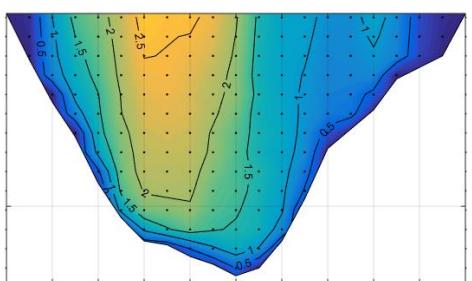
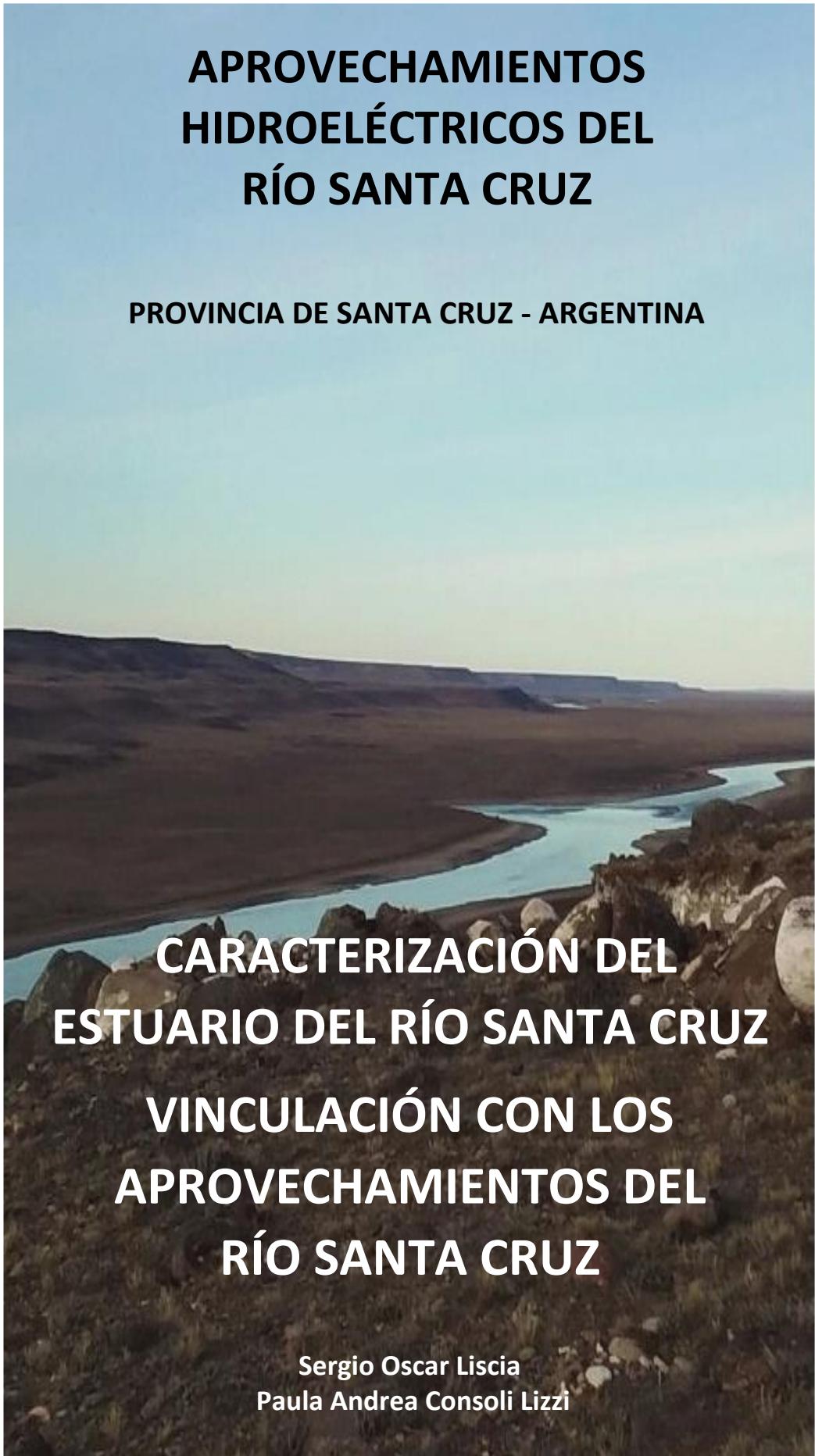
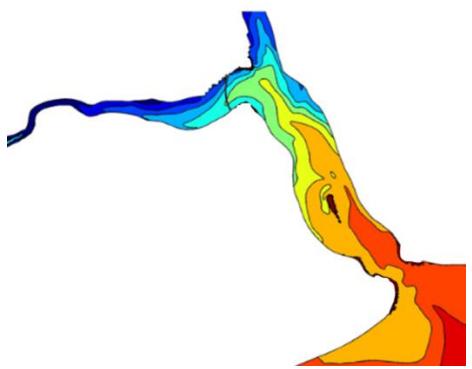




APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ

PROVINCIA DE SANTA CRUZ - ARGENTINA



Caracterización del estuario del río Santa Cruz.

