

APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

PLAN DIRECTOR DE GESTIÓN AMBIENTAL
OA28
PROGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESTUARIO DE LOS
RÍOS SANTA CRUZ Y CHICO

Estudio del Estuario del Río Santa Cruz



Secretaría de Gobierno de Energía
Ministerio de Hacienda
Presidencia de la Nación

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ (PRESIDENTE DR. NÉSTOR C. KIRCHNER Y GOBERNADOR JORGE CEPERNIC), PROVINCIA DE SANTA CRUZ

ACTUALIZACIÓN

CAPÍTULO 3 – LÍNEA DE BASE AMBIENTAL Y ESTUDIOS ESPECIALES

PUNTO 2 - MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL ESTUARIO DEL RÍO SANTA CRUZ

2	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL ESTUARIO DEL RÍO SANTA CRUZ	2
2.1	INTRODUCCIÓN	2
2.2	METODOLOGÍA	4
2.2.1	Informe de Campo	4
2.2.2	Informe de Avance del Estudio	11
2.3	RESULTADOS	13
2.3.1	Informe de Campo	13
2.3.2	Informe de Avance	20
2.4	CONCLUSIONES	48
2.4.1	Informe de Campo	48
2.4.2	Informe de Avance	48
2.5	CONCLUSIONES GENERALES	52
2.6	BIBLIOGRAFÍA	53

2 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA, DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL ESTUARIO DEL RÍO SANTA CRUZ

2.1 INTRODUCCIÓN

En el EIA del proyecto original (Serman & asociados s.a, 2015a para Represas Patagonia) se ha incluido un análisis de los “Riesgos que requieren estudios especiales”, definidos como alteraciones que pueden ocurrir, con alta probabilidad, pero cuyos efectos no pueden ser valorados debido a la falta de conocimiento disponible en el momento de elaboración del EIA, por lo cual se requiere de la construcción de modelos y de comprobaciones de campo.

En particular, se consideró que el último tramo del río tiene características estuariales debido a la influencia del régimen de mareas. Esto determina que de acuerdo a los antecedentes disponibles, desde el kilómetro cero hasta el 55-60, el escurrimiento de las aguas del río se ve afectado y parcialmente frenado periódicamente durante los períodos de creciente del ciclo de mareas. La extensión de la pluma marina de mayor salinidad varía estacionalmente por influencia astronómica, y también por la variación de caudal del río.

Los caudales significativamente menores que se darán durante el llenado, determinarán que la zona estuarial se extienda aguas arriba y aumente la influencia salina en el estuario, en una superficie que debe ser adecuadamente estudiada.

Se indicó en el EIA del proyecto original que este efecto también podría darse diariamente durante la fase de acumulación de agua en los embalses. Esta consideración ya no es válida al haberse cambiado la forma de operación de los embalses a un funcionamiento de base, el cual considera que todo el flujo fluvial ingresante al sistema es erogado sin reducciones. No se producirán por lo tanto los fuertes empuntamientos y reducciones diarias del caudal del río aguas debajo de JC. Por tal motivo, solamente queda a dilucidar el posible efecto de mayor avance de la pluma de agua salina hacia aguas arriba, durante el período de llenado,

Dado que no se dispuso de información que permitiera conocer objetivamente este riesgo, se requirió realizar un modelo que permita conocer la calidad de las aguas en el área de contacto estuarial y prever posibles cambios debido a la diferente distribución de caudales.

La UTE contrató a tal efecto a la empresa Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA), la cual es una consultora orientada a la solución de problemas ambientales, operaciones de campo e ingeniería de costas, y la oceanografía e hidrografía aplicadas, consolidada bajo una estructura empresarial formal en 1996. Sus fundadores son oceanógrafos. Ha realizado hasta el año 2015, 83 estudios con operaciones de campo, 72 asociados a medio ambiente y 46 a ingeniería. De estos estudios, 88 han implicado modelización matemática, disponiendo la empresa de software específico de última generación. ESSA posee un amplio equipamiento de medición y muestreo, y tiene amplia experiencia en mediciones de campo en áreas marítimas y fluviales.

Los profesionales a cargo del presente estudio son los siguientes:

Sergio Schmidt. Director del Proyecto en Gabinete. Presidente y socio fundador de Ezcurra & Schmidt S.A.

Es Oceanógrafo del Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA) de Argentina y Doctor of Philosophy, Coastal and Oceanographic Engineering, University of Florida, USA.

Es especialista en ingeniería de costas y oceanografía costera. Es experto en modelación numérica de fenómenos físico-ingenieriles, tales como erosión de costas y su control, hidrodinámica costera, canales dragados, dispersión de contaminantes, derrames de petróleo, clima de olas, impacto de acciones costeras, entre otros. Ha liderado y trabajado en proyectos relacionados a dragados, instalaciones portuarias, mejoramiento de canales y cursos de agua, puertos deportivos, estabilidad de playas, evaluaciones ambientales asociados a manejos de costas, desarrollo de obras y estructuras costeras, dragados, puertos, e industria del petróleo offshore, entre otros.

Es profesor de grado y posgrado de la Universidad de Buenos Aires y tiene a su cargo el área de Oceanografía Costera. Es profesor de la Universidad del Salvador, en la Carrera de Ciencias Ambientales.

Horacio Ezcurra. Director de Proyecto en Campo. Jefe de Operaciones. Es socio fundador de Ezcurra & Schmidt S.A.

Es Oceanógrafo del Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA), Piloto de Ultramar de Primera (marina mercante argentina), Oficial de Marina egresado de la Escuela Naval Militar y retirado como Teniente de Navío, especializado en Oceanografía. Especialista, con más de 35 años de experiencia en proyectos costeros de todo tipo, tanto ambientales como ingenieriles, especialmente en operaciones de levantamientos oceanográficos e hidrográficos aplicados, operaciones de levantamientos diversificados en ríos, costas en general y en el mar, y gestión ambiental. Experto en operaciones de todo tipo en el mar, costas y ríos, aplicadas a adquisición de datos para proyectos de investigación científica, ambiental e ingenieril. Diseño de instrumentos para proyectos, como vibrocócorers, muestreadores especiales, equipos para maniobras no convencionales. Ha conducido extensas operaciones multidisciplinarias para estudios ambientales e ingenieriles, liderando equipos de múltiples profesiones y especialidades.

Gabriel Danieli. Modelación Matemática

Gabriel Danieli es oceanógrafo de la Universidad de Buenos Aires y parte del staff de Ezcurra & Schmidt S.A. desde el año 2003. Allí se especializó en modelación matemática de sistemas naturales trabajando en proyectos asociados a la oceanografía, ingeniería y el medioambiente.

ESSA le ha permitido participar en más de 60 proyectos de diversas temáticas ampliando sus conocimientos y capacidades, diversificándose y usando la oceanografía para resolver problemas de la ingeniería y el medioambiente. En ambos casos principalmente en el mar, pero también en proyectos de calidad de aire y aguas subterráneas, siempre desde la aplicación de modelos numéricos. Entre los modelos y software específicos que ha utilizado y utiliza actualmente se encuentran: DHI MIKE 3 (HD), DHI MIKE 21 (HD), DHI MIKE 3/21 (PA), DHI MIKE 3/21 (SA), CMS Flow, CMS Wave, Delft SWAN, Delft CRESS, MixZon CORMIX, Waterloo Hydrogeologic Visual Modflow, Matlab Acoustic Toolbox, Bellhop Model, ISCST3, Air Quality Model, SCREEN, Air Quality Model. También ha participado de campañas en zonas que van desde las playas hasta unos 100 m de profundidad, realizando diferentes tipos de muestreos.

Marcelo Gramaglia. Técnico en electrónica. Operador de equipos en el mar. Asistente de Modelación. Experto en tareas de campo y navegación. Amplia experiencia en el planeamiento y ejecución de operaciones de campo tanto en el mar como en las costas, desde 1994. Ha participado en proyectos de investigación oceanográfica aplicada, hidrografía, levantamientos y operaciones de muestreos de diversos tipos en ambientes costeros, fluviales y oceánicos, y construcción naval liviana.

Pablo Ezcurra. Asistente de Operaciones

Tiene una amplia experiencia como técnico en trabajos de investigación de campo en ríos y ambientes costeros/ marítimos. Ha participado en extensas operaciones de relevamientos hidrográficos, mediciones hidráulicas y estudios de suelos con sismica de reflexión. Ha construido prácticamente todo el equipamiento de muestreos de Ezcurra y Schmidt S.A.

2.2 METODOLOGÍA

A la fecha de redacción de la presente evaluación, se dispone de información parcial sobre el desarrollo de estos estudios, presentada en los siguientes informes, los cuales se adjuntan como Anexos del presente documento:

- Informe de Campo. 10/01/2017 (Anexo I)
- Informe de Avance. Marzo de 2017 (Anexo II)

Se describe a continuación la metodología utilizada y presentada en estos informes:

2.2.1 Informe de Campo

En el Informe de Campo, se documentan las actividades desarrolladas durante una campaña de mediciones de campo, realizada en el Estuario del Río Santa Cruz, entre los días 11 y 29 de diciembre de 2016, y los resultados preliminares obtenidos.

El objetivo principal de la campaña fue obtener datos medidos, en varios lugares de los parámetros que caracterizan los procesos físicos y dinámicos de este estuario, con el objeto posterior de usar esos datos para calibrar modelos numéricos de simulación del funcionamiento del estuario. Estos modelos a su vez, son usados para contribuir a evaluar el potencial impacto ambiental del llenado y la operación de los dos nuevos proyectos de represas a ser construidas sobre el Río Santa Cruz.

Se destaca que el estuario del Río Santa Cruz es un ambiente muy especial, y particularmente dinámico en sus procesos oceanográficos físicos. Debido a la gran amplitud de la marea, la misma domina las corrientes en el estuario, y el viento tiene poca influencia. En las zonas con canales naturales profundos se encuentran velocidades de corrientes muy altas, del orden de 7 nudos (3,5 m/s), durante el vaciado y llenado que produce la marea.

El informe incluye los siguientes anexos:

- ANEXO 01, Bitácora de las operaciones: Una descripción cronológica, con días y horas de todas las operaciones realizadas en la campaña de mediciones
- ANEXO 02, Fotografías documentales: Una selección de fotos que ilustran el medio ambiente y las tareas hechas.
- ANEXO 03, Ejemplos gráficos de datos medidos: Se han incluido, como ejemplo, resultados de las mediciones a fin de ilustrar la particular dinámica de este estuario
- ANEXO 04, Muestras entregadas: El listado con los datos de las muestras entregadas en el Obrador de la UTE Represas, en Comandante Piedrabuena.

Las mediciones realizadas se presentan a continuación en forma resumida, brindándose información más detallada en el punto correspondiente a los resultados obtenidos.

• MEDICIONES EN ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS FIJAS

Se instalaron dos estaciones oceanográficas completas, de registro automático, una en el mar, afuera del estuario (Estación “MAR”) y otra dentro del mismo (Estación “ESTUARIO”). El objeto de instalar estas estaciones fue medir, durante 10 ciclos completos de mareas semidiurnas las siguientes variables oceanográficas:

1. Perfil vertical de velocidades, cada 10 minutos, con 2 equipos ADCP Nortek AWAC, de 600 kHz y 400 kHz de frecuencia acústica.
2. Salinidad, Temperatura, Mareas y Turbidez, cada 10 minutos, con 2 equipos turbidímetros nefelométricos digitales OBS-3A.

El sistema de fondeo incluye un implante especial, que se instala en el fondo, apoyado sobre su base, la cual tiene lastres de plomo de 120 kg de peso para mantenerlo en su sitio, con una línea de recuperación que lo vincula a otro elemento de plomo de 50 kg de peso (“muerto”) y a un ancla adicional tipo Bruce de 20 kg.

Las ubicaciones donde fueron instalados los equipos se presentan en la siguiente figura.

Figura 01 - Ubicación en el estuario de las estaciones oceanográficas fijas “Mar”, “Estuario” y “Estuario 2”.



Fondeo Estación fija de mediciones “MAR”

SITIO MAR FONDEO: 14 dic 2016 1507 horas	PUNTO	LATITUD WGS 84	LONGITUD WGS 84	S [m]	Hm [m]	SR [m]
	EQUIPOS	50° 10.559' (s)	068° 12.709' (w)	15	3.3	11.7
	RECUPERACIÓN	50° 10.565' (s)	068° 12.706' (w)			
	MUERTO	50° 10.572' (s)	068° 12.702' (w)			

Notas:

S: Sondaje tomado al fondear los equipos, en metros.

Hm: Altura de marea estimada de tabla, en metros.

SR: Sondaje reducido al cero hidrográfico local, en metros.

Fondeo Estación fija de mediciones “ESTUARIO 2”. Segunda posición de re-instalación.

SITIO ESTUARIO 2 FONDEO: 22 dic 2016 1337 horas	PUNTO	LATITUD WGS 84	LONGITUD WGS 84	S [m]	Hm [m]	SR [m]
	EQUIPOS	49° 58.530' (s)	068° 32.169' (w)	3.0	3.92	-.92
	RECUPERACIÓN	49° 58.523' (s)	068° 32.174' (w)			
	MUERTO	49° 58.515' (s)	068° 32.180' (w)			

Notas:

S: Sondaje tomado al fondear los equipos, en metros.

Hm: Altura de marea estimada de tabla, en metros.

SR: Sondaje reducido al cero hidrográfico local, en metros.

Figura 2-1 Sitios de instalación de las estaciones fijas de mediciones

Al recuperar la Estación "Estuario", se observó que tanto la estructura del implante, como los equipos en sí, presentaban señales de daños por haber sido arrastrados sobre el fondo rocoso, y haberse invertido todo el conjunto, y haber arrastrado y golpeado contra las rocas de ese fondo duro, formado por cantos rodados grandes. El conector entre el equipo y el pack de baterías presentaba signos de estar dañado y haber perdido estanqueidad.

Es posible que el daño se haya producido durante la maniobra de fondeo, en el centro de un canal más profundo con corrientes intensas, o bien que el implante completo haya sido arrastrado unos metros por una masa derivante de algas gigantes "Cachiyuyos", *Macrocytis Pyrifera*.

Por tal motivo, se realizó un nuevo fondeo en otro punto cercano, pero con menos profundidad y corriente, durante cuatro ciclos de marea completos. Se utilizó el equipo ADCP AWAC de 1000 kHz, por su mayor resolución a esta profundidad, menor que la original.

- **MEDICIONES DE CAUDAL Y MUESTRAS DE AGUA**, en el Río Santa Cruz y el Río Chico

En función de los resultados presentados en el Informe "Influencia de la Marea sobre el Nivel del Río Santa Cruz en el Tramo de la Ex-Rn3 y Punta Quilla", elevado por el Grupo de Inspección de la Obra (que se adjunta como Anexo III), se definieron de común acuerdo con la Inspección las secciones utilizadas para realizar los aforos de caudal del río Chico, y del Río Santa Cruz. Los sitios seleccionados fueron los siguientes:

1. **Río Chico:** En el Puente de la actual Ruta 3, y en un horario coincidente con la bajante de la marea.
2. **Río Santa Cruz:** En el lugar que ocupaba el antiguo puente de la Ex Ruta 3, aproximadamente 10 km aguas arriba del actual acceso carretero a la Isla Pavón, en un horario coincidente con la bajante de la marea.

En cada sección Transversal elegida se midieron perfiles de velocidades con correntómetro OTT C31. En cada perfil vertical se midió la profundidad con escandallo de plomo y cinta métrica. En la parte de mayor velocidad del agua de cada sección se tomó una muestra de 2 litros de agua con botella Niskin, a media profundidad, para el análisis del contenido de sedimentos en suspensión, y su distribución granulométrica.

Los datos de los perfiles obtenidos fueron graficados en forma de curvas de velocidades de corriente en función de la profundidad. A partir de estas curvas, se obtuvieron velocidades de corriente a intervalos verticales regulares. Con estos datos, se aplicó el método numérico de Simpson $h/3$, para realizar la integración en profundidad. De esta manera se calculó para cada vertical el caudal unitario en esa vertical. Los valores de los caudales unitarios obtenidos en cada vertical fueron graficados a lo ancho de cada sección transversal de aforo de caudal en forma de curvas de caudal. A partir de estas curvas, se aplicó el método numérico de Simpson $h/3$, para realizar la integración a lo ancho de la sección de aforo de caudal, obteniéndose el caudal en m^3/s que pasaba por la sección de aforo durante las mediciones.

- MEDICIONES CONTINUAS DE VIENTO, durante todo el período de trabajos de campo y mediciones.

Se 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.

- MUESTRAS DEL FONDO en el estuario, con muestreadores draga Van Veen y Coring de caída libre

Se tomaron 10 muestras de suelos en el estuario y parte del Río Santa Cruz. Los detalles de las posiciones exactas la descripción visual de cada muestra, y el tipo de envase y preservante agregado, están incluidos en el ANEXO 04 del Informe de Campo que se adjunta. Los principales detalles de las muestras se presentan a continuación. Se usaron dos equipos diferentes:

1. Dragas tipo Van Veen, de cucharas opuestas y cierre disparado al hacer contacto con el fondo. En varios puntos hubo que repetir los lances hasta obtener una cantidad adecuada de muestra.
2. Equipo Coring de caída libre, con tubo sacamuestra de acero de 63 mm de diámetro interior, con camisa de PVC de pared fina, con un peso de 30 kg, y una penetración máxima de 1, 20 m. Este equipo no funcionó en los fondos de arena compacta o canto rodado.

Se seleccionaron los 10 puntos en el estuario que se ilustran en la siguiente figura, los cuales a criterio de ESSA serían representativos de los sedimentos presentes.

Figura 18 - Ubicación, sobre la imagen del estuario de los 10 puntos en los que se obtuvieron muestras del fondo.

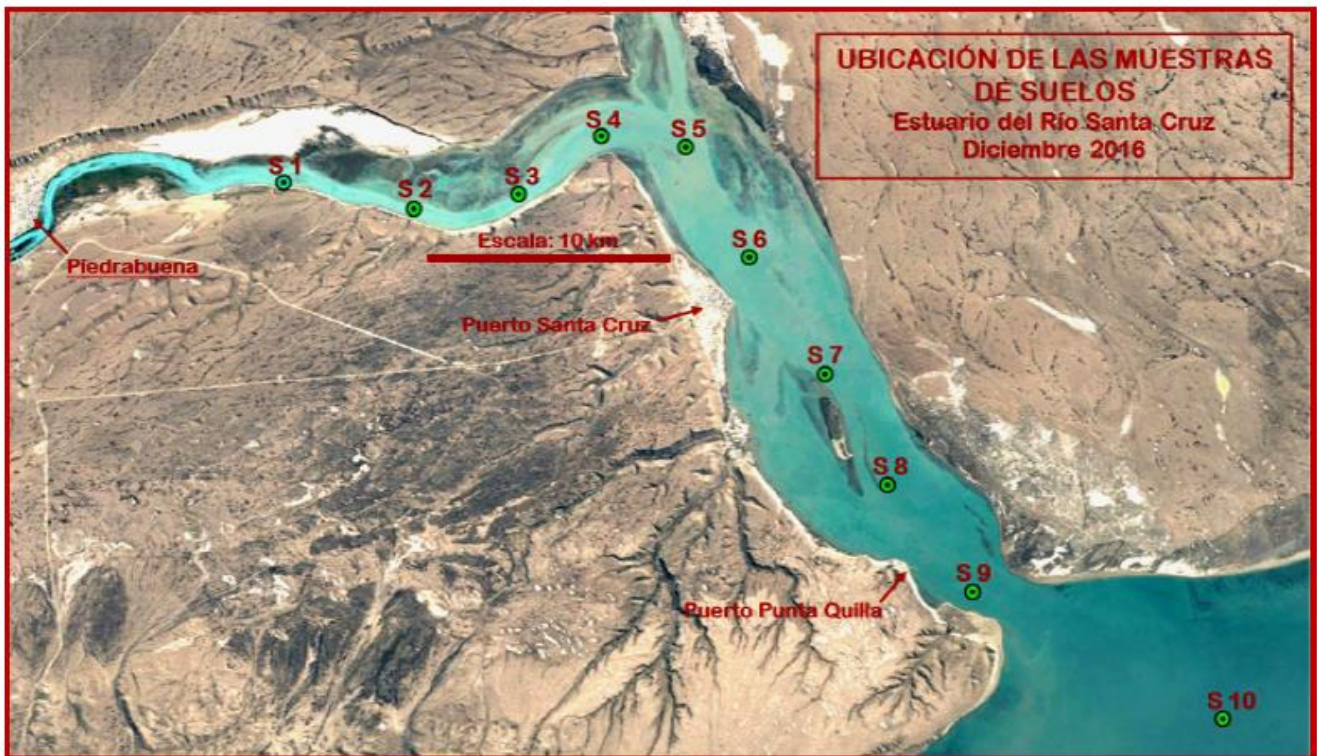


Figura 2-2 Ubicación de puntos donde se obtuvieron muestras de fondo

- **LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO EXPEDITIVO**

El objeto de levantamiento batimétrico expeditivo fue brindar datos acerca del relieve del fondo del estuario al modelo numérico hidrodinámico. Se levantaron en forma expeditiva aproximadamente 69.5 km de perfiles batimétricos mono haz, en transectas (líneas perpendiculares al eje del estuario), líneas longitudinales y algunas diagonales. Se levantaron líneas batimétricas en:

- En el estuario (a fin de verificar y ajustar la carta náutica del SHN),
- En el Río Chico, a fin de brindar datos del relieve del cauce para la modelación numérica.
- En el Río Santa Cruz, a fin de complementar un levantamiento batimétrico preexistente.

El levantamiento se condujo los días 21 y 25 de diciembre de 2016, usando la lancha "Viento Sur". El equipo usado fue el siguiente:

- Sonda ODOM Echotrack CV 100,
- Receptor GPS Trimble Ag 132, en modo no diferencial (error probable circular 5 m),
- Software de adquisición y control de derrotas HYPACK Batimetría expeditiva a los fines de brindar datos al modelo numérico.

El día 21 de diciembre se midieron mareas, refiriendo los datos mediante nivel óptico a la regla existente en el muelle en desuso del Ex Frigorífico Armour, ubicado en la confluencia de los Ríos Chico y Santa Cruz. Esta regla fue colocada por la Inspección de Obra. Se tomó la cota IGN del cero de la regla, definida en la publicación "Influencia de la Marea sobre el Nivel del Río Santa Cruz en el Tramo de la Ex-RN3 y Punta Quilla", elevado por el Grupo de Inspección de la Obra.

- **MEDICIÓN EXPEDITIVA DEL CAUDAL EN EL ESTUARIO**

El día 17 de diciembre de 2016 se midieron perfiles verticales de corrientes, en 13 puntos, ubicados sobre 3 transectas, como se muestra en la siguiente figura. Se usó el equipo ADCP AWAC de 1000 kHz de frecuencia acústica, por su superior resolución. Debido a las grandes dificultades para fondear la lancha en este estuario, debido a las fuertes corrientes, del orden de 6 a 7 nudos, y el mal tenedero para las anclas en esos fondos con cantos rodados, se adoptó la técnica de "posicionamiento dinámico" para conducir las mediciones.

Figura 22 - Ubicaciones, sobre la imagen del estuario, de las transectas con estaciones de mediciones de corrientes con equipo AWAC ADCP de 1000 kHz.

