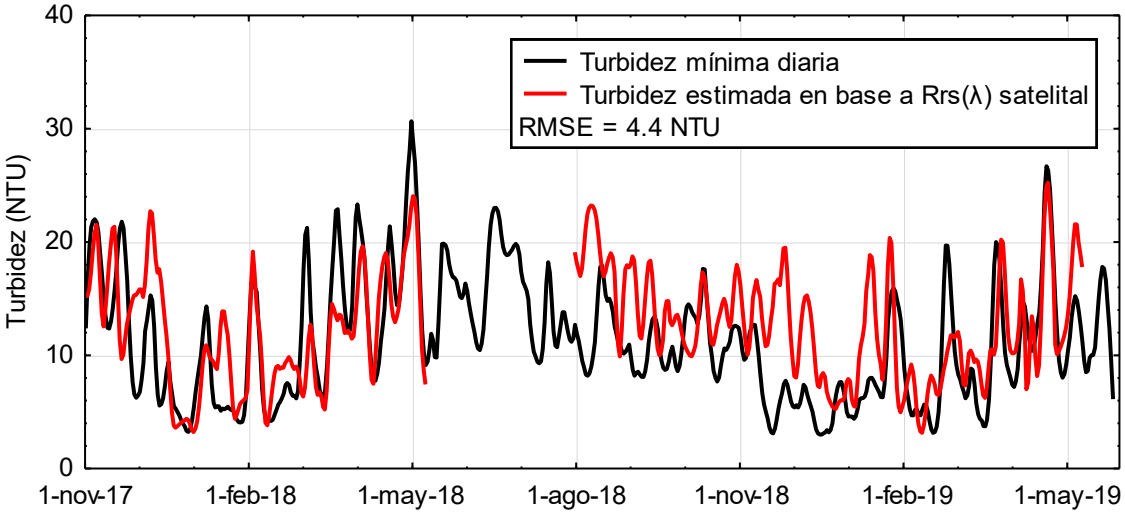


Figura 11.8.2 Serie de turbidez in situ horaria, niveles del mar, turbidez mínima diaria y calculada en base a Rrs (λ).

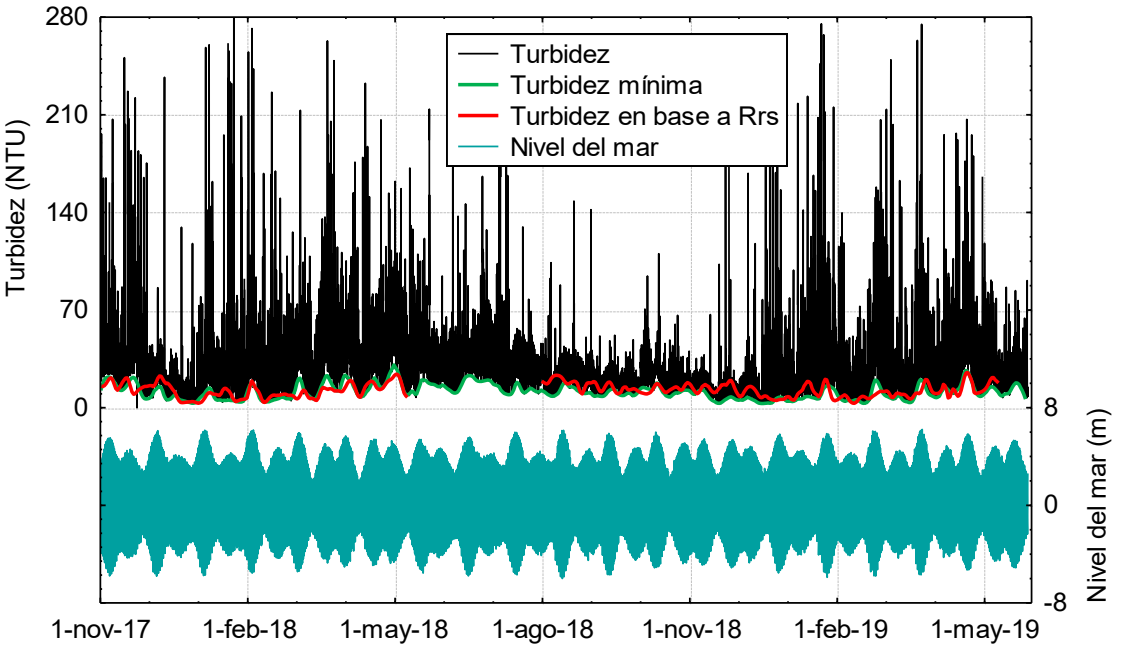


Figura 11.8.3 Serie de tiempo turbidez mínima diaria de los registros in situ y calculada en base a Rrs (λ). RMSE: raíz del error cuadrático medio.

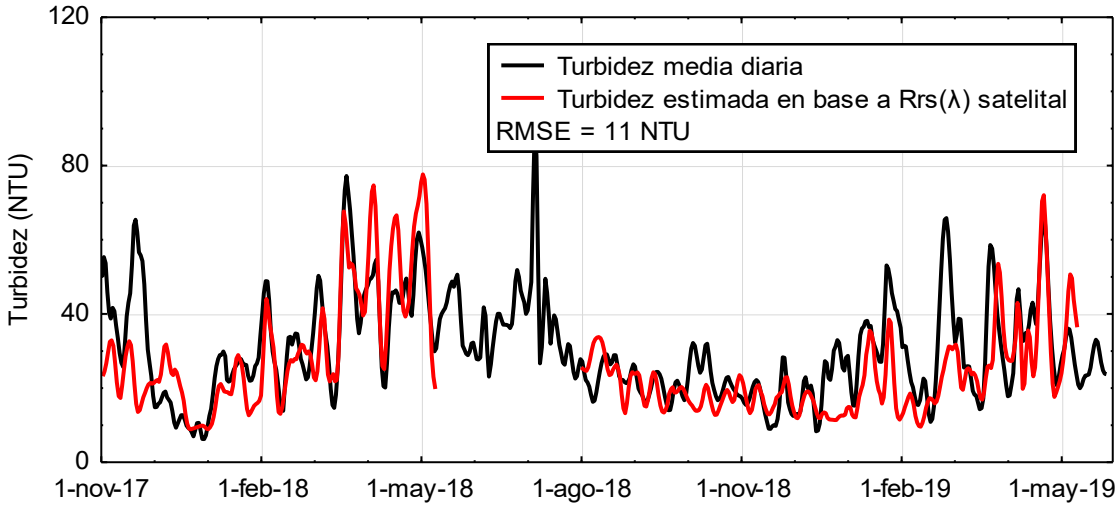


Figura 11.8.4 Serie de turbidez in situ horaria, niveles del mar, turbidez media diaria y calculada en base a Rrs (λ).

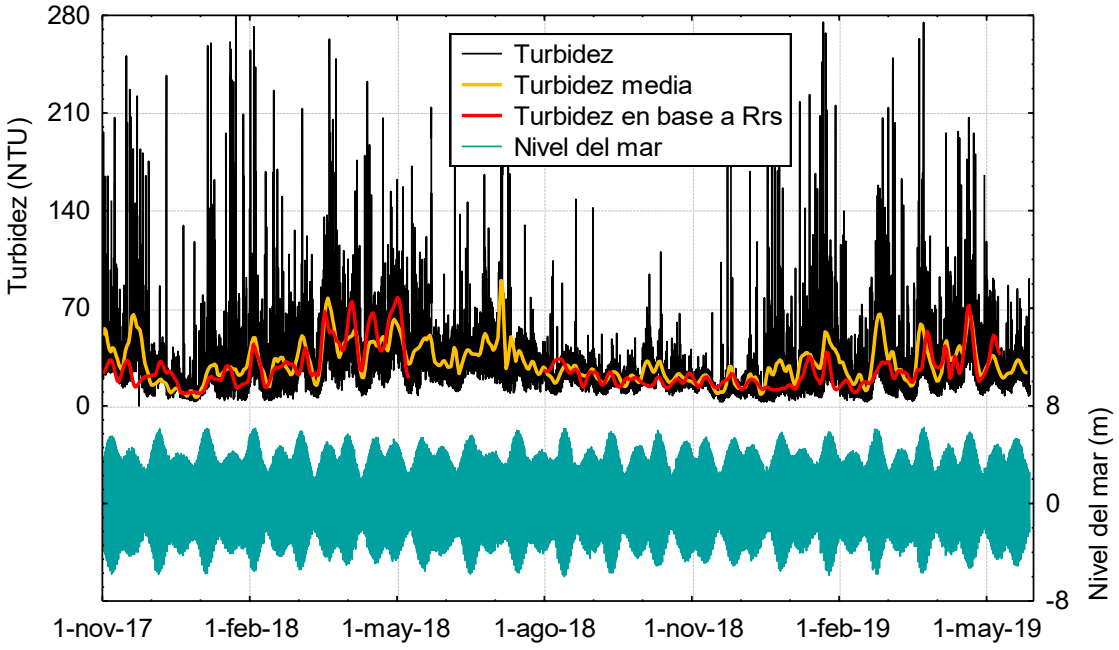
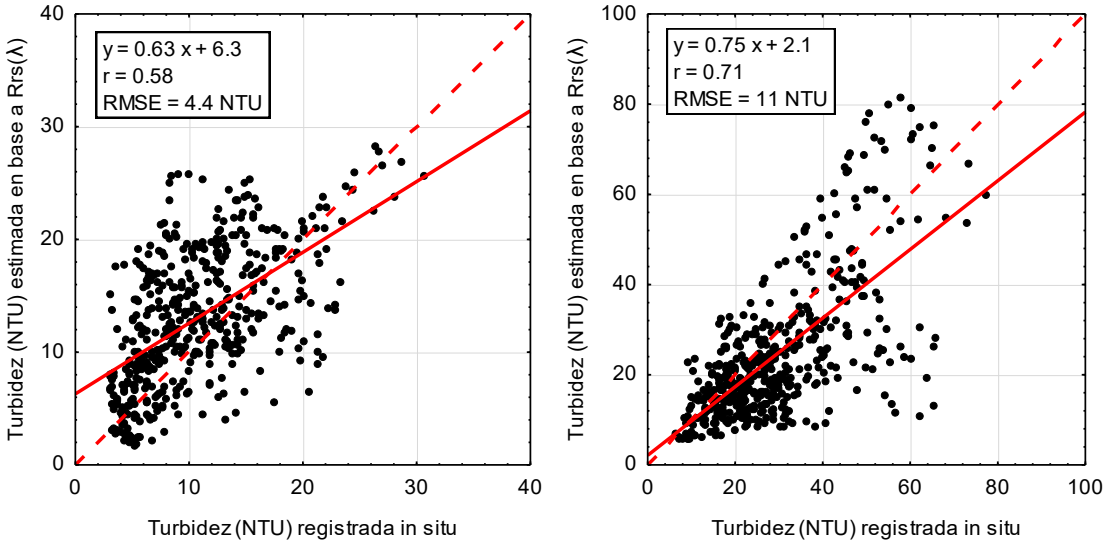


Figura 11.8.5 Diagramas de dispersión entre la turbidez registrada y la estimada en base a los algoritmos encontrados. Mínimos diarios (izquierda) y medias diarios (derecha).



11.9. Conclusiones del Capítulo 11

En el presente estudio se consideraron 3 bases de datos de imágenes satélites: Landsat 8, el producto de MUR y el sitio GlobColour. Cada paquete se utilizó para analizar diferentes aspectos de la pluma de Estuario del río Santa Cruz. Estas son las principales conclusiones:

En base a las imágenes Landsat 8 fue posible validar cualitativamente la pluma calculada por el modelo regional hidrodinámico y de transporte de sedimentos: MIKE 3 Flow Model (HD+MT). Este modelo fue calibrado utilizando datos in situ de temperatura, salinidad, niveles del mar y turbidez en 2 estaciones de la zona, una en río Santa Cruz y otra en el estuario. La generalización a 2D en superficie que permiten las imágenes satelitales, aunque sea solo para algunos instantes, solidifican la confianza sobre la pluma computada por el modelo.

En base al producto de GHRSST Level 4 MUR, se extrajeron datos en forma de series temporales para comparar con las mediciones in situ. Si bien la comparación es aceptable en términos cualitativos debe recordarse que los datos registrados in situ corresponden a mediciones realizadas a 10.4 m de profundidad en un sitio de 16 m de profundidad ambos referidos al NMM, mientras que los datos de MUR corresponden a la temperatura superficial del mar (TSM). El resultado se mantuvo a nivel cualitativo, observándose un

adecuado acuerdo entre las mediciones in situ y los datos extraídos de las imágenes de MUR. Es interesante observar mayor alejamiento entre los datos en los meses fríos.

Con los datos de MUR también se construyeron mapas de la media mensual del año 2018 de SST y se los comparó con sus pares resultantes del modelado. La comparación muestra un buen acuerdo de la onda anual de TSM, aunque en el interior de estuario los datos de MUR se muestran más homogéneos que los resultados del modelo. Donde, tanto en los meses de invierno como de verano, el MIKE Flow Model FM presenta temperaturas más extremas. La calibración del modelo en el interior del Estuario y parte del río Santa Cruz es muy buena, pero en las cercanías de los bordes offshore, donde el MIKE 3 Flow Model (HD) se alimenta de las temperaturas calculadas por el modelo global HYCOM, hay cierto alejamiento de los mapas de MUR. Por lo que se podría intentar incluir estos datos como bordes del modelo, extrapolándolos con algún criterio, desde la superficie a toda la columna de agua. Es esperable que en el interior del estuario el MIKE 3 Flow Model FM esté funcionando mejor que las mediciones remotas interpoladas, pero que fuera de este, donde el modelo no posee registros para calibrar, los campos 2D superficiales de MUR se asemejen más a la realidad que el modelo.

Por último, se obtuvieron las Rrs(λ) del sitio GlobColour de diferentes sensores con espaciado temporal de 1 día. Estos datos presentan faltantes en los meses de mayo, junio y julio. Con el resto de los datos se buscó representar la turbidez de la pluma de descarga en el mar del estuario del río Santa Cruz. Los datos in situ en Punta Quilla identifican mayores niveles de turbidez en los períodos de sicigias que en los de cuadraturas, también con mayores caudales del río Santa Cruz. La turbidez basada en Rrs(λ) corrobora este hallazgo. Se probaron diferentes algoritmos para representar los mínimos y medios diarios de turbidez, en ambos casos el cociente Rrs(670)/Rrs(412) resultó ser el más eficaz.

Capítulo **12**

Resultados: Crecimiento del NMM en la descarga del río Santa Cruz

Respecto al crecimiento del nivel del mar en la región de interés de este trabajo Ruiz Etcheverry et al. (2016) presentan un análisis de datos de altímetro para el período enero de 1993 a diciembre de 2009 (21 años), en el que se observa un máximo de tendencia del nivel mar en la zona de la descarga del río Santa Cruz.

La Figura 12.1 es un mapa de tendencia lineal del nivel del mar que ha sido presentado en (Ruiz Etcheverry et al., 2016). Esta imagen presenta tres regiones en el Mar Argentino con grandes tendencias positivas de la anomalía del nivel del mar (sea level anomaly - SLA), con valores > 4 mm/año:

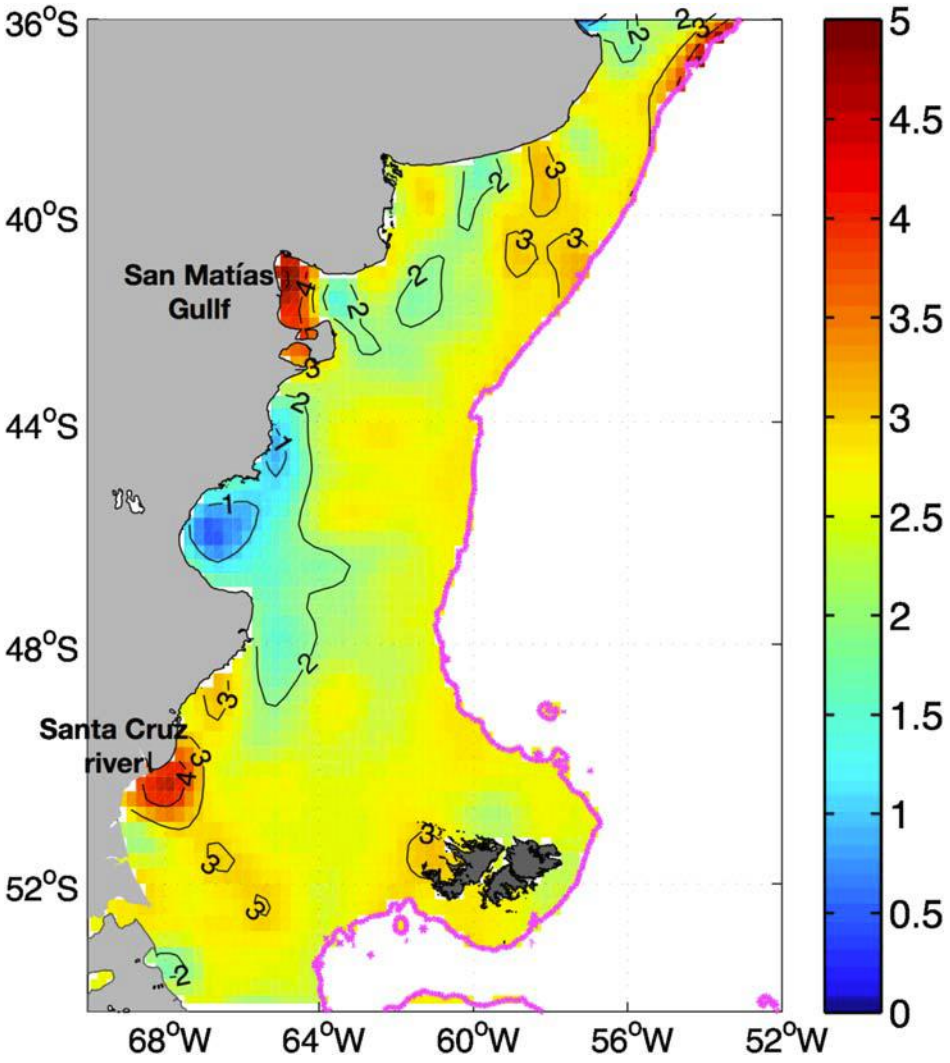
i) en la plataforma exterior al norte de 38°S

ii) en el Golfo San Matías, cerca de los 42°S

iii) en la región costera alrededor de la desembocadura del río Santa Cruz, cerca de los 50°S

(Ruiz Etcheverry et al., 2016) indican que la tendencia observada podría ser una respuesta al aumento de la descarga fluvial. Sin embargo, el estudio de Pasquini y Depetris (2011) no encontró tendencias significativas en la descarga del río Santa Cruz. También, Ruiz Etcheverry et al. (2016), exploraron si los cambios en la tensión del viento podrían explicar las tendencias observadas en el SLA en la región a través de procesos de afloramiento o descenso. No se encontró ninguna tendencia significativa en los vientos que pudiera explicar el proceso mencionado cerca de la desembocadura del río Santa Cruz.