Vinculación con los aprovechamientos del

río Santa Cruz

Sergio Oscar Liscia
Paula Andrea Consoli Lizzi

Liscia, Sergio Oscar

Caracterización del estuario del río Santa Cruz : vinculación con los aprovechamientos del río Santa Cruz / Sergio Oscar Liscia ; Paula Andrea Consoli Lizzi ; Coordinación general de Sergio Oscar Liscia. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2025.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-34-2574-9

1. Hidráulica. 2. Ecología. I. Consoli Lizzi, Paula A. II. Liscia, Sergio Oscar, coord. III. Título.

CDD 627

Caracterización del estuario del río Santa Cruz. Vinculación con los aprovechamientos del río Santa Cruz

Sergio Oscar Liscia, Paula Andrea Consoli Lizzi



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2025.

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723.

© Universidad Nacional de La Plata

Coordinador

Sergio Oscar Liscia¹

Autores

Sergio Oscar Liscia

Paula Andrea Consoli Lizzi¹

¹ Universidad Nacional de La Plata

Nota preliminar

El río Santa Cruz, ubicado en la provincia homónima en el Sur de la Patagonia Argentina, tiene su cuenca con nacientes en el Campo de Hielos Patagónico Sur. Sus caudales se originan por la combinación de aportes de glaciares, lluvias y el derretimiento de nieves, e interactúan con una gran cantidad de lagos y lagunas. Precisamente el río Santa Cruz nace del lago Argentino, dirigiéndose hacia el este hasta desembocar en el Océano Atlántico.

El proyecto más relevante desarrollado sobre este río resulta el aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz. Se trata de un viejo anhelo de interés energético para la Argentina, postergado por diferentes motivos a lo largo de los años. El aprovechamiento está conformado por dos presas, con sendas centrales hidroeléctricas y estructuras de seguridad: Presidente Dr. Néstor Carlos Kirchner (ex Condor Cliff), emplazada a unos 127 km del inicio del río Santa Cruz, y Gobernador Jorge Cépernic (ex La Barrancosa), ubicada 70 km aguas abajo de la primera. Ambas forman el complejo hidroeléctrico del río Santa Cruz, encontrándose actualmente en construcción.

La concreción del inicio de las obras en el año 2015 cierra un ciclo de varias décadas de actualizaciones del proyecto, durante el cual fue adaptándose progresivamente a los avances que las matrices energéticas y a los abordajes que los temas ambientales han impuesto con el paso del tiempo. El proyecto concebido para la licitación, como es dable esperar, se ha ido modificando conforme a la profundización del conocimiento geológico, geotécnico, ambiental, hidráulico, hidromecánico e hidrológico, llevando cada propuesta a soluciones técnicas/científicas que permitieron superar los inconvenientes suscitados. Entre las optimizaciones más destacadas, además de la modificación de los niveles de embalse, se encuentra la reducción del número de turbinas atendiendo cuestiones ambientales y contractuales. En la central aguas arriba la cantidad de turbinas Francis pasó de seis a cinco, y en la segunda el número de turbinas Kaplan se redujo de cinco a tres, acarreando también modificaciones en el diseño de las obras. La reducción de las turbinas Kaplan se vinculó directamente a garantizar el funcionamiento del último tramo del río con su régimen natural.

En atención a lo expuesto, este libro responde a una iniciativa de la Universidad Nacional de La Plata para que se cuente con información de base científica de uno de los principales impactos de las obras. Durante el llenado de los embalses se produce una restricción hidrológica temporal en el último tramo del río. El presente estudio es un aporte fundamental para dimensionar en magnitud y en extensión temporal los efectos de esta maniobra. En la presente publicación se aborda la metodología utilizada para la simulación de las variables hidráulicas en el estuario del río Santa Cruz, donde ocurre el encuentro entre los ríos Santa Cruz y Chico y el mar. Se presentan los resultados obtenidos de las modelaciones en lo que respecta al comportamiento de salinidad, entendida ésta como un parámetro que define el hábitat en que se desarrolla la

biota. Asimismo, se aborda con detalle la caracterización durante junio y julio, época del año en la que el Macá Tobiano (un ave endémica de particular interés por encontrarse en peligro de extinción) reside en el estuario. En última instancia, el objetivo de este libro es ofrecer información sobre la dinámica del estuario del río Santa Cruz en condiciones naturales y durante el llenado de los embalses, a fin de proporcionar herramientas que ayuden a la toma de decisiones orientadas a mitigar el impacto de las obras.