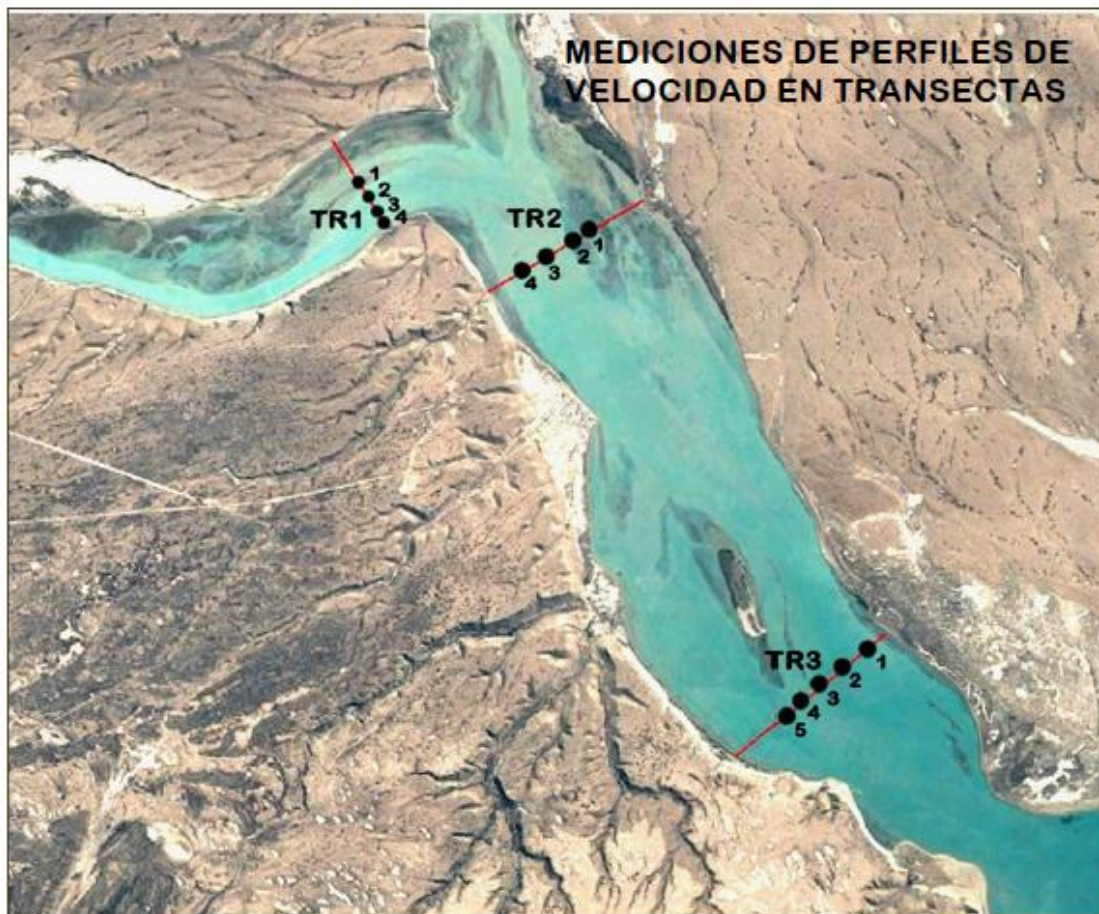


Figura 2-3. Ubicación de transectas con estaciones de medición de corrientes

- MEDICIONES DE 20 PERFILES VERTICALES DE CORRIENTES, TEMPERATURA, SALINIDAD Y TURBIDEZ

El día 23 de diciembre de 2016, se realizaron estas mediciones con el objetivo de poder observar la intrusión salina en el estuario. Se midieron perfiles verticales de corrientes, velocidad y dirección, usando un equipo ADCP Nortek AWAK de 400 kHz, y perfiles verticales de Conductividad (salinidad), Temperatura (°C), Turbidez (NTU), y Profundidad (como presión hidrostática) con un equipo CTDtu OBS 3A, en los 10 puntos a lo largo del estuario que se ilustran en la siguiente figura, en situación de bajante, y luego de crecida en cada punto. En total se levantaron perfiles verticales, sobre 10 puntos, dos veces en cada punto, una en crecida y otra en bajante. Se realizaron las mediciones, comenzando aguas arriba, en la Estación N° 01, y navegando aguas abajo, parando en cada una de las estaciones a realizar. La totalidad de estas mediciones fue hecha con marea en bajante. Al terminar la estación de más afuera del estuario, la Estación N° 10, se esperó para que se consolide la corriente de crecida, luego de lo cual se empezó a trabajar nuevamente en los perfiles, con la corriente creciendo francamente. Se empezó nuevamente en la Estación 10a, hasta terminar aguas arriba en la Estación 01a.

Figura 23 - Ubicaciones de Estaciones CTDtu y AWAC, 01 a 10. Por claridad, sólo se graficaron las estaciones con mediciones con marea bajante, navegando hacia Afuera del estuario.

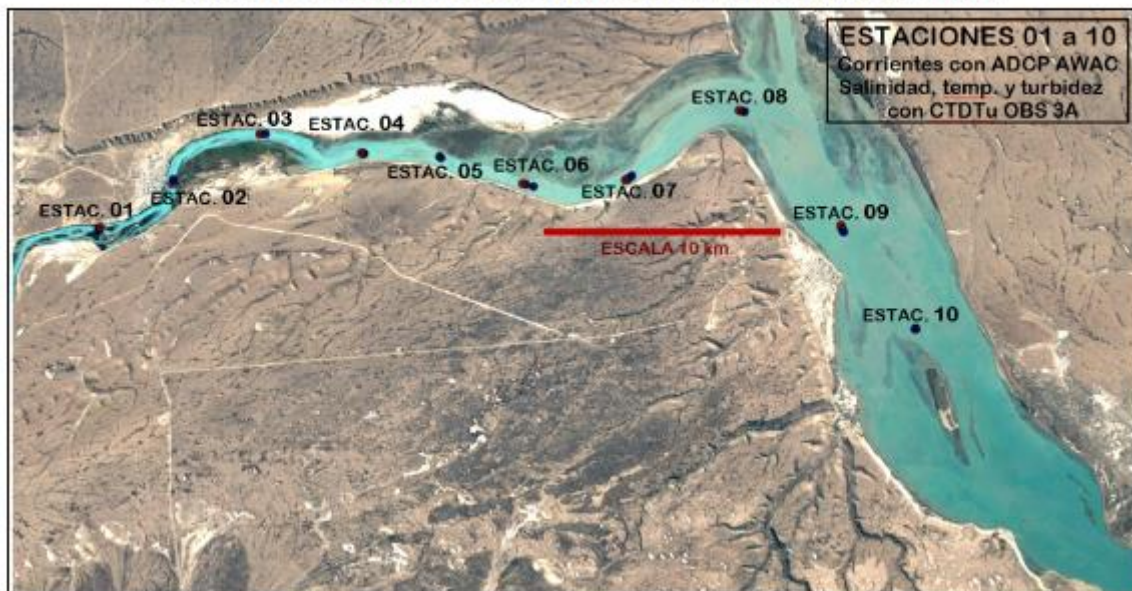


Figura 2-4. Ubicación de Estaciones de medición de perfiles verticales (en marea bajante)

- MUESTRAS DE AGUA EN EL ESTUARIO

Simultáneamente con la tarea de obtener perfiles CTDtu, se tomaron 10 muestras de agua de 2 litros cada una con botellas Niskin, en 5 puntos, a profundidad media, inmediatamente luego de medir los perfiles verticales de CTDtu. Las muestras de agua se tomaron en todos los puntos con número par, tanto en situación de bajante, como en situación de creciente. El objeto de estas muestras es determinar su contenido de Sólidos Totales en Suspensión, a fin de correlacionar este dato con el de turbidez nefelométrica medida en el mismo instante y sitio, en las estaciones CTDtu.

- MUESTRAS DE AGUA EN EL RÍO SANTA CRUZ

Se tomaron dos muestras de agua, una en el eje del proyecto de la presa "Jorge Cepernic", y otra en el nacimiento del Río Santa Cruz, ambas el día 27 de diciembre de 2016, cuyos datos son los siguientes:

Tabla 2-1. Datos de muestras de agua tomadas fuera del estuario, en el río Santa Cruz

MUESTRA	WP	FECHA de obtención	HORA de obtención	POSICIÓN Ref WGS 84	DESCRIPCIÓN	EQUIPO	USO, CONSERVACIÓN
Eje Presa JC, R.S. CRUZ, agua	351	27-dic-16	12:00:00	S50 11.202 W70 07.292	Muestra de agua en vertical de mayor corriente, a media profund.	Botella Niskin	Sin preservante
Nacimiento R. S. CRUZ, agua	353	27-dic-16	16:15:00	S50 16.065 W71 53.143	Muestra de agua en vertical de mayor corriente, a media profund.	Botella Niskin	Sin preservante

2.2.2 Informe de Avance del Estudio

El objeto de los estudios presentados en el informe, es realizar la modelación de niveles del mar, corrientes, temperatura, salinidad y turbidez en el Estuario del Río Santa Cruz para diferentes escenarios asociados a la estación del año (incluyendo variaciones estacionales de los caudales de los ríos que desembocan en el Estuario) y condiciones de antes, durante y después de la construcción de las represas.

El informe de avance disponible a la fecha abarca hasta la calibración de los modelos, en los aspectos hidrodinámico y de salinidad, restando aún efectuar la calibración de turbidez / sólidos suspendidos. Adicionalmente, se presenta una evaluación de la temperatura y salinidad para diferentes condiciones de caudales.

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

- Modelo hidrodinámico 3D, Sistema MIKE 3 (HD, Hydrodynamic), desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute). Este módulo es la base para el cálculo de niveles del mar y corrientes locales sobre la cual se difunden diferentes propiedades del agua de mar, como la temperatura, salinidad y concentraciones de sedimentos en suspensión.
- Las variaciones de temperatura y salinidad en el mar y el estuario se han modelado utilizando el módulo MIKE 3 (AD, Advección-Dispersión) incorporado como variaciones de estas variables en MIKE 3 (HD).
- Para el seguimiento de los sedimentos en suspensión asociados a la turbidez se ha utilizado el modelo MIKE 3 (MT, Mud Transport) que permite el transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos finos.

Los modelos requieren condiciones de contorno para su aplicación. Se han utilizado las siguientes fuentes de información:

- Base de datos globales WOD13 (World Ocean Database 2013 de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA))

Esta base de datos contempla todas las estaciones argentinas de CEADO (Centro Argentino de Datos Oceanográficos, del Servicio de Hidrografía Naval). Estos datos fueron tomados para analizar la variación temporal de la temperatura y salinidad que se incorporaron al modelo por los bordes abiertos de la grilla utilizada en las simulaciones.

- Tablas de Marea (Servicio de Hidrografía Naval, SHN, 2016) para las alturas de la marea para Punta Quilla.
- Mediciones de ESSA (Vientos, temperatura y humedad) previamente descriptas
- Mediciones de ESSA en la Estación Mar y Estación Estuario 2 (nivel del mar, temperatura y turbidez)

A continuación de resumen los valores característicos obtenidos:

Tabla 2-2. Valores característicos de las variables medidas en las Estaciones fijas

Tabla 4.4.1 Valores característicos de las variables medidas en la Estación Mar. Profundidad del lugar: 17.1 m referido al Nivel Medio del Mar (NMM). Intervalo de muestreo: 10 min. UPS: unidades prácticas de salinidad equivalentes a gr/l

Variable	N	Máximo	Mínimo	Medio	Desvío
Temperatura (°C), OBS	825	12.1	10.2	11.0	0.3
Turbidez (NTU), OBS	810	281	2	15	30
Salinidad (UPS) con datos del OBS	825	33.2	31.2	32.3	0.3
Profundidad del lugar (m)	825	22.6	11.3	17.1	3.5
Velocidad corriente (m/s), AWAC (2.5 m del fondo)	823	1.02	0.07	0.57	0.16
Velocidad corriente (m/s), AWAC (6.5 m del fondo)	825	1.15	0.15	0.67	0.17
Velocidad corriente (m/s), AWAC (10.5 m del fondo)	792	1.27	0.23	0.75	0.20
Velocidad corriente (m/s), AWAC (14.5 m del fondo)	458	1.40	0.22	0.85	0.27
Velocidad corriente (m/s), AWAC (16.5 m del fondo)	336	1.57	0.18	0.96	0.31
Velocidad corriente (m/s), AWAC (18.5 m del fondo)	190	1.70	0.37	1.11	0.30

Tabla 4.4.2 Valores característicos de las variables medidas en la Estación Estuario 2. Profundidad del lugar: 5.6 m referido al Nivel Medio del Mar (NMM). Intervalo de muestreo: 10 min.

Variable	N	Máximo	Mínimo	Medio	Desvío
Temperatura (°C), OBS	289	14.0	12.8	13.3	0.3
Turbidez (NTU), OBS	289	476	4	47	44
Salinidad (UPS) con datos del OBS	290	19.4	3.6	11.5	5.0
Profundidad del lugar (m)	289	8.8	2.5	5.6	2.1
Velocidad corriente (m/s), AWAC (1.25 m del fondo)	289	0.81	0.01	0.38	0.22
Velocidad corriente (m/s), AWAC (2.25 m del fondo)	262	0.93	0.01	0.48	0.24
Velocidad corriente (m/s), AWAC (3.25 m del fondo)	198	1.01	0.01	0.61	0.25
Velocidad corriente (m/s), AWAC (4.25 m del fondo)	159	1.13	0.03	0.69	0.31
Velocidad corriente (m/s), AWAC (5.25 m del fondo)	124	1.28	0.04	0.68	0.33
Velocidad corriente (m/s), AWAC (6.25 m del fondo)	86	1.26	0.12	0.60	0.31

- Mediciones de ESSA (perfiles de turbidez en creciente y bajante)
- Batimetría integrada

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

Servicio de Hidrografía Naval

Carta náutica H413 “De Puerto San Julián a Río Gallegos”

Carta náutica 2 “Puerto Santa Cruz”

Carta náutica H367 “Punta Quilla”

ESSA

Ezcurra y Schmidt S.A. 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 realizada por Represas Patagonia

Consta de 20 Perfiles en el Río Santa Cruz entre Piedrabuena y el estuario y 3 Perfiles en la zona del estuario

Calibración de Corrientes y niveles del mar

La calibración del MIKE 3 (HD) consistió en la comparación entre los valores medidos del nivel del mar y el campo de corrientes y los calculados por el modelo. La calibración es un proceso iterativo donde se modifican coeficientes 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.

Calibración de Temperatura y salinidad

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

2.3 RESULTADOS

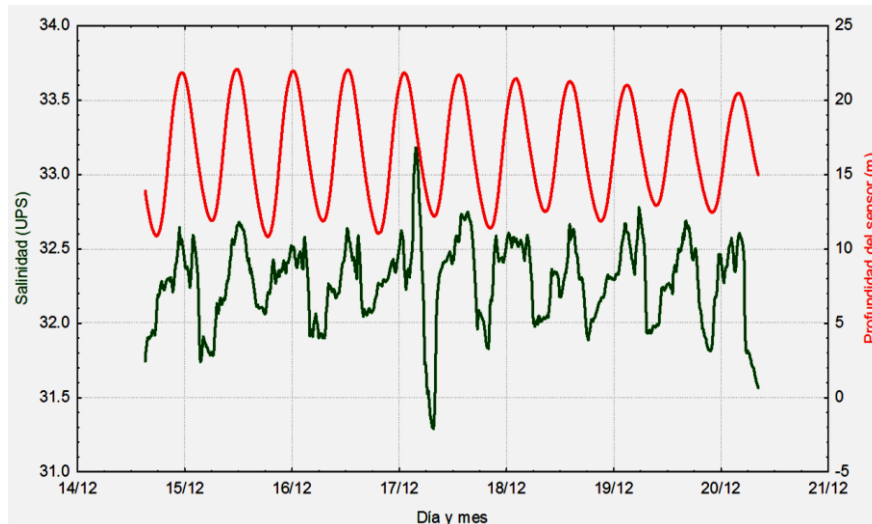
2.3.1 Informe de Campo

Los principales resultados de las mediciones realizadas se presentan a continuación.

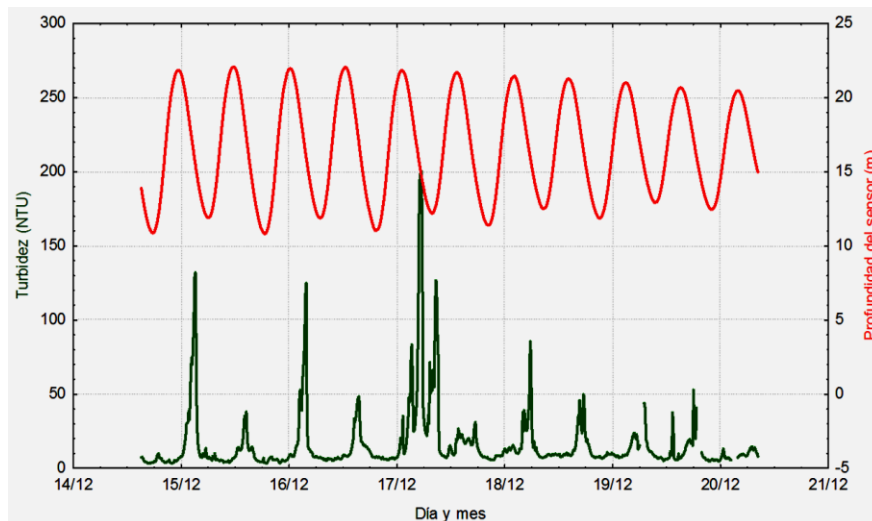
- **MEDICIONES EN ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS FIJAS**

Los resultados de las dos estaciones oceanográficas se presentan en el “ANEXO 03 Ejemplos gráficos de datos medidos”, del Informe de Campo.

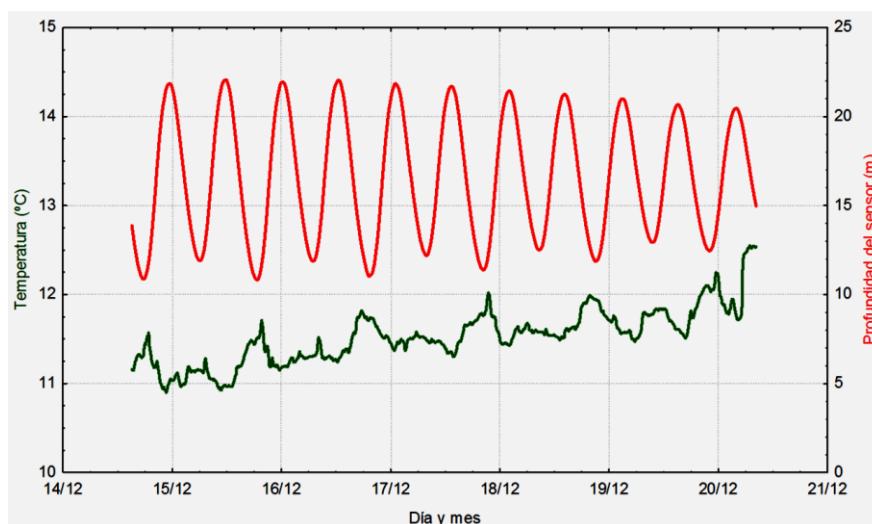
Los resultados permiten apreciar adecuadamente las condiciones de salinidad, turbidez y temperatura del agua. Se reproducen a continuación las figuras correspondientes a ambas estaciones. Las series de tiempo de valores de velocidad de la corriente a diferentes niveles y los perfiles verticales se pueden consultar en el referido documento.



En la Estación "Mar", aún estando fuera del Estuario, se observa una variación de la salinidad, de poca amplitud (sólo unas pocas unidades UPS), en sincronismo con las pleamares y bajamares.

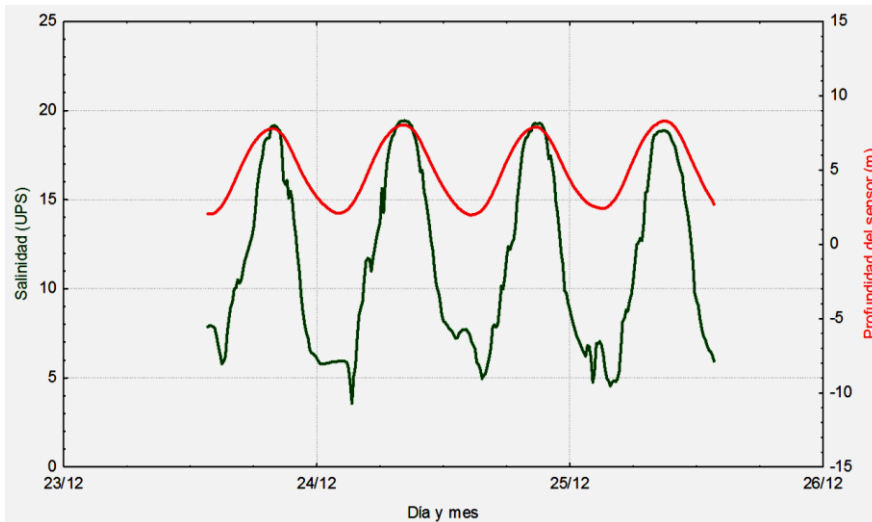


En la Estación "Mar", pudo observarse que la variación de turbidez también está relacionada con la marea, en forma de picos de turbidez más alta, durante las máximas corrientes de bajante

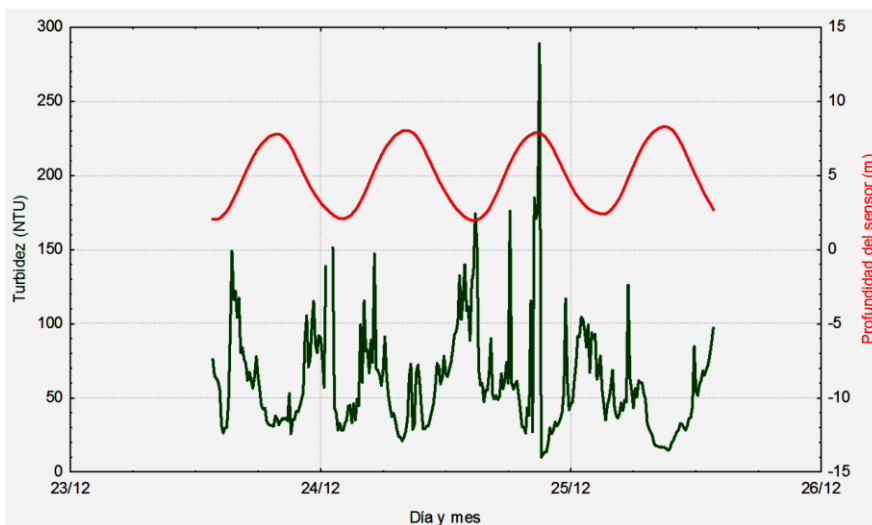


En la Estación "Mar", la temperatura tiene una tendencia general a aumentar a medida que pasan los días, algo esperable en esta época del año, al final de la primavera.

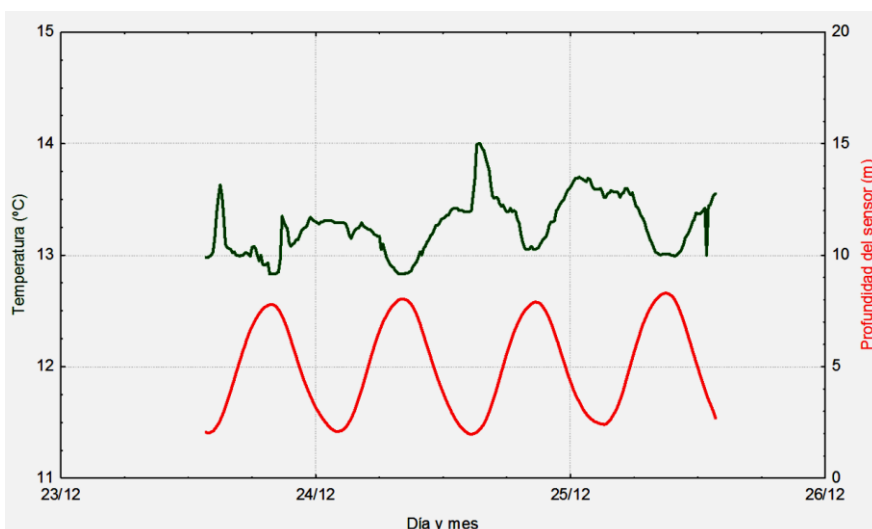
Figura 2-5. Estación Mar. Serie de tiempo de profundidad del sensor, turbidez, salinidad y temperatura



En la Estación "Estuario", se observa una variación de la salinidad muy significativa de más de 10 UPS, perfectamente sincronizada con las pleamares y bajamares.



En la Estación "Estuario", la turbidez tiene una muy marcada variabilidad que no depende enteramente de las mareas.



En la Estación "Estuario", la temperatura tiende a presentar un mínimo durante la pleamar y un máximo durante la bajamar, no muy regular. Lo cual indica que el agua del Río Santa Cruz es más caliente que el agua de mar.