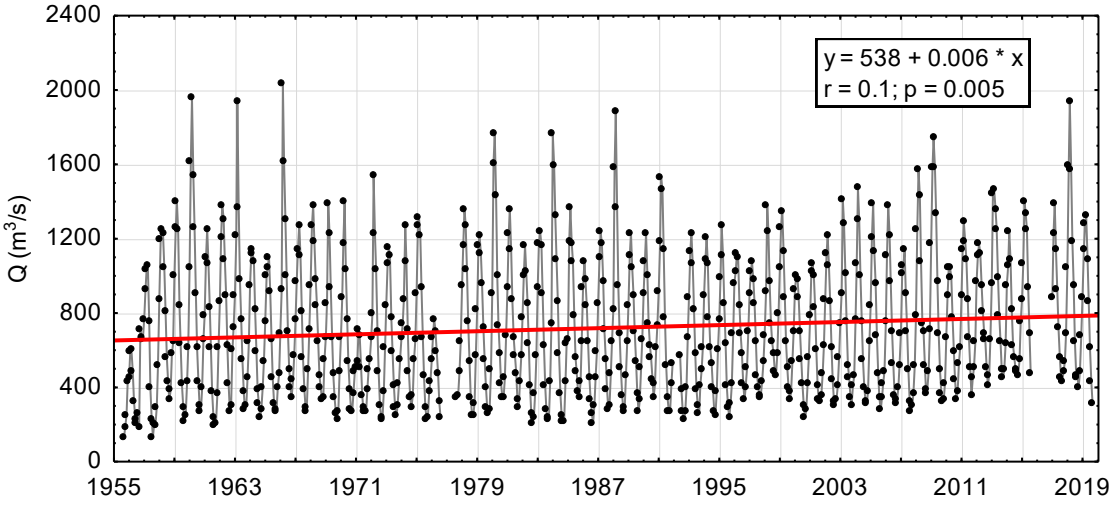
Figura 12.1 Distribución de la tendencia lineal del SLA (mm/año) para el periodo comprendido entre enero de 1993 y diciembre de 2013. La línea magenta indica la isóbata de 200 m, (Fuente: Ruiz Etcheverry et al., 2016)



El presente trabajo ha estudiado una serie de tiempo de caudales del río Santa Cruz de 1955 a 2019, con algunos periodos menores sin datos. Esta serie ha sido construida en base a datos de niveles del río y aforos en Charles Fuhr. Detalles del ajuste entre las variables se presenta en Lara (2016). Este trabajo indica que el ajuste se basó en más de 900 aforos, con caudales comprendidos entre 180 m^3/s (25% del módulo) y 1700 m^3/s (2.5 veces el módulo), lo que garantiza que se dispone de un conocimiento fiable de la función que relaciona los niveles con los caudales en Charle Fuhr (curva HQ en CHF). Por otro lado, para el presente estudio se realizaron aforos en la estación Puente Viejo que han sido comparados con la serie de caudales construida en base a la curva HQ. Estos resultados se presentan en el punto 7.16.

La Figura 12.2 presenta la serie temporal de caudales con la tendencia lineal durante los años disponibles que incluyen al período analizado por Ruiz Etcheverry et al. (2016). Los datos indican una tendencia positiva significativamente distinta de 0 (valor-p = 0.005), por lo que el aumento del nivel del mar observado por el mencionado artículo está de acuerdo con este resultado. La pendiente es de 0.006 m^3/s por día, correspondiente a un aumento en el caudal de unos 2.2 m^3/s cada año. No se analiza en este trabajo cuánto significa este aumento en el caudal respecto del nivel del mar en la zona de la desembocadura del río.

Figura 12.2 Serie de tiempo de caudales del río Santa Cruz



Capítulo **13**

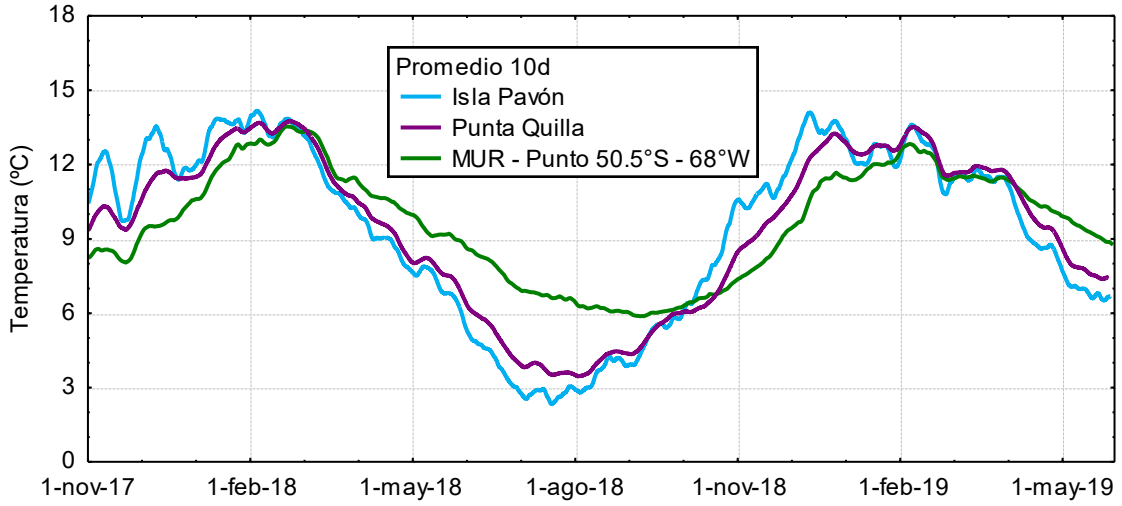
Resultados: Frentes de temperatura en la zona de la descarga del río Santa Cruz

El trabajo de Rivas y Pisoni (2010), analiza los frentes de TSM (temperatura superficial del mar) de la plataforma argentina, y encuentran que, a lo largo de las costas de Tierra del Fuego y Santa Cruz, la combinación de una fuerte mezcla mareal y plumas costeras de baja salinidad conducen a ciclos estacionales semestrales de intensidad y persistencia de los frentes, con un máximo relativo en invierno. También observan que el contraste entre los valores de la TSM a ambos lados de los frentes es menor en invierno. Concluyendo que la señal de temperatura parece ser el resultado del calentamiento en verano y el enfriamiento en invierno de una banda de agua de baja salinidad atrapada cerca de la costa.

Los frentes cálidos se definen cuando la TSM más alta se encuentra en la región menos profunda (agua de mar a menor temperatura que la costera) y los fríos cuando la TSM más alta está en la región más profunda. Según los autores los frentes identificados en las costas de Santa Cruz muestran un ciclo semestral con frentes fríos en invierno y cálidos en verano. Los datos de temperatura del interior del estuario del RSC presentados en la presente tesis coinciden con las conjeturas del trabajo de Rivas y Pisoni (2010).

La Figura 13.1 muestra las series de tiempo de temperatura registradas en el interior del río Santa Cruz (Isla Pavón) y en Punta Quilla, ambas promediadas en una ventana de 10 días. El promedio elimina variaciones de escala temporal menor que escapan al análisis necesario en este capítulo, asociadas a la marea astronómica o la onda diaria de temperatura impuesta por el día y la noche.

Figura 13.1 Series de tiempo de temperaturas registradas en el interior del río Santa Cruz (Isla Pavón) y en Punta Quilla, ambas promediadas en una ventana de 10 días. Serie de temperatura superficial en el punto 50.5º S – 68º W, de la base de datos satelitales construida por MUR, ya descripta en este documento.



A este figura se le agrega la serie de TSM en el punto 50.5º S – 68º W, de la base de datos satelitales construida por MUR, ya descripta en este documento. Es interesante ver que las series registradas en Punta Quilla e Isla Pavón son parecidas entre sí. Aunque la primera de estas tiene una amplitud algo menor, cualquiera de estas curvas podría utilizarse para el análisis que sigue.

Las definiciones de los frentes de SST según Rivas y Pisoni (2010) en la región de interés de esta tesis son:

- cálidos si la temperatura del agua del estuario es mayor que la del mar.
- fríos si la temperatura del agua del estuario es menor que la del mar.

Por lo tanto, en base a la Figura 13.2 los frentes fríos ocurren en invierno, es decir temperatura del estuario menor a la del mar, esto coincide con la Figura 13.1 donde las temperaturas registradas en Isla Pavón y Punta Quilla son menores a las observadas en la base de MUR. En verano la situación se invierte ya que se observa que el agua de mar está relativamente más fría que el agua del estuario.

Esta idea se refuerza con las Figuras 13.3 a 13.8, en las que se muestran las series de tiempo de nivel del mar y temperatura registradas en Punta Quilla. En estas figuras se observa que la temperatura varía en función de la marea. Dado que la temperatura del mar y la del estuario poseen valores diferentes, y que en el estuario ocurre la transición

en entre ambas, los registros de esta variable presentan condiciones que vale la pena describir. Se identifican 3 situaciones:

- Nivel del mar y la temperatura están a contrafase. Ocurre cuando la marea sube y trae agua del mar con temperatura inferior a la del estuario. Ocurre en los meses de verano: octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero.
- Nivel del mar y temperatura no muestran relación. Esta situación ocurre en los meses de transición donde la temperatura del agua de mar y la del estuario son muy parecidas (estrictamente iguales en algunos momentos). Ocurre en los meses de transición marzo y septiembre.
- Nivel del mar y la temperatura están en fase. Ocurre cuando la marea sube y trae agua del mar con temperatura mayor a la del estuario. Ocurre en los meses de invierno: abril, mayo, junio, julio y agosto.

Las mediciones presentadas en esta tesis confirman el análisis de los frentes presentado por (Rivas y Pisoni, 2010).

Figura 13.2 Ciclo estacional del número medio mensual de píxeles frontales Cálidos (línea gruesa) y Fríos (línea delgada) durante el período 1985-2002, para la zona costera de Santa Cruz. (Fuente: Rivas y Pisoni, 2010).

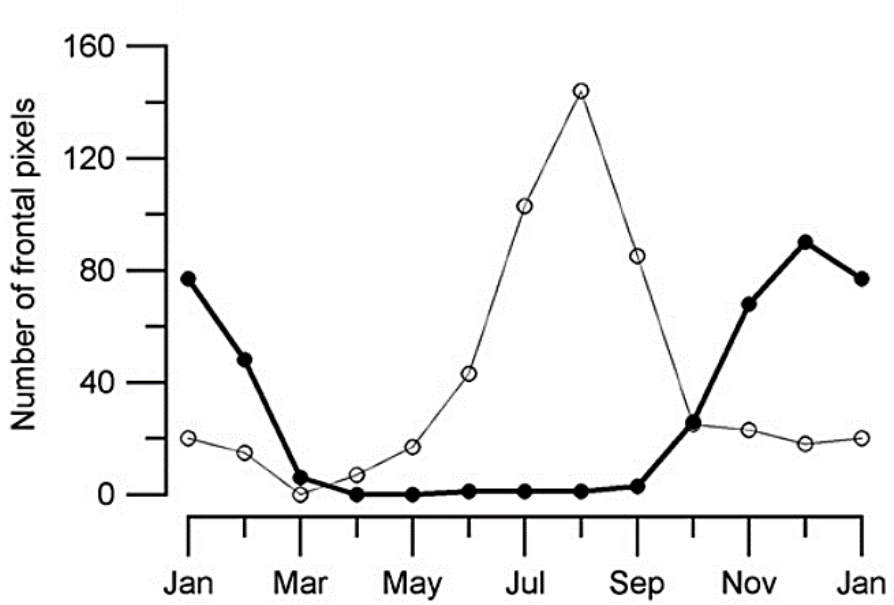


Figura 13.3 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en enero de 2018. En este mes se observa que el nivel del mar y la temperatura están a contrafase. Cuando la marea sube (trae agua del mar) la temperatura baja, indicando que el agua de mar está a menor temperatura que el agua del estuario.

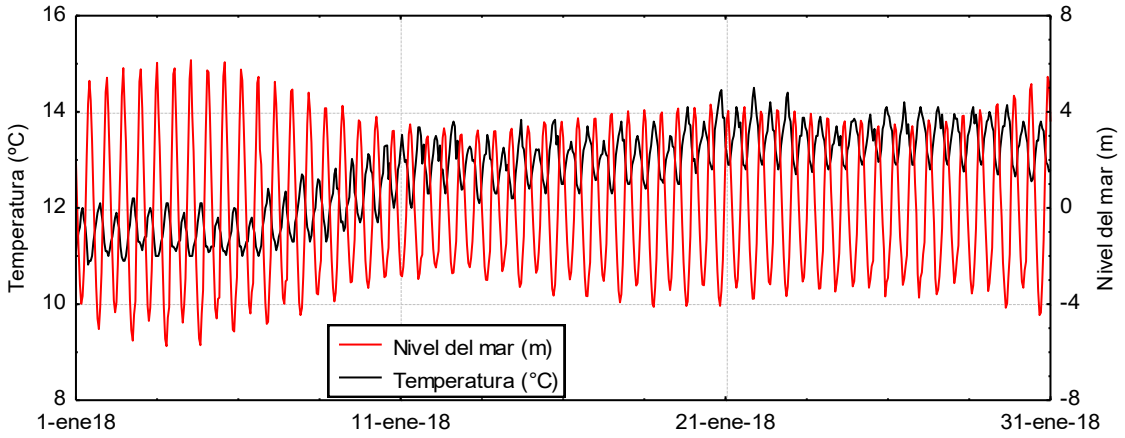


Figura 13.4 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en marzo de 2018. En este mes se observa el cambio de fase entre las variables.

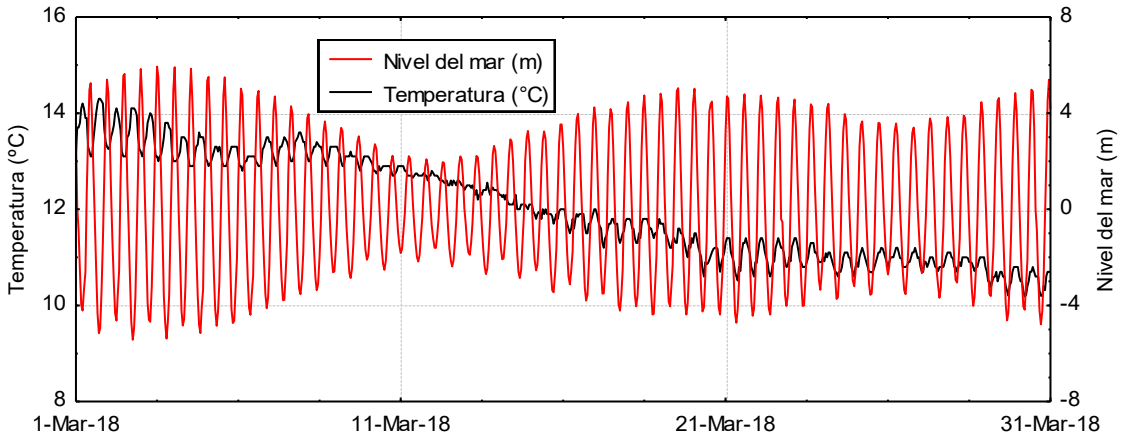


Figura 13.5 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en mayo de 2018. En este mes se observa que el nivel del mar y la temperatura están en fase. Cuando la marea sube (trae agua del mar) la temperatura sube, indicando que el agua de mar está a mayor temperatura que el agua del estuario.