A la fecha de emisión de esta publicación, la construcción de los aprovechamientos no ha finalizado, presentando mayor avance la materialización de la central que está aguas abajo. Por este motivo se analiza una variedad de escenarios posibles, y es previsible la actualización de estos estudios cuando llegue la fecha de finalización de las obras, en caso de que en su concreción surgieran cambios de relevancia.

Por último, resta mencionar que esta publicación es la tercera de una serie de tres libros^{1 2} que aborda diferentes aspectos del río y sus obras. Cada uno de ellos trata sobre la cabecera de la cuenca, la explotación de las obras y el estudio de los efectos del llenado de los embalses respectivamente, ofreciendo en conjunto una mirada general desde la naciente del río hasta su desembocadura, aportando una integración longitudinal y temporal del mismo, con la finalidad de contribuir a un mejor uso de los recursos naturales de Argentina.

¹Crecidas de diseño del río Santa Cruz. ISBN 978-950-34-2293-9

²Simulación de operación de embalse y despacho de potencia y energía del aprovechamiento del río Santa Cruz. ISBN 978-950-34-2356-1

Agradecimientos

Se valora la disponibilidad de información en el Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (Argentina), en la World Ocean Database 2013 de la National Oceanographic and Atmospheric Administration, en el modelo de marea OSU TPXO de Egbert & Erofeeva y en las imágenes satelitales de Google Earth.

Se reconoce la valiosa contribución del Dr. Federico Zabaleta a la implementación inicial del modelo numérico, y el aporte del Dr. Steven Chapra a la interpretación de fluctuaciones de clorofila.

Se agradece a los profesionales de la planta potabilizadora de Piedrabuena por compartir sus registros de turbidez.

Índice

Introducción	1
1.1 Descripción general de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz .	1
1.2 Descripción general del estuario del río Santa Cruz	9
1.2.1 Medio antrópico	10
1.2.2 Entorno natural	10
1.2.3 Biota	11
1.3 Vinculación del estuario con los aprovechamientos del río Santa Cruz	13
1.3.1 El estuario en las etapas principales de la vida útil de las presas	13
1.3.2 Criterios para definir el hidrograma de llenado	14
1.3.3 Metodología para caracterizar afectaciones potenciales	15
1.4 Estructura de la publicación	16
Caracterización del medio físico	17
2.1 Definición del área bajo estudio	17
2.2 Relevamientos efectuados	18
2.2.1 Caracterización de ondas de marea	18
2.2.2 Inspección visual de áreas de mojado y secado	20
2.2.3 Caracterización batimétrica	21
2.2.4 Muestreo del lecho	23
2.2.5 Determinación de perfiles verticales	27
2.2.6 Red hidrometeorológica	29
2.2.7 Muestreos mensuales	37
2.2.8 Monitoreo continuo	45
2.2.9 Aforos líquidos y sólidos	53
2.2.10 Limnología	58
2.3 Análisis e interpretación de los datos medidos	59
2.3.1 Hidrología e hidrodinámica	59
2.3.2 Transporte de sedimentos	73
2.3.3 Nutrientes	93
2.3.4 Salinidad	97
2.3.5 Temperatura del agua	104
2.4 Conclusiones	117
Implementación del modelo numérico	123

3.1	Generalidades de la metodología	123
3.1.1	Alcances del modelo	123
3.1.2	Software empleado	125
3.1.3	Ecuaciones gobernantes	125
3.1.4	Caracterización del medio físico	127
3.2	Configuración del modelo	128
3.2.1	Discretización espacio-temporal	128
3.2.2	Condiciones de contorno	131
3.2.3	Monitoreo de resultados	136
3.2.4	Calibración y validación del modelo	137
3.3	Conclusiones	139
Modelación del estuario en estado natural		141
4.1	Hidrodinámica del estuario	141
4.1.1	Generalidades	141
4.1.2	Alcance de la onda de marea	146
4.1.3	Efecto de los aportes del río Santa Cruz sobre la hidrodinámica estuarial .	149
4.2	Tiempo de residencia	155
4.2.1	Método del prisma de marea	155
4.2.2	Experimento del trazador	157
4.2.3	Discusión	159
4.3	Salinidad	161
4.3.1	Influencia del caudal del río Santa Cruz	162
4.3.2	Influencia de las mareas	166
4.3.3	Alcance del frente salino	169
4.3.4	Conclusiones	170
4.4	Temperatura del agua	171
4.4.1	Temperatura del agua en verano	171
4.4.2	Temperatura del agua en invierno	172
4.4.3	Conclusiones	173
4.5	Salinidad en escenarios de referencia	174
4.5.1	Año medio	174
4.5.2	Hidrograma de excedencia temporal 100 %	179
4.5.3	Hidrograma de excedencia temporal 95 %	182
4.5.4	Comentarios finales sobre los hidrogramas de referencia	185
4.6	Conclusiones	186
Modelación del estuario durante el llenado de embalses		189
5.1	Identificación de potenciales modificaciones introducidas por las presas en distintas etapas de su vida útil	189
5.1.1	Construcción de las presas	190