Figura 2-6. Estación Estuario 2. Serie de tiempo de profundidad del sensor, turbidez, salinidad y temperatura

- MEDICIONES DE CAUDAL Y MUESTRAS DE AGUA, en el Río Santa Cruz y el Río Chico

Medición de caudal y toma de muestra de agua en el Río Chico

CAUDAL TOTAL Río Chico, 15 dic 2016, a horas 19:15-20:15 = 11,1 m³/s

Nivel del Río Chico en sitio de aforo, Puente Ruta 3:

Distancia vertical de la superficie agua a marca roja en baranda= 11,55 m

Cota IGN marca roja en baranda= 16,143 m (determinada por el Topógrafo Gonzalo Valdés)

Altura nivel del agua IGN= 4,593 m

Medición de caudal y toma de muestra de agua en el Río Santa Cruz

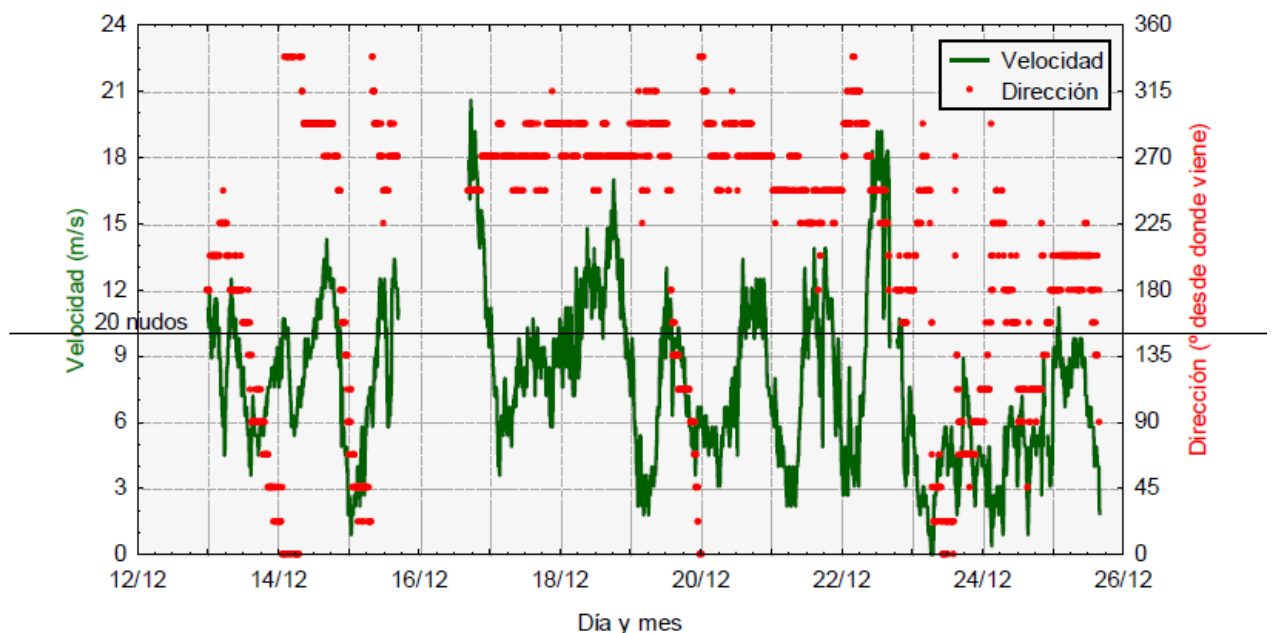
CAUDAL TOTAL Río Santa Cruz, 19 dic 2016, a horas 15:30-16:47 = 569,3 m³/s.

Nivel río en sitio de aforo, ex Ruta 3:

Lectura escala limnimétrica Inspección= 1,41 m. Altura nivel del agua IGN= 8,59 m

Las muestras de agua fueron enviadas a laboratorio y se encuentran en proceso

- MEDICIONES CONTINUAS DE VIENTO, durante todo el período de trabajos de campo y mediciones.



NOTA:

El intervalo sin datos, entre el 15 dic a 1700 horas y el 16 dic a 1630 horas, se debió a un episodio de vibraciones anómalas que afectaron el conector de la alimentación de baterías. Los datos serán completados con información de modelos globales de NOAA. Es interesante observar que la dirección predominante para vientos de más de 20 nudos (10 m/s), fue del sector centrado en el oeste, entre el ONO y el OSO (en grados: 247.5° al 292.5°)

Figura 2-7. Velocidad y dirección del viento, medido en el aeropuerto de Puerto Santa Cruz

- MUESTRAS DEL FONDO en el estuario, con muestreadores draga Van Veen y Coring de caída libre

Las muestras de fondo fueron enviadas a laboratorio y se encuentran en proceso.

- **LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO EXPEDITIVO**

Los datos de la batimetría realizada se adicionaron a la batimetría realizada por la Represas Patagonia y a la batimetría de las cartas náuticas, resultando la batimetría integrada que se presenta en la siguiente figura.

Los datos batimétricos en formato X, Y y Z, fueron incorporados al modelo MIKE 3 (HD) que, a partir de una subrutina, generó la grilla de modelación sobre la cual se hicieron las simulaciones. Los datos batimétricos obtenidos por ESSA, y por Represas Patagonia coinciden con los datos de las cartas náuticas.

En algunos sitios puntuales donde se detectaron algunas diferencias entre los sondeos de las cartas respecto a los sondeos de los relevamientos de Represas Patagonia y ESSA, se utilizaron los valores de estos últimos relevamientos para la grilla de modelación.

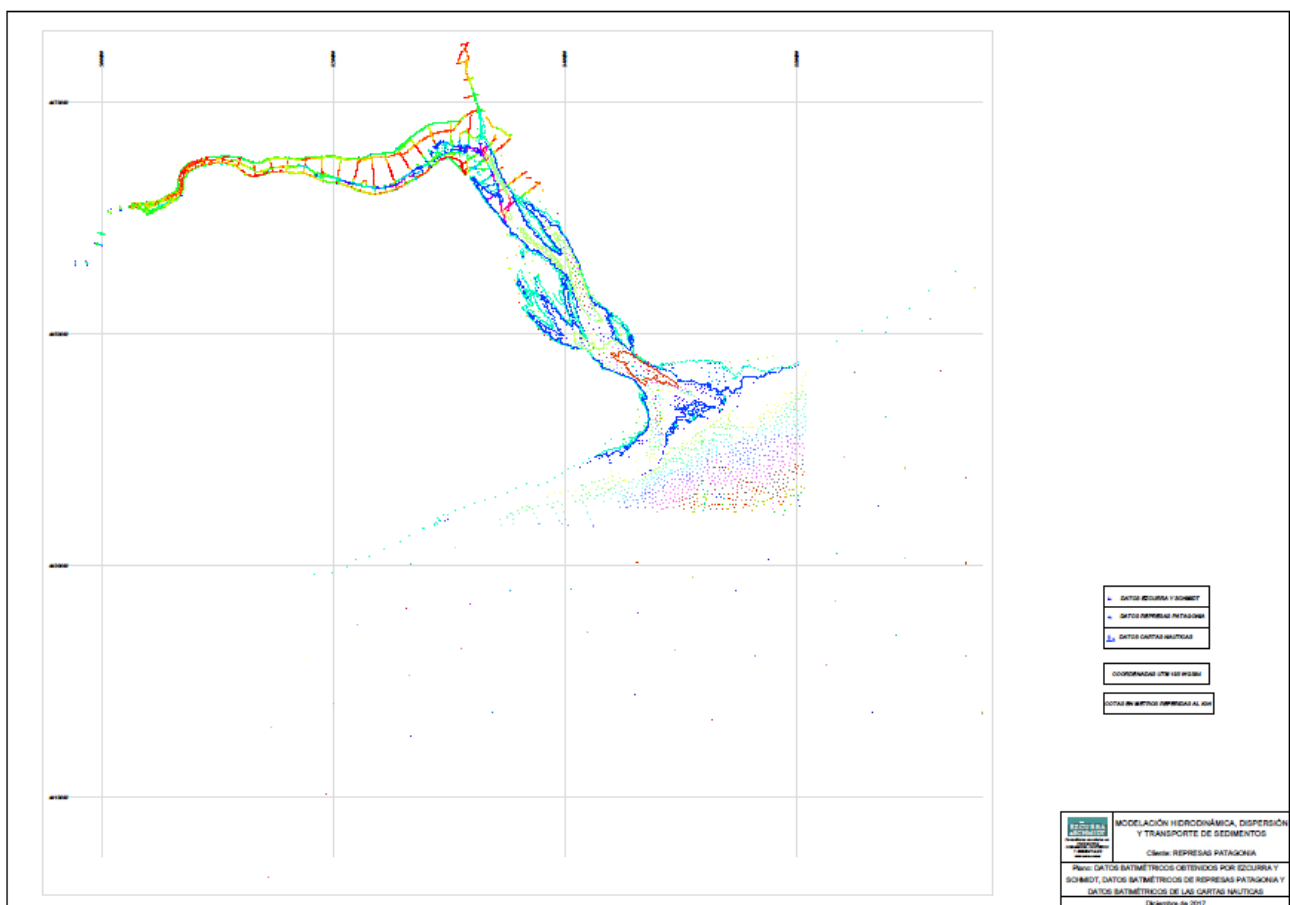


Figura 2-8. Batimetría integrada para la generación del Modelo Digital del Lecho

- **MEDICIÓN EXPEDITIVA DEL CAUDAL EN EL ESTUARIO**

La información de mayor interés obtenida en estas mediciones son los perfiles detallados de velocidad de la corriente, a ser empleados para la calibración del modelo hidrodinámico 3D, en forma complementaria a las estaciones fijas.

Un ejemplo de estos datos se presenta en la siguiente figura:

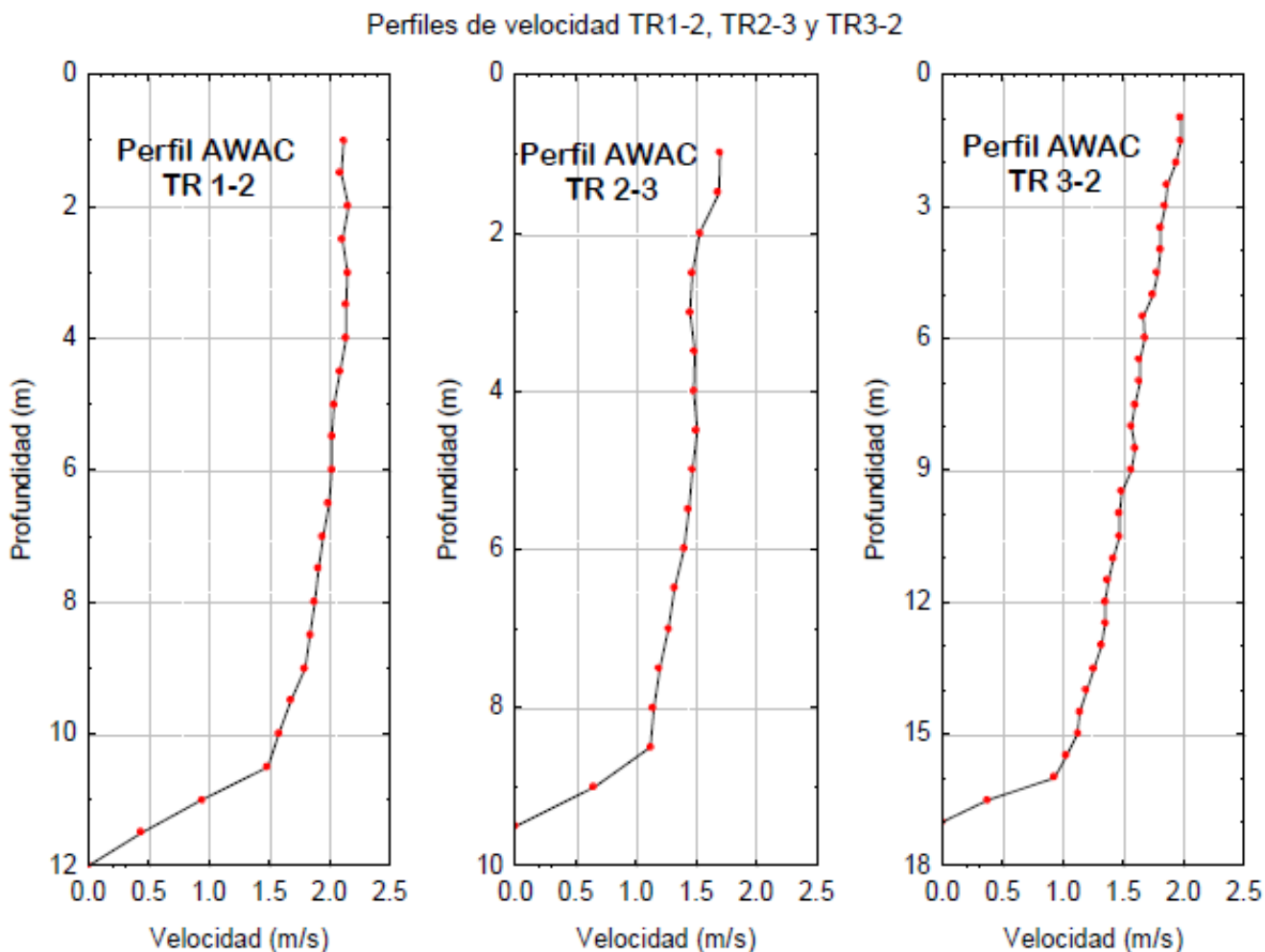


Figura 2-9. Ejemplo de perfiles verticales de velocidad medidos para los aforos en el estuario

- MEDICIONES DE 20 PERFILES VERTICALES DE CORRIENTES, TEMPERATURA, SALINIDAD Y TURBIDEZ

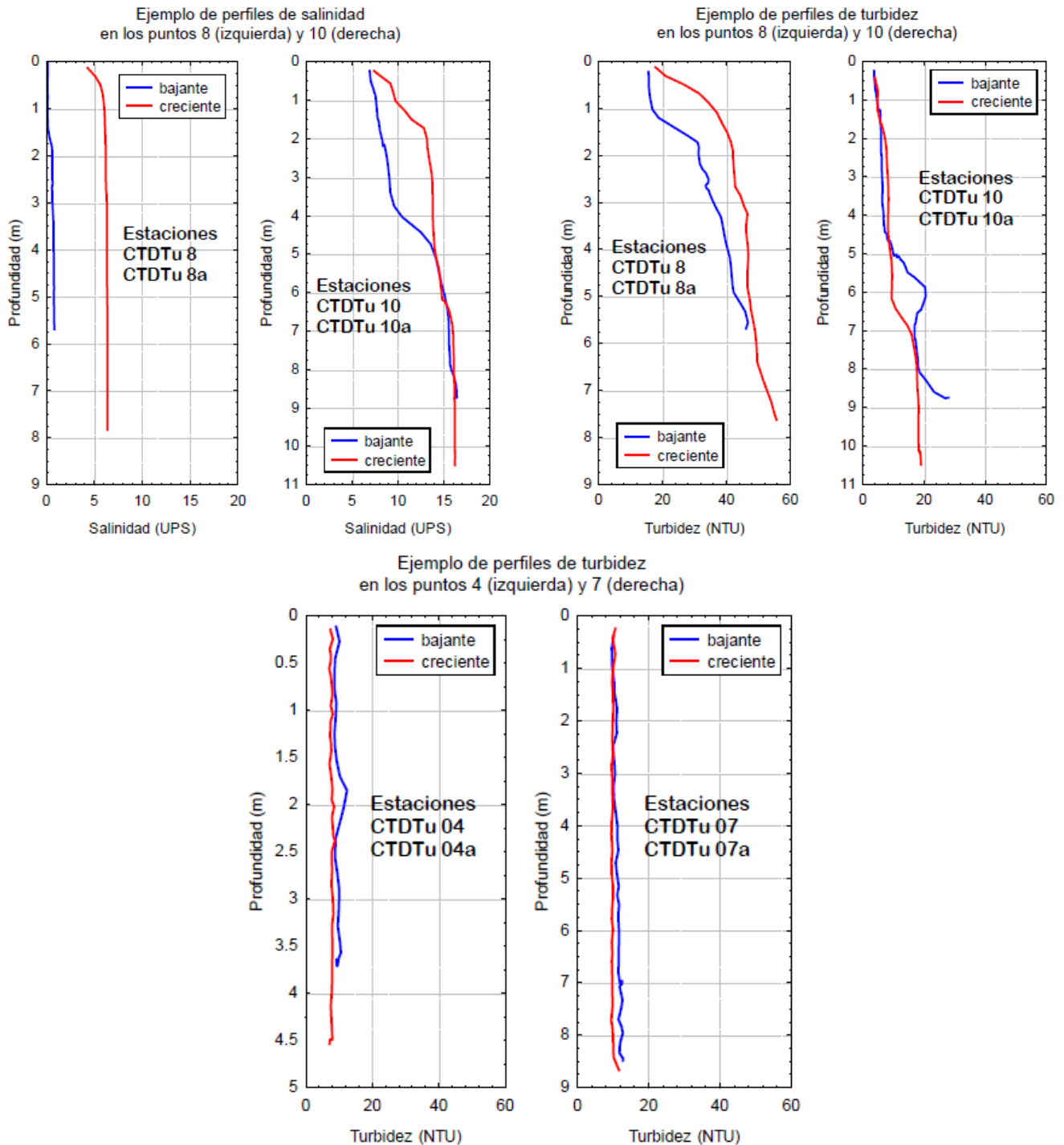


Figura 2-10. Ejemplo de perfiles verticales de salinidad y turbidez medidos

- **MUESTRAS DE AGUA EN EL ESTUARIO**

Las muestras de agua del estuario fueron enviadas a laboratorio y se encuentran en proceso.

- **MUESTRAS DE AGUA EN EL RÍO SANTA CRUZ**

Las muestras de agua del río Santa Cruz fueron enviadas a laboratorio y se encuentran en proceso.

2.3.2 Informe de Avance

Temperatura del aire en Puerto Santa Cruz

Se han obtenido los datos de temperatura del aire para Puerto Santa Cruz, que se muestran en la Tabla siguiente.

Tabla 2-3. Temperatura del aire para la Estación Puerto Santa Cruz (Servicio Meteorológico Nacional), período 1901-1960. Altura 12 m s/NMM

Temperatura (°C)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Media	14.3	14.1	12.2	8.6	4.6	1.7	1.8	3.5	6.1	8.8	11.4	12.8	8.3
Máxima Media	21.0	20.9	18.8	14.3	9.2	5.4	5.6	8.2	11.8	16.0	18.7	21.1	14.3
Mínima Media	8.9	8.4	6.6	3.5	0.6	-2.0	-1.9	-0.5	1.2	3.6	6.0	8.0	3.5
Mínima Absoluta	0.0	-3.8	-3.2	-8.0	-12.1	-17.0	-16.5	-17.0	-7.4	-6.6	-3.4	-0.6	-17.0

Caudales mensuales del Río Santa Cruz

Se han obtenido los datos de caudales del Río Santa Cruz en Estación Charles Führ para el período septiembre de 1955 – agosto de 2015, provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos. La figura siguiente muestra los caudales en términos de los caudales medios, mínimos y máximos.

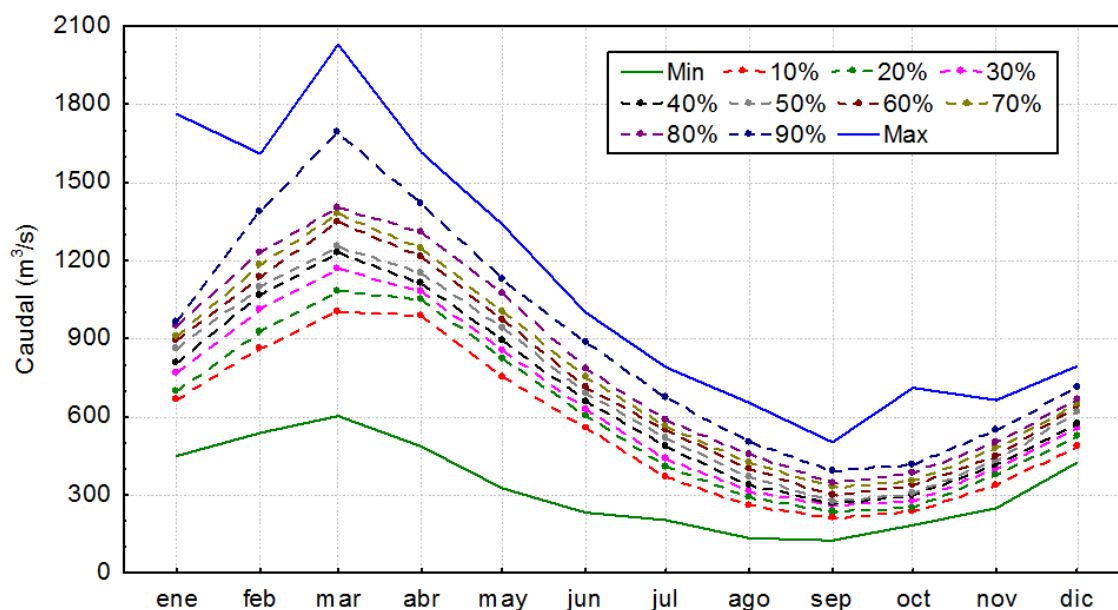


Figura 2-11. Frecuencia de caudales medios mensuales del Río Santa Cruz en Estación Charles Führ (septiembre de 1955 – agosto de 2015) (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>)

Implementación del modelo matemático

El programa utilizado es MIKE 3 HD (HYDRODYNAMIC) versión FM (FLEXIBLE MESH) con módulo AD (ADVECTION-DISPERSION) y módulo MT (MUD TRANSPORT), desarrollado por Danish Hydraulic Institute (DHI).

La batimetría sobre la cual se soporta la malla de elementos finitos del modelo se presenta en la figura siguiente.

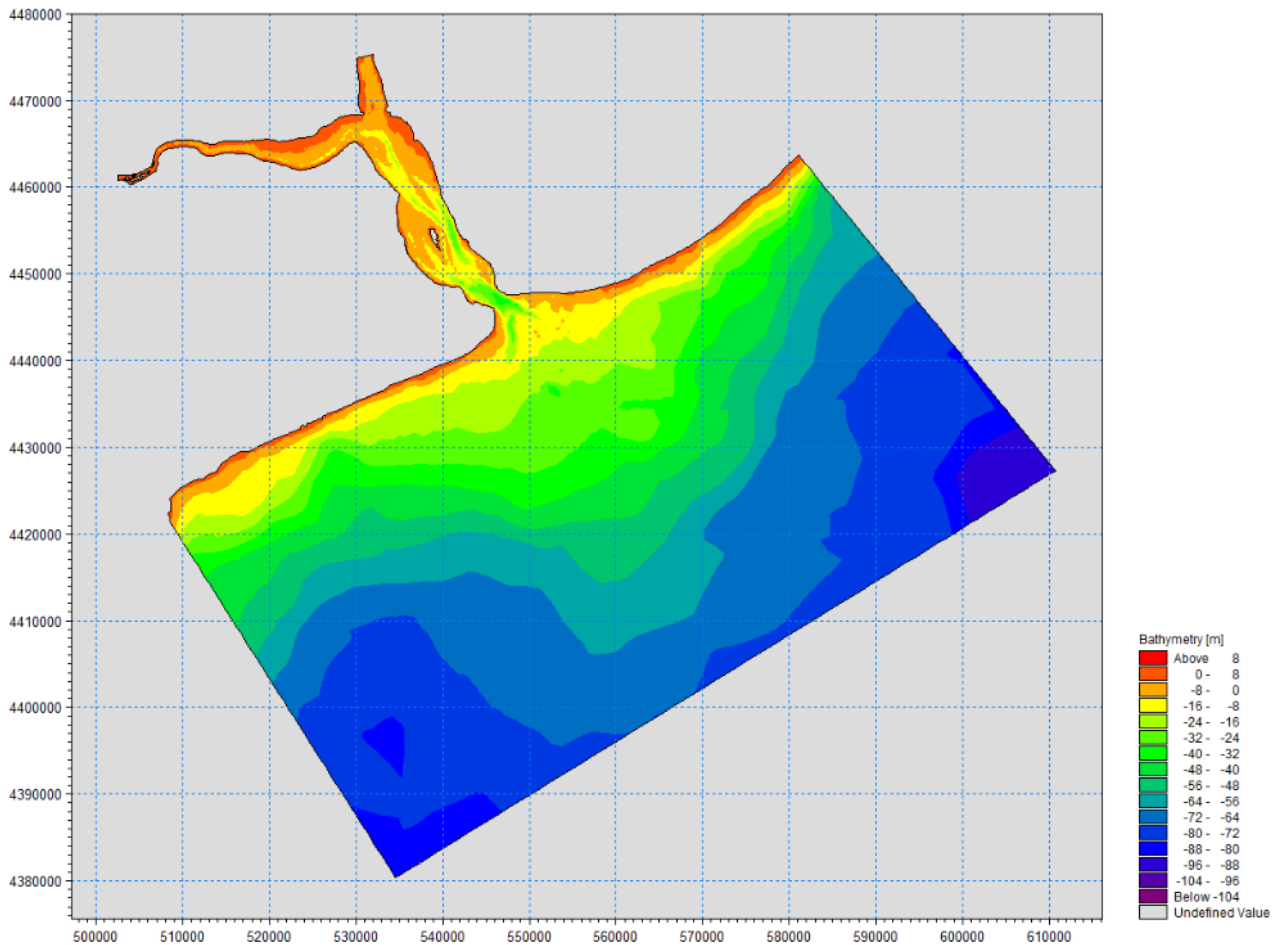


Figura 2-12. Batimetría completa del modelo sobre la cual se soporta la grilla

Calibración de Corrientes y niveles del mar

Las figuras siguientes muestran la comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 (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.

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 horas (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.

Este flujo de agua que entra y sale, permite que las aguas del estuario cambien todo el tiempo propiedades tales como la salinidad y la temperatura.