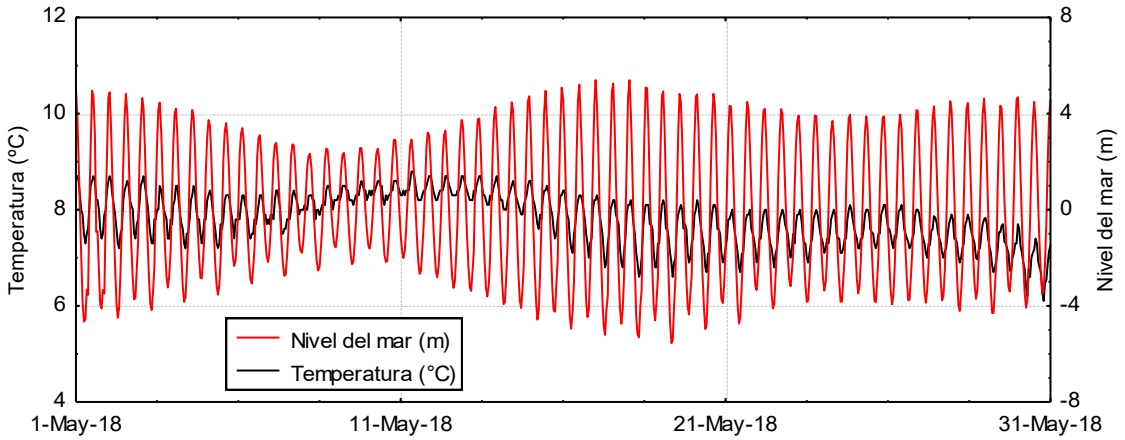


Figura 13.6 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en julio de 2018. En este mes se observa que el nivel del mar y la temperatura están en fase. Cuando la marea sube (trae agua del mar) la temperatura sube, indicando que el agua de mar está a mayor temperatura que el agua del estuario.

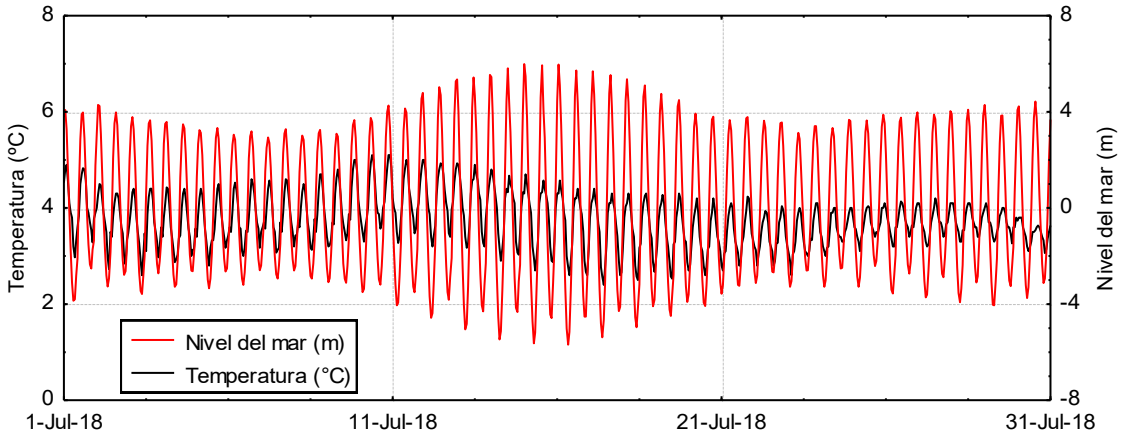


Figura 13.7 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en septiembre de 2018. En este mes se observa el cambio de fase entre las variables.

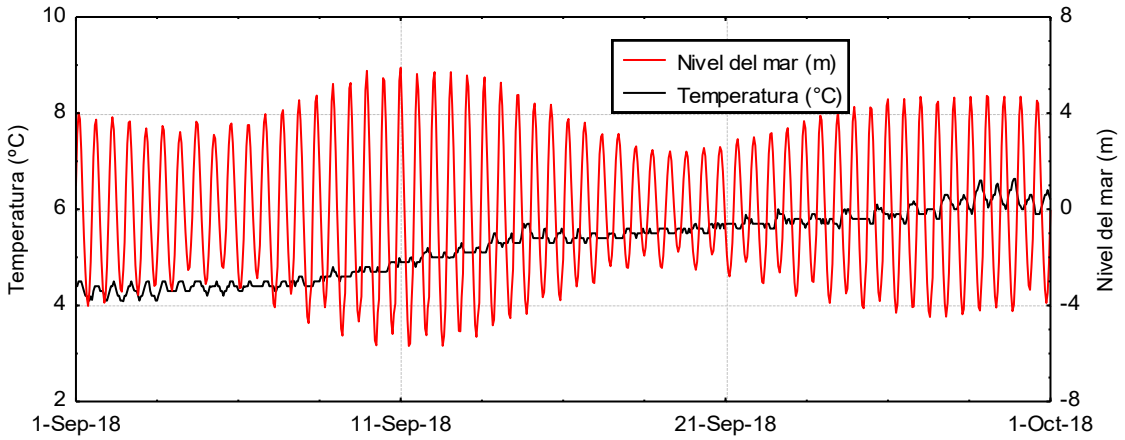
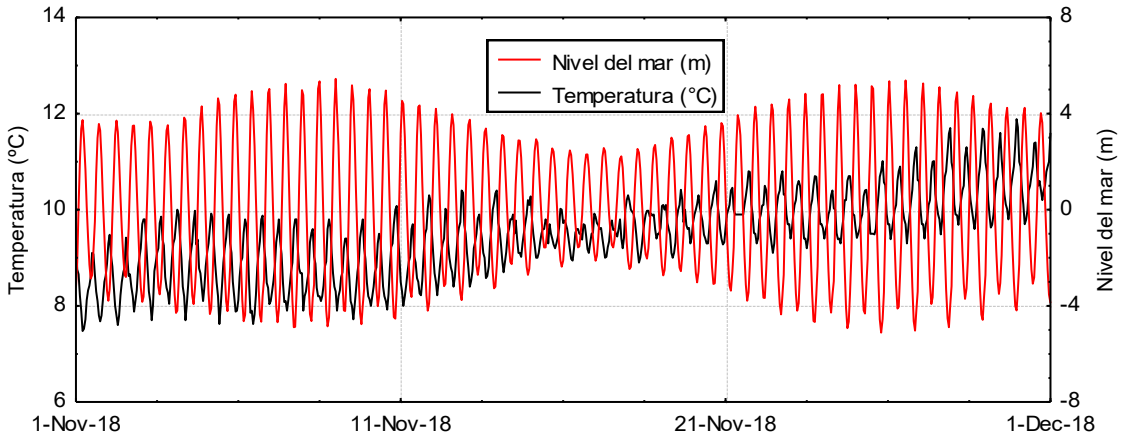


Figura 13.8 Nivel del mar y temperatura registrada a unos 10 m (NMM) en Punta Quilla en noviembre de 2018. En este mes se observa que el nivel del mar y la temperatura están a contrafase. Cuando la marea sube (trae agua del mar) la temperatura baja, indicando que el agua de mar está a menor temperatura que el agua del estuario.



Capítulo **14**

Síntesis del trabajo y principales conclusiones

14.1. Síntesis del trabajo

El presente trabajo de tesis analiza el comportamiento de las variables físicas: nivel del mar, temperatura, salinidad y concentraciones de sedimentos en suspensión (turbidez), en el estuario del río Santa Cruz, en base a mediciones in situ, simulaciones matemáticas y datos de sensores remotos.

La tesis tiene origen en los trabajos ambientales que ha realizado Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA) vinculados al proyecto de la construcción de las represas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic en el río Santa Cruz, de la provincia homónima, en Argentina. Durante los estudios se acumuló una gran cantidad de información hidrográfica y oceanográfica del estuario, y los ríos Santa Cruz y Chico. El proyecto consiste en la construcción de dos represas y sendas centrales hidroeléctricas ubicadas sobre el río Santa Cruz con la finalidad de generar energía renovable para Argentina. El contrato está a cargo de las empresas China Gezhouba Group Corporation, Eling Energía S.A. e Hidrocuyo que conforman la UTE (unión transitoria de empresas) Represas Patagonia.

Represas Patagonia solicitó la asistencia de ESSA (www.essa.com.ar) para realizar los estudios hidrográficos y oceanográficos, con fines ambientales, en parte del río Santa Cruz y su estuario. Para sustentar los estudios, ESSA realizó una serie de mediciones que fueron utilizadas en los mencionados estudios y que, para la presente tesis, han sido reanalizadas.

El trabajo solicitado a ESSA, como en muchas ocasiones, fue evolucionando durante su ejecución (finales de 2016 hasta principios de 2019), y luego de cumplir con los primeros objetivos, hubo nuevos requerimientos de Represas Patagónicas, de la Universidad Nacional de la Plata (UNLP), quienes fueran auditores de todos los estudios, y también de las ONGs asociadas al medioambiente. Esta situación requirió nuevas tareas, tanto en el campo como de modelación. Los Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) se aprobaron en diciembre de 2016 luego de las primeras campañas de ESSA, pero las autoridades exigieron monitoreos que comenzaron hacia fines de 2017 y se extendieron hasta principios de 2019 con las tareas de movimientos de suelos y construcción ya en marcha.

Represas Patagonia permitió el uso con fines académico/científicos de las mediciones de niveles del mar, temperatura, conductividad del agua y turbidez, realizadas en Punta Quilla, Isla Pavón y río Chico. Otros datos se obtuvieron de bases de datos y modelos globales. Además de ser analizados, estos datos alimentaron el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) con sus módulos de Transporte de temperatura y salinidad (TR); y el módulo de transporte de sedimentos (MT) para establecer los campos de corrientes, niveles del mar, temperatura, salinidad y concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario para distintas condiciones de descarga del río Santa Cruz. La cantidad y calidad de los datos registrados ha permitido calibrar al modelo numérico para que este calcule las variables de interés, con escaso margen de error.

Entre los análisis realizados se estudiaron las diferencias que presentaron las variables que caracterizan el estuario (temperatura, salinidad, nivel del mar y concentraciones de sedimentos en suspensión) con y sin represas. Para ello se utilizó un modelo numérico de la región capaz de simular el comportamiento realista de las variables de interés ya mencionadas. El modelo fue calibrado con 19 meses de datos, de temperaturas, salinidad (basada en conductividad), nivel del mar y concentraciones de sedimentos en suspensión (basados en turbidez), en las estaciones de Isla Pavón, Punta Quilla y río Chico. La estación de Punta Quilla ubicada en el interior del dominio de modelación es ideal para realizar comparaciones entre los resultados del modelo y las mediciones. También resultaron importantes las mediciones de niveles en Isla Pavón, ya que el dominio de modelación fue elegido río arriba en una zona donde la marea carece de influencia en el nivel de este. La comparación en Isla Pavón del nivel del río permitió verificar una correcta propagación

(en fase y amplitud) de la marea astronómica en el río Santa Cruz y su estuario. En Isla Pavón no se registraron valores de salinidad durante los 19 meses de recopilación de información. El modelo coincidió con este resultado.

Utilizando el modelo calibrado se realizó una comparación de los niveles del mar, temperatura, salinidad y concentración de sedimentos en suspensión, para el período de llenado de las represas y la condición sin estas. Las represas han sido diseñadas para que los caudales del río solo se alteren (disminuyan) durante el llenado de los embalses. Por lo tanto, el periodo de estudio está limitado al llenado de los embalses, cuyo comienzo y finalización más probables son el 15 de noviembre y el 1 de junio. Los caudales considerados fueron los siguientes: caudal igualado o superado el 50% de los años para cada día calendario (Q_{50}), caudal igualado o superado el 75% de los años para cada día calendario (Q_{75}), caudal igualado o superado el 95% de los años para cada día calendario (Q_{95}), caudales mínimos históricos (noviembre a junio de los años 1955 y 1956) ($Q_{55\text{-}56}$) y 2 caudales sintéticos propuestos por UVA (2018), Q_{H1} y Q_{H2}.

Para las simulaciones de transporte de sedimentos, debido a la inexistencia de la granulometría de los sedimentos en suspensión, se adoptó un diámetro de 4 µm (sedimentables) ya que no se cuenta con nueva evidencia que contradiga lo dicho en Menéndez et al. (2017). Los sedimentos en suspensión que ingresan al estuario por el río Santa Cruz se componen de dos fracciones: sedimentables y coloides. Se consideró que el 32% de los sólidos sedimentables, de la concentración sin represas, llegan al tramo inferior del río Santa Cruz y que los coloides no son retenidos por las obras. Los sedimentos que trae el río Chico ingresan sin restricciones al estuario con fracciones del 90% sedimentables y el resto coloides. Para una mejor comparación entre resultados, se realizaron simulaciones con el aporte de sedimentos de los dos ríos y con el río Santa Cruz solamente. No se ha incluido el aporte de los sedimentos por efecto del viento.

Una síntesis de los principales resultados de la tesis se presenta a continuación ordenados por tema analizado:

I. Nivel del Río en Isla Pavón y Nivel del mar en Punta Quilla

El primer resultado interesante que se desprende de esta tesis es la relación entre los niveles del río Santa Cruz a la altura de Isla Pavón y los de Punta Quilla. En Isla Pavón,

a unos 30 km aguas arriba de la desembocadura del río Santa Cruz en el estuario, hay influencia de la marea astronómica que propaga desde el mar. Allí, el nivel natural del río se ve perturbado irregularmente por la marea astronómica, ya que en sicigias se registran pleamares pero no bajamares; y en algunas cuadraturas no hay pleamares y ni bajamares. El efecto de la marea se pierde en el río Santa Cruz con la distancia a la desembocadura (hacia aguas arriba), a la altura de Puente Viejo (a unos 40 km aguas arriba de la desembocadura del río Santa Cruz en el estuario) el efecto de la marea ya no es observable. Allí, el cauce tiene suficiente nivel para que las variaciones asociadas a la marea no tengan incidencia, desde ya la configuración del cauce del río (formas, islotes, rugosidades y canales, entre otros) camino al sitio, también influye en la propagación de la onda de marea en el interior de este. Lo que muestran los datos y simulaciones numéricas es que las pleamares en Isla Pavón y en el resto del río (hasta donde se observa alguna influencia de la marea astronómica) parecen depender de la altura del lecho, porque hasta esa altura es donde existe fluido que puede ser perturbado.

Para estudiar la influencia de la marea en la zona de Isla Pavón y aguas arriba se utilizó el modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD) forzado solamente con marea astronómica desde el mar, sin imponer condición de contorno en Puente Viejo (solo existe el cauce del río Santa Cruz, pero sin agua) por lo que es posible observar como con cada pleamar el agua viaja a la zona de Isla Pavón porque el cauce le permite alcanzar la zona.

Otro efecto para resaltar es que en Isla Pavón no se observa una inversión de la corriente durante la creciente asociada a la marea (cómo ocurre en todo el estuario), es suficiente una reducción en la intensidad del flujo para que el agua se acumule en la zona y genere un máximo de nivel. Lo que está ocurriendo para que se genere una pleamar es que durante la creciente (pleamar) en este sitio, el caudal es menor que el del río aguas arriba.

II. Prisma de marea

Si se comparan los volúmenes de agua que ingresan para las distintas amplitudes de marea con el volumen de agua del estuario, puede deducirse que en el término de un ciclo de marea ingresa y egresa un volumen de agua equivalente al del estuario definido hasta el NMM. El volumen de ingreso y egreso en 6 h es de 1.13 km^3, para condiciones de marea con amplitud media.

III. Comparación entre los campos de temperatura, salinidad, corrientes y niveles del mar para los caudales mínimos, máximos y medios del mes de junio

Se hicieron simulaciones para 3 caudales del río Santa Cruz, todos representativos del mes de junio: mínimo, 232 m^3/s; medio, 691 m^3/s y máximo 1002 m^3/s. En el interior del estuario el nivel de las aguas es controlado por las mareas sin influencia del caudal del río Santa Cruz.

En el dominio de modelación considerado no se observó salinidad en la parte más alta del río, hasta un punto a 15 km aguas adentro del río para el caudal mínimo del mes de junio.

Dentro del estuario, se observan cambios importantes de la salinidad en función de los 3 caudales considerados. Por ejemplo, en un punto frente a Puerto Santa Cruz, las medias temporales de la salinidad varían entre 26.2 y 16.1 UPS para los caudales mínimo y máximo respectivamente.

IV. Respecto de las comparaciones con y sin represas

Se han realizado simulaciones para el período de llenado de los embalses para comparar la respuesta del estuario a la presencia de las represas. Para ello se han comparado los resultados entre las simulaciones con el caudal mediano (Q_{50}) y 5 potenciales caudales de erogación: Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}, siendo el $Q_{55\text{-}56}$ el menor caudal de todos.