5.1.2	Llenado de los embalses	190
5.1.3	Operación de las presas	191
5.1.4	Conclusiones	191
5.2	Consideraciones generales sobre el llenado de embalses	192
5.3	Hidrogramas de llenado de las presas sobre río Santa Cruz	193
5.3.1	Escenarios de llenado de los embalses	193
5.3.2	Escenarios de hidrogramas ambientales de referencia	196
5.3.3	Formulación general de hidrogramas de llenado con base ambiental	199
5.3.4	Criterio con que se valoraron afectaciones durante el llenado	204
5.4	Verificación de llenados de proyecto	205
5.4.1	Modificaciones durante llenado del embalse Gdor. Jorge Cepernic	206
5.4.2	Modificaciones durante el llenado del embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner	219
5.5	Modificaciones en la temperatura del río Santa Cruz	226
5.6	Conclusiones	228
	Reflexiones finales	231

Índice de figuras

1.1	Ubicación de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y presa Gdor. Jorge Cepernic: vista en planta (superior); perfil longitudinal (inferior)	2
1.2	Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner	4
1.3	Sección típica de la presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner	5
1.4	Sección típica de la obra de descarga (vertedero/descargadores de fondo y medio fondo/desvío) - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner . .	5
1.5	Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner	5
1.6	Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic	6
1.7	Sección típica de la presa Gdor. Jorge Cepernic	6
1.8	Sección típica de la obra de descarga (vertedero y descargadores de fondo) - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic	7
1.9	Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic	7
1.10	Fotografías satelitales del estuario, en que se aprecian las amplias variaciones de niveles y zonas de mojado y secado: pleamar arriba, bajamar abajo. Reproducida de Google Earth	9
1.11	Infraestructura en las márgenes del río Santa Cruz: ciudades de Comandante Luis Piedrabuena y Puerto Santa Cruz, puerto de Punta Quilla, puente sobre río Chico (RN3), antiguo puente sobre río Santa Cruz, frigorífico y tomas de agua de ambas localidades. Editada a partir de imagen de Google Earth	10
1.12	Fotografías del medio natural. a. Puente viejo durante pleamar. b. Isla Pavón durante marea media. c. Inmediaciones de Piedrabuena durante bajamar. d. Sector puente sobre río Chico. e y f. Sarcocornias en cercanías de Punta Quilla durante marea baja	11
1.13	Volante para difusión de relevamiento participativo de aves	12
1.14	Sitios de avistaje del Macá Tobiano: 01. Punta Quilla, 02. Isla Leones, 03. Punta Reparo, 04. Ca. Misionero, 05. Frigorífico, 06. Piedrabuena	13
2.1	Niveles en el río Santa Cruz el 17 de octubre de 2016	19
2.2	Montaje de fotografías de la vista aérea próxima a margen izquierda cerca del Frigorífico, en sentido antihorario de Este a Norte. Se aprecian las grandes extensiones que quedan expuestas en bajamar	20