Figura 5.4.1 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 (HD) en la Estación Mar

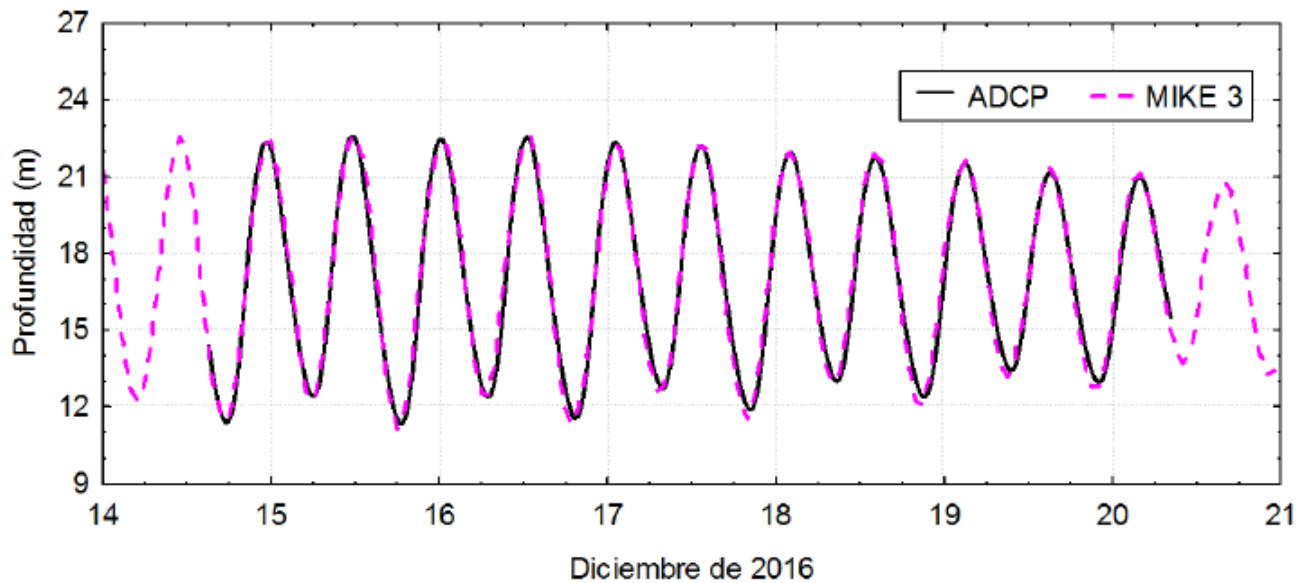


Figura 5.4.2 Comparación entre las profundidades medidas y calculadas por el MIKE 3 (HD) en la Estación Estuario 2

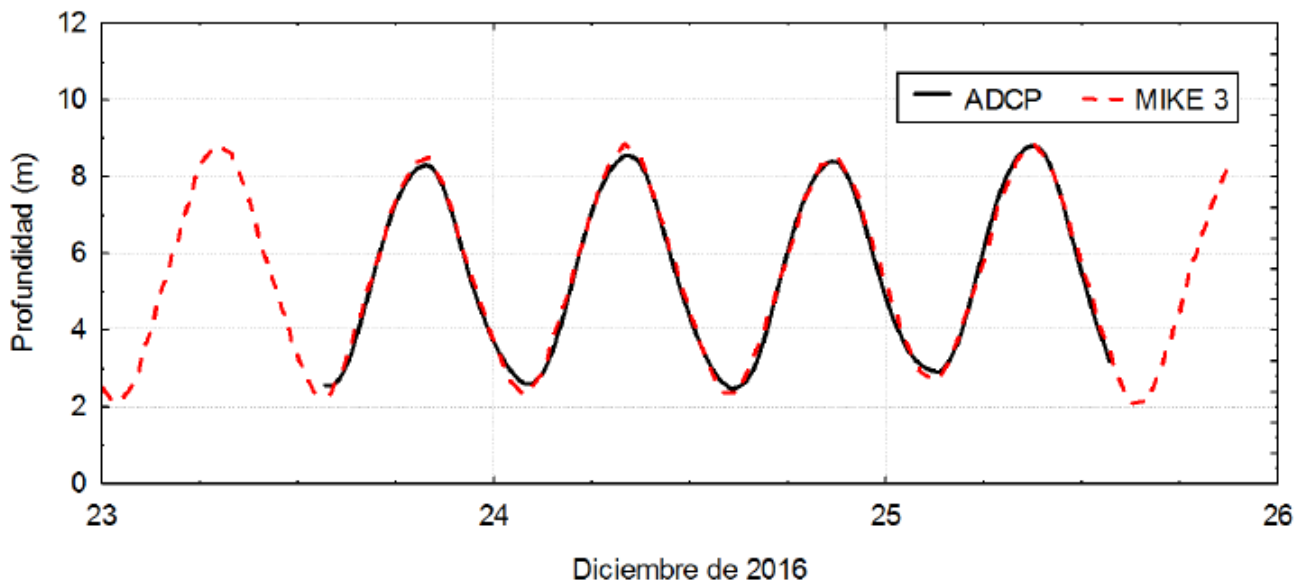


Figura 2-13. Ajuste de profundidades medidas y calculadas en las Estaciones fijas.

Se presentan también en el Informe de Avance los gráficos de calibración de velocidades para diferentes profundidades, mostrándose en las figuras siguientes algunos gráficos ilustrativos de la calibración obtenida.

Figura 5.4.4 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 (HD) en la Estación Mar, a 6.5, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.

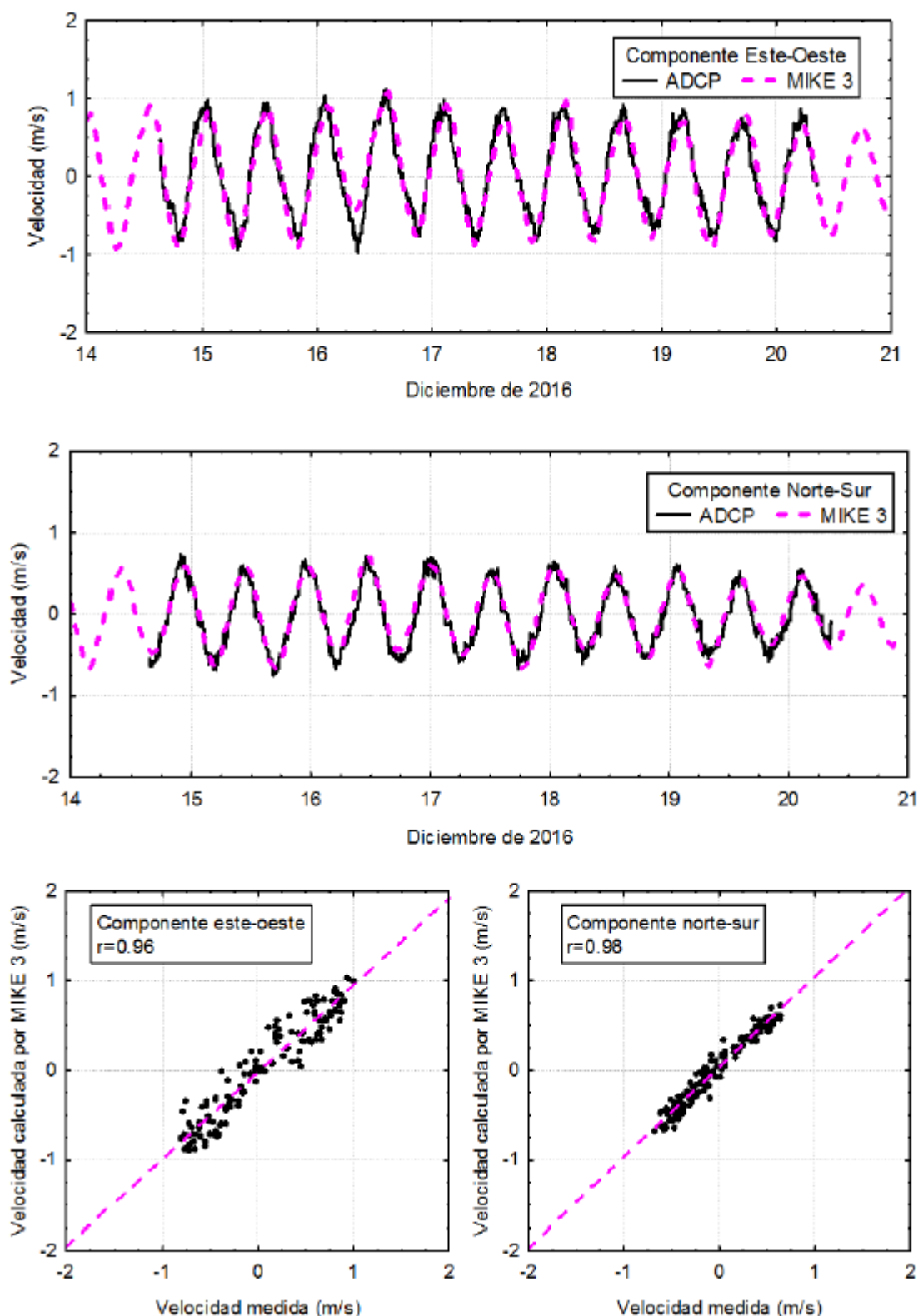


Figura 2-14. Ejemplos del ajuste de velocidades medidas y calculadas en la Estación Mar.

Figura 5.4.9 Comparación entre las componentes E-W y N-S medidas y calculadas por el MIKE 3 (HD) en la Estación Estuario 2, a 3.25, sobre el fondo, y correlaciones. Nota: r coeficiente de correlación.

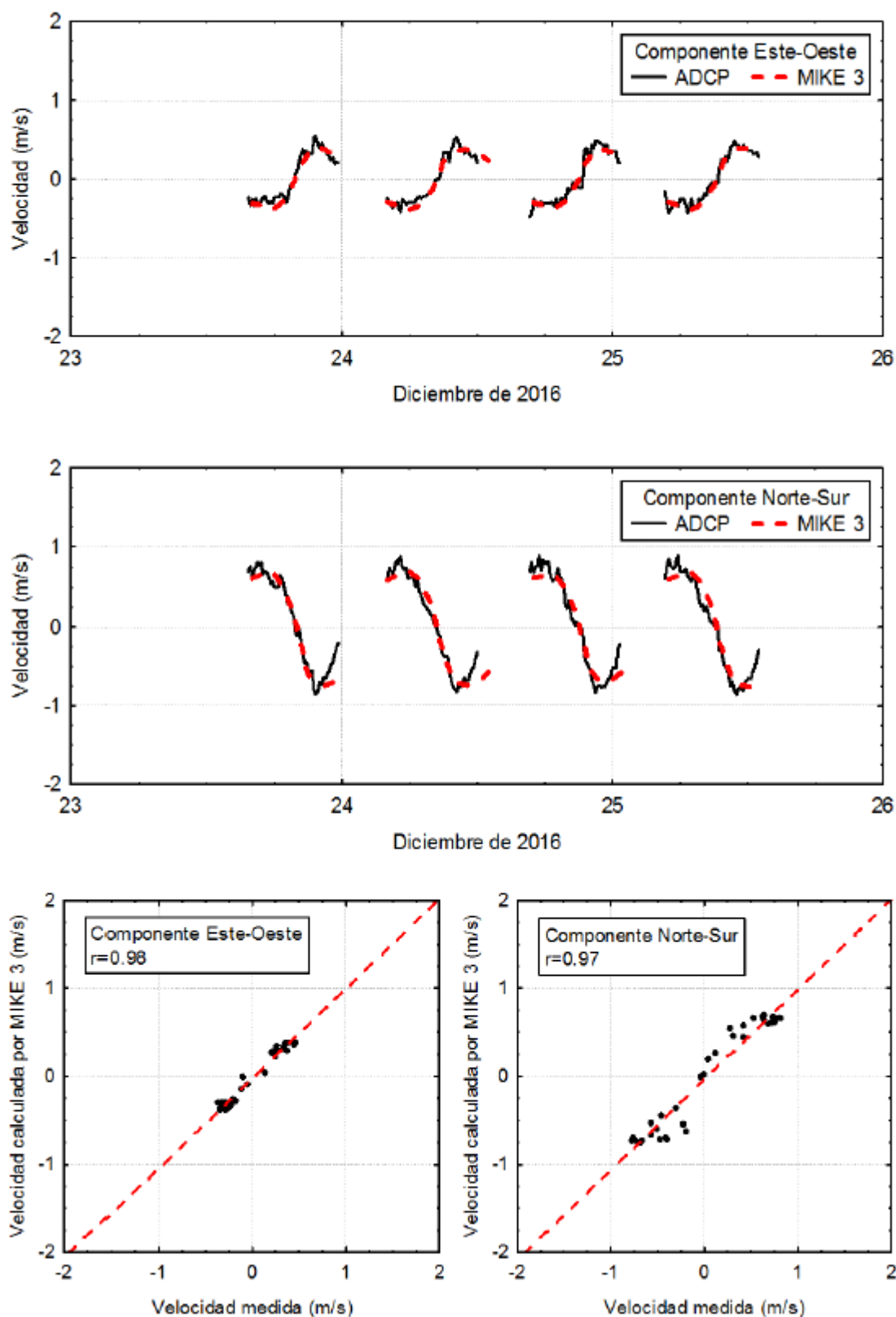


Figura 2-15. Ejemplos del ajuste de velocidades medidas y calculadas en la Estación Estuario 2.

También se calibraron los perfiles de velocidad medidos, como se ilustra en las siguientes figura y tabla.

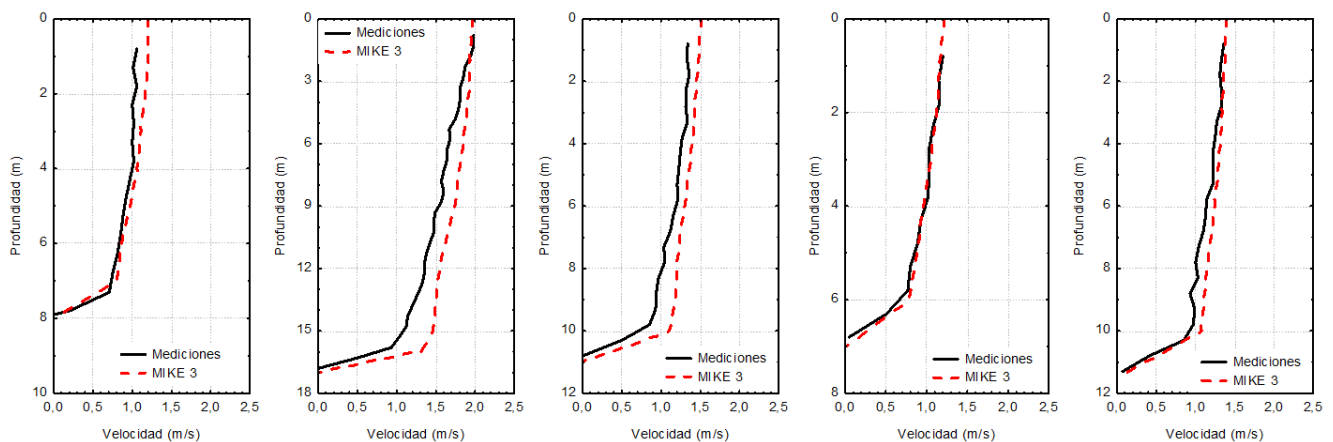


Figura 2-16. Ejemplo de comparación entre los perfiles de velocidad registrados durante la campaña de diciembre de 2016 y los resultados del modelo MIKE 3 (HD). Estaciones TR 3-1 (izquierda), TR 3-2 (centro izquierda), TR 3-3 (centro), TR 3-4 (centro derecha) y TR 3-5 (derecha).

Tabla 2-4. Comparación entre las velocidades medias de los perfiles de velocidad medidos durante la campaña de diciembre de 2016 y los resultados del modelo MIKE 3 (HD).

Estación	WP	Fecha	Hora	Velocidad media medida (m/s)	Velocidad media calculada (m/s)	Dirección media medida (°)	Dirección media calculada (°)
TR 1-1	396	17-dic.-16	15:38:34	1.1	1.1	67	60
TR 1-2	397	17-dic.-16	15:49:08	1.4	1.4	43	54
TR 1-3	398	17-dic.-16	16:27:07	1.3	1.3	39	53
TR 1-4	399	17-dic.-16	16:46:28	1.9	1.6	41	31
TR 2-1	390	17-dic.-16	12:33:11	0.8	0.8	292	307
TR 2-2	389	17-dic.-16	12:19:31	0.8	1.1	294	301
TR 2-3	388	17-dic.-16	12:01:47	1.8	1.7	322	299
TR 2-4	387	17-dic.-16	11:38:14	1.7	1.6	317	302
TR 3-1	404	17-dic.-16	18:34:28	0.8	0.9	131	133
TR 3-2	403	17-dic.-16	18:21:06	1.5	1.6	147	115
TR 3-3	402	17-dic.-16	18:11:25	1.1	1.2	159	116
TR 3-4	401	17-dic.-16	18:00:37	0.8	0.9	151	129
TR 3-5	400	17-dic.-16	17:41:46	1.1	1.2	118	137

Calibración de Temperatura

Simultáneamente a los ajustes realizados para la calibración del MIKE 3 (HD), se utilizó el módulo MIKE 3 (AD) que simula la difusión y dispersión de la temperatura y la salinidad. Para calibrar estas variables se realizaron corridas del MIKE 3 (HD+AD) en busca de un ajuste satisfactorio. Algunos resultados característicos se muestran a continuación.

La figura siguiente muestra la comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 (HD+AD) cerca del fondo en las estaciones Mar y Estuario 2. Puede verse que los valores medidos y los calculados por el MIKE 3 (HD+AD) 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.

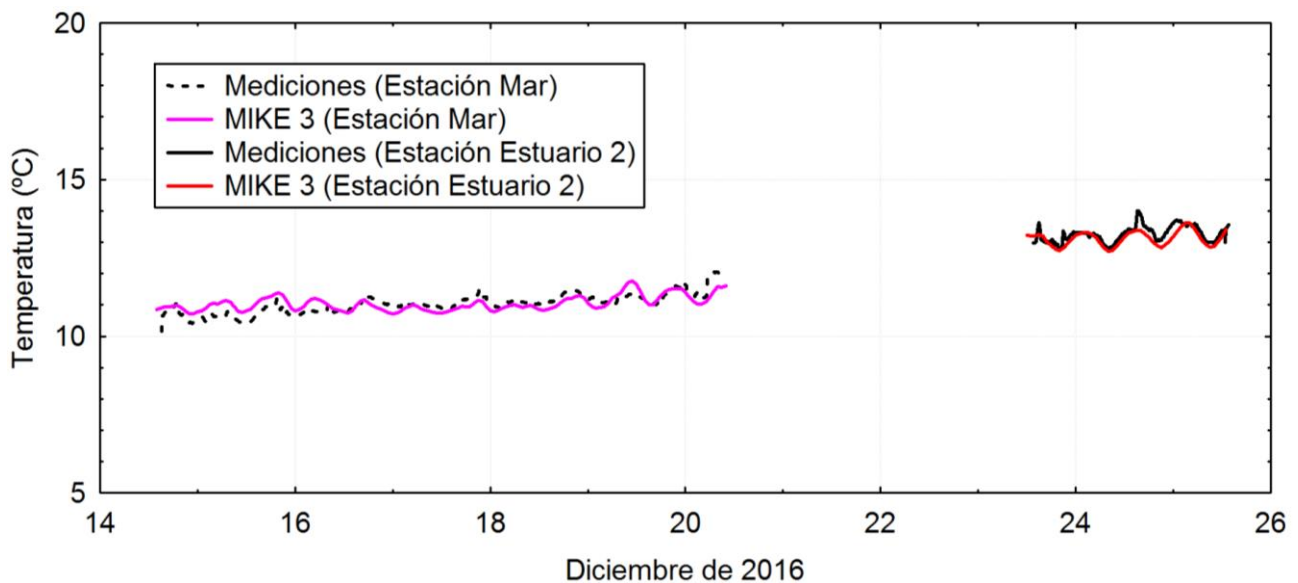


Figura 2-17. Comparación entre las temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 (HD+AD) en las estaciones Mar y Estuario

Las figuras siguientes muestran ejemplos de la comparación entre los perfiles verticales de temperaturas medidos en las estaciones y calculados con MIKE 3 (HD+AD). 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.

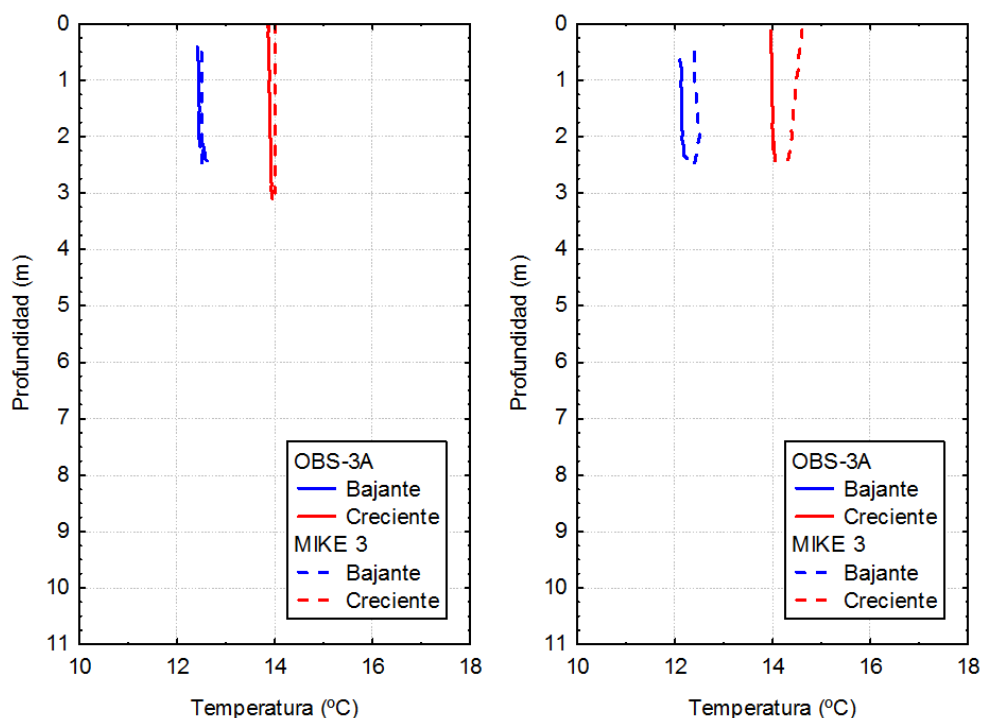


Figura 2-18. Ejemplo de comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 (HD+AD) en las estaciones 01 y 02.

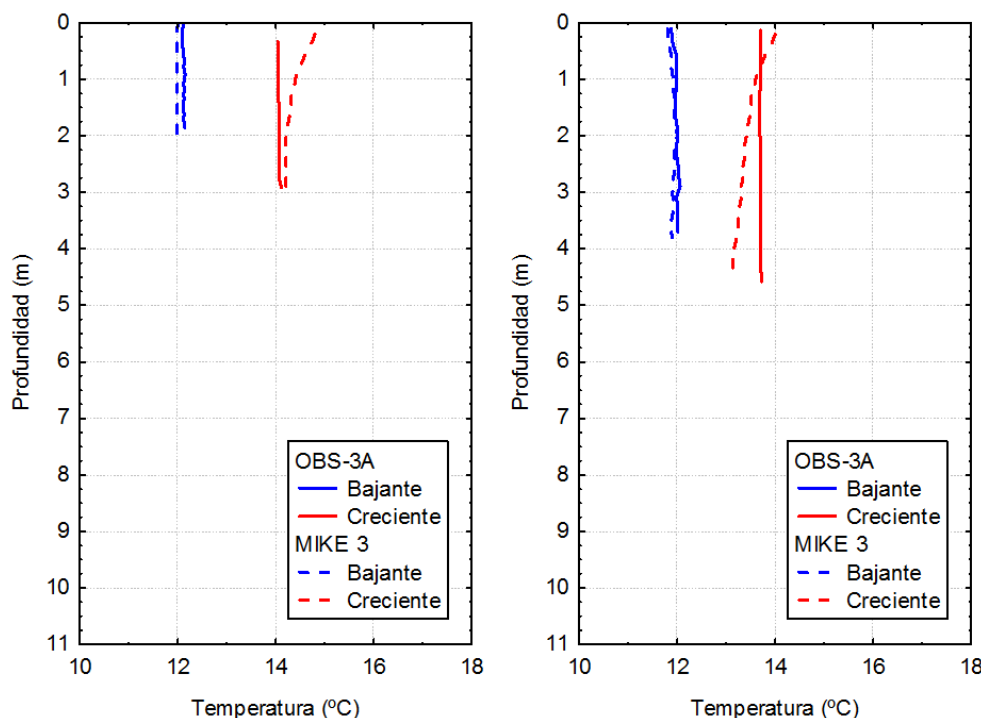


Figura 2-19. Ejemplo de comparación entre los perfiles de temperaturas medidas y calculadas con MIKE 3 (HD+AD) en las estaciones 03 y 04.