Para la temperatura

Las diferencias entre las temperaturas medias generadas por los diferentes caudales de erogación y el Q_{50} están en todos los casos por debajo de 0.6ºC. Este es un valor que está muy por debajo de las variaciones naturales (sin represas), que rondan los 2.8°C.

Para la salinidad

Para el caso de la salinidad las diferencias medias entre las generadas por el caudal mediano y los diferentes caudales de erogación, son menores o similares a las variaciones de las condiciones naturales. Estas variaciones naturales, representadas por los desvíos estándar de la salinidad, son diferentes dependiendo de la zona del estuario analizada. Para el caudal mediano (sin represas) las salinidades medias para los puntos analizados están entre 2.8 y 19.8 UPS, mientras que los desvíos estándar lo están entre 4.3 y 9.1 UPS, correspondiendo el menor desvió a las zonas más alejadas del mar.

Para los niveles del mar

Las modificaciones de los niveles del mar asociadas al llenado de las represas resultan despreciables comparadas con las variaciones naturales de niveles en el estuario.

Comparaciones entre concentraciones de sedimentos en suspensión entre las condiciones de erogación de las represas con la condición “sin represas”, con aportes de sedimentos de los ríos Chico y Santa Cruz

Hay que considerar que los sedimentos en suspensión simulados que ingresan al estuario se componen de dos fracciones: sedimentables y coloides. Las represas retienen el 68% de los sedimentables y 0% de coloides.

Para poner un contexto a las variaciones naturales del medio puede verse que las concentraciones de sedimentos en suspensión, registradas en Punta Quilla (no resultados de modelo), tienen un valor medio de unos 30 mg/l, con variaciones diarias de unos 26 mg/l, mientras que el valor medio que resulta del modelo para este período es de 25 mg/l y el desvío estándar es de 16 mg/l.

MIKE 3 Flow Model FM (HD+MT) representa aceptablemente los fenómenos que generan turbidez en el estuario, entre ellos los aportes de sedimentos de los ríos Santa Cruz y Chico, incluyendo la variación asociada a los ciclos de marea y la dispersión del medio. Pero, existen otros fenómenos que pueden aportar sedimentos a la zona, como la voladura de partículas por efecto del viento, que no son considerados en esta modelación. Por lo tanto, los resultados del modelo deben considerarse conservadores, y es posible que las concentraciones de los sedimentos en suspensión, y principalmente sus variaciones, sean mayores. Esto está de acuerdo con que las variaciones naturales reales, no las calculadas por el modelo, pueden ser mayores.

La presencia de los embalses (simulaciones con los caudales de erogación) genera menores concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario, pero en valores que se encuentran dentro de las variaciones naturales de la zona. En promedio para todos los meses y todos los puntos de control la disminución en las concentraciones es de unos 5 mg/l, mientras que el desvío estándar generado por el caudal Q_{50} (variaciones naturales) es de 6 mg/l. Aun comparando por punto y por mes, las diferencias de concentraciones entre los caudales de erogación y el Q_{50} son menores al rango de variación natural esperado (diferencias entre máximos y mínimos generados por el caudal Q_{50}).

Bajo las condiciones de Q_{50} (sin represas), las concentraciones medias, en el interior del estuario para todos los meses variaron, entre 9 y 28 mg/l, correspondiendo la menor concentración media a la zona más cercana al mar, en las proximidades de Punta Quilla. Los desvíos estándar variaron entre 3 y 9 mg/l para el período de llenado.

Las mayores diferencias entre las concentraciones generadas por los caudales de erogación (Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H1} y Q_{H2}) y el caudal de referencia (Q_{50}), se observan en la zona más alta del estuario, cerca de la desembocadura de ambos ríos.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario deben explicarse considerando el aporte de ambos ríos, considerando las épocas y la combinación de sus caudales y concentraciones.

En los meses de febrero y marzo se registraron caudales y concentraciones bajas de sedimentos en suspensión en el río Chico. La concentración total (producto de la descarga de ambos ríos) es muy parecida a la concentración de los sedimentos que trae el río Santa Cruz, pues casi no hay aporte del río Chico. Por lo tanto, es esperable que el déficit sea mayor para estos meses, ya que la modificación impuesta al modelo tiene que ver con la disminución del aporte de sedimentos desde el río Santa Cruz. Para los meses de febrero y marzo, el déficit promedio para el interior del estuario es del 49%.

En los meses de abril y mayo se registraron caudales y concentraciones muy altas y, muy bajas del río Chico. La concentración total (producto de la descarga de ambos ríos) en estos meses es influenciada por el río Chico enmascarando el déficit de concentraciones que trae el río Santa Cruz. Por lo tanto, es razonable que el déficit no sólo sea menor en la zona alta del estuario (cerca de la desembocadura del ríos) que para los meses de febrero y marzo, sino que en situaciones hay superávit (el río Santa Cruz posee poco caudal y por lo tanto, el estuario recibe “poca” agua para diluir las concentraciones del río Chico. El río Chico tiene mayor incidencia en las concentraciones del estuario cuando el caudal erogado del río Santa Cruz es menor, porque hay menos agua para diluir los sedimentos que aporta el río Chico.

Para los meses de noviembre y diciembre, el déficit de concentraciones varió entre un 12% y un 34% de la concentración media sin represas, con un promedio de 16%.

El tiempo de residencia de los sedimentos en el estuario se analizó con una concentración arbitraria de 15 mg/l que se redujo a un máximo de 2 mg/l en 20 días y de 0.7 mg/l a los 30 días de iniciada la simulación.

Comparaciones entre concentraciones de sedimentos en suspensión entre las condiciones de erogación de las represas con la condición “sin represas”, con aportes de sedimentos del río Santa Cruz solamente

Bajo las condiciones de caudal del río Santa Cruz Q_{50} (sin represas) las concentraciones medias, en el interior del estuario variaron entre 5 mg/l y 24 mg/l, correspondiendo la menor concentración media a la zona más cercana al mar, en las

proximidades de Punta Quilla. Los desvíos estándar variaron entre 2 mg/l y 7 mg/l para el período de llenado.

El SESGO para todos los meses es negativo. Esto indica que hay un déficit de concentraciones de sedimentos en suspensión para los distintos caudales de erogación, cuando se comparan con el caudal sin represas (Q_{50}). La magnitud de ese déficit cambia con los meses, dependiendo del caudal y concentraciones de sedimentos (aportes) del río Santa Cruz. En términos de las concentraciones el déficit disminuye hacia el mar, acompañando a la caída de las concentraciones medias asociadas a Q_{50}.

Para estas simulaciones (sin el aporte de sedimentos del río Chico) es claro que a menores caudales del río Santa Cruz ($Q_{75} > Q_{95} > Q_{H2} > Q_{H1} > Q_{55\text{-}56}$) se observa un mayor déficit de concentraciones para todos los puntos y para todos los meses. Los déficits de concentraciones para los 5 caudales de erogación difieren poco entre sí. Las variaciones naturales entre los diferentes meses de llenado son mayores que las diferencias que introducen los caudales de erogación y el caudal mediano.

Sin el aporte del río Chico, es claro que el déficit más importante está asociado a la disminución del 68% de los sedimentables en las represas. El río Chico hace un aporte a las concentraciones de sedimentos en el estuario, variable para los distintos meses dependiendo, además, de los aportes de cada uno de los ríos. La influencia del río Chico se observa en todas las concentraciones asociadas al Q_{50} con una contribución media de unos 5 mg/l.

Los déficits de concentraciones son similares con y sin río Chico salvo en los meses de abril y mayo, cuando el aporte de sedimentos del río Chico es importante. Durante febrero y marzo, las contribuciones del río Chico son muy pobres y, por lo tanto, casi no hay diferencias entre las simulaciones con y sin río Chico.

Las diferencias encontradas en las concentraciones de sedimentos en suspensión dentro del estuario, entre el caudal de Q_{50} (sin represas) y los diferentes caudales de erogación Q_{75}, Q_{95}, $Q_{55\text{-}56}$, Q_{H2} y Q_{H1} (con represas), en promedio durante los 6.5

meses de llenado, disminuyen entre 3 mg/l a 5 mg/l (con el aporte del río Chico) y entre 5 y 6 mg/l (sin el aporte del río Chico).

Comparaciones de concentraciones de sedimentos en suspensión entre las condiciones medias (Q_{50}) y la condición mínima histórica natural ($Q_{55\text{-}56}$). Sedimentos aportados por el río Santa Cruz y el río Chico, y río Santa Cruz solamente

Las diferencias entre las simulaciones sin las represas (no existe déficit de sedimentos producto de la presencia de los diques) Q_{50} y $Q_{55\text{-}56}$ (sin considerar el aporte del río Chico), son pobres. Indicando que, aún con caudales del río Santa Cruz muy pobres las concentraciones de sedimentos en suspensión en el estuario no parecen cambiar significativamente.

Los resultados indican que, si no se considera el aporte del río Chico, en todos los casos las concentraciones que genera Q_{50} son mayores a las que genera $Q_{55\text{-}56}$, con diferencias promedio de unos 3 mg/l.

Mientras que, con el aporte de sedimentos del río Chico, los resultados varían dependiendo de los meses con considerados, puede resumirse así:

- Para los meses de noviembre, diciembre y enero Q_{50} genera concentraciones similares que $Q_{55\text{-}56}$.
- Para los meses de febrero y marzo Q_{50} genera concentraciones algo mayores que $Q_{55\text{-}56}$, como ya se ha explicado el río Chico para estos meses posee muy pobre caudal. $Q_{55\text{-}56}$, genera concentraciones, en promedio para estos meses, de 3 mg/l menos que Q_{50}.
- Para los meses de abril y mayo, Q_{50} genera concentraciones algo menores que $Q_{55\text{-}56}$, producto de la importante cantidad de sedimentos aportados por el río Chico para esta época. $Q_{55\text{-}56}$, genera concentraciones, en promedio para estos meses, de 5 mg/l más que Q_{50}.

V. Imágenes satelitales

En el presente estudio se consideraron 3 bases de datos de imágenes satélites: Landsat 8, el producto de MUR y el sitio GlobColour. Cada paquete se utilizó para analizar diferentes aspectos de la pluma de estuario del río Santa Cruz. Estas son las principales conclusiones:

En base a las imágenes Landsat 8 fue posible validar cualitativamente la pluma calculada por el modelo regional hidrodinámico y de transporte de sedimentos: MIKE 3 Flow Model (HD + MT). Este modelo fue calibrado utilizando datos in situ de temperatura, salinidad, niveles del mar y turbidez en 2 estaciones de la zona, una en río Santa Cruz y otra en el Estuario. La generalización a 2D en superficie que permiten las imágenes satelitales, aunque más sea para algunos instantes (en los que se registró la imagen Landsat), solidifican la confianza sobre la pluma computada por el modelo.

En base al producto de GHRSST Level 4 MUR, se extrajeron datos en forma de series temporales para comparar con las mediciones in situ. Si bien la comparación es aceptable en términos cualitativos debe recordarse que los datos registrados in situ corresponden a mediciones realizadas a 10.4 m de profundidad en un sitio de 16 m de profundidad ambos referidos al NMM, mientras que los datos de MUR corresponden a la TSM. El resultado se mantuvo a nivel cualitativo, observándose un adecuado acuerdo entre las mediciones in situ y los datos extraídos de la imágenes de MUR. Es interesante observar mayor alejamiento entre los datos en los meses fríos.

Con los datos de MUR también se construyeron mapas de la media mensual del año 2018 de TSM y se los comparó con sus pares resultantes del modelado numérico. En el interior de estuario los datos de MUR se muestran más homogéneos que los resultados del modelo. En los campos medios puede verse que los máximos y mínimos del modelo alcanzan un rango mayor. La calibración del modelo en el interior del Estuario y parte del río Santa Cruz es muy buena, y es probable que el procesamiento de MUR en el interior del estuario tienda a suavizar los datos. Por otro lado, en los bordes exteriores, el MIKE 3 Flow Model FM (HD) se alimenta de las temperaturas calculadas por el modelo global HYCOM, y puede verse que el producto de MUR muestra ciertas diferencias de TSM con el modelo allí. Es esperable que en el interior del Estuario el MIKE 3 Flow Model (HD) esté

funcionando mejor que las mediciones remotas interpoladas, pero que fuera del estuario, donde el modelo no posee registros para calibrar, los resultados del modelo se alejen un poco de los campos 2D de MUR.

Por último, se obtuvieron las Rrs(λ) del sitio GlobColour de diferentes sensores con espaciado temporal de 1 día. Estos datos presentan faltantes en los meses de mayo, junio y julio. Con el resto de los datos se buscó representar la turbidez de la pluma de descarga en el mar del estuario del río Santa Cruz.

Los datos in situ en Punta Quilla identifican mayores niveles de turbidez para los períodos de sicigias que para los de cuadraturas, también con mayores caudales del río Santa Cruz. La turbidez basada en Rrs(λ) corrobora este hallazgo. Se probaron diferentes algoritmos para representar los mínimos y medios diarios de turbidez, en ambos casos el cociente Rrs(670)/Rrs(412) resultó ser el más eficaz.

VI. Crecimiento del NMM en la descarga del río Santa Cruz

Esta tesis analiza los caudales del RSC durante los años disponibles que incluyen al período analizado en Ruiz Etcheverry et al. (2016) y encuentra una tendencia positiva y significativa en la serie de tiempo. Por lo que el aumento del nivel del mar observado por el mencionado artículo está de acuerdo con este resultado. El crecimiento del caudal se calcula en unos 2.2 m^3/s por año. No se analiza en este trabajo cuanto significa este aumento en el caudal respecto del nivel del mar en la zona de la desembocadura del río.

VII. Variaciones temporales de los frentes de temperatura superficial en la zona de la descarga del río Santa Cruz

Los frentes identificados en las costas de Santa Cruz muestran un ciclo semestral con frentes fríos en invierno y cálidos en verano. Los datos de temperatura del interior del estuario del RSC presentados en la presente tesis coinciden con las conjeturas del trabajo Rivas y Pisoni (2010).

Los datos de temperatura y niveles del mar registrados en Punta Quilla una combinación de situaciones que resultan de las diferencias relativas entre la temperatura del agua que aporta el río Santa Cruz y la temperatura del mar. La marea alterna la predominancia, en la zona de Puna Quilla, de una y otra agua. Se puede observar que el nivel del mar y la

temperatura están a contrafase (entre octubre y febrero), el nivel del mar y temperatura no muestran relación en los meses de transición de marzo y septiembre; y el nivel del mar y la temperatura están en fase (entre abril y agosto).

14.2. Conclusiones

La presente tesis doctoral ha permitido mejorar la comprensión de los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos que gobiernan el estuario del río Santa Cruz. Se han utilizado datos in situ, un modelo numérico 3D de alta resolución y el análisis de sensores remotos. El trabajo establece una línea de base hidrodinámica y sedimentológica integral del estuario previa a la construcción de las represas del río Santa Cruz, un hábitat sensible por la presencia de especies clasificadas, como el Macá Tobiano (Podiceps gallardoi).

El estuario del río Santa Cruz puede clasificarse, en base a su circulación, como un estuario verticalmente mezclado. Las mediciones y simulaciones muestran que las intensas corrientes de marea destruyen la estratificación vertical y que la salinidad queda determinada por la fase semidiurna de la marea. La salinidad promedio es más alta cerca del océano y disminuye a medida que asciende por el estuario y río, además, el prisma de marea es más de 1 orden de magnitud mayor que el caudal del río Santa Cruz. De todas maneras, en ciertas condiciones, con caudales de río relativamente grandes y condición de marea de cuadratura, su condición pasa a ser la de parcialmente mezclado. Esto, y otras complejidades del estuario, como la configuración de dos ríos aportantes de sedimentos y aguas de deshielo aportadas por el río Santa Cruz, sugieren que un modelo matemático es necesario para representar los procesos del estuario.

La onda de marea se propaga de manera efectiva a lo largo del estuario y por unos 40 km del río Santa Cruz, alcanzando claramente la zona de Isla Pavón, ubicada aproximadamente a 60 km de la desembocadura al mar. Allí, solo se observan pleamares cuando la cresta de la onda de marea supera el nivel base del río, y no se registran bajamares. Aguas arriba de Isla Pavón la marea continúa haciéndose presente por unos 12 km más, hasta que desaparece, condicionada por la batimetría y morfología del río.

La calibración del modelo MIKE 3 Flow Model FM (HD+MT), utilizando un extenso conjunto de datos de nivel, corrientes, temperatura, salinidad y turbidez, demostró su

capacidad para reproducir adecuadamente los patrones observados. Este modelo robusto es una herramienta confiable para evaluar escenarios hipotéticos, como los ya realizados (impactos de la construcción y operación de las represas sobre el ecosistema estuarino), y otros que pudieren requerirse, por otros temas ambientales o de la ingeniería.