2.3	Ubicación de los puntos y perfiles batimétricos levantados aguas abajo de JC en el tramo final del río Santa Cruz (naranja) y relevamientos específicos del estuario (granate)	21
2.4	Carta Náutica 2, "Puerto Santa Cruz". Fuente: Servicio de Hidrografía Naval.	22
2.5	Fotografías representativas del acorazamiento observado en el río Santa Cruz. Corresponden a los sitios Charles Fuhr (izq.) y Puente Viejo (der.)	23
2.6	Caracterización del lecho del estuario. Izq: sitios de toma de muestra (marcadores verde para la primera campaña y amarillos para la segunda). Der: zonificación basada en el segundo muestreo, reproducida de [25].	24
2.7	Muestreo de lecho en Puente Viejo. Izq: sitio de toma de muestras. Der: granulometría (muestras superficiales en línea continua, y muestras subsuperficiales con asteriscos)	25
2.8	Muestreo del lecho en Isla Pavón, como parte de la campaña aguas abajo de JC. Izq.: Sitio de toma de muestras en margen izquierda (MI) y derecha (MD). Der.: curvas granulométricas, indicando en línea continua muestras superficiales y con asterisco muestra subsuperficial; las dos primeras corresponden a MI y las tres finales a MD)	25
2.9	Sitios de muestreo de lecho del estuario, incluyendo zonificación adoptada para presentación de resultados de Figura 2.10	26
2.10	Curvas granulométricas de muestras del lecho obtenidas en el estuario.	26
2.11	Sitios de medición en que se determinaron perfiles verticales. Perfiles puntuales <i>CTDTu</i> y transectas <i>Tr</i> en que se midieron velocidades. También se indican las estaciones Estuario2 y Mar en las que se efectuaron mediciones continuas durante unos pocos días	27
2.12	Perfil vertical de velocidades en zona central del cauce en Puente Viejo, correspondiente a uno de los tantos perfiles transversales realizados durante aforos de 500 m ³ /s (octubre 2017, izq.) y de 2160 m ³ /s (febrero 2018, der.). Reproducido de [1].	28
2.13	Perfiles verticales de turbidez en Estaciones 03, 07 y 09, distinguiendo bajante y creciente. Reproducida de [25].	28
2.14	Perfiles verticales de temperatura en Estaciones 03, 07 y 09, distinguiendo bajante y creciente. Reproducida de [25].	29
2.15	Perfiles verticales de temperatura en Estaciones 08, 09 y 10, distinguiendo bajante y creciente (aguas arriba, la salinidad observada fue nula). Reproducida de [25]. .	29
2.16	Estación hidrometeorológica Punta Quilla. Caseta sobre la cual se emplaza (izq.), y ubicación general en la zona de la boca del estuario (der.)	30
2.17	Período de registros de estación hidrometeorológica Punta Quilla <i>HM PQ</i> , y solapamiento con otros monitoreos periódicos: equipos OBS fondeados en forma continua en Punta Quilla <i>OBS PQ</i> , Río Chico <i>OBS RC</i> e Isla Pavón <i>OBS IP</i> ; aforos y toma de muestras de agua puntuales en Río Chico <i>Q+M RC</i> y Puente Viejo <i>Q+M PV</i> , y toma de muestras en Isla Pavón <i>Q+M IP</i>	31

2.18 Registros temporales de estación hidrometeorológica Punta Quilla	32
2.19 Histogramas correspondientes a parámetros medidos por la estación hidrometeorológica Punta Quilla.	33
2.20 Temperaturas medias mensuales obtenidas de los registros de la estación hidrometeorológica Punta Quilla.	33
2.21 Precipitación acumulada mensual obtenida de los registros de la estación hidrometeorológica Punta Quilla. Se han sombreado valores anómalos que superaban los 200 mm mensuales.	33
2.22 Datos meteorológicos. Estación Charles Fuhr	35
2.23 Datos meteorológicos. Estación Punta Quilla	36
2.24 Sitios de los relevamientos en el sector del estuario. Las estaciones marcadas con triángulo comprenden aforos	37
2.25 Registros continuos del OBS de Isla Pavón: nivel, conductividad, temperatura y turbidez	46
2.26 Registros continuos del OBS de Punta Quilla: nivel, conductividad, temperatura y turbidez	47
2.27 Registros continuos del OBS de río Chico: nivel, conductividad, temperatura y turbidez	48
2.28 Registros continuos de perfil vertical de velocidades horizontales (magnitud y dirección) en estaciones Mar (izq.) y Estuario 2 (der.). La línea gris referencia ascenso y descenso de la cota de pelo de agua.	50
2.29 Registros continuos en estación Mar: profundidad, temperatura en el fondo, salinidad en el fondo, turbidez en el fondo y velocidad media vertical.	51
2.30 Registros continuos en estación Estuario 2: profundidad, temperatura en el fondo, salinidad en el fondo, turbidez en el fondo y velocidad media vertical.	52
2.31 Serie de caudales diarios en la estación Charles Fuhr.	53
2.32 Sección de aforo Puente Viejo. Localización y fotografía de los estribos del antiguo puente	55
2.33 Aforo líquido con ADCP y sólido con botella Niskin en Puente Viejo.	56
2.34 Perfiles transversales de velocidades en Puente Viejo. Arriba, para un caudal de 295 m ³ /s en septiembre de 2022, y abajo, para caudal de 1338 m ³ /s en abril de 2019. Reproducidos de los informes de campaña [14] y [13].	56
2.35 Puente de la RN3 sobre el Río Chico. Fotografía del flujo tomada desde margen izquierda (izq.), y recolección de la muestra de agua de botella Niskin de 8 lts. (der.).	58
2.36 Sitios monitoreados durante las campañas de limnología.	59
2.37 Fechas de caracterización limnológica de estaciones de monitoreo del estuario SC14 a PQ13, indicando visitas sólo con medición <i>in situ</i> de OD (rosa) y las que proveyeron análisis de laboratorio (verde). La línea roja indica cambio de laboratorio responsable de análisis.	59
2.38 Caudales aforados en río Chico durante las campañas mensuales	60