En vista de los resultados de la comparación de temperaturas medidas y calculadas por el modelo, se considera calibrado el MIKE 3 (HD+AD) para el estuario.

La figura siguiente muestra dos ciclos de marea de unas 12 horas de período y 7 puntos seleccionados que representan 7 condiciones 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.

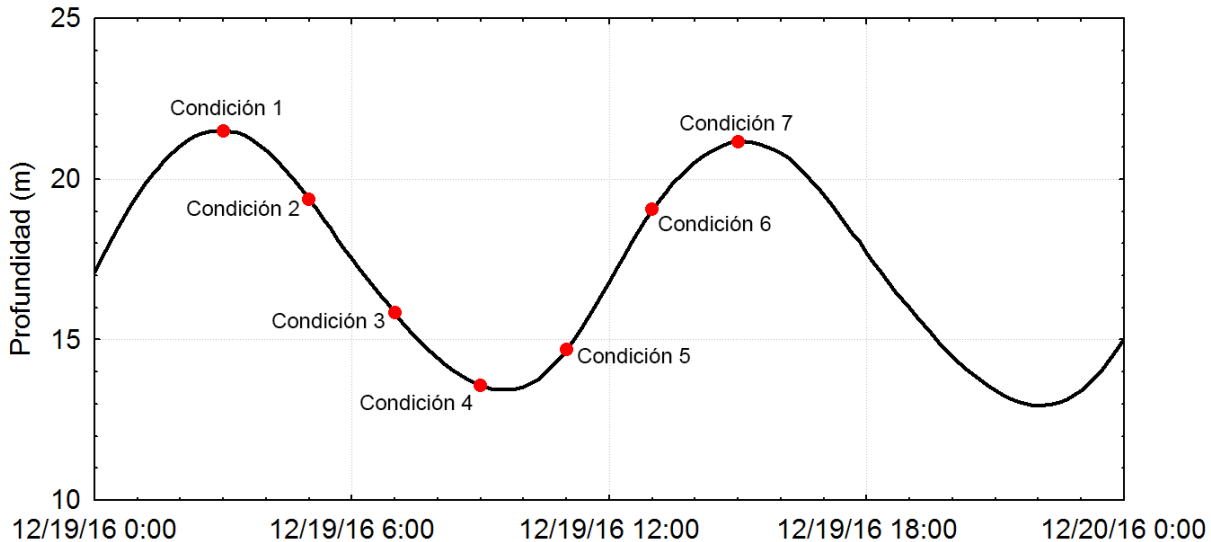


Figura 2-20. Ciclo de marea de unas 12 horas de período y 7 condiciones de la marea en la posición de la Estación Mar (en la boca del estuario).

La figura siguiente muestra la temperatura ambiente registrada por la Estación Meteorológica para el día 19 de diciembre de 2016. Se identifican, también las 7 condiciones de marea.

Con estos elementos, se analizarán las distribuciones de temperatura y salinidad asociadas a un ciclo de marea.

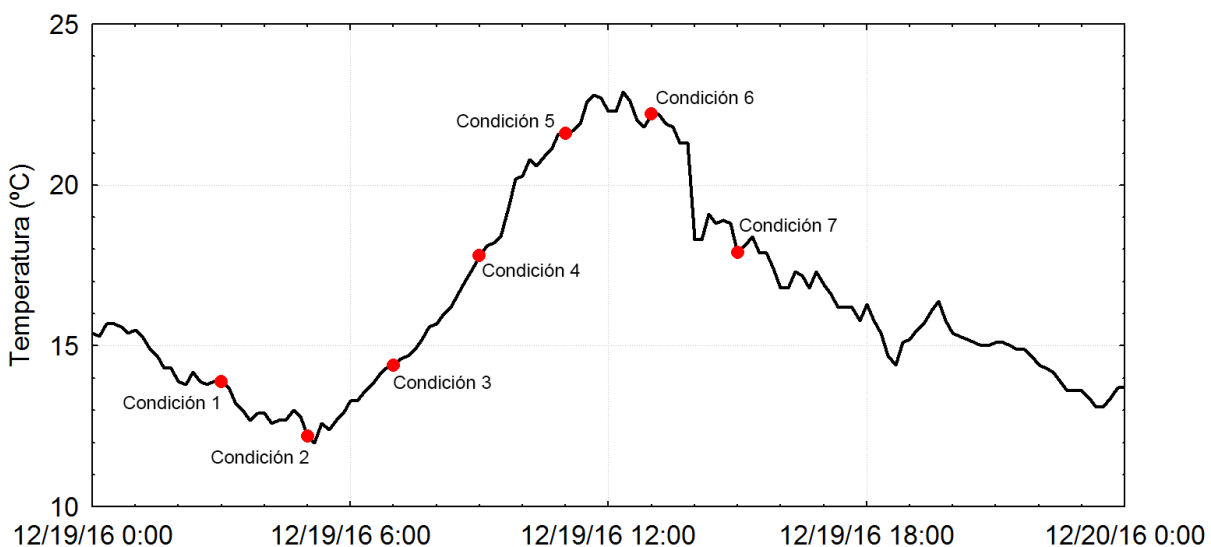


Figura 2-21. Temperatura ambiente registrada por la Estación Meteorológica para el día 19 de diciembre de 2016. Se identifican los instantes de las 7 condiciones de la Figura 2-20.

Las mediciones utilizadas para la calibración del modelo indican que para esta época la temperatura de los Ríos Santa Cruz y Chico es superior a la observada en el mar.

En el estuario ocurre la mezcla de aguas y en toda la región debe considerarse el efecto de la variación de temperatura impuesta por el intercambio de calor entre el agua y la atmósfera. Los campos de temperatura variables en tiempo y espacio han sido reproducidos por el modelo. En las figuras siguientes se presentan ejemplos de los campos de temperatura y velocidades de la capa cercana al fondo del mar para diferentes condiciones de marea y temperatura ambiente, presentados en el Informe de Avance.

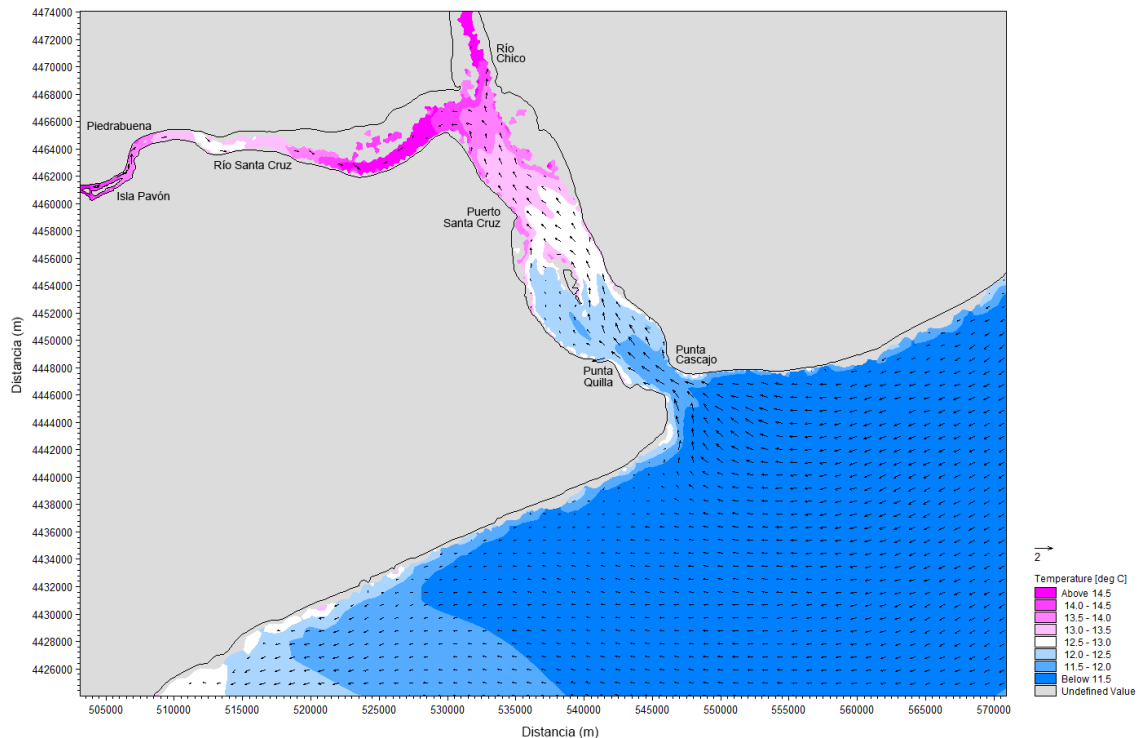


Figura 2-22. Campo de temperatura y corrientes para la Condición 1 de marea

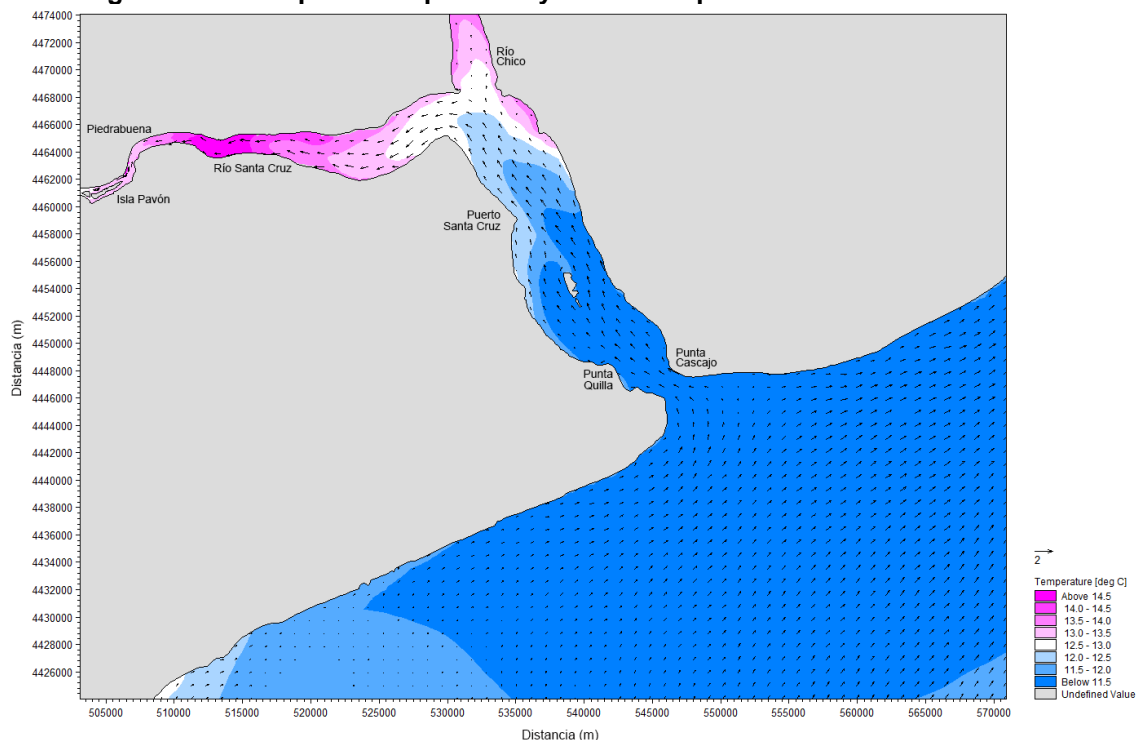


Figura 2-23. Campo de temperatura y corrientes para la Condición 5 de marea

Se presentaron en el Informe de Avance las características del campo de temperaturas a las 5 capas que utiliza el modelo para la Condición 6 (1 PM del día 19 de diciembre de 2016). Las temperaturas aumentan a medida que las capas son más superficiales, encontrándose los máximos de temperatura en superficie. Para la condición 6 la temperatura ambiente ha trepado desde las 5 AM a 1 PM 10°C (desde 12°C a 22°C). 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.

Calibración de Salinidad

La figura siguiente muestra la comparación de la salinidad medida y la calculada por el modelo MIKE 3 (HD+AD) 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 (HD+AD), tanto para la Estación Mar (boca de la ría) y la Estación Estuario 2 (interior de la ría).

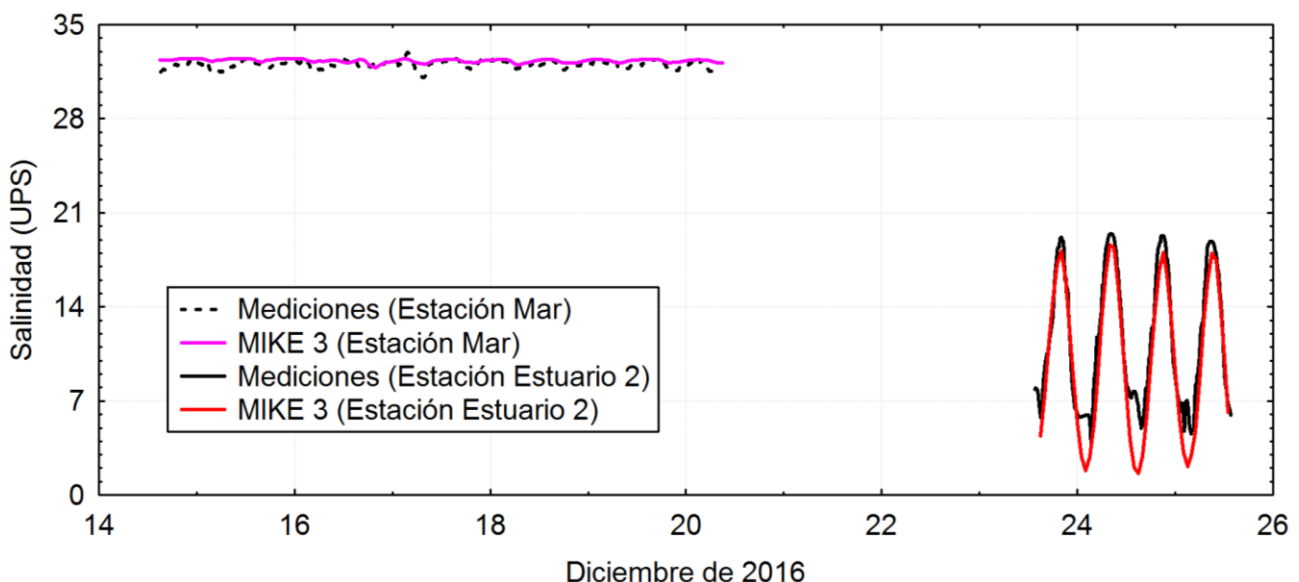


Figura 2-24. Comparación de la salinidad medida y la calculada por el modelo MIKE 3 (HD+AD) en los puntos de las estaciones de medición Estuario 2 y Mar

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

La correlación entre los valores medidos y los calculados por el modelo es muy buena para la Estación 08, tanto en bajante como en creciente.

Para el caso de la Estación 09 la correlación es satisfactoria, con una correcta estimación del rango de salinidades en el punto de medición. Más en detalle, 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. En creciente el modelo sobrestima la salinidad en superficie y representa bien la salinidad en el fondo. Debe tenerse en cuenta que estas comparaciones entre perfiles instantáneos (se tarda 1 min en perfilar toda la columna de agua) requiere de una gran precisión en el tiempo del modelo para extraer exactamente el perfil que corresponda al instante exacto que se hizo la modelación.

Para el caso de la Estación 10 la correlación es satisfactoria tanto en creciente como en bajante.

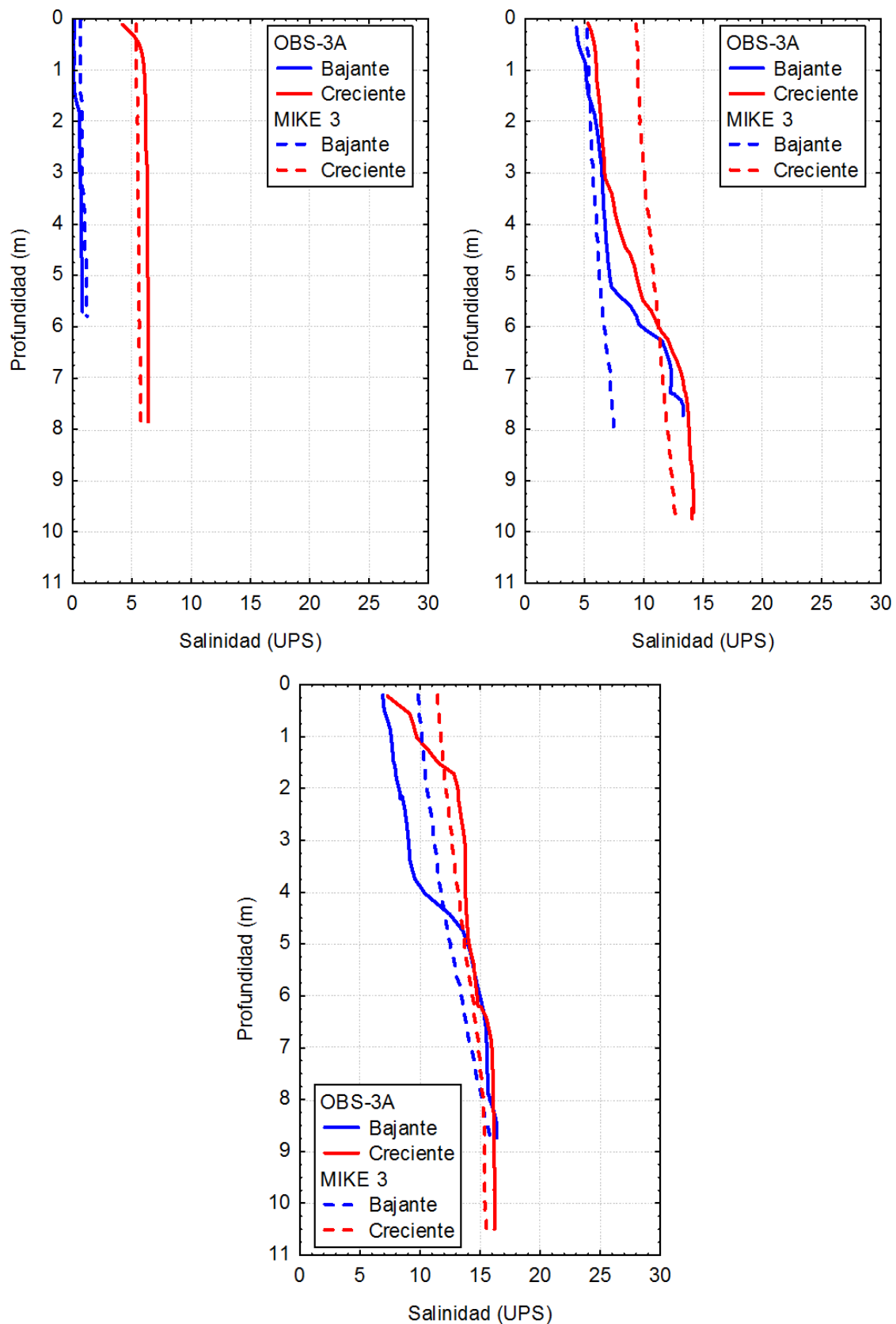


Figura 2-25. Comparación en las mediciones de perfiles de salinidad y los generados por el modelo MIKE 3 (HD) en los puntos P8 (izquierda), P9 (derecha) y P10 (abajo).

Con respecto a la baja salinidad registrada en 23/12 en los puntos P1 a P7, si bien ESSA midió en creciente, la velocidad utilizada por la embarcación fue mayor que la velocidad de propagación de la marea, produciendo un efecto “como si la salinidad persiguiera al instrumento, pero no lo alcanza”. La figura siguiente muestra la posición de los puntos de referencia para el análisis que se agrega a continuación.

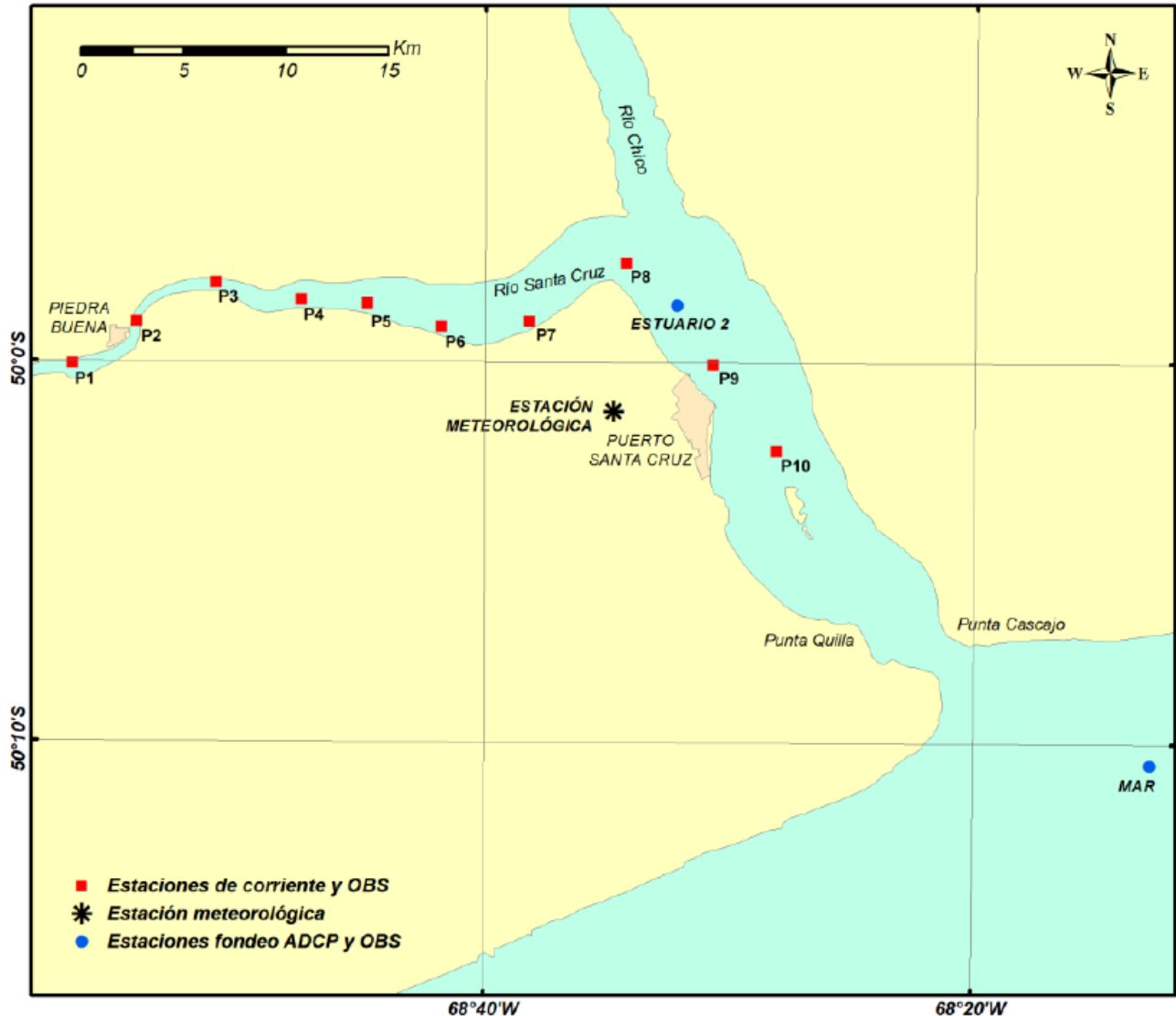


Figura 2-26. Ubicación de las estaciones de medición

Nota: Las coordenadas de P1 son E503683 N4461252 UTM 19S (WGS84). Se encuentra a casi 500 metros aguas arriba de la Toma de Agua de Piedrabuena.

Dado que durante el período utilizado para la calibración del modelo, la salinidad es prácticamente nula en los puntos P1, P2 y P3 (ver Tabla siguiente), en las figuras siguientes se muestran a continuación series de tiempo de salinidad sólo en los puntos P4 a P10.

Se puede apreciar que durante las mediciones en los puntos P4 a P7 la salinidad que calcula el modelo es nula tanto en la bajante como en la creciente, de la misma manera que en las mediciones. Sólo se observa salinidad diferente de cero en los puntos P8, P9 y P10, también al igual que en las mediciones.

Tabla 2-5. Salinidad generada por el modelo en los Puntos P1 a P10, utilizando un caudal del Río Santa Cruz de 570 m³/s. Estadísticas básicas para el período de modelación 12 a 25 de diciembre de 2016.