La turbidez en el estuario presenta una marcada variabilidad temporal, regulada por la interacción de la escala semidiurna y de la fase de la marea (sicigia-cuadratura). El análisis de la escala semidiurna muestra dos máximos de turbidez asociados al ciclo de mareas, uno principal durante la bajante, producto de la resuspensión de sedimentos por las altas velocidades y el aporte de material fluvial, y otro secundario durante la creciente, debido a la resuspensión por las corrientes de llenado del estuario. La escala impuesta por el ciclo sicigia-cuadratura muestra que durante los períodos de sicigia presentan niveles de turbidez mayores que los de cuadratura, debido a las mayores velocidades de corriente y al mayor volumen de agua movilizado que incrementa la capacidad de resuspensión y transporte. En sicigias los mínimos de turbidez aumentan, por lo que la región ofrece un ambiente con mayor cantidad de sedimentos en suspensión.

El estuario del río Santa Cruz se complejiza por la presencia de dos fuentes que aportan sedimentos con comportamientos distintos: el río Santa Cruz (mayor caudal y pobre concentración de sedimentos en suspensión) y el río Chico (menor caudal y altas concentraciones). Por lo que, como se mostró en los análisis realizados, no es posible caracterizar la turbidez del estuario únicamente en función del caudal del río principal.

Se resalta que la cuantificación del impacto hidráulico sobre el estuario por la construcción de las presas, simulando el comportamiento del estuario forzado por diferentes caudales de diseño, constituye un aporte muy relevante para la toma de decisión. Por ejemplo, en base a las simulaciones pudo determinarse que la salinidad es cero en la zona de la toma de agua de Comandante Luís Piedrabuena, aún para el menor caudal de erogación de diseño.

El uso de imágenes satelitales (Landsat 8, MUR, GlobColour) permitió extrapolar espacialmente las mediciones puntuales, validando la forma y extensión de la pluma estuarina simulada por el modelo. Se encontró que el algoritmo basado en el cociente

Rrs(670)/Rrs(412) fue el más efectivo para estimar la turbidez a partir de reflectancias, corroborando los patrones de mayor turbidez durante sicigias. Este resultado es corroborado por las mediciones in situ, remotas y el modelo matemático.

Por último, la tendencia positiva en los caudales del río Santa Cruz, es una posible explicación al aumento del nivel del mar en la desembocadura del estuario, observado por el procesamiento de imágenes satelitales. También las mediciones presentadas en esta tesis corroboran la inversión de los frentes de temperatura observados en el frente marítimo de Tierra del Fuego y Santa Cruz.

Capítulo **15**

Referencias

Berg, P., & Poulsen, J. W. (2012). "Intercomparison of three-dimensional hydrodynamic models of the Baltic Sea: MIKE 3, GETM and MOM". Journal of Marine Systems, 96-97, 1-14.

Bindelli, Lucas & Kazimierski, Leandro & Re, Mariano. (2018). Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica: Modelos numéricos y potencial energético.

CIG, UNLP, 2017-18. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y MATERIAL DISUELTO EN MUESTRAS DEL RÍO SANTA CRUZ. Centro de Investigaciones Geológicas de la Universidad Nacional de La Plata.

Chad A. Greene http://www.chadagreene.com

DHI (2016). "MIKE 3 Flow Model FM - Scientific Documentation". DHI Water & Environment.

DHI (2018). "MIKE 3 Validation Guide: Cases and Applications". DHI Publication.

Dogliotti, A.I., Ruddick, K.G., Nechad, B., Doxaran, D. & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, *156*, 157-168. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020

Erikson, L. H., & Rasmussen, E. B. (2009). "3D modelling of thermal plumes from power plant cooling water". DHI Water & Environment, Environmental Hydraulics Series.

Ezcurra & Schmidt S.A., 2017a. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. Estudio de Campo de Apoyo a la Modelación. Estuario del río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz. REPRESAS PATAGONIA China Gezhouba Group Company Limited / Electroingeniería SA / Hidrocuyo SA / UTE.

EZCURRA & SCHMIDT S.A., 2017b. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. Estuario del río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz.

F. Mélin, Validation of ocean color remote sensing reflectance data: Analysis of results at European coastal sites, Remote Sensing of Environment, Volume 280, 2022, 113153, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113153.

Franz, 2016. Remote Sensing Reflectance and Derived Products: MODIS & VIIRS. Bryan Franz. Ocean Ecology Laboratory NASA Goddard Space Flight Center. MODIS/VIIRS. Science Team Meeting 6-10 June 2016, Silver Spring, MD.

GlobColour. https://hermes.acri.fr/?class=archive

GlobColour, 2020. Product User's Guide Reference: GC-UM-ACR-PUG-01 Version 4.2.1 March 2020.

Gräwe, U., & Burchard, H. (2012). "A comparative assessment of the surface mixed layer simulation in MIKE 3 and other 3D circulation models". Ocean Dynamics, 62(5), 749-767.

Günther, H., & Madsen, K. S. (2009). "Validation of the unstructured grid formulation in MIKE 3 Flow Model FM for North Sea applications". Journal of Marine Systems, 78(S1), S1-S14.

Hongyan Xi et al., 2020. Global retrieval of phytoplankton functional types based on empirical ortogonal functions using CMEMS GlobColour merged products and further extension to OLCI data. Hongyan Xi, Svetlana N. Losa, Antoine Mangin, Mariana A. Soppa, Philippe Garnesson, Julien Demaria, Yangyang Liu, Odile Hembise Fanton d'Andon, Astrid Bracher

Inspección, 2016. Inspección de obra Represa Jorge Cepernic. Influencia de la marea sobre el nivel del río Santa Cruz en el tramo de la ex-RN3 y Punta Quilla. Octubre de 2016.

Jacobsen, N. G., & Jensen, J. H. (2011). "Performance of MIKE 3 Flow Model FM in tidally dominated estuaries". DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark. DHI Technical Report.

Kärnä, T., & Deigaard, R. (2010). "Modelling of suspended sediment transport using MIKE 3 in a Danish tidal inlet". Coastal Engineering, 57(7), 657-671.

Lara, 2016. Evaluación de la influencia del Proyecto Hidroeléctrico Néstor Kirchner sobre los niveles de agua del Lago Argentino. Subsecretaría de Energía Hidroeléctrica de la República Argentina. Ascensio LARA; junio 2016.

Mazzoni y Vázquez, 2010. Elizabeth Mazzoni y Mirian Vázquez, 2010. DESERTIFICACIÓN EN LA PATAGONIA. Developments in Earth Surface Processes, Volume 13. Publicado por Elsevier B.V.

Menéndez et al., 2017. MODELACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA DEL RÍO SANTA CRUZ BAJO EL EFECTO DE LAS REPRESAS PATAGÓNICAS. REPRESAS PATAGÓNIA, ELING-CGGC-HCSA-UTE

Moon J-E. et al., 2016. Initial Validation of GOCI Water Products against in situ Data Collected around Korean Peninsula for 2010-2011 Jeong-Eon Moon, Young-Je Park*, Joo-Hyung Ryu, Jong-Kuk Choi, Jae-Hyun Ahn, Jee-Eun Min, Young-Baek Son, Sun-Ju Lee, Hee-Jeong Han, and Yu-Hwan Ahn Korea Ocean Satellite Center, KIOST, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea.

MUR https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/las/UI.vm

NSW - Natural Resources Monitoring, 2016. Assessing estuary ecosystem health: Sampling, data analysis and reporting protocols. State of NSW and Office of Environment and Heritage.

Rapport et al., 1998. Rapport DJ, Costanza R and McMichael AJ (1998), 'Assessing Ecosystem Health', Trends in Ecology and Evolution 13, 397–402.

Rasmussen, E. B., & Larsen, T. (2010). "Three-dimensional modelling of transport processes in the Limfjorden, Denmark". DHI Conference Papers, 15th International Conference on Hydroinformatics.

Represas Patagonia, 2017. O BRAS CIVILES – OBRAS GENERALES MEMORIA DE CÁLCULO – LLENADO DE EMBALSES - Nº GE-A.CV-MC. HD-(OG-00-00)-P001.

Rivas y Pisoni, 2010. Identification, characteristics and seasonal evolution of surface thermal fronts in the Argentinean Continental Shelf Andrés L. Rivas, Juan Pablo Pisoni Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET), Boulevard Brown s/n, (9120) Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Roesler, Carlos Ignacio. 2016-03-15. "Conservación del Macá Tobiano (Podiceps gallardoi): factores que afectan la viabilidad de sus poblaciones". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Romero, Silvia Inés. (2008). Estimaciones satelitales de clorofila y los frentes oceánicos del Atlántico sudoccidental. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Ruiz Etcheverry et al., 2016. Ruiz Etcheverry, L. A., M. Saraceno, A. R. Piola, and P. T. Strub (2016), Sea level anomaly on the Patagonian continental shelf: Trends, annual patterns and geostrophic flows, J. Geophys. Res. Oceans, 121, 2733‐2754, doi:10.1002/2015JC011265.

Serman, 2016. Estudio de impacto ambiental aprovechamientos hidroeléctricos del río santa cruz (presidente Dr. Néstor C. Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), provincia de Santa Cruz.

Smagorinsky, J. 1963 General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. Mon. Weather Rev. 91, 99–165.

Sterk et.al., 2012. Geert Sterk, Jacopo Parigiani, Eduardo Cittadini, Piet Peters, Johannes Scholberg, Pablo Peri, 2012. Aeolian sediment mass fluxes on a sandy soil in Central Patagonia. Elsevier.

USGS. https://earthexplorer.usgs.gov/

Uva, 2018. Estudio de Caudal Ecológico. Proyecto de Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz. Argentina. 24 julio 2018. Universidad de Valladolid, España. Director del informe Juan Manuel Diez-Hernández.

Valle-Levinson A (2011). Classification of Estuarine Circulation. In: Wolanski E and McLusky DS (eds.) Treatise on Estuarine and Coastal Science, Vol 1, pp. 75–86. Waltham: Academic Press. © 2011 Elsevier Inc. All rights reserved.

Vested, H. J., & Justesen, P. (2008). "High-resolution 3D modelling of a Danish fjord using MIKE 3 FM". Estuarine, Coastal and Shelf Science, 77(4), 545-555.

Capítulo **16**

ANEXO A. MIKE 3 Flow Model FM

A continuación están se presentan links a los manuales del modelo MIKE 3 Flow Model FM y discriminados por módulos:

Módulo Hidrodinámico (HD)

- MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, User Guide
- MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Step-by-Step Training Guide
- MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation
- MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic module, Non-hydrostatic formulation, Validation Report

Módulo de Transporte (TR)

- MIKE 3 Flow Model FM, Transport Module, User Guide

Módulo de Transportes de Sedimentos (MT)

- MIKE 3 Flow Model FM, Mud Transport Module, User Guide
- MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Mud Transport Module, Scientific Documentation

El modelo hidrodinámico se basa en la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. Pueden aplicarse tanto las ecuaciones tridimensionales completas de Navier-Stokes como las ecuaciones tridimensionales de aguas poco profundas. Algunas características generales de este modelo son:

- El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad y de momento, y se cierra utilizando un esquema para la turbulencia.

- La superficie libre se tiene en cuenta mediante un enfoque de transformación de coordenadas “sigma” o “z” o mezcla entre ambas.

- La discretización espacial de las ecuaciones de conservación se realiza utilizando un método de volumen finito centrado en celdas.

- La integración temporal se realiza mediante un esquema semi-implícito.

- Los términos verticales de convección y difusión se discretizan utilizando un esquema implícito para eliminar las limitaciones de estabilidad asociadas a la resolución vertical.

- El resto de los términos se discretizan utilizando un método de Euler de primer orden o un esquema Runge-Kutta explícito de segundo orden.

- Para las ecuaciones de Navier-Stokes se emplea el método de proyección para la presión no hidrostática. Los flujos convectivos de la interfaz se calculan mediante un método aproximado de Riemann. Este esquema permite una simulación robusta y estable de los flujos que presentan shocks o discontinuidades, como una descarga de agua y saltos hidráulicos.

A continuación se presenta el sistema de ecuaciones utilizado por MIKE 3 Flow Model FM.

Conservación de masa

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

Conservación de momento

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z} = fv-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial x}-g\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_A}{\partial x}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}+F_u-F_{vx}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial wv}{\partial z} = -fu-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial y}-g\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_A}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y}+F_v-F_{vy}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial uw}{\partial x}+\frac{\partial vw}{\partial y}+\frac{\partial w^2}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial z}+F_w-F_{vz}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

$$F_u=\frac{\partial}{\partial x}\left(2\nu_t^h\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)$$

$$F_v=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(2\nu_t^h\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$F_w=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

$\nu_t^v = Viscosidad\ turbulenta\ vertical$

$\nu_t^h = Viscosidad\ turbulenta\ horizontal$

$f = 2\Omega sen(\phi)$

$\Omega = frecuencia\ angular$

$q = presión\ no\ hidrostática$

$\phi = latitud$

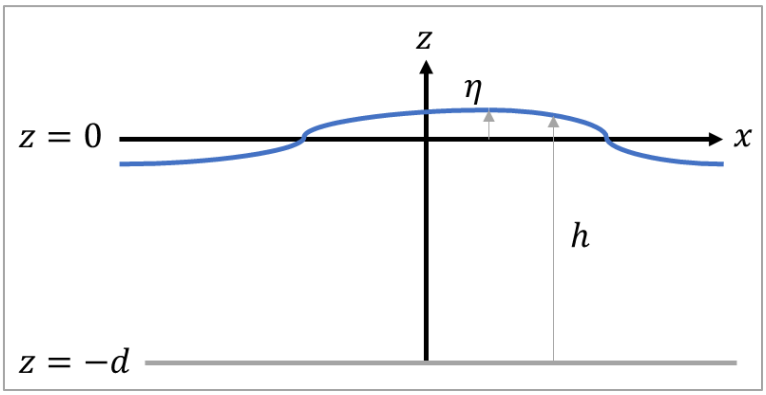
La presión se discrimina entre la hidrostática (p_H) y la no hidrostática

$$p_H = p_A + \rho_0 g(\eta - z) + g\int_z^\eta (\rho - \rho_0)dz$$

Condiciones en la superficie y el fondo para u, v, y w

El modelo utiliza condiciones de contorno en la superficie asociados a la transferencia de energía impuesta por viento a través de las tensiones τ_{sx} y τ_{sy}. Y en el fondo a través de la fricción de fondo τ_{bx} y τ_{by}. La Figura 16.1 presenta la referencia vertical que utiliza el modelo.

Figura 16.1 Esquema con sistema de referencia del MIKE 3 Flow Model FM



$$z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u\frac{\partial \eta}{\partial x} + v\frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t^v}(\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

$$z = -d$$

$$u\frac{\partial d}{\partial x} + v\frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t^v}(\tau_{bx}, \tau_{by})$$

Ecuaciones de transporte de temperatura (T) y salinidad (S)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_t + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{ts}^v \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \hat{\mathrm{H}}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{ts}^v \frac{\partial S}{\partial z}\right)$$

$$F_t = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{ts}^h \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_{ts}^h \frac{\partial T}{\partial y}\right)$$

$$F_s = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{ts}^h \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_{ts}^h \frac{\partial S}{\partial y}\right)$$

$$D_{ts}^v = Dispersión\ de\ T\ y\ S\ vertical$$

$$D_{ts}^h = Dispersión\ de\ T\ y\ S\ horizontal$$

Modelo de turbulencia: Smagorinsky (1963)

Si bien el modelo ofrece otras formulaciones más modernas para la turbulencia, para esta tesis se utilizó el modelo de Smagorinsky de 1963. Esta formulación, en la que la viscosidad turbulenta horizontal depende de los gradientes de velocidad, presentó un adecuado funcionamiento y posibilitó una muy buena calibración del modelo. La ecuaciones de viscosidad turbulenta son las que siguen.

$$\nu_t^h = c_s^2 l^2 \sqrt{2\left(S_{xx}S_{xx} + 2S_{xy}S_{xy} + S_{yy}S_{yy}\right)}$$

$$S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad S_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\nu_t^v = U_\tau h\left(c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left(\frac{z+d}{h}\right)^2\right)$$

$$U_\tau = \max(U_{\tau s}, U_{\tau b})$$

$$c_s = constante\ empírica$$

$$l = distancia\ característica$$

$$c_1 = 0.41$$

$$c_2 = -0.41$$

Coordenadas Sigma

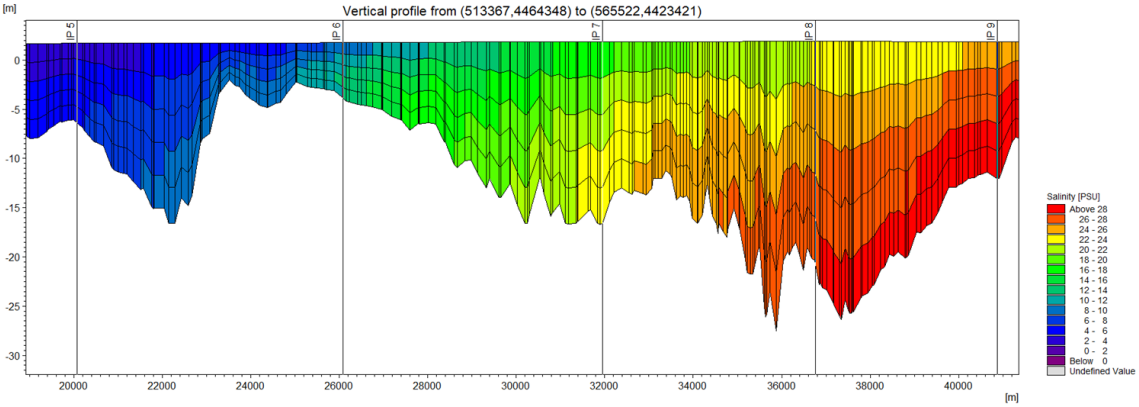
El modelo permite la discretización espacial vertical en coordenadas sigma, en las que la cantidad de puntos de cálculo en vertical es fija, y las profundidades de estos nodos se adecuan a la profundidad del lugar en cada paso temporal. Esta configuración requiere

una nueva definición de variables del sistema en la que aparece la nueva variable sigma (σ) que varía entre 0 y 1, como sigue.

$$t' = t, \qquad x' = x, \qquad y' = y, \qquad \sigma = \frac{z + d}{h}$$

La Figura 16.2 presenta un corte vertical de la región estudiada en esta tesis para ilustrar en como el modelo discretiza la grilla verticalmente.