2.39 Perfil transversal de velocidades registradas en río Chico para un caudal 3.1 m ³ /s (julio de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s y la progresiva 0 está en margen izquierda.	60
2.40 Perfil transversal de velocidades registradas en río Chico para un caudal 36.8 m ³ /s (diciembre de 2017). El mapa de colores indica velocidades en m/s y la progresiva 0 está en margen izquierda.	61
2.41 Evolución temporal de niveles h registrados en río Chico. Mediciones propias continuas con OBS y puntuales durante aforos (naranja), y registros continuos y puntuales de aforos de la SsRRHH (azul).	62
2.42 Evolución temporal de caudales en río Chico: aforos puntuales durante campañas, aforos de la SsRRHH y valores diarios de SsRRHH.	62
2.43 Influencia de ondas de marea sobre niveles de río Chico. Arriba, registros de niveles h en río Chico y Punta Quilla. Para río Chico, mediciones continuas con OBS y mediciones mensuales puntuales; para Punta Quilla, registros del OBS y de la estación hidrometeorológica. Abajo, serie de caudales Q aforados en las campañas mensuales.	62
2.44 Detalle de los registros de niveles de los OBS ubicados en río Chico y Punta Quilla	63
2.45 Niveles en río Chico h_{RC} frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} . La línea discontinua marca igualdad de niveles.	64
2.46 Ley altura-caudal en río Chico. Aforos en campañas mensuales (círculos) y de la SsRRHH (puntos), y ajuste según Ec. (2.1) (en línea continua).	65
2.47 Hidrogramas anuales observados en río Chico. Series de datos obtenidas a partir de las alturas registradas por la SsRRHH entre 2016 y 2023.	65
2.48 Curva de duración de caudales de río Chico, elaborada a partir de los datos diarios de la SsRRHH.	65
2.49 Velocidades registradas en Puente Viejo para un caudal de 2103 m ³ /s (abril de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s, y la progresiva 0 está en margen izquierda.	66
2.50 Velocidades registradas en Puente Viejo para un caudal de 483 m ³ /s (junio de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s, y la progresiva 0 está en margen izquierda.	67
2.51 Evolución temporal de niveles en Isla Pavón. Arriba, medición continua de niveles h con OBS en Isla Pavón (naranja), en Punta Quilla (azul) y cota de pelo de agua medida durante los aforos mensuales (amarillo). Abajo, serie de caudales del río Q_{SC} , proveniente de aforos en Puente Viejo (azul) y según la ley H-Q de Charles Fuhr (naranja).	68
2.52 Detalle de la evolución temporal de niveles en Isla Pavón. Medición continua de niveles h con OBS en Isla Pavón (naranja) y en Punta Quilla (azul).	68
2.53 Retraso en el pasaje de la onda de marea ΔT para diferentes caudales de río Santa Cruz Q_{SC}	69