Punto	Salinidad (UPS)			
	Valor medio	Mínimo	Máximo	Desvío Estándar
P1	0.0	0.0	0.0	0.0
P2	0.0	0.0	0.0	0.0
P3	0.0	0.0	0.1	0.0
P4	0.2	0.0	3.4	0.6
P5	0.9	0.0	9.0	1.9
P6	2.4	0.0	14.3	3.8
P7	5.2	0.0	20.3	6.3
P8	9.4	0.0	25.0	7.7
P9	16.5	3.3	30.3	8.1
P10	21.6	7.6	31.7	6.8

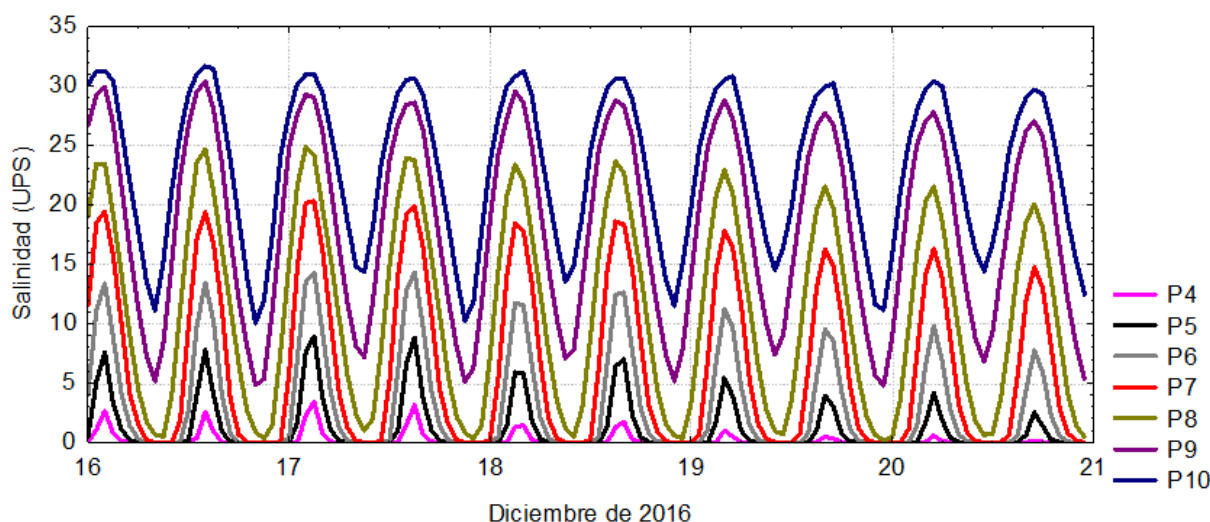


Figura 2-27. Resultados del modelo MIKE 3 (HD). Salinidad cercana al fondo en los puntos P4 a P10, para el período 16 a 20 de diciembre de 2016.

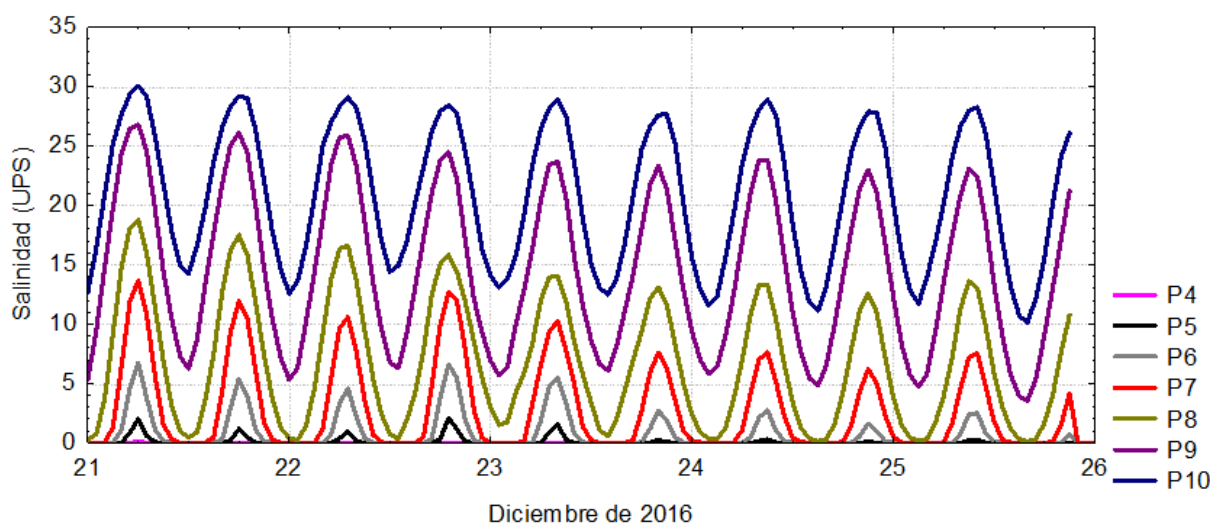


Figura 2-28. Resultados del modelo MIKE 3 (HD). Salinidad cercana al fondo en los puntos P4 a P10, para el período 21 a 25 de diciembre de 2016.

Puede apreciarse que:

- La salinidad en los puntos P4 a P10 es mayor cuando el agua ingresa al Río Santa Cruz durante con la pleamar.
- La salinidad dentro del Río Santa Cruz es mayor cuando la amplitud de marea es mayor. Por ejemplo para sicigias la salinidad en el punto P4 alcanza unos 4 UPS y en cuadratura es nula. Durante las simulaciones la amplitud de marea fue cambiando como muestra la Tabla 6.6.2

Para una mayor clarificación, se presenta la figura siguiente que vincula el momento de medición con los resultados de la modelación.

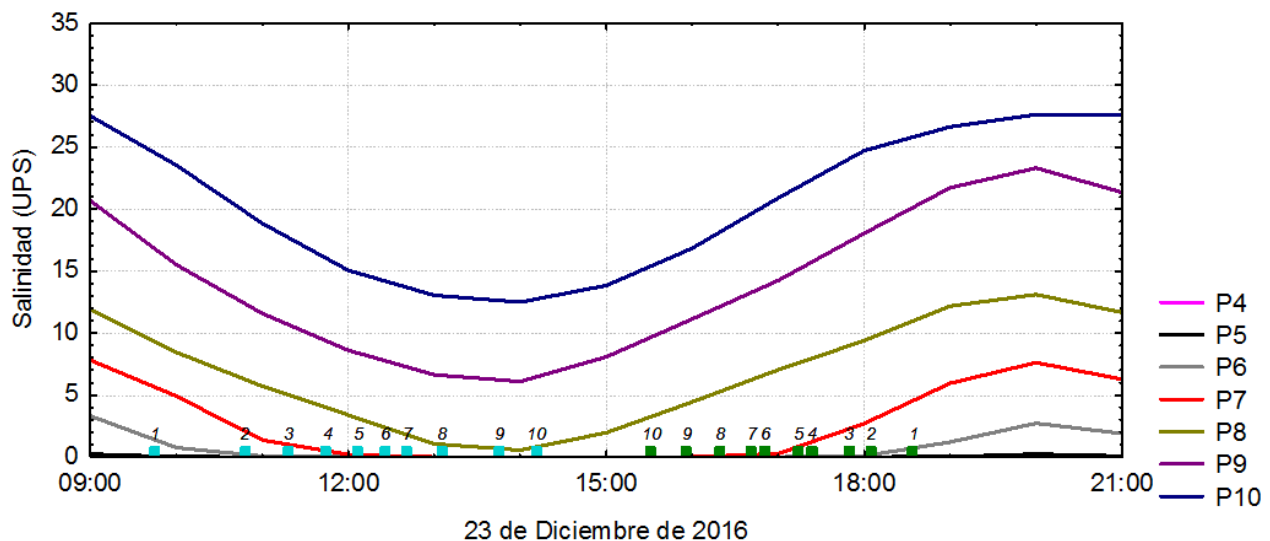


Figura 2-29. Resultados del modelo MIKE 3 (HD). Salinidad cercana al fondo en los puntos P4 a P10, para el 23 de diciembre de 2016. Los cuadrados celestes identifican el momento de las mediciones que se realizaron durante la bajante y los cuadrados verdes durante la creciente. Los números de 1 a 10 se corresponden con los puntos P1 a P10.

Se puede apreciar que durante las mediciones en los puntos P4 a P7 la salinidad que calcula el modelo es nula tanto en la bajante como en la creciente, de la misma manera que en las mediciones. Sólo se observa salinidad diferente de cero en los puntos P8, P9 y P10, también al igual que en las mediciones.

Por otro lado, con el objeto de establecer los valores de salinidad en puntos de referencia con un caudal mayor al establecido para la calibración ($570 \text{ m}^3/\text{s}$), se seleccionó un caudal de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ y se hizo una corrida del MIKE 3.¹

De esta nueva corrida se extrajo la salinidad calculada por el modelo en los puntos P1 a P10, a las mismas profundidades que en el caso correspondiente al caudal de $570 \text{ m}^3/\text{s}$. Se calcularon valores medios, mínimos y máximos de la serie de tiempo para cada punto.

La salinidad asociada al caudal mayor resultó algo menor en todos los puntos. A modo de ejemplo, en el punto P7 la salinidad es en promedio 1.1 UPS menor que para la caso de caudal mayor. Las diferencias son poco significativas.

En vista de estos resultados de la comparación de salinidades medidas y calculadas por el modelo, se considera calibrado el MIKE 3 (HD+AD) para el estuario, desde el punto de vista de la temperatura y salinidad.

¹ El mayor valor es consistente con el orden de magnitud del caudal en la Estación Charles Furh, para el entorno de la fecha de aforo realizado en la ex Ruta 3.

Salinidad y corrientes para distintas condiciones de marea

Los campos de salinidad variables en el tiempo han sido reproducidos por el modelo para diferentes condiciones de marea y viento. En las figuras siguientes se presentan campos de salinidad y velocidades de la capa cercana al fondo del mar para las condiciones de marea más extremas de pleamar y bajamar, calculados por el MIKE 3 (HD+AD).

De estas 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. En creciente el agua salada en 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.

Se presentan a continuación dos campos de salinidad y corrientes, para las condiciones 4 y 7 de marea. La condición 4 es casi de bajamar (el agua aún se está retirando). La salinidad tiene valores entre 4 UPS y 28 UPS, aproximadamente. La condición 7 es cercana a la pleamar. El agua está aún entrando al estuario y la salinidad tiene valores entre 20 UPS y 32 UPS, aproximadamente

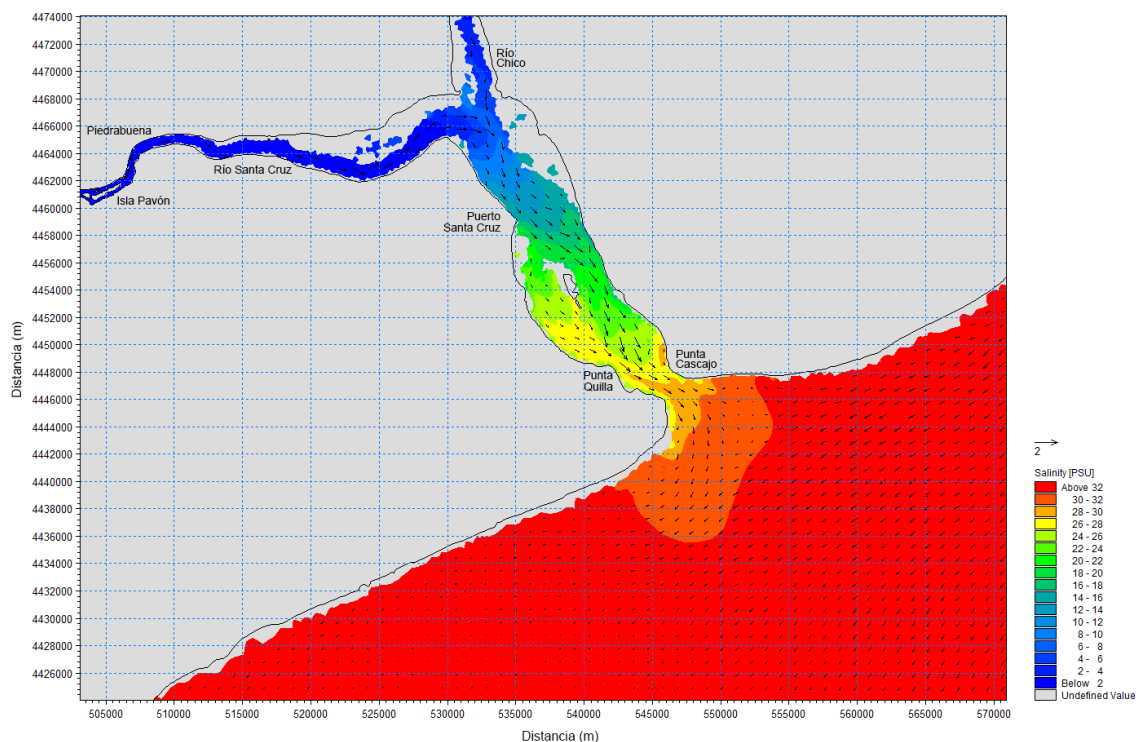


Figura 2-30. Campo de salinidad y corrientes para la Condición 4 de marea

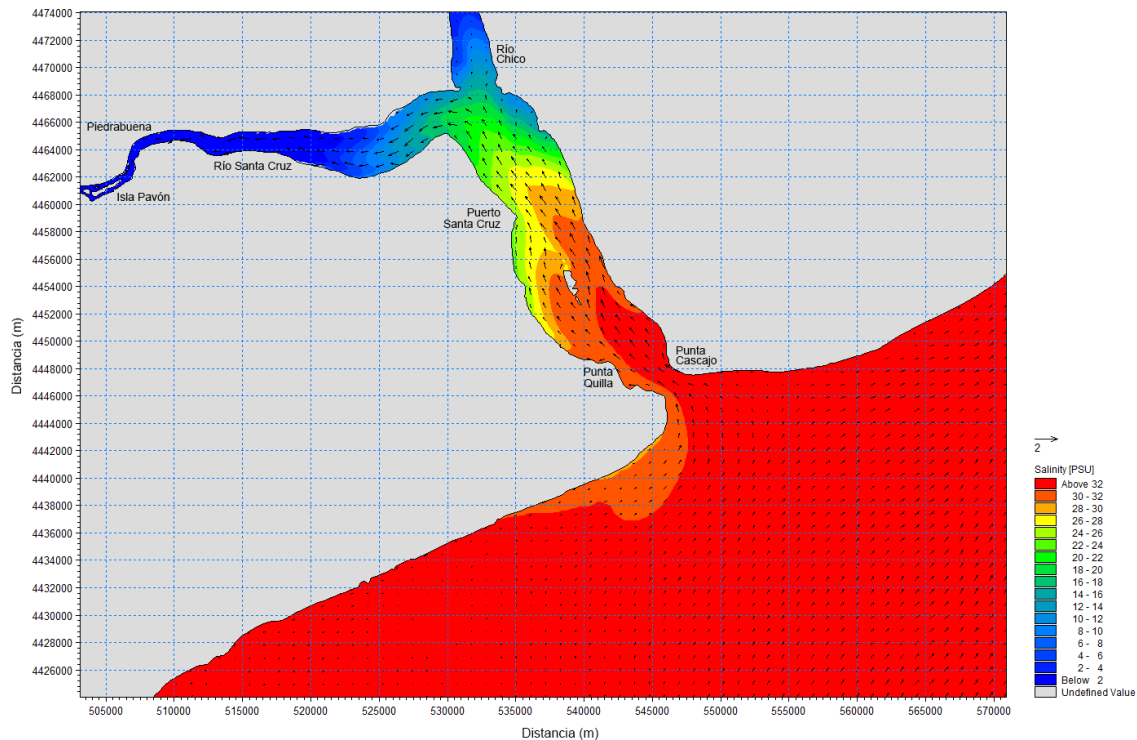


Figura 2-31. Campo de salinidad y corrientes para la Condición 4 de marea

Para ilustrar la distribución de la salinidad en la vertical, se han presentado figuras para la Condición 6 (condiciones de creciente, el agua sigue entrando), las que incluyen los campos de velocidades en las 5 capas de cálculo que utiliza el modelo además de la salinidad.

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, la salinidad en el estuario aumenta a medida que las capas son más profundas, encontrándose los máximos cercanos al fondo. 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).

Corte longitudinal de salinidad

Para ilustrar la estructura vertical de la salinidad se presentan a continuación figuras que muestran la salinidad para 7 condiciones de marea a lo largo de una línea arbitraria longitudinal del estuario.

Los diferentes estados de la marea muestran variaciones importantes de la salinidad en el espacio y tiempo. Esta línea arbitraria 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. Estas figuras también ilustran sobre las variaciones de los niveles del mar sobre el eje y las pendientes de la superficie del mar. El punto inicial del eje x correspondiente a IP1 se encuentra a aproximadamente 11 km de la toma de agua de Piedrabuena, entre los puntos P3 y P4 correspondientes a los sitios de medición de salinidad.

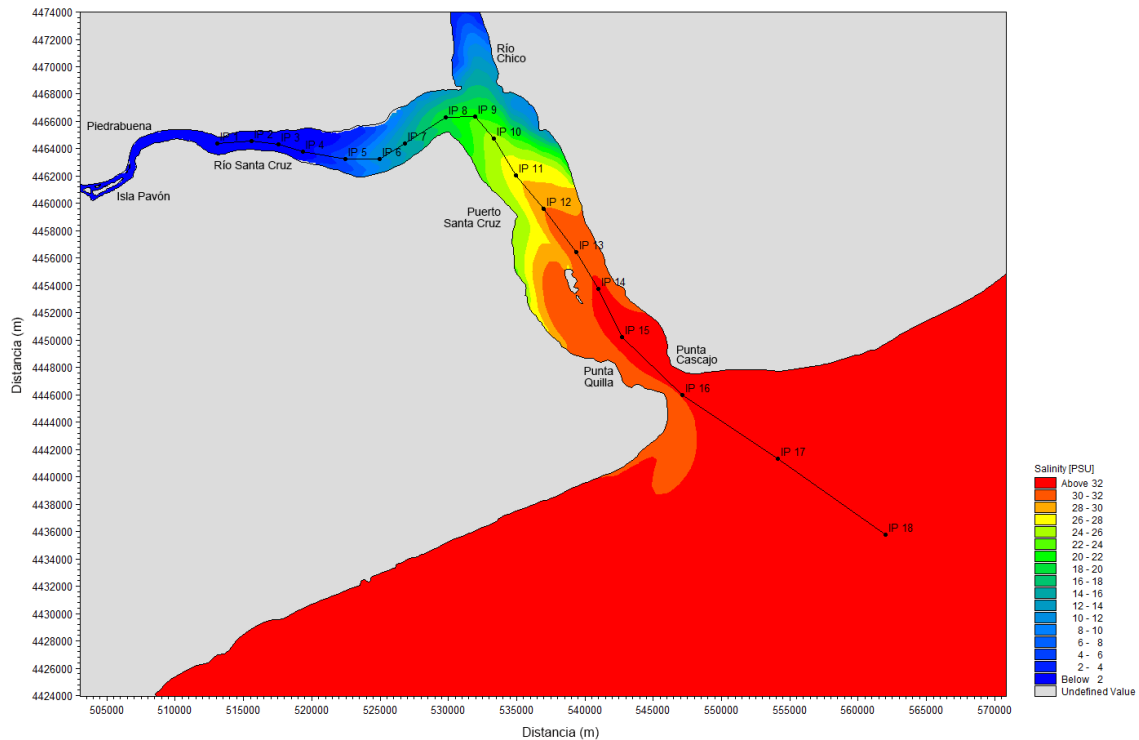


Figura 2-32. Eje del corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes condiciones de marea

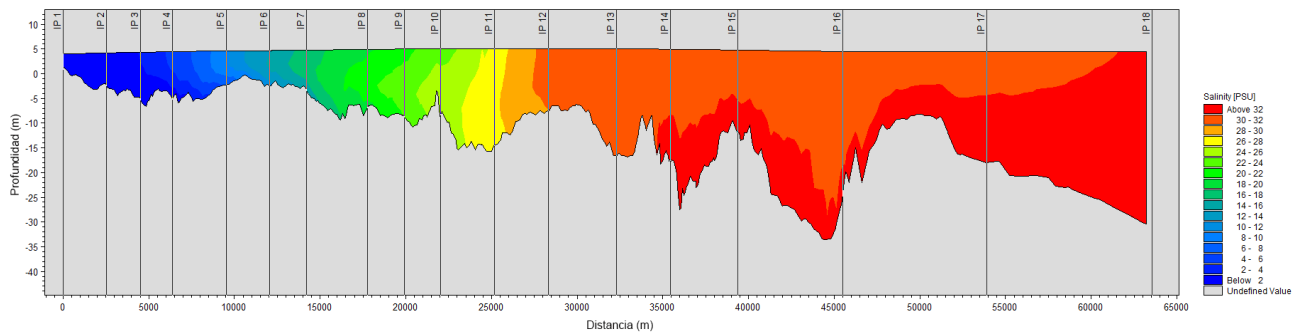


Figura 2-33. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 1 de marea.

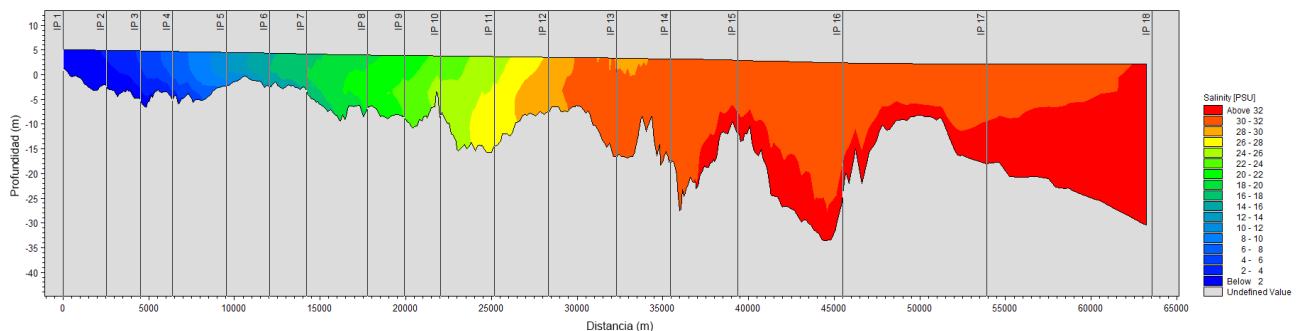


Figura 2-34. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 2 de marea.

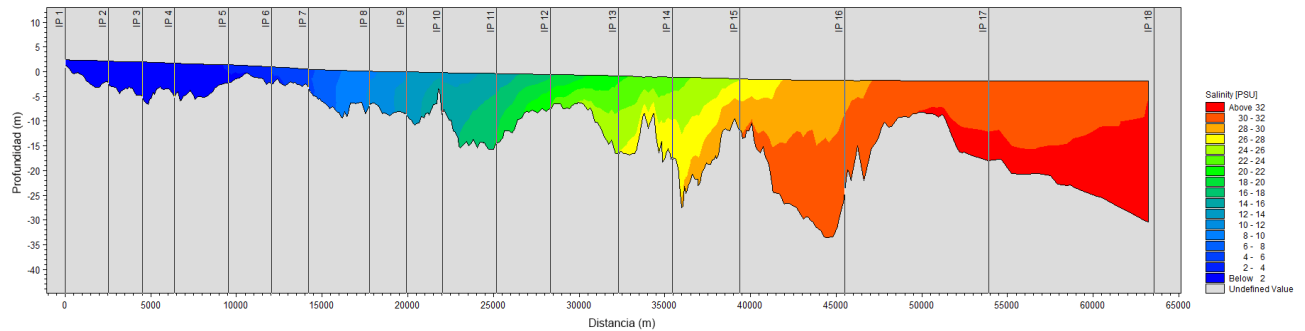


Figura 2-35. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 3 de marea.

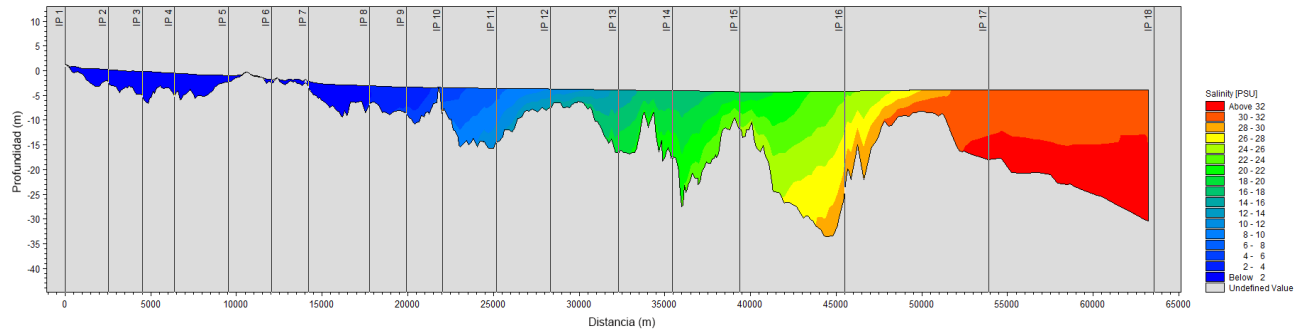


Figura 2-36. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 4 de marea.