Figura 16.2 Corte vertical de la región estudiada en esta tesis para ilustrar en como el modelo discretiza la grilla verticalmente. Los coleres representan salinidad.



Capítulo **17**

ANEXO B. ESTUARIOS Y SUS CARACTERISTICAS

17.1. Clasificaciones

En la Tabla 17.1.1 del libro de Savenije (2012), se presenta una visión general combinada de los diferentes tipos de estuarios, junto con sus principales características relacionadas con las mareas, la influencia de los ríos, la geología, la salinidad y el número de estuarios. Observamos que el tipo de ola de marea y el tipo de intrusión salina son muy diferentes en estos estuarios. Algunas de las características no siempre son evidentes. Por ejemplo, en los fiordos, que generalmente no drenan grandes cuencas hidrográficas (de lo contrario ya se habrían convertido en aluviales) y, por lo tanto, no tienen un caudal fluvial muy elevado, aunque puede producirse estratificación. Esto se debe a que suelen ser muy profundos y, como resultado, tienen una amplitud de velocidad de marea (y una excursión de marea) relativamente baja, lo que da lugar a un número de Richardson estuarino elevado. En los canales prismáticos, también puede producirse estratificación si hay suficiente agua fluvial que se ve obligada a pasar por el canal.

Un número importante relacionado con los estuarios es el número de Richardson estuarino, que se define como la relación entre la energía potencial que aporta al estuario la descarga del río a través de la flotabilidad del agua dulce y la energía cinética que aporta la marea durante un período de marea:

$$NR = \frac{\Delta\rho}{\rho}\frac{gh}{v^2}\frac{Q_f T}{P_t} = \frac{\text{Energía Potencial aportada por el río}}{Energía\ Cinética\ aportada\ por\ la\ marea}$$

Donde

$\Delta\rho$ → Diferencia de densidad entre agua de mar y agua de río.

ρ → Densidad del agua (usualmente ~1000 kg/m³ para agua dulce, ~1025 kg/m³ para agua de mar).

g→ Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

h → Profundidad promedio del estuario (m).

v → Amplitud de la velocidad de la marea (m/s).

Q_f → Descarga fluvial (caudal de agua dulce, m³/s).

T → Período de marea (s). Para una marea semidiurna principal, $T \approx 12.4$ h = 44640 s.

P_t → Volumen de la marea de flujo ("tidal flood volume" o "tidal prism", m³).

Este número predice el tipo de mezcla y estructura de salinidad que predomina en un estuario, como se explica Fischer et al. (1979):

- Si NR es muy pequeño (< 0.08): El estuario está bien mezclado. La energía de la marea domina.
- Si NR está en el rango 0.08 - 0.8: El estuario está parcialmente mezclado.
- Si NR es muy grande (> 0.8): El estuario está fuertemente estratificado (tipo cuña salina). La energía del río domina.

Tabla 17.1.1 Clasificación de los estuarios en relación con los siguientes aspectos: mareas, influencia fluvial, geología, salinidad y número de estuarios.

Forma	Tipo de onda de marea	Influencia Fluvial	Geología	Salinidad	Número de Richardson Estuarino
Bahía	Onda estacionaria	Sin descarga fluvial	–	Salinidad marina	Cero
Ría	Onda mixta	Pequeña descarga fluvial	Sistema de drenaje inundado	Salinidad alta, a menudo hipersalina	Pequeño
Fiordo	Onda mixta	Descarga fluvial modesta	Valle glaciar inundado	Parcialmente mezclado a estratificado	Alto
Estuario en Embudo	Onda mixta; gran rango de marea	Descarga estacional	Aluvial en llanura costera	Bien mezclado	Bajo
Delta	Onda mixta; pequeño rango de marea	Descarga estacional	Aluvial en llanura costera	Parcialmente mezclado	Medio
Canal Prismático Infinito	Onda progresiva	Descarga estacional	Artificial (antrópico)	Parcialmente mezclado a estratificado	Alto

El NR depende del prisma de marea y del caudal del río, ambos variables temporalmente. El caudal del río posee una fuerte estacional, mientras que el prima de marea cambia fuertemente en función de los ciclos de sicigias y cuadraturas. Por ello, se presenta la Tabla 17.1.2 a continuación diferentes cálculos de NR para el estuario del río Santa Cruz, barriendo diferentes condiciones.

Tabla 17.1.2 Calculo del NR para el estuario del río Santa Cruz en condiciones de diferentes caudales del río y diferentes prisma de marea.

Variable	Caudal bajo			Caudal medio alto			Caudal máximo		
	prima grande	prima medio	prisma bajo	prima grande	prima medio	prisma bajo	prima grande	prima medio	prisma bajo
Δρ	25	25	25	25	25	25	25	25	25
ρ	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025
g	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
h	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
v	3.2	2	0.7	3.2	2	0.7	3.2	2.5	0.7
Qf	400	400	400	1500	1500	1500	2200	2200	2200
T	44640	44640	44640	44640	44640	44640	44640	44640	44640
Pt	1.7e9	1.1e9	8.5e8	1.7e9	1.1e9	8.5e8	1.7e9	1.1e9	8.5e8
NR	0.002	0.007	0.074	0.007	0.026	0.277	0.015	0.032	0.406

La Tabla 17.1.2 indica que el estuario del río Santa Cruz presenta diferentes NR, en los que en casi todas las situaciones es menor a 0.08 condición de estuario bien mezclado. Existen algunas situaciones, con caudales de río relativamente grandes y condición de marea de cuadratura, en los que el número supera el 0.08, quedando en el condición de parcialmente mezclado.

Savenije (2012) desarrolló un marco analítico utilizado para predecir la propagación de la marea y la intrusión salina en estuario aluviales. Sus ecuaciones proporcionan una formulación semi-analítica que relaciona explícitamente la distancia de decaimiento de la marea, con la amplitud de la marea en la boca, la profundidad, la pendiente y la convergencia del ancho. Este autor define un estuario aluvial como aquel cuya geometría (forma, profundidad, ancho) está controlada predominantemente por procesos de transporte de sedimentos (fluvial y marino) y por el flujo de marea, en un equilibrio dinámico. Sus características clave son:

- Lecho y riberas móviles compuestas por material no consolidado (aluvión).
- Geometría en equilibrio entre la erosión y la deposición.

- **Presencia significativa de transporte de sedimentos** tanto del río como del mar.
- **Morfología típica en embudo** que se ensancha hacia la boca.

El Estuario del río Santa Cruz es un **caso híbrido y al más complejo**:

- Su **origen es glaciar** (como un fiordo), pero su **funcionamiento sedimentario actual es aluvial**.
- Su **morfología es prismática y confinada**, a diferencia de los modelos teóricos clásicos de embullo.
- Combina una **fuerza motriz macromareal** con un **aporte fluvial glaciar estacional**.

Esta combinación de características lo convierte en un laboratorio natural para estudiar procesos estuarinos en un contexto glacial y macromareal, un nicho que no está cubierto por las clasificaciones tradicionales basadas en estuarios de latitudes medias o de planicies aluviales.

La topografía es clave para los procesos del estuario (Savenije, 2012). El hecho de que el agua fluya como lo hace está fuertemente influenciado por el medio a través del cual fluye. En principio, las ecuaciones hidráulicas no lineales (las ecuaciones de St. Venant) pueden demostrar un comportamiento irregular e impredecible, pero en los estuarios aluviales rara vez se observa esto.

En un **estuario aluvial**, la marea se propaga como una onda de carácter **mixto** que tiene elementos de una onda **estacionaria** y una onda **progresiva**.

- Una onda **progresiva**. En la elevación máxima, el agua se mueve en la dirección de la onda; en la elevación más baja, la velocidad es hacia atrás, opuesta a la dirección de la onda; en el nivel de agua promedio, el movimiento es vertical. La velocidad de flujo más alta ocurre en la elevación máxima. En una onda progresiva, el **desfase entre la elevación del agua y la velocidad es cero**. Las ondas de crecida en los ríos también son ondas progresivas. En la elevación máxima, el caudal también está en su punto máximo; en la elevación más baja, el caudal está en su mínimo. Las ondas puramente progresivas ocurren en canales sin fricción de longitud infinita y con

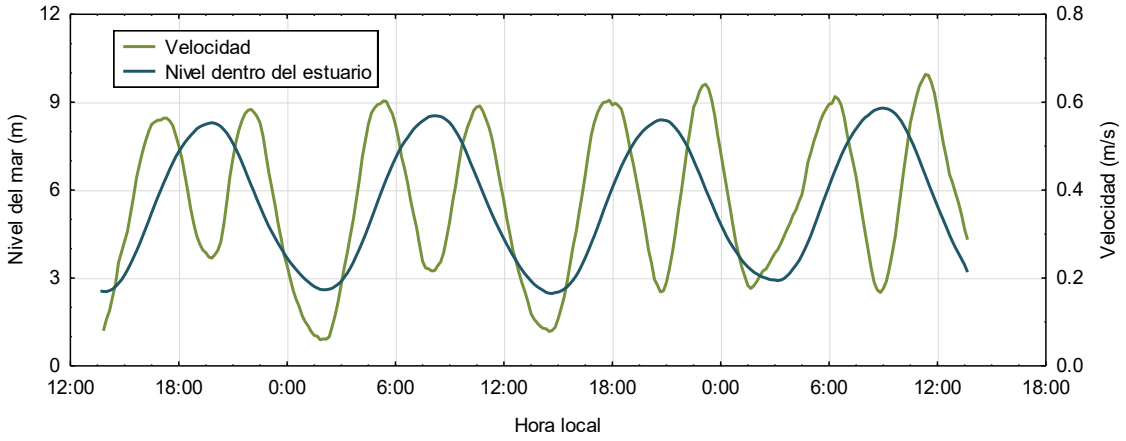
una sección transversal constante. Para que ocurra una onda progresiva en un canal, este debe tener una sección transversal constante y ser muy largo.

- Una onda **estacionaria** es diferente. Una onda estacionaria es como una onda que podemos crear en una bañera balanceándola. En los extremos, la velocidad es cero y cambia de dirección. El desfase **entre la elevación y la velocidad de π/2**. Las ondas estacionarias ocurren en puertos, bahías y, en general, en cuencas semicerradas que están conectadas al mar.

En los estuarios aluviales, las ondas son de un tipo mixto: una mezcla entre una onda progresiva y una estacionaria con un desfase entre cero y π/2. El valor del desfase depende de la geometría del canal y de la fricción.

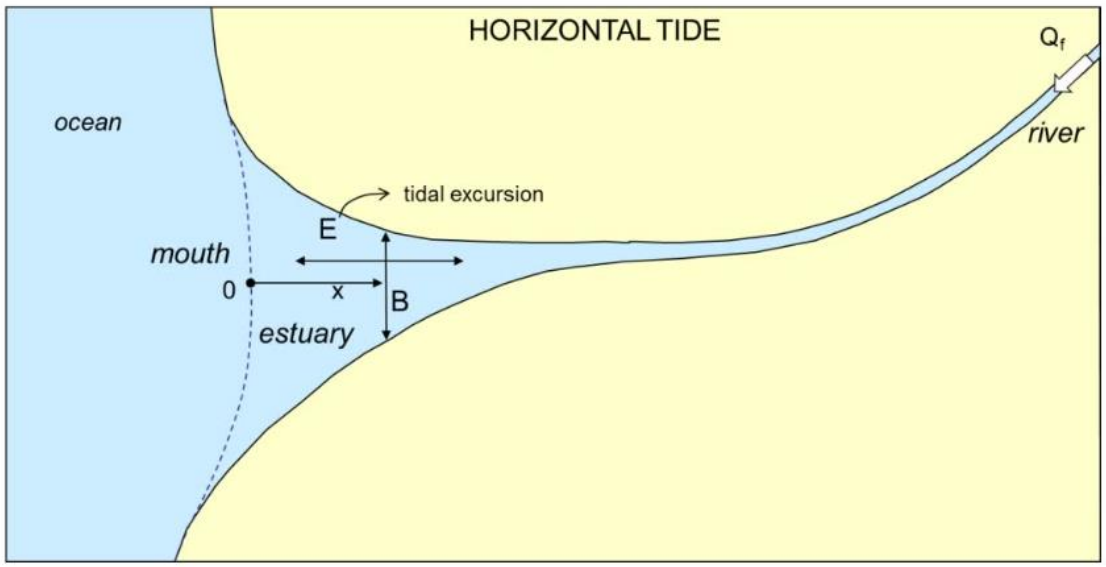
La marea en el interior del estuario del río Santa Cruz propaga como onda estacionaria pura, con los mínimos de velocidad en las pleamares y bajamares. Esta característica se aleja de la definición de Savenije (2012), de estuario aluvial. La Figura 17.1.1 muestra que, si bien la velocidad no se hace cero, sus mínimos coinciden con los máximos y mínimos de niveles.

Figura 17.1.1 Nivel del agua y velocidad media registrados en las estación Estuario 2.



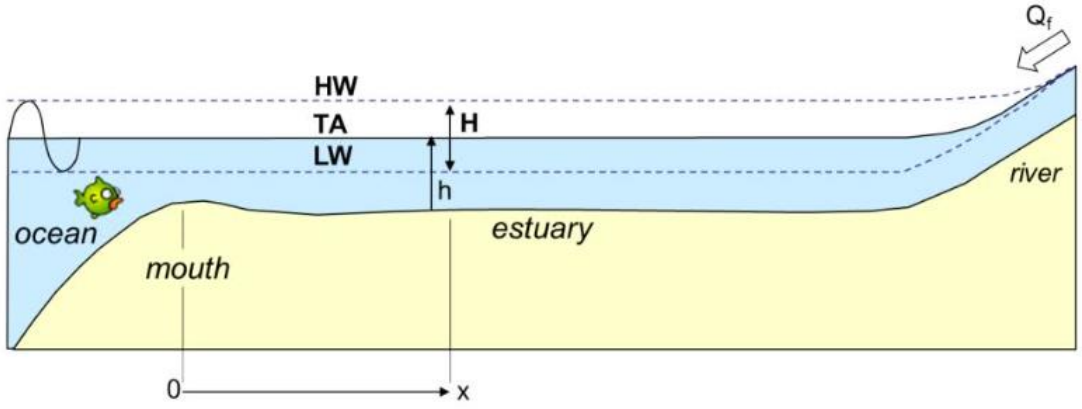
En la Figura 17.1.2, se presenta un esquema de un estuario aluvial, en el que se observan dos escalas horizontales importantes del estuario: el ancho B, que es una función de x, y la excursión de marea E, que en los estuarios aluviales parece ser constante. La excursión de marea es la distancia que recorre una partícula de agua debido a la marea. Esta se desplaza hacia el interior durante el flujo de pleamar y vuelve a salir durante el reflujo de bajamar.

Figura 17.1.2 Esquema con la definición del estuario. Vista en planta.



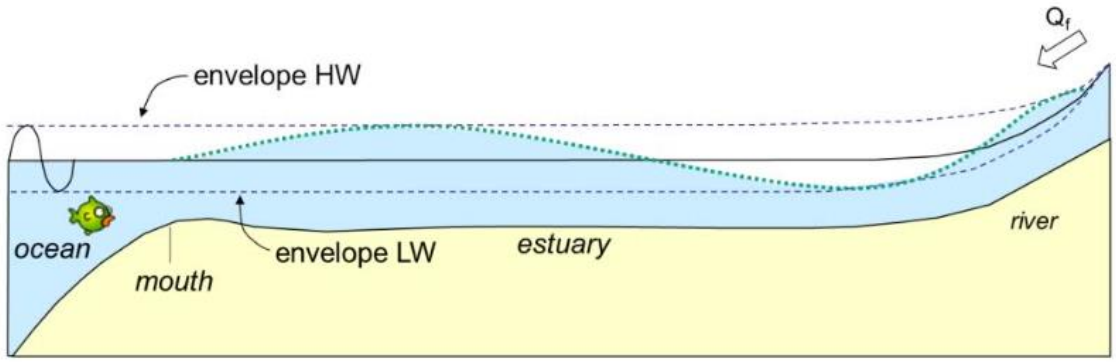
La excursión de marea es de hecho el rango horizontal de la marea, que es la integral en el tiempo de la velocidad de la marea entre los dos momentos de aguas muertas: mínima o cero de velocidad de la bajamar (LWS) y de la pleamar (HWS). La longitud típica de la excursión de marea para una marea diurna es de 10 km. En la parte más ancha del estuario, la relación E/B puede ser pequeña, particularmente en estuarios con forma de embudo muy marcada, pero en la parte superior del estuario, esta relación es generalmente grande.