2.54 Afectación de mareas en Isla Pavón. Niveles en Isla Pavón h_{IP} frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} , indicando en colores el caudal del río Santa Cruz en cada condición. La línea roja discontinua indica igualdad de niveles.	69
2.55 Ley H-Q en Isla Pavón. Nivel h_{IP} en función del caudal aforado en Puente Viejo Q_{PV} (círculos), y ajuste según Ec. (2.2) (línea continua).	70
2.56 Ley H-Q en Puente Viejo. Nivel h_{PV} en función del caudal aforado en Puente Viejo Q_{PV} , distinguiendo campañas del estuario (círculos) y de la Red HM-HA (puntos), y ajuste y ajuste según Ec. (2.3) (línea continua).	71
2.57 Hidrogramas de interés ambiental del río Santa Cruz. Curvas de excedencia de 100 %, 95 %, 50 %, 5 % y caudal máximo.	72
2.58 Evolución temporal de concentraciones de sólidos suspendidos totales en río Santa Cruz, río Chico y Estuario. En el gráfico inferior, detalle del río Santa Cruz, superponiendo serie de caudales en línea continua	74
2.59 Relación entre sólidos suspendidos y turbidez en río Santa Cruz. El contorno de los marcadores indica el sitio muestreado, el color de relleno el caudal.	75
2.60 Granulometría de sólidos suspendidos en Puente Viejo. Curva de distribución acumulada (izq.) y distribución de frecuencias (der.). Cada serie de datos corresponde a un mes diferente.	75
2.61 Transporte de sedimentos en Puente Viejo en función del caudal líquido, distinguiendo fracción fina y gruesa. Concentración de sólidos suspendidos (izq.) y caudal sólido (der.)	76
2.62 Concentración de sólidos en suspensión en Puente Viejo en función del caudal líquido.	76
2.63 Concentración de sólidos suspendidos en río Chico. Dependencia con el caudal (izq.) y con la turbidez (der.). El relleno de marcadores responde a la otra variable no graficada (turbidez y caudal, respectivamente). En la figura de la derecha, se han incorporado con fondo blanco las muestras de fondo.	77
2.64 Concentración de sólidos suspendidos en Punta Quilla. Dependencia con la turbidez. El color de relleno indica mes del año.	78
2.65 Registro del OBS de evolución temporal de la turbidez en Isla Pavón. Contraste con evolución de viento y precipitaciones medidos en Punta Quilla	80
2.66 Detalle de registro del OBS de evolución temporal de la turbidez en Isla Pavón durante un mes en que su evolución presentó poco ruido. Contraste con evolución de viento y precipitaciones medidos en Punta Quilla, y niveles en Isla Pavón . . .	81
2.67 Valores diarios de turbidez en Isla Pavón (mínimo en negro, rango de valores en gris, muestreo mensual en marcador azul). Contraste con viento (valor mediano diario, rango de valores en gris) y precipitaciones medidos en Punta Quilla	82
2.68 Fotografía tomada hacia aguas arriba desde puente RN3 sobre río Santa Cruz (Isla Pavón) tras un evento de lluvia. Nótese el cambio de coloración del agua sobre la margen derecha del cauce.	83

2.69 Evolución de turbidez registrada por la planta potabilizadora de Piedrabuena. Arriba, período 1991-1994: registros de la planta en eje principal (azul) y contraste con temperatura ambiente en eje secundario (naranja). Abajo, año 2017: registro de la planta (naranja) y medición con OBS (azul).	84
2.70 Datos de la estación 2839-Piedrabuena: sólidos suspendidos, turbidez, nivel y precipitación.	85
2.71 Evolución temporal de turbidez en Río Chico (OBS y toma de muestras). Contraste con niveles del río, y con variables meteorológicas medidas en Punta Quilla: viento (valor mediano diario, rango de valores en gris) y precipitación.	86
2.72 Estudio de causas de evolución de turbidez en río Chico: lluvia precipitada en las últimas 48 hs (en Punta Quilla), máximo nivel diario y turbidez mediana diaria. Arriba, evolución temporal; abajo, pares de valores, donde la escala de colores indica precipitación.	87
2.73 Conductividad, turbidez y niveles en río Chico. Las líneas discontinuas coinciden con los momentos de máxima turbidez.	88
2.74 Datos de la estación de la BDHI 2836–RN3: sólidos suspendidos, turbidez y caudal.	88
2.75 Detalle de la evolución temporal de turbidez en Punta Quilla, durante dos semanas que presentaron pocos picos ruidosos (registro del OBS en azul, valor medio diario en negro). Arriba, nivel provocado por la marea a modo de referencia.	89
2.76 Evolución temporal de turbidez en Punta Quilla (valores por encima de 100 NTU omitidos para mejor visualización). Se destacan el valor mediano (negro) y mínimo diario (gris). Más arriba se incluye evolución de viento (valor mediano diario en naranja, dirección indicada en el color de relleno, rango de valores en gris), precipitación y nivel de pelo de agua.	90
2.77 Análisis espectral para detectar frecuencias en la evolución de turbidez. Arriba, serie temporal del OBS, indicando en rojo el tamaño de ventana usado en el análisis de remoción de ruido. Abajo, espectro de energía, destacando el pico correspondiente a 12:30 hs.	91
2.78 Propuesta de ajuste de turbidez Punta Quilla: turbidez media y mínima diaria frente a cota de pelo de agua máxima diaria.	92
2.79 Histogramas con porcentaje del tiempo de permanencia de niveles de turbidez en cada sitio, destacando el valor más observado.	92
2.80 Evolución temporal de las concentraciones de nutrientes (ortofosfato, fósforo, nitrógeno) y sólidos suspendidos medidos en las muestras mensuales de agua en los distintos sitios. Notar que las concentraciones de nitrógeno y SST se han graficado en decenas y décimas de $\mu\text{g/l}$ para mejor visualización. Además, se han omitido unos pocos datos que salen de la escala vertical.	93