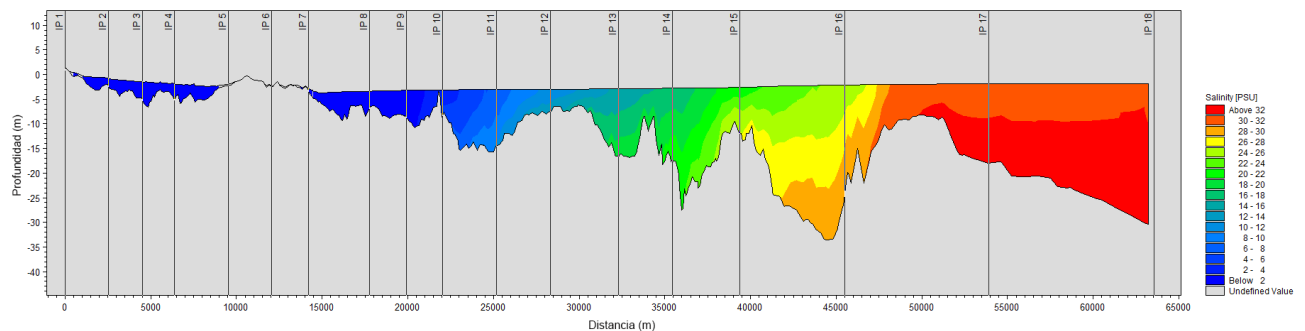


Figura 2-37. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 5 de marea.

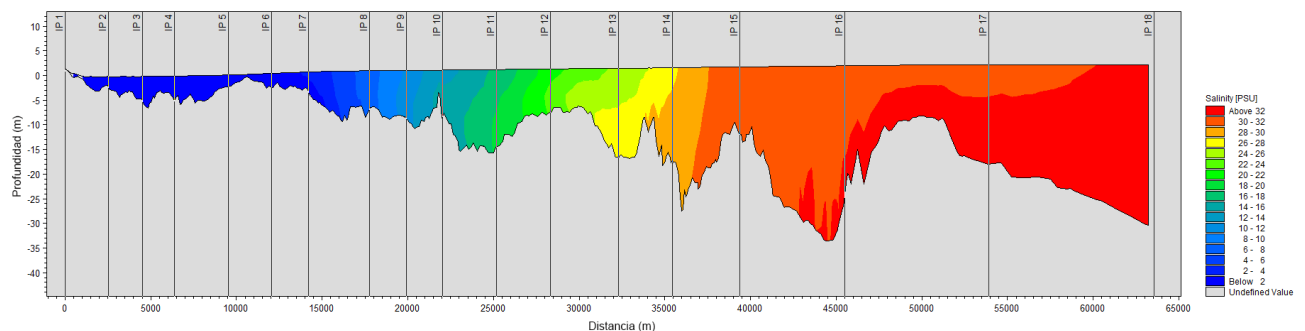


Figura 2-38. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 6 de marea.

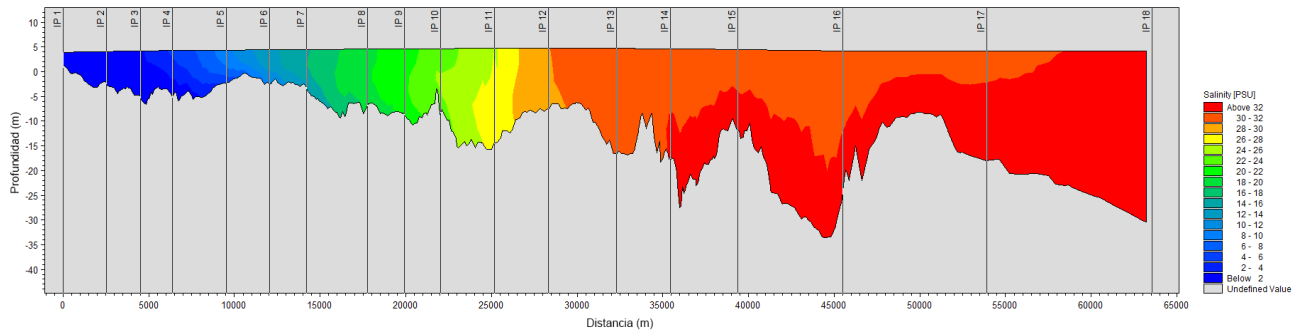


Figura 2-39. Corte vertical del campo de salinidad y distribuciones para las siguientes Condición 7 de marea.

Estimación de la renovación del agua del estuario con la marea

Se ha realizado una estimación de la fracción de agua que se renueva diariamente en el estuario, a partir de algunas simplificaciones. El volumen de agua que tiene el estuario al NMM, alcanza unos 1.12 km³ (1120 millones de metros cúbicos). 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.

Tabla 2-6. Estimación del volumen de agua que ingresa al estuario entre la BM y la PM (prisma tidal) 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	1.13
Marea de cuadratura (menor amplitud)	6	0.85

Salinidad, temperatura y corrientes en la Estación 10 a distintas profundidades.

En el Informe de Avance se presentan series de tiempo de nivel del mar, temperatura, salinidad y componentes este-oeste y norte-sur de las velocidades calculadas por el modelo para un punto de posición que coincide con la Estación 10, a diferentes profundidades. Las series muestran estar dominadas por las mareas para todas las variables. Esto es, mayor amplitud en los ciclos de las variables coincide con la mayor amplitud en la marea.

Comparación entre los campos de temperatura, salinidad, corrientes y niveles del mar para los caudales mínimos, máximos y medios del mes de junio

Este análisis es sumamente importante puesto que permite evaluar las condiciones hidrodinámicas y, salinidad y temperatura, a partir de escenarios con caudales mínimos, medios y máximos.

Por esta razón, se reproducen todos los resultados presentados en el Informe de Avance, que resultan de gran interés para la presente actualización del EIA.

Se han seleccionado 3 escenarios de junio asociados a aspectos de interés ambiental (plena invernada del Maca Tobiano), con los caudales del río que se muestra en la tabla siguiente (ver Figura 2-11.).

Tabla 2-7. Caudales del río para el mes de junio asociados a los escenarios de interés ambiental (Subsecretaría de Recursos Hídricos (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>))

Caudal medio histórico para junio (años 1955 – 2003)	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

Las simulaciones (para el mes de junio) tienen las siguientes características:

- Marea y viento variables ambos de modelos globales validados por la calibración.
- Respecto de la temperatura del Río Santa Cruz, el informe (Serman & asociados, 2015b para Represas Patagonia) indica que *“En relación al río Santa Cruz, como parte de la campaña de verano se registraron temperaturas de 12°, mientras que en el invierno la temperatura registrada fue de entre 4 y 3° (siendo el valor más bajo de 2,8°C el cual se registró en el Punto 7), para caudales altos y bajos respectivamente, advirtiéndose una relación directa entre temperatura del agua y caudal”*.
- Se ha seleccionado una temperatura constante en los dos ríos Santa Cruz y Chico de 4°C considerando a junio como primer mes del invierno y caudales relativamente altos para este período, ya que julio y agosto registran caudales inferiores.
- Temperatura del mar constante en los bordes del dominio de simulación de 7.5 °C en base a la interpolación conseguida de los datos de la WOD13.
- Temperatura ambiente de datos de la estación meteorológica de Puerto Santa Cruz, el promedio histórico de junio es de 1.7 °C.
- Salinidad de los ríos Santa Cruz y Chico nula en los borde del dominio de modelación.
- Salinidad del mar constante de 32.5 UPS en los bordes del dominio de simulación basada en los datos de WOD13.

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, para los 3 caudales seleccionados, cerca del fondo, se presentan en las tablas siguientes.

Tabla 2-8. Altura de la columna de agua (m) medida desde el fondo, en cada punto, expresada en términos de sus valores medios, mínimos y máximos. Mes representado: junio

Puntos	Q _{min} = 232 m ³ /s			Q _{med} = 691 m ³ /s			Q _{max} = 1002 m ³ /s		
	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo
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 Piedrabuena, el nivel medio del río aumenta a medida que aumenta el caudal del mismo. La diferencia entre niveles del río alcanza 1.1 m entre las simulaciones con caudal mínimo y máximo.
- Prácticamente, a partir del punto P8 el nivel de las aguas es controlado por las mareas sin influencia del caudal que se trate.

Tabla 2-9. Salinidad (UPS), en cada punto, expresada en términos de sus valores medios, mínimos y máximos. Mes representado: junio. Posición vertical del dato: 1 metro sobre el fondo.

Puntos	Q _{min} = 232 m ³ /s			Q _{med} = 691 m ³ /s			Q _{max} = 1002 m ³ /s		
	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo
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 2-10. Temperatura (°C) en cada punto, expresada en términos de sus valores medios, mínimos y máximos. Mes representado: junio.

Puntos	Q _{min} = 232 m ³ /s			Q _{med} = 691 m ³ /s			Q _{max} = 1002 m ³ /s		
	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo
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: 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 2-10.** 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. Las variaciones de temperaturas máximas observadas para las simulaciones con máximo y mínimo caudal son de 1°C.

Tabla 2-11. Velocidad (m/s) en cada punto, expresada en términos de sus valores medios, mínimos y máximos. Mes representado: junio

Puntos	Q _{min} = 232 m ³ /s			Q _{med} = 691 m ³ /s			Q _{max} = 1002 m ³ /s		
	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Máximo
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 hasta el punto P5. Desde allí hacia el mar, el módulo de la corriente se hace independiente del caudal y es dominado por las mareas.

Las figuras siguientes muestran cortes, a lo largo del río y ría, 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 2-32..

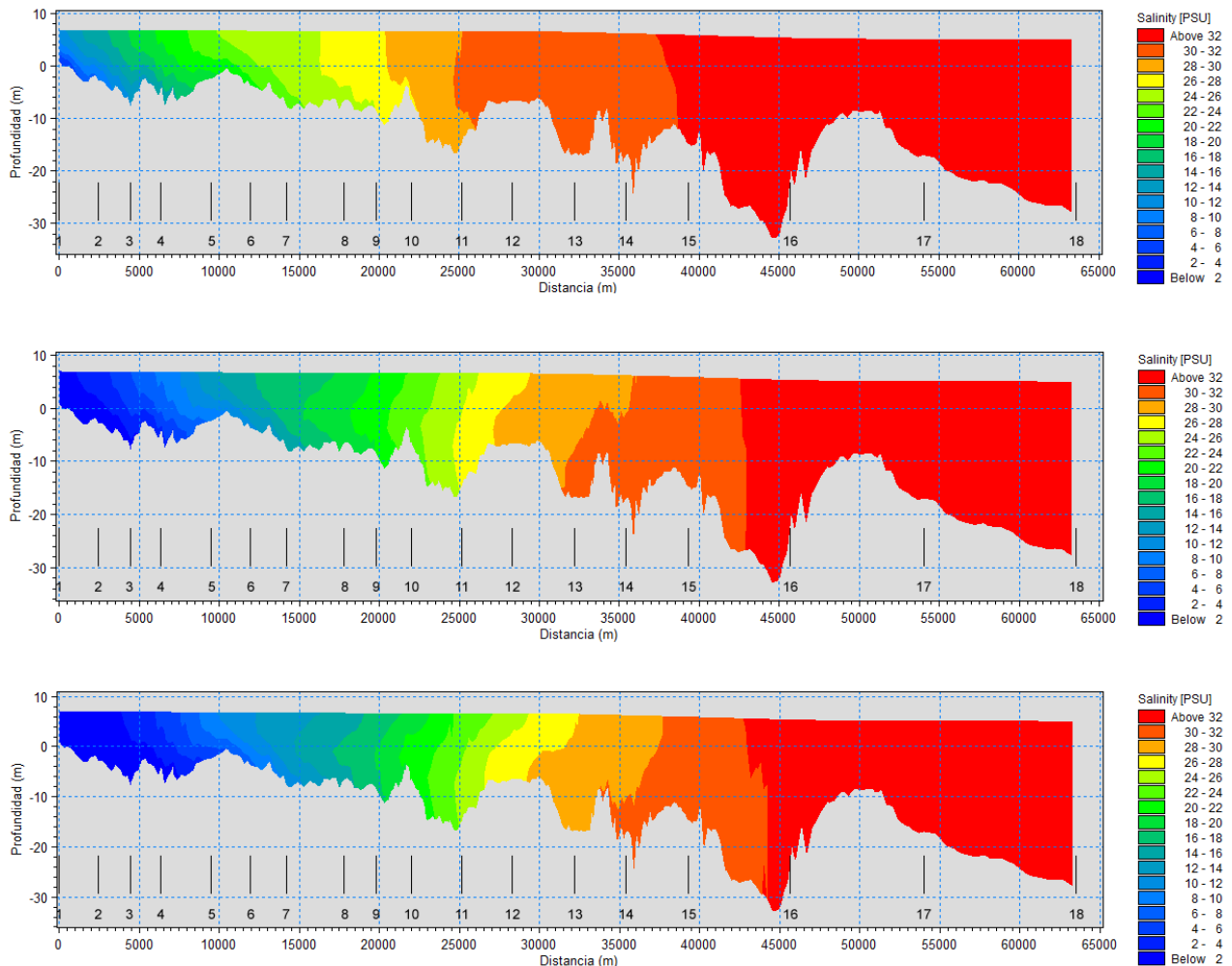


Figura 2-40. Cortes verticales de salinidad para el caudal $Q_{\min} = 232 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba), $Q_{\text{med}} = 691 \text{ m}^3/\text{s}$ (medio) y $Q_{\max} = 1002 \text{ m}^3/\text{s}$ (abajo) para la condición de pleamar.

- Como es de esperarse, a mayor caudal, menor presencia salina en el río y la ría. 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.
- En condiciones de caudal mínimo la salinidad alcanza a afectar la marca 1 (punto IP1), el cual se encuentra a unos 11 km aguas abajo de la toma de agua de Piedrabuena.
- Salinidades menores a 2 UPS solamente se encuentran para los caudales medio y máximo.

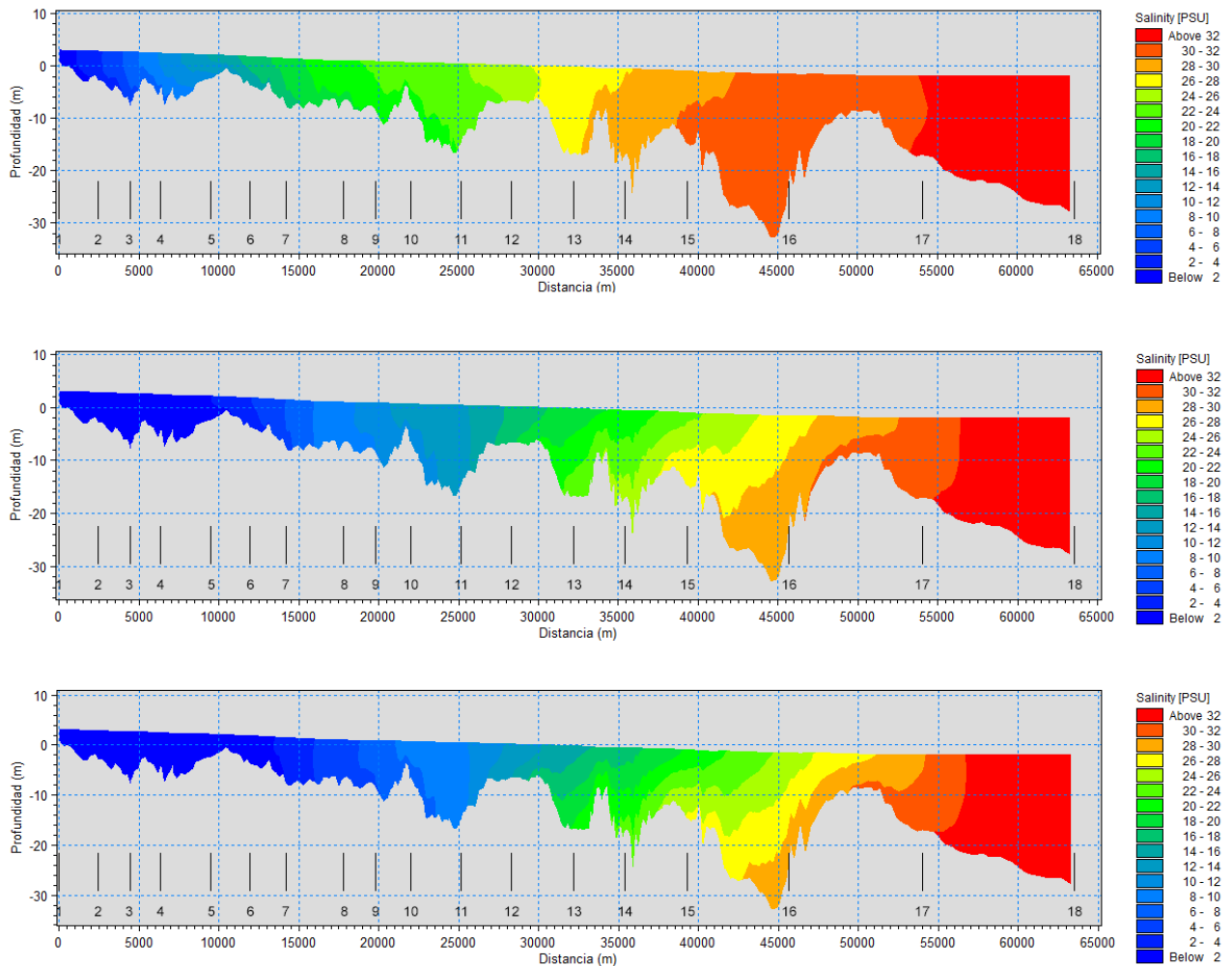


Figura 2-41. Cortes transversales de salinidad para el caudal $Q_{min} = 232 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba), $Q_{med} = 691 \text{ m}^3/\text{s}$ (medio) y $Q_{max} = 1002 \text{ m}^3/\text{s}$ (abajo) para la condición de bajante.

- En el caso de marea bajante, valores de salinidad entre 26 y 28 UPS (amarillo en las figuras) se encuentran entre las marcas 12 y 14 para el caso del mínimo caudal y entre las marcas 15, y 16-17 para el máximo caudal.
- Salinidades menores a 2 UPS solamente se encuentran para los todos los caudales.

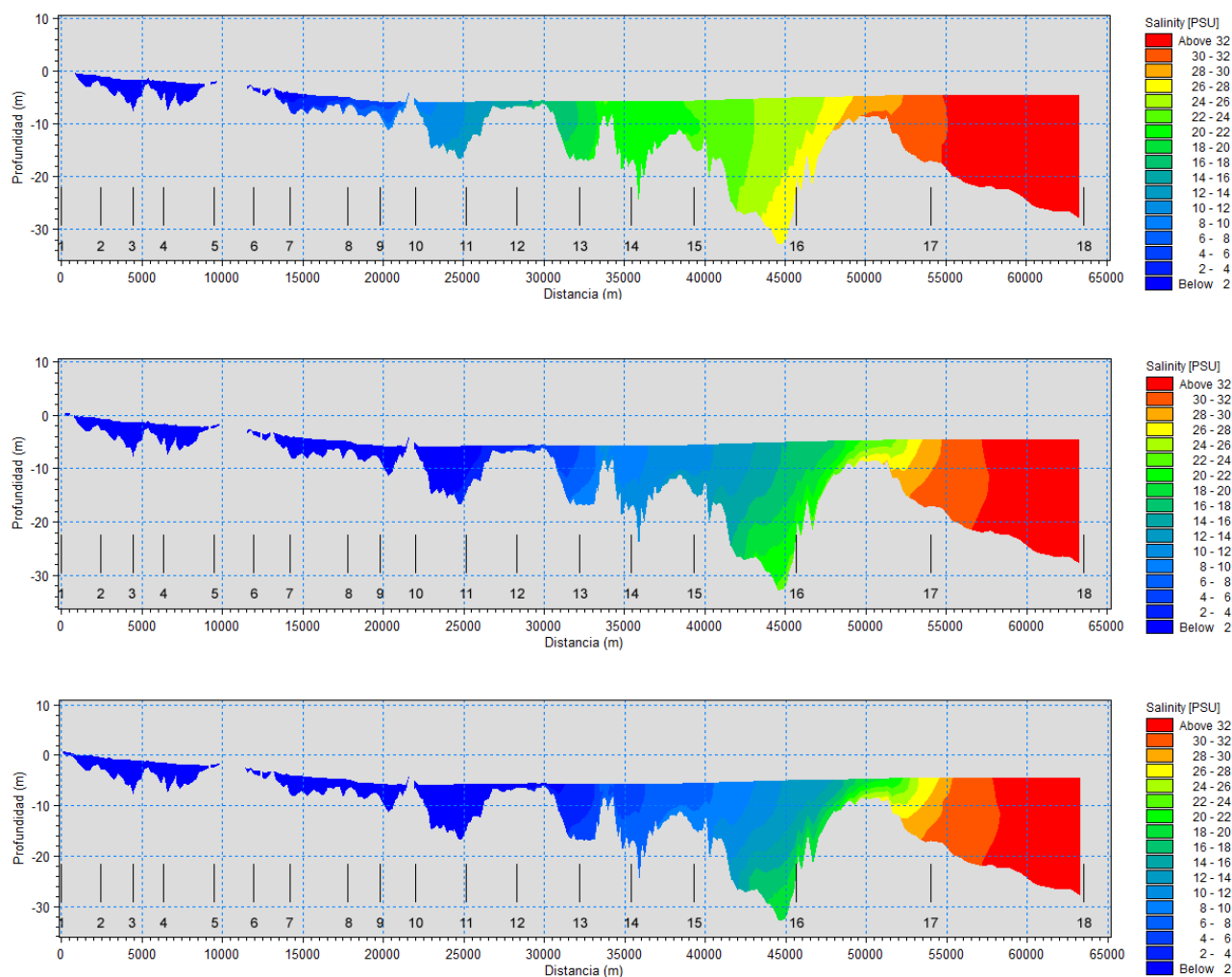


Figura 2-42. Cortes transversales de salinidad para el caudal $Q_{min} = 232 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba), $Q_{med} = 691 \text{ m}^3/\text{s}$ (medio) y $Q_{max} = 1002 \text{ m}^3/\text{s}$ (abajo) para la condición de bajamar.

- En el caso de bajamar, valores de salinidad entre 26 y 28 UPS (amarillo en las figuras) se encuentran entre las marcas 15 y 16-17 para el caso del mínimo caudal y 17 para el máximo caudal.
- Salinidades menores a 2 UPS solamente se encuentran para los todos los caudales.

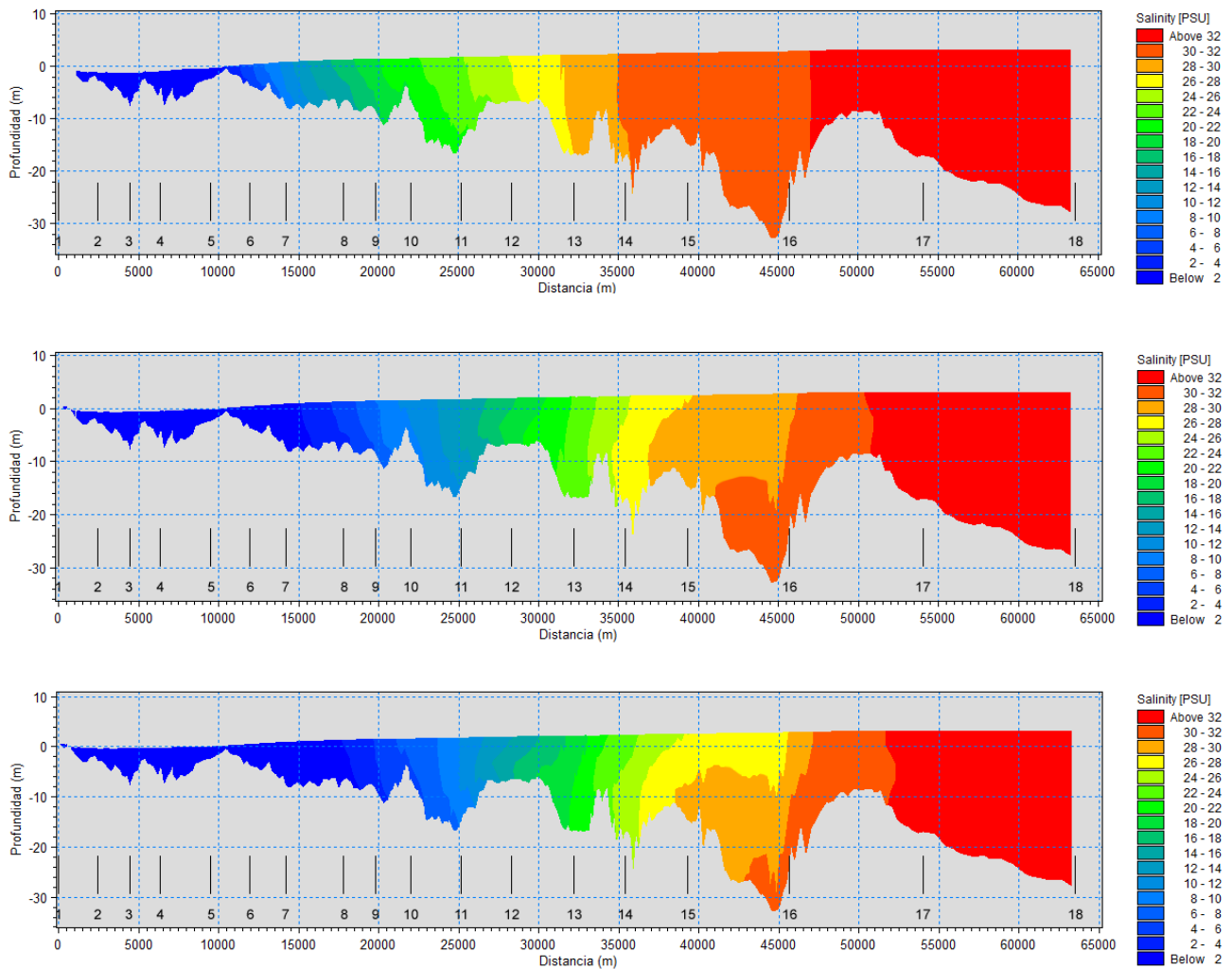


Figura 2-43. Cortes transversales de salinidad para el caudal $Q_{\min} = 232 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba), $Q_{\text{med}} = 691 \text{ m}^3/\text{s}$ (medio) y $Q_{\max} = 1002 \text{ m}^3/\text{s}$ (abajo) para la condición de creciente.