Figura 17.1.3 Esquema con la definición del estuario. Corte longitudinal. Qf es el caudal del río.



Si se observan los niveles de agua instantáneos en el estuario, se obtiene una onda de marea instantánea como se muestra esquemáticamente en la Figura 17.1.3. Esta onda está contenida entre las envolventes.

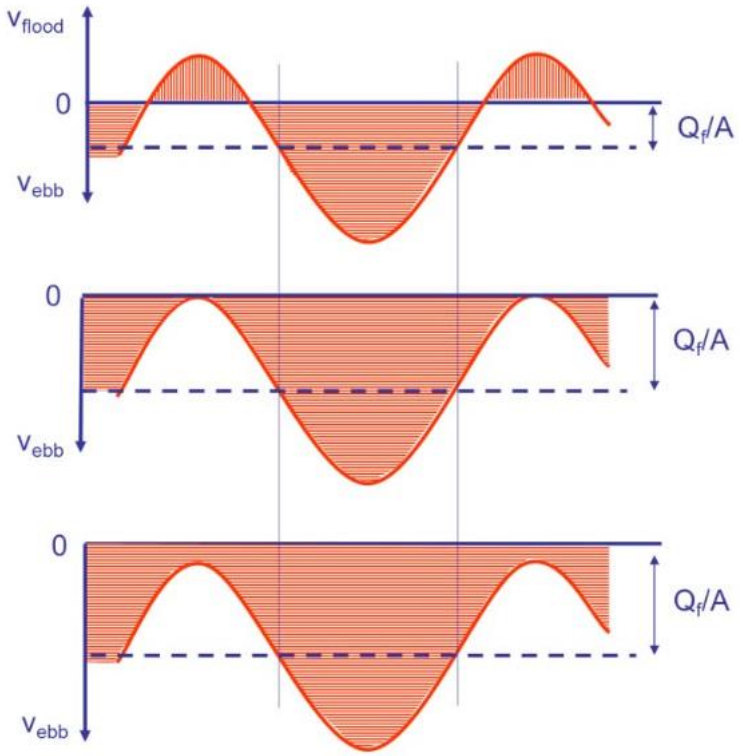
Figura 17.1.3 Corte longitudinal de un estuario incluyendo el nivel instantáneo de marea



Rara vez una onda de marea completa cabe dentro de la longitud de un estuario (excepto en estuarios muy largos, como el Gambia), y la pendiente del río está algo exagerada. Algunos estuarios tienen una onda de marea amortiguada, mientras que otros experimentan amplificación de marea. En el último caso, el rango de marea solo se amortigua cuando la influencia del río se vuelve dominante sobre la marea (por ejemplo, en el estuario del Escalda).

A medida que la descarga del río gana influencia, las velocidades de flujo se modifican. Sin descarga del río, el momento de la calma de pleamar (HWS, por sus siglas en inglés) ocurre algún tiempo después de la pleamar (HW), momento en el cual la corriente entrante se detiene, cambia de dirección y posteriormente comienza a vaciarse (reflujo). Lo contrario ocurre algún tiempo después de la bajamar (LW). En la calma de bajamar (LWS) la corriente de reflujo se detiene, cambia de dirección y comienza el flujo de entrada (flujo). Si hay una descarga fluvial sustancial, entonces los momentos de calma se desplazan: la ocurrencia de LWS se retrasa y la HWS ocurre antes. La Figura 17.1.4 proporciona una ilustración esquemática de esto.

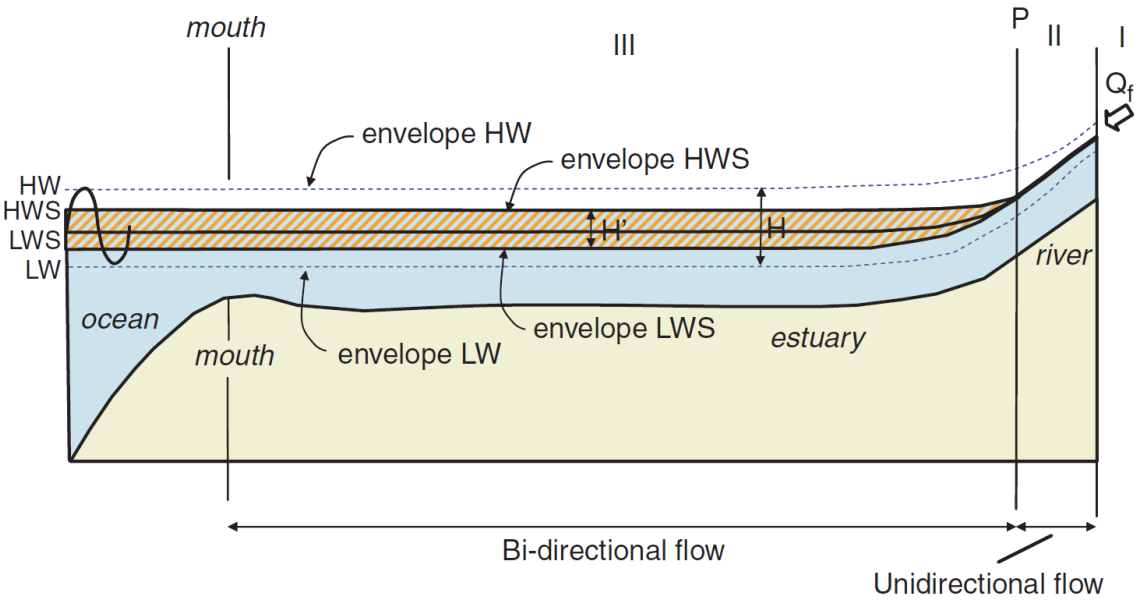
Figura 17.1.4 Influencia del caudal fluvial. En el eje vertical se encuentra la velocidad de flujo de la corriente, la cual se ve afectada por la magnitud de la velocidad del flujo fluvial Qf/A. La velocidad del flujo de pleamar tiene dirección positiva; el flujo de bajamar es negativo.



Se observa que hay una superposición de la descarga del río sobre los flujos de marea y, como resultado de la descarga del río, la corriente de reflujo se hace más grande y la corriente de entrada se reduce (gráfico superior), hasta el punto donde solo hay un momento de calma y ya no hay un cambio de dirección del flujo (gráfico del medio). Más río arriba (el gráfico inferior) todavía hay una onda de marea, pero el flujo es permanentemente descendente.

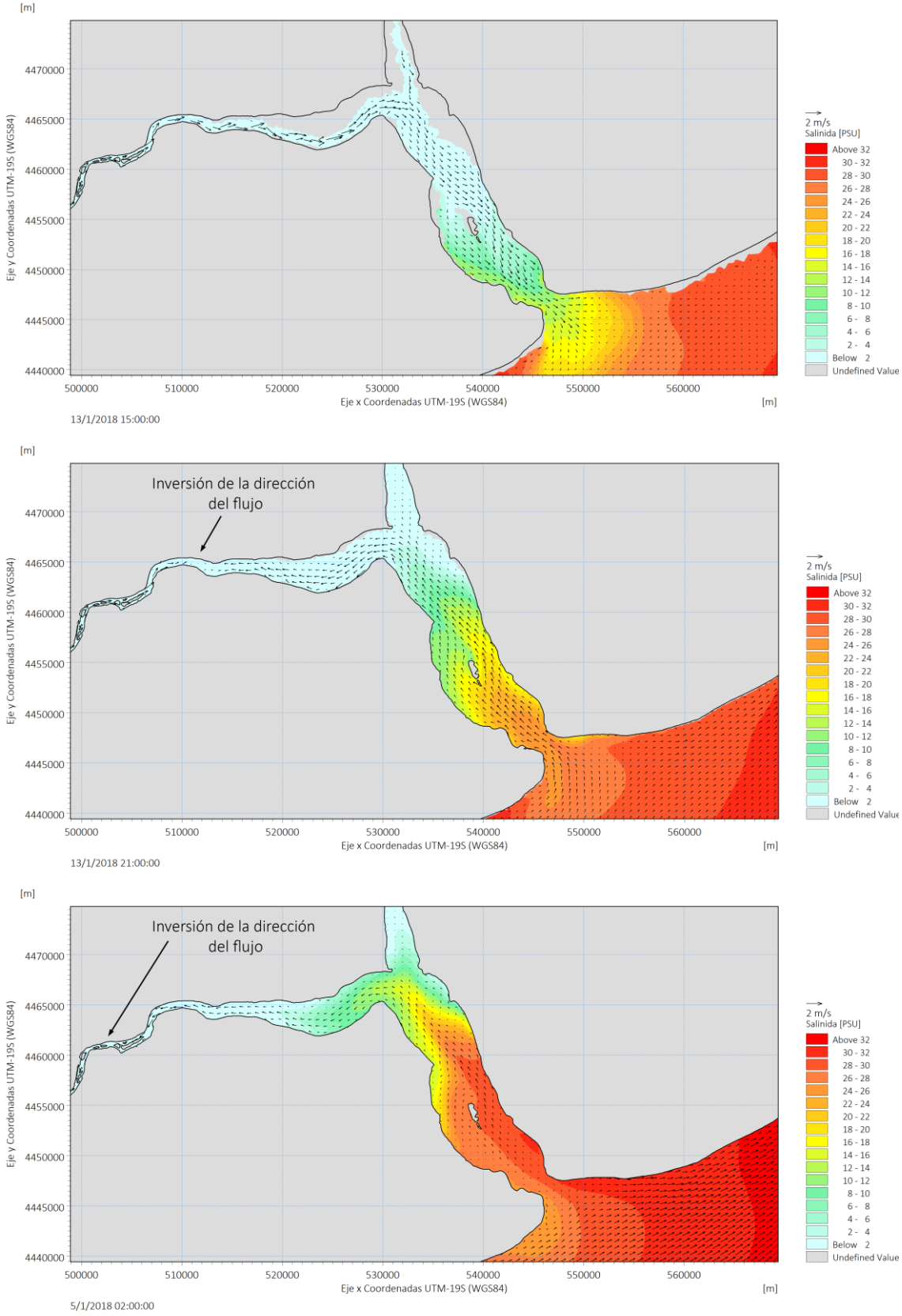
Savenije (2012), presenta la Figura 17.1.5 en la que puede la envolvente de los niveles de agua en HWS y LWS. La diferencia entre estas dos envolventes se indica con H', el rango de marea en calma. La figura también muestra el punto P, donde las dos calmas coinciden - aguas arriba de P el flujo ya no cambia de dirección.

Figura 17.1.5 El prisma de marea contenido entre las envolventes de Pleamar de Agua Muerta (HWS) y Bajamar de Agua Muerta (LWS).



Esta es una característica que se observa claramente en el estuario del río Santa Cruz. La posición del puntos de inversión del flujo es variable dependiendo la condición de marea, ya que en sicigias la marea penetra más en el río y en consecuencia la inversión del flujo también, y de la estacionalidad del caudal del río Santa Cruz, ya que en los meses de mayor caudal (de enero a junio) el punto de inversión de la dirección de flujo ocurre más aguas arriba que en los meses de menor caudal (de julio a diciembre). La Figura 17.1.6 ilustra acerca de los cambios en la posición del punto de inversión de flujo (hasta donde existe flujo bidireccional) en el estuario del río Santa Cruz para condiciones de marea crecente en cuadraturas y sicigias, también presenta la condición de bajante para comparar.

Figura 17.1.6 Campos de corrientes y salinidad en condiciones de marea bajante en cuadraturas (arriba), marea creciente en cuadraturas (medio) y creciente en sicigias (abajo).



17.2. Comparación del estuario del río Santa Cruz con otros estuarios

Se realizó una búsqueda de otros estuarios que tuvieran características semejantes a las del estuario que es objeto de esta tesis. Para realizar la comparación se tuvieron en cuenta estas características. Parámetros para clasificar estuarios:

- **Marea:** Marea macromareal (amplitud > 4 m). Con 7-11 metros, está en el rango de **megamarea**. Esto es el factor más distintivo.
- **Caudal del río:** Caudal medio-alto (400-1300 m^3/s).
- **Morfología:** Estuario corto (de unos 25 km), relativamente angosto (de unos 5 km) y profundidad media somera (de unos 7 m). Estuario bien canalizado, donde la marea no se dispersa en una amplia llanura de marea, sino que propaga de manera más eficiente.

La Tabla 17.2.1 presenta una comparación de diferentes estuarios con características que acercan a las del estuario del río Santa Cruz.

Tabla 17.2.1 Comparación entre el Estuario del río Santa Cruz y otros

Característica	Estuario Río Santa Cruz (AR)	Estuario Río Seine (FR)	Estuario Río Gallegos (AR)	Bahía de Fundy (Ríos Internos) (CA)	Río Colorado (Histórico) (MX/US)	Río Elorn / Ría de Brest (FR)	Río Derwent (AU)
Longitud (km)	~25 km	~30 km	~40-50 km (más largo y sinuoso que el RSC)	~20-40 km (ej. Río Petitcodiac)	Delta complejo (~50+ km de influencia)	~20 km	~50 km (desde Hobart al interior)
Ancho (km)	~5 km	~3-6 km (canal principal)	~1-3 km (más angosto, meándrico que RSC)	~1-2 km (canal principal histórico)	Muy variable, plano deltaico	~1-3 km	~3-8 km (se ensancha hacia la boca)
Caudal de agua dulce (m^3/s)	400 - 2,000	~500 (promedio), hasta >2,000	~20 – 100 (mucho menor, régimen pluvial-nival)	Muy bajo (< 100)	Histórico: ~1500 (Hoy: mínimo)	Bajo (~30 m^3/s)	~90 (prom.), >500 (picos)
Amplitud Marea	7 m - 10 m	7.5 m (Sicigias)	7 m - 10.5 m	>10-16 m	6 - 8 m	8 m	~2.1 m (med.) - 3.5 m (S)
Profundidad Media	~7.2 m (NMM)	~7 - 9 m (canal navegable dragado)	~5 - 8 m (similar, pero con sectores más someros)	Muy variable: 10-40 m (canales profundos)	Muy somero (< 5 m) en el delta	~8 - 12 m	~10-15 m (más profundo)
Fuerza Dominante	Marea + Río (Alto)	Marea + Río (Mod-Alto)	Marea Dominante + Río (Bajo)	Marea Extremada + Río (Débil)	Marea + Río (Hist. Alto)	Marea + Río (Débil)	Marea + Río (Moderado)

Al estuario del río Santa Cruz en Argentina podría asociársele como análogo hidrodinámico al estuario del río Sena en Francia, debido a la combinación similar de:

- Marea grande (megamarea en Santa Cruz, macromarea en el Sena).
- Caudal fluvial significativo y variable.
- Morfología y dimensiones comparables (longitud, anchura y profundidad).

De todas maneras existen diferencias importantes entre ambos estuarios:

- En el Santa Cruz, el valle tiene pendiente pronunciada. A los 60 km, la cota del lecho está por encima de la cota que pueden alcanzar las pleamares.
- En el Sena, el valle tiene pendiente mínima. A los 160 km, la cota del lecho sigue estando por debajo del nivel del mar, pero la marea ha perdido toda su energía por la fricción y se topa con una presa.
- El "embudo" es la norma en la teoría (como el estuario del Sena): Las definiciones clásicas y gran parte de la literatura científica suelen presentar la forma de embudo (donde el estuario se ensancha hacia el mar) como la característica definitoria de un estuario. Por ejemplo, varias fuentes los describen como "un solo brazo ancho en forma de embudo ensanchado" o con "una forma semejante al corte longitudinal de un embudo". Esto hace que los estuarios que no se ajustan a este patrón estén menos documentados en las fuentes generales.
- El caso del Río Santa Cruz es particular: El aporte de sedimentos al estuario se comparte entre en Chico y el Santa Cruz y su boca no se ensancha pero se profundiza (característica prismática o confinada), lo sitúa como un caso morfológico específico que escapa a una clasificación más generalizada.

17.3. Algunos trabajos en el estuario del río Sena

Tidal dynamics in the Seine estuary: A modelling approach

Autores: Le Hir, P., F. Cayocca, y B. Waeles.

Publicación: *Ocean Dynamics* (2001) o en publicaciones técnicas relacionadas (como de Ifremer).

En este trabajo los autores utilizan un modelo numérico bidimensional para simular la hidrodinámica del estuario. Explican cómo la convergencia de la onda de marea, la fricción con el fondo y la geometría del estuario (especialmente su estrechamiento y profundización) controlan la propagación de la marea. Abordan directamente la deformación de la onda de marea a medida que avanza hacia el interior. Explica cómo la marea se vuelve más asimétrica (la bajamar viaja más rápido que la pleamar) y cómo, bajo ciertas condiciones (mareas vivas, caudal bajo del río), esta deformación puede generar un pequeño tren de olas conocido como "mascaret" o macareo, que es la prueba más evidente de la no linealidad de la propagación de la marea en el Sena.

The effect of engineering works on the tidal wave propagation in the Seine estuary

Autores: Chanson, H. (este investigador ha escrito varios artículos sobre el tema).

Publicación: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* (2010) o similares.

Hubert Chanson ha analizado extensamente los datos históricos de mareas en el estuario del río Sena. Este trabajo compara datos de antes y después de las grandes obras de dragado y construcción de diques (especialmente para el puerto de Port 2000 en Le Havre). Muestra cómo estas modificaciones han alterado la celeridad y la amplitud de la marea aguas arriba. Proporciona un análisis empírico (con datos reales) de cómo la intervención humana ha cambiado la propagación de la marea. Es crucial para entender que el comportamiento actual de la marea no es puramente natural, sino influido por la ingeniería.

Hydrodynamics of the Seine estuary: From the sea to the Poses dam

Autores: GIP Seine-Aval (Groupement d'Intérêt Public). Este consorcio financia y publica investigaciones multidisciplinares sobre el estuario.

Publicación: Informes y síntesis de GIP Seine-Aval (por ejemplo, la serie "La Seine en son estuaire").

Este trabajo ofrece una visión integral. Incluyen estudios sobre cómo la marea penetra más de 100 km tierra adentro, desde Honfleur/Le Havre hasta el azud de Poses, que marca el límite de la navegación marítima y el fin de la influencia mareal. Analizan la atenuación gradual de la amplitud de la marea y el cambio en el régimen de corrientes.

Morphological evolution of the Seine estuary: Impact on tidal propagation

Autores: Tessier, B., y otros (a menudo asociados con la Universidad de Rouen).

Publicación: *Bulletin de la Société Géologique de France* (2006) o *Comptes Rendus Geoscience*.

Estos estudios geológicos y sedimentológicos investigan cómo la evolución natural y antrópica de la forma del estuario (canales, planicies de marea, bancos de arena) ha influido en la hidrodinámica. Un canal más profundo y estrecho, por ejemplo, permite que la marea penetre con menos atenuación. Este trabajo conecta la forma del estuario con la propagación de la marea. Ayuda a entender por qué la marea se comporta como lo hace en función de la geometría del sistema.

17.4. La inclusión del agua de deshielo

El régimen de agua de deshielo añade una característica hidrológica distintiva al estuario del río Santa Cruz:

- Estacionalidad muy marcada: Caudales máximos en primavera-verano (deshielo) y mínimos en otoño-invierno.
- Variabilidad interanual: Influenciada por la cantidad de nieve acumulada en invierno y las temperaturas del verano.

- Baja temperatura del agua y carga de sedimentos finos.

El río Santa Cruz es un sistema bastante único: un estuario de megamarea forzado por un río de alto caudal con régimen glacio-nival. A continuación se presentan algunos estuarios que podrían asemejarse al del río Santa Cruz, en base a esta combinación de características:

1. Fiordo de Sermilik / Estuario de Helheim (Groenlandia)

Similitudes

- Aporte de Deshielo: Directo y masivo desde el glaciar Helheim, uno de los glaciares de salida más grandes de Groenlandia. El agua de deshielo es el driver principal del sistema.
- Marea: Sermilik es un fiordo influenciado por una marea significativa (alrededor de 4-5 m), aunque no tan extrema como la de Santa Cruz. Sin embargo, la dinámica mareal dentro del fiordo es un campo de estudio activo.
- Morfología: Es un sistema largo y profundo (un fiordo, que es un tipo de estuario tallado por glaciares), similar en escala longitudinal al Santa Cruz pero a menudo más angosto.

Diferencias

- Caudal: El caudal de deshielo es enorme pero muy difícil de medir y altamente variable (depende de la fusión superficial y la descarga basal del glaciar). No siempre está canalizado en un "río" bien definido como en Santa Cruz.
- Entorno: Es un sistema polar, con presencia de hielo marino y icebergs, lo que añade complejidad.
- Por qué es un análogo clave: Es el caso de estudio perfecto para analizar la interacción entre el agua de deshielo (fría, dulce y boyante) y la marea en un ambiente estuarino. Los estudios aquí se centran en cómo esta interacción afecta la circulación, la mezcla y el transporte de calor hacia los glaciares.

2. Estuario del Río Fraser (Columbia Británica, Canadá) - El Análogo de Deshielo Nival

Similitudes

- Aporte de Deshielo: Su régimen hidrológico está dominado por el deshielo nival de las Montañas Rocosas. Tiene una estacionalidad muy marcada, con crecidas enormes en primavera/verano.
- Caudal: El caudal es muy alto y comparable. Promedia ~3500 m^3/s, con picos que pueden superar los 10,000 m^3/s en el deshielo. Está en el mismo orden de magnitud que el Santa Cruz.
- Morfología: Es un estuario de ~35 km de largo, con un plano de marea muy amplio (diferente a Santa Cruz), pero la zona del canal principal es un buen punto de comparación.

Diferencias

- Marea: La marea es mesomareal (amplitud de ~3 m), significativamente menor que la megamarea de Santa Cruz. Esta es la diferencia principal.
- Sedimentos: El Fraser transporta una carga de sedimentos mucho mayor, lo que genera un delta muy activo.

A pesar de la diferencia en la marea, el Fraser es uno de los estuarios mejor estudiados del mundo en cuanto a la influencia de un caudal de deshielo en la dinámica estuarina. Los estudios sobre cómo el pico de deshielo "limpia" el estuario de agua salada son directamente aplicables para entender la estacionalidad en el Santa Cruz.

3. Estuario del Río Cook (Alaska, EE. UU.)

Similitudes

- Aporte de Deshielo: Recibe agua de glaciares de marea (tidewater glaciers) en sus cabeceras.
- Marea: Es un sistema de megamarea, con amplitudes que superan los 7-8 metros, muy similar a Santa Cruz.
- Escala: Tiene dimensiones longitudinales y transversales comparables.

Diferencias

- Configuración: Es un estuario complejo con múltiples brazos y aportes glaciares directos, no un simple río que desemboca en el mar. La dinámica es más similar a un fiordo.

Al añadir el factor "agua de deshielo" entre las características del estuario, queda claro que el Santa Cruz pertenece a una categoría muy específica de estuarios forzados por megamareas y grandes caudales de origen glaciar o nival.

17.5. Propagación de la marea hacia el interior del río

Si bien los análisis realizados por Savenije en diferentes de sus trabajos, en particular en libro publicado en 2005, con 2da edición en 2012, son para estuarios aluviales, las variables hidrodinámica pueden funcionar de manera similar para el estuario del río Santa Cruz. Resumiendo los conceptos, la marea propaga más lejos en un río si:

- La amplitud de marea en la boca es mayor.
- El caudal del río (Q_f) es menor.
- El estuario es más profundo y ancho (menor fricción).
- La pendiente del río es suave.

La evidencias obtenidas por esta tesis indican que la influencia de la marea se observa hasta unos 67 km desde la boca del estuario.

17.6. Mayor amplitud de marea implica mayor turbidez en las aguas

La afirmación del título está sólidamente fundamentada pero existen excepciones. En principio un mayor rango de marea implica:

- Mayores velocidades de corriente: Lo que genera un esfuerzo cortante en el fondo (bed shear stress) más intenso, resuspendiendo más sedimentos del lecho (Burchard & Baumert, 1998).

- Mayor prisma de marea: Un volumen de agua más grande en movimiento puede movilizar sedimentos de una área más extensa y contribuir a un transporte neto de sedimentos (Geyer et al., 2001).

El estudio sobre el estuario Humber (macromareal) de Uncles et al. (2006) muestra cómo el gran rango de marea es el principal responsable de mantener una zona de máxima turbidez extremadamente intensa y persistente, con la presencia de lodo fluido. Es un caso clásico donde la relación se cumple de manera dramática.

Excepciones y factores por los que no siempre mayor amplitud de marea implica mayor turbidez:

A. Disponibilidad de Sedimentos (factor crítico)

Un estuario puede tener una marea enorme, pero si no hay una fuente significativa de sedimentos finos (limos y arcillas) disponibles para ser resuspendidos, la turbidez será baja. Un estuario rocoso o de fondo grueso (arena gruesa o grava) no desarrollará alta turbidez a pesar de una amplitud de mareasgrande. La relación depende de que exista un suministro de sedimentos cohesivos.

B. El Papel de la Descarga Fluvial (Caudal del Río)

La influencia del río puede contrarrestar la influencia de la marea:

- Alto caudal fluvial: Puede generar una estratificación fuerte que inhiba la mezcla vertical y la resuspensión por la marea. Además, un caudal muy alto puede exportar sedimentos mar afuera, limpiando el estuario y evitando la formación de una zona de máxima turbidez persistente, incluso con mareas grandes (Geyer et al., 2001).

- Bajo caudal fluvial: Favorece el atrapamiento de sedimentos dentro del estuario, permitiendo que la energía de la marea domine y maximice la turbidez.

C. La Morfología del Estuario (Convergencia)

La forma del estuario (cómo se estrecha hacia tierra adentro) controla la amplificación o amortiguación de la marea. Un estuario muy convergente puede amplificar la marea río arriba, aumentando la turbidez en regiones internas. Por el contrario, la fricción en un estuario largo y poco convergente puede amortiguar la marea rápidamente, limitando su poder de resuspensión en las áreas superiores.

D. El Concepto de Hiperturbidez y Estuarios de "Atasco" (Bottled)

Investigaciones recientes han identificado un umbral. Pasado un cierto punto, una amplitud de mareasmuy grande, combinado con una alta concentración de sedimentos, puede llevar a la formación de un "lodo fluido" (fluid mud) estable cerca del fondo. Este lodo actúa como un amortiguador, disipando la energía de la marea y suprimiendo la resuspensión adicional hacia la columna de agua superior. En estos casos, un aumento de la amplitud de mareas no se traduce en un aumento lineal de la turbidez en la columna de agua, porque la energía se "gasta" en mezclar la capa de lodo fluido.

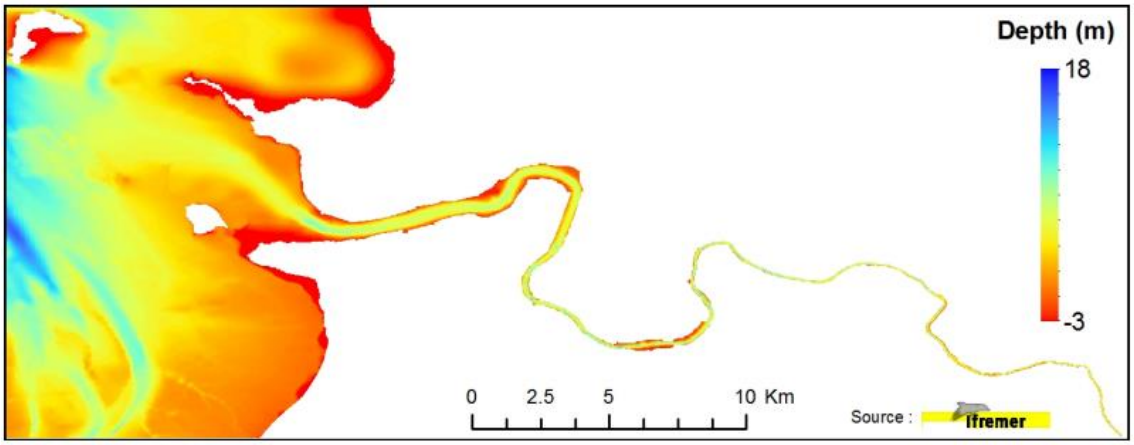
En el trabajo de Winterwerp, J. C. (2011) se presenta un estudio del estuario Scheldt (también macromareal) que muestra que el transporte de sedimentos y la turbidez están gobernados predominantemente por la asimetría de la marea (la diferencia de duración o fuerza entre flujo y reflujo) y no solo por la magnitud absoluta de la amplitud de marea. La asimetría puede variar a lo largo del estuario, por lo que no está directamente ligada a la amplitud de marea de manera simple.

Otro trabajo relacionado es el de Talke, et al. (2009), en el que se presenta un modelo analítico que demuestra la existencia de bucles de retroalimentación (feedback loops). Por ejemplo, una alta turbidez aumenta la densidad del agua, lo que modifica la circulación residual, que a su vez afecta el transporte de sedimentos. Esto significa que la relación marea-turbidez no es una simple causa-efecto, sino parte de un sistema complejo y no lineal.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión, indica Tattersall et al. (2003), obtenidas en la parte baja del estuario del Tamar en el suroeste de Inglaterra utilizando sensores de dispersión de luz óptica, mostraron una concentración de fondo promediada en profundidad de 20 mg/l durante la mayor parte del ciclo de marea, pero es sicigia, la concentración promediada en profundidad aumenta a 250 – 400 mg/l.

Toublanc et al. (2017) por su parte, estudiaron el estuario del Charente, que es un sistema altamente turbio (con concentraciones de sedimentos en suspensión generalmente superiores a 5 g/L) que sigue sin ser bien comprendido, a pesar de su fuerte impacto en las actividades locales. En este estudio, se desarrolla un modelo hidrosedimentológico tridimensional para representar la dinámica de sedimentos de este estuario. La validación del modelo demuestra una buena precisión, especialmente en la reproducción de la variabilidad semidiurna y de sicigia-cuadratura. Se realizan varias simulaciones para evaluar la influencia de las mareas y del caudal fluvial sobre el máximo de turbidez. Se calculan las concentraciones de sedimentos en suspensión (SSC) media y máxima, y la estratificación sedimentaria. La Figura 17.6.1 presenta la batimetría del estuario de estuario del Charente.

Figura 17.6.1 Cobertura de la grilla y batimetría utilizada por el modelo del estuario del Charente, de Toublanc et al., (2017).



La Tabla 17.6.1 presenta resultados del modelo calibrado de Toublanc et al. (2017), en los que puede verse que para todas las condiciones las condiciones de sicigia generan mayores concentraciones que las de cuadraturas.

Tabla 17.6.1 Los indicadores SSC, ΔSSC, SSC_{max}, ΔSSC_{max} (g/L), y sus distancias asociadas desde la desembocadura (km) y tiempos durante el ciclo de marea para caudales fluviales medio, alto y bajo (50 m³/s, 400 m³/s, 5 m³/s).

	Mean river discharge		High river discharge		Low river discharge	
	Spring tides	Neap tides	Spring tides	Neap tides	Spring tides	Neap tides
$\overline{SSC}$	1.63	0.183	1.29	0.307	1.22	0.091
$\overline{\Delta SSC}$	1.11	0.080	0.880	0.141	0.697	0.037
SSC_{max}	14.7	1.81	12.0	2.74	5.58	1.14
Distance	13.3	29.8	3.09	22.1	11.7	22.3
Tide hour	HW	LW	LW+3	LW	LW+4	HW+5
ΔSSC_{max}	14.4	1.44	10.6	2.22	4.21	0.887
Distance	13.3	29.8	1.64	22.1	12.2	22.3
Tide hour	HW	LW	LW+3	LW	LW+4	HW+5

17.7. Referencias del ANEXO B

Burchard, H., & Baumert, H. (1998). The formation of turbidity maxima in a mesotidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(3), 285-298.

Chanson, H. (2010). The effect of engineering works on the tidal wave propagation in the Seine estuary. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 163(1), 3-14.

Fischer, H.B. List, E.J. Koh, R.C.Y. Imberger J. and Brooks, N.H. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York.

Geyer, W. R., Woodruff, J. D., & Traykowski, P. (2001). Sediment transport and trapping in the Hudson River estuary. *Estuaries*, 24(5), 670-679.

GIP Seine-Aval. (varios años). *La Seine en son estuaire* [serie de informes]. Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval.

Le Hir, P., Cayocca, F., & Waeles, B. (2001). Tidal dynamics in the Seine estuary: A modelling approach. *Ocean Dynamics*, 51(2-3), 123-138.

Savenije, H. H. G. (2005). *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier.

Savenije, H. H. G. (2012). *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries* (2nd ed.). Elsevier.

Talke, S. A., de Swart, H. E., & Schuttelaars, H. M. (2009). Feedback between residual circulations and sediment distribution in highly turbid estuaries: An analytical model. *Continental Shelf Research*, 29(1), 119-135.

Tattersall G.R., Elliott A.J., Lynn N.M. Suspended sediment concentrations in the Tamar estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science. Volume 57, Issue 4, 2003, Pages 679-688, ISSN 0272-7714

Tessier, B., et al. (2006). Morphological evolution of the Seine estuary: Impact on tidal propagation. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 177(6), 295-306.

F Toublanc, I Brenon, T Coulombier. Formation and structure of the turbidity maximum in the macrotidal Charente estuary (France): Influence of fluvial and tidal forcing. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 169, pp.1 - 14. ff10.1016/j.ecss.2015.11.019ff. ffhal-01459347f

Uncles, R. J., Stephens, J. A., & Law, D. J. (2006). Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1-2), 30-52.

Winterwerp, J. C. (2011). Fine sediment transport by tidal asymmetry in the Scheldt Estuary, The Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 90(1), 31-48.