- En el caso de marea creciente, valores de salinidad entre 26 y 28 UPS (amarillo en las figuras) se encuentran entre las marcas 12 y 13 para el caso del mínimo caudal y entre las marcas 14 y 16 para el máximo caudal.
- Salinidades menores a 2 UPS solamente se encuentran para los todos los caudales.

Como consecuencia de estas simulaciones, puede verse que hay variaciones muy importantes de la salinidad en tan poco tiempo como un ciclo de marea (12.4h) durante el cual ocurren los estados de marea presentados: pleamar, bajante, bajamar y creciente. A modo de ilustración, valores entre 26 y 28 UPS, varían entre las marcas de referencia 7 y 8, y 17 durante un ciclo de marea, esto es en una distancia de unos 40 km. Lo mismo puede decirse de las zonas con valores de la salinidad menor a 2 UPS, que varían entre la marca 1 hasta la marca 13, algo más de 30 km.

Las figuras siguientes 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.

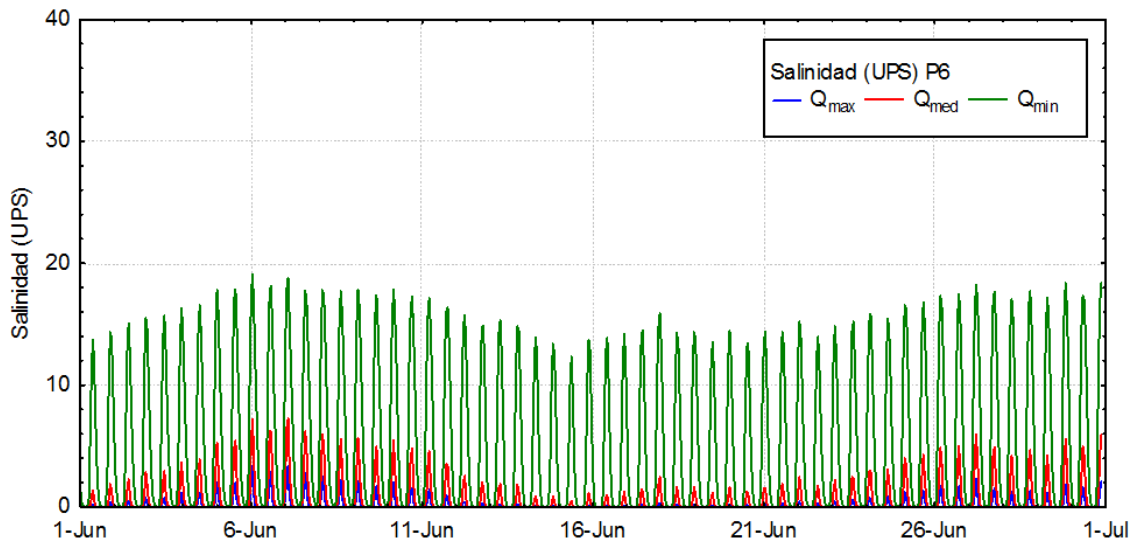


Figura 2-44. Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P6, a 1 m por sobre el fondo

Puede verse que la salinidad en este punto varía con la marea, tomando valores nulos con la bajante y es mayor cuando el caudal del Río Santa Cruz es menor.

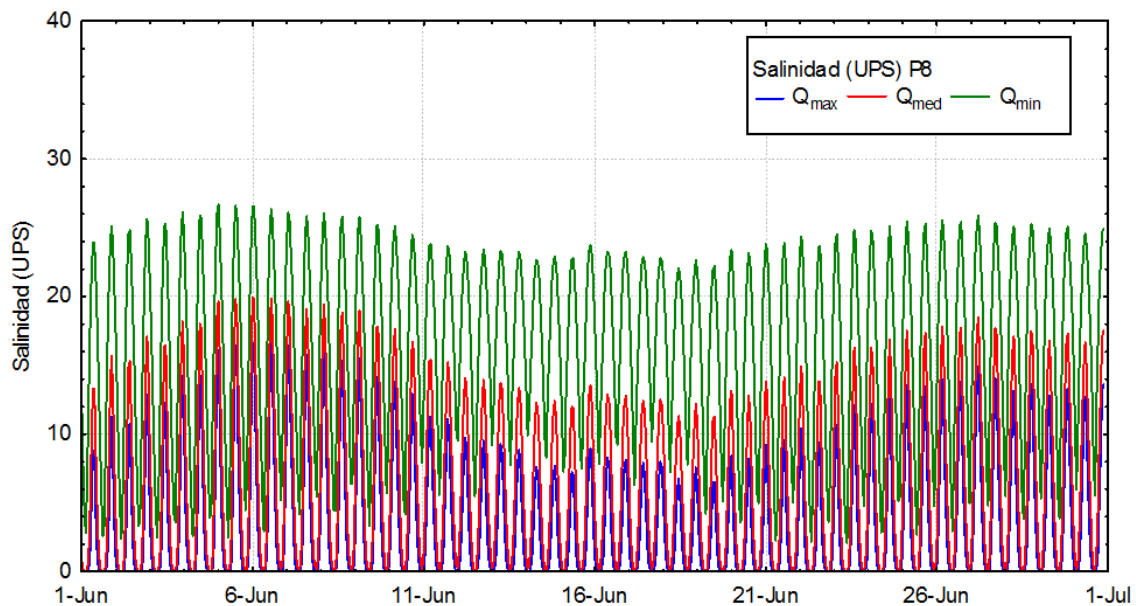


Figura 2-45. Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P8, a 1 m por sobre el fondo

En este caso, 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.

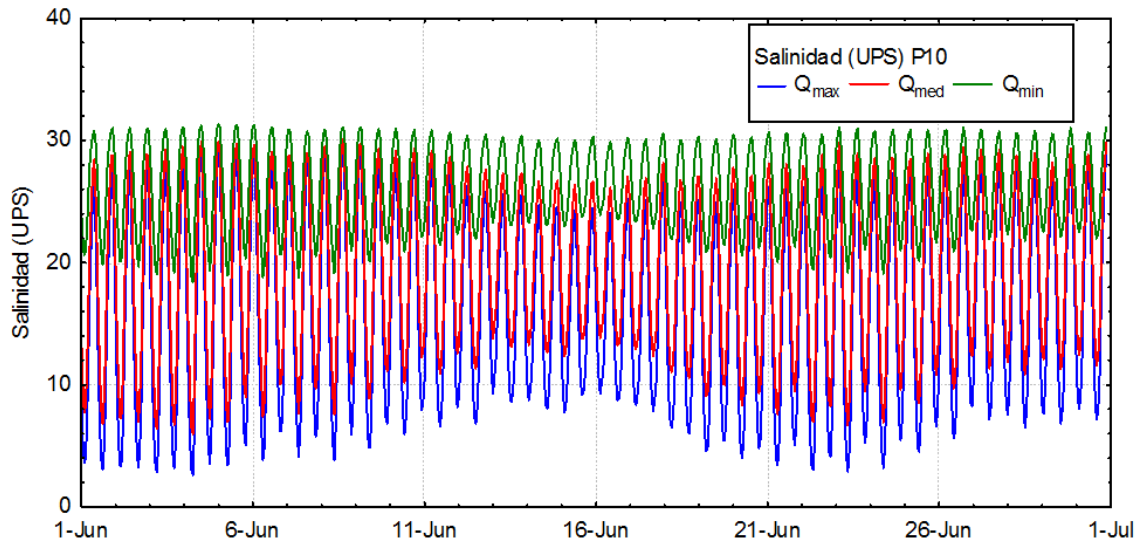


Figura 2-46. Series de tiempo (de 1 mes de duración) de la salinidad para los 3 caudales considerados, para el punto P10, a 1 m por sobre el fondo

Puede verse que la salinidad en este punto varía con la marea tomando valores mínimos (nunca nulos) con la bajante y es 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.

2.4 CONCLUSIONES

2.4.1 Informe de Campo

El estuario del Río Santa Cruz representó un desafío especial para conducir estas operaciones, por su dinámica muy intensa, caracterizada por corrientes de marea fuertes con valores máximos entre 4 y 7 nudos, vientos de alta variabilidad y muy fuertes, y grandes dificultades por las amplitudes de marea para navegar en sitios con bancos, y para lanzar y recuperar la lancha. El principal problema hallado fue el hecho que al recuperar los equipos fondeados en la Estación Estuario, todo el conjunto tenía graves evidencias de haber arrastrado sobre un fondo rocoso, y haberse deteriorado tanto el perfilador vertical de corrientes ADCP AWAC como el Turbidímetro y CTD OBS 3A, por lo que se decidió fondear nuevamente esa estación, para registrar adicionalmente cuatro ciclos adicionales de marea dentro del estuario. La cantidad y diversidad de datos registrados en esta campaña costera permiten concluir que los objetivos de la misma se cumplieron ampliamente.

2.4.2 Informe de Avance

Se ha realizado una modelación de niveles del mar, corrientes, temperatura, salinidad y turbidez en el Estuario del Río Santa Cruz para establecer la calibración del modelo MIKE 3 en base a mediciones. Los módulos utilizados del MIKE 3 son tres: hidrodinámico, difusión – dispersión y transporte de sedimentos.

La calibración realizada implica la búsqueda de la mejor correlación entre los datos medidos y los calculados por el modelo, para las siguientes variables:

- Elevación de la superficie del mar (altura de la marea)
- Velocidad y dirección de las corrientes a distintas profundidades
- Temperatura
- Salinidad y,
- Turbidez

Cuando se ha logrado la mejor correlación de todas las variables, se da por calibrado el modelo y se asegura que el mismo calculará satisfactoriamente esas variables, en el tiempo y el espacio, para otras épocas fuera del período de medición. A la fecha, se considera el modelo calibrado en todas las variables menos la turbidez, cuyo proceso de calibración está en desarrollo.

Se han utilizado diferentes fuentes de información para la calibración de los modelos: bases de datos globales (temperatura y salinidad del mar), resultados de las mediciones de corrientes, temperatura, conductividad (salinidad) y turbidez. Adicionalmente, se realizaron perfiles batimétricos complementarios de las cartas náuticas disponibles.

En el Informe de Avance, se han presentado resultados expresados en términos de la marea, específicamente de determinados momentos de la marea, ya que se ha establecido que las propiedades del agua como la temperatura y principalmente la salinidad depende del estado de la marea.

Las principales conclusiones alcanzadas son las siguientes:

- La calibración de los modelos MIKE 3 (HD) y MIKE 3 (AD) ha sido muy satisfactoria, favorecida por la regularidad y gran amplitud de las mareas, que se constituyen en la fuerza dominante del movimiento de las masas de agua en el estuario. El modelo corre sobre una grilla basada en la batimetría asociada al dominio de modelación y cuenta con 20874 elementos de variada forma y tamaño para hacer eficiente el cálculo.
- El ingreso y egreso de agua al estuario en cada ciclo de marea es muy importante. Considerando que el volumen de agua del estuario (al NMM) es 1.12 km^3 (1120 millones de metros cúbicos) y que el volumen de agua que ingresa al estuario entre la BM y la PM es 1.13 km^3 para amplitudes medias de marea (1.69 y 0.85 km^3 para amplitudes máximas asociadas a sicigias y mínimas asociadas a cuadraturas, respectivamente), es claro que en el término de un ciclo de marea (12.4 horas) entra y sale un volumen de agua equivalente al del estuario. Este flujo de agua que entra y sale, permite que las aguas del estuario cambien constantemente sus propiedades, tales como la salinidad y la temperatura. El mecanismo de renovación de agua del estuario, por la acción de las mareas, es altamente eficiente.
- La importancia de la marea puede verse desde sus corrientes de marea asociadas. Son frecuentes corrientes con velocidades en superficie que superan 1.5 m/s .
- Las mediciones utilizadas para la calibración del modelo indican que para la época de medición las temperaturas de los Ríos Santa Cruz y Chico son superiores a la observada en el mar, en unos 2°C .
- Al momento de las mediciones, aguas con salinidad de algún significado se encuentran partir de la convergencia de los dos ríos hacia el mar. Los perfiles de salinidad en el estuario muestran valores mayores cerca del fondo.

- En el estuario ocurre la mezcla de aguas producida por descarga del río Santa Cruz principalmente y aquellas de origen marino. Esta mezcla que convoca aguas dulces y salinas con diferente temperatura de origen, son afectadas por la variación diaria de temperatura impuesta por el intercambio de calor entre el agua y la atmósfera.
- En general, la temperatura del agua de mar, relativamente más fría que la de los ríos para la época de medición, ingresa al estuario generando un 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. También debe considerarse que 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. Las temperaturas aumentan a medida que las capas son más superficiales, encontrándose los máximos de temperatura en superficie.
- Las mediciones utilizadas en la calibración del modelo indican salinidades nulas en los Ríos Santa Cruz y Chico y superiores a 32 UPS en el mar.
- Durante la calibración, se hizo una comparación de 13 perfiles de corrientes medidos (considerados como instantáneos) y aquellos generados por el modelo. La correlación entre valores medidos y calculados se considera muy buena y coherente con las correlaciones entre series de tiempo.
- Los campos de salinidad variables en el tiempo han sido reproducidos por el modelo para diferentes condiciones de marea y viento. El agua de mar ingresa al estuario dominada por las velocidades de marea, generando un importante gradiente horizontal de salinidad que varía espacialmente en función de la condición de marea.
- En creciente (para el día 19/12/2016 con 9 m de amplitud de marea) la salinidad en el interior del estuario fue mayor que en bajante y salinidades del orden de 10 UPS pudieron encontrarse a unos 10 km dentro del Río Santa Cruz.
- En bajante (para el día 19/12/2016 con 9 m de amplitud de marea), el Río Santa Cruz muestra salinidad nula en toda la extensión simulada (desde Isla Pavón hasta su desembocadura en el estuario). Este efecto fue causado por la combinación entre la velocidad de avance de la embarcación de mediciones y la velocidad de la onda de marea creciente, de tal manera que la salinidad no alcanzó a los puntos de medición.
- Los campos de salinidad en todas las capas del modelo muestran una variación importante con salinidades nulas provenientes de los Ríos Santa Cruz y Chico hasta salinidades superiores a 32 UPS mar adentro. La salinidad en el estuario aumenta a medida que las capas son más profundas, encontrándose los máximos cercanos al fondo.
- La pluma de agua de relativamente baja salinidad, que se genera en la desembocadura del estuario hacia el mar, es de menor tamaño en el fondo que en la superficie. Respecto a 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 cambia con cada ciclo de marea.
- Las series de tiempo del nivel del mar, temperatura, salinidad y componentes este-oeste y norte-sur de las velocidades calculadas por el modelo para un punto interior del estuario, muestran estar dominadas por las mareas para todas esas variables. Esto es, mayor amplitud en los ciclos de las variables coincide con la mayor amplitud en la marea.

- Con el objeto de establecer los valores de salinidad en puntos de referencia con un caudal mayor al establecido para la calibración ($570 \text{ m}^3/\text{s}$), se seleccionó un caudal de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ y se hizo una corrida del MIKE 3, manteniendo las condiciones de las corridas con el anterior caudal. La máxima diferencia en la salinidad media, entre los dos casos, fue calculada para el punto P8 y alcanzó 1.7 UPS, mayor para el caso de menor caudal.

Atendiendo a aspectos de interés ambiental, se hicieron simulaciones para 3 caudales del Río Santa Cruz, todos representativos del mes de junio: mínimo, $232 \text{ m}^3/\text{s}$; medio, $691 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo $1002 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Cerca del extremo oeste del dominio de modelación, en Piedrabuena, el nivel medio del río aumenta a medida que aumenta el caudal del mismo. La diferencia entre niveles del río alcanza 1.1 m entre las simulaciones con caudal mínimo y máximo.
- Prácticamente, a partir del punto P8 el nivel de las aguas es controlado por las mareas sin influencia del caudal que se trate.
- 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.
- La temperatura cerca del punto P1 depende de la condición de contorno impuesta al modelo: 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 . 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, luego desde el punto P8 se ve la influencia de la temperatura más cálida del mar, repitiéndose este fenómeno para todos los caudales.
- Las variaciones de temperaturas máximas observadas para las simulaciones con máximo y mínimo caudal son de 1°C .
- El módulo de las velocidades de las corrientes cerca del fondo varía, con alguna significación, con el caudal del río hasta el punto P5: a mayor caudal mayor velocidad hasta el punto P5. Desde allí hacia el mar, el módulo de la corriente se hace independiente del caudal y es dominado por las mareas.
- Las variaciones de salinidad son muy importantes en poco tiempo, como un ciclo de marea (12.4h) durante el cual ocurren los estados de marea pleamar, bajante, bajamar y creciente. Masas de agua con valores de salinidad entre 26 y 28 UPS, se desplazan unos 40 km en un solo ciclo de marea. Lo mismo puede decirse de las masas de agua con valores de la salinidad menor a 2 UPS, que se desplazan unos 30 km en ese mismo tiempo.

2.5 CONCLUSIONES GENERALES

Si bien resta aún culminar los estudios referidos a los aspectos sedimentológicos, los avances logrados en relación con el conocimiento de las fluctuaciones espaciales y temporales de la temperatura del agua y de su salinidad son muy relevantes para el conocimiento del comportamiento del sector estuarial del río Santa Cruz, información que no estaba disponible previamente por la falta de estudios antecedentes sistemáticos.

En el EIA del proyecto original (Serman & asociados s.a., 2015 para Represar Patagonia) se especificó la realización de un modelo hidrodinámico y sedimentológico para conocer en detalle el efecto del manejo de los caudales sobre el río Santa Cruz aguas debajo de la presa Jorge Cepernic. Esta modelización debía abarcar el último tramo con características estuariales debido a la influencia del régimen de mareas.

Se consideró también que los caudales significativamente menores que se darán durante el llenado, podrían causar que la zona estuarial se extienda aguas arriba y aumentar la influencia salina en el estuario.

Se comentó asimismo que este efecto también podría darse diariamente durante la fase de acumulación de agua en los embalses. No obstante, considerando el modo de funcionamiento del sistema en base que actualmente se propone, y dado que los caudales erogados serán prácticamente los mismos que ingresan al embalse, el único efecto posible sobre la extensión del área afectada por la pluma de salinidad, se podría producir durante la fase del llenado.

Por otro lado, se consideró que el tramo ubicado aguas abajo de Piedrabuena hasta la desembocadura en el mar, incluyendo el sector terminal del río Chico, debe ser modelizado en forma tridimensional aplicando un software apropiado, lo cual ha sido cumplimentado a través de la aplicación del modelo MIKE 3 HD y AD. Para la implementación del modelo, se debía verificar y complementar la información batimétrica provista en las cartas náuticas de manera de generar un Modelo Digital del Lecho de precisión adecuada a los fines del estudio, en toda la extensión modelizada, lo cual fue realizado satisfactoriamente.

Para la calibración del modelo, se han realizado un conjunto de mediciones del perfil vertical de velocidades (preferentemente con ADCP), de turbidez y de salinidad. Las mediciones se han realizado en forma sistemática durante varios ciclos de marea en dos puntos fijos representativos del estuario y del mar, y fueron complementadas con mediciones auxiliares puntuales distribuidas a lo largo del estuario hasta la localidad de Piedrabuena, de tal manera de “capturar” la variabilidad espacial y temporal de los parámetros.

Se han registrado los vientos durante el período de mediciones, para incluir en la modelización hidrodinámica su efecto en la propagación de la marea.

Por otro lado, se ha verificado con aforos puntuales, el caudal afluente al área modelada por el río Santa Cruz y el río Chico.

El modelo ha sido calibrado considerando los siguientes aspectos:

- Calibración de la fluctuación de Caudales y Velocidades influenciados por la descarga fluvial y por la propagación de la marea.
- Calibración de la penetración del frente o cuña de salinidad en las condiciones de caudal imperantes durante las mediciones.

Resta aún efectuar la calibración de las variaciones de carga de sedimentos en suspensión en función de la propagación de la marea, considerando el efecto de la salinidad en la floculación de las partículas finas.

Una vez calibrado, el modelo debía ser empleado para representar al menos los siguientes escenarios:

- Cuantificación de los efectos transitorios de mayor penetración de la salinidad hacia aguas arriba acercándose a Piedrabuena, considerando los caudales reducidos durante el período de llenado de las represas. Esta modelización debe considerar el caudal ecológico que se erogue hacia aguas abajo del embalse Jorge Cepernic. Como se mencionó, no es necesario considerar la fluctuación de caudales diarios, dado que en la actual operación prevista, las represas no retendrán caudal luego de ser llenadas, sino que trabajarán erogando el caudal que ingrese a las mismas.
- Estimación del impacto de la retención parcial de los sedimentos por parte de los embalses, sobre la sedimentación natural en la zona estuarial afectada por mareas y salinidad, evaluando los posibles efectos morfológicos que podrían ocurrir. Para realizar estas simulaciones, se deberá considerar como condición de borde aguas arriba del modelo tridimensional, la concentración de sedimentos finos en suspensión, que surja de los estudios de retención en los embalses.

El análisis que se ha presentado en el Informe de Avance, muestra el efecto que tiene en la temperatura y salinidad del tramo estuarial, el caudal del río Santa Cruz. Para ello, se han seleccionado tres condiciones de caudal, $Q_{\text{mínimo}} = 232 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{medio}} = 691 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{\text{máximo}} = 1002 \text{ m}^3/\text{s}$, registrados en el mes de junio en la Estación Charles Führ (período septiembre de 1955 – agosto de 2015).

Si bien el caudal mínimo adoptado no es el menor registrado en el río dado que en los meses de agosto y setiembre se han registrado valores mínimos ligeramente menores, es un valor razonablemente representativo de condiciones invernales y del orden de magnitud que podría tener el caudal ecológico que se adopte para la etapa de llenado de las represas.

Los resultados muestran que hasta el punto de control P2, ubicado a unos 3,5 km aguas abajo de la toma de agua de Piedrabuena, para ninguna de las condiciones de caudal y nivel se produce una afectación de la salinidad del agua a 1 metro del fondo. Recién en el punto P3, ubicado a unos 8 km de la toma de Piedrabuena, se registra un leve incremento de salinidad alcanzando un pico de 1,4 UPS a 1 metro del fondo en pleamar.

En consecuencia, a partir de la información presentada en el Informe de Avance, se puede estimar que no se producirían afectaciones de la salinidad del agua en la toma de agua de Piedrabuena durante la fase de llenado, siempre que los caudales erogados sean del orden del valor mínimo modelado.

2.6 BIBLIOGRAFÍA

SERMAN & ASOCIADOS S.A. 2015a. Estudio de Impacto Ambiental Aprovechamiento Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (Presidente Dr. Néstor C. Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), Provincia de Santa Cruz. Represas Patagonia. ELING CGGC HCSA UTE.

Serman & asociados, 2015b. Estudio de Impacto Ambiental Aprovechamiento Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (Presidente Dr. Néstor C. Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), Provincia de Santa Cruz. Represas Patagonia. ELING CGGC HCSA UTE. ADENDA – SEGUNDA CAMPAÑA LIMNOLÓGICA.