2.81 Relación de nitrógeno y ortofosfatos respecto de la concentración de fósforo en río Santa Cruz. Los contornos de marcador indican el sitio de muestreo, y el color del relleno el mes. Se incluyen, a modo orientativo y no de ajuste, la habitual relación 1:16 entre N y P, mientras que se acota la relación entre PO y P con las rectas 1:1 y 3:1.	95
2.82 Concentraciones de fósforo P en río Chico. Relación con sólidos suspendidos (incluyendo una propuesta de ajuste) y variabilidad con el caudal Q	96
2.83 Concentraciones de nitrógeno N y ortofosfato PO frente a fósforo P en río Chico. Se indica la habitual relación 1:16 entre N y P, y se propone un ajuste entre PO y P.	96
2.84 Nutrientes en Punta Quilla. Relación entre fósforo y sólidos suspendidos, y entre nitrógeno y fósforo teniendo como guía la proporción de Redfield 1:16.	97
2.85 Conductividad en río Chico en función de la marea. Izq.: Conductividad frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} , distinguiendo el caudal del río Chico mediante el mapa de colores. Der.: Histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad.	98
2.86 Evolución temporal de conductividad en río Chico: registro del OBS, medición puntual en campo y en muestras de laboratorio. Arriba, serie de niveles del río.	99
2.87 Evolución temporal de conductividad en Punta Quilla: registro del OBS, medición puntual en campo y en muestras de laboratorio. Arriba, serie de niveles.	101
2.88 Detalle de la evolución temporal de conductividad en Punta Quilla. Las líneas discontinuas se ubican en una bajamar y una pleamar respectivamente. Arriba, registro de nivel h	102
2.89 Evolución de valores mensuales de conductividad en Punta Quilla: gris indica rango de variación, y se destacan los valores medianos y mínimos mensuales. Abajo, caudal del río Santa Cruz.	102
2.90 Dependencia de valores característicos mensuales de la conductividad en Punta Quilla con el caudal del río Santa Cruz.	102
2.91 Conductividad en Punta Quilla en función de la marea. Izq.: Conductividad frente a niveles de la marea, disitnguiendo caudal del río Santa Cruz en el mapa de colores; la línea negra ejemplifica un ciclo de marea de gran amplitud. Der.: Histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad.	103
2.92 Evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón. Abajo, registro del OBS (línea continua) y muestreo mensual (asteriscos naranjas). Arriba, variación de niveles h en el sitio, registro de temperatura del aire en Charles Fuhr y Punta Quilla, y registros del índice UV en Charles Fuhr y Punta Quilla.	105
2.93 Evolución anual de la temperatura del agua del río Santa Cruz: registros del OBS de Isla Pavón, mediciones durante muestreos puntuales en Charles Fuhr, Puente Viejo e Isla Pavón, y propuesta de valores medios mensuales.	106
2.94 Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel h en el sitio, y temperatura del aire y radiación UV medidos en la EHMA Charles Fuhr y EHMA Punta Quilla.	106

2.95 Análisis de señales de los registros del OBS de temperatura del agua en Isla Pavón. Arriba, señal y tamaño de ventana; abajo, espectro de energía destacando el pico en frecuencia 0.042 h^{-1}	107
2.96 Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón: según valores medios mensuales de Tabla 2.13, predicción en base a valores medios de temperatura en la EHMA Punta Quilla, y contraste con mediciones del OBS.	108
2.97 Evolución anual de la temperatura del agua del río Chico: registros del OBS, mediciones durante muestreos puntuales (en gris, los dos excluidos del cálculo), y propuesta de valores medios mensuales.	109
2.98 Evolución de la temperatura del agua en río Chico, según registro del OBS y muestreo mensual (abajo). Arriba, variación de niveles en el sitio, registro de temperatura del aire en Punta Quilla, y registros del índice UV en Punta Quilla.	110
2.99 Detalle de la evolución de la temperatura del agua en río Chico. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel, temperatura del aire y radiación.	111
2.100 Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en río Chico: predicción en base a valores medios mensuales de Tabla 2.14, predicción en base a valores medios de temperatura en la EHMA Punta Quilla, y contraste con mediciones del OBS.	112
2.101 Evolución anual de la temperatura del agua en Punta Quilla: registros del OBS, mediciones durante muestreos puntuales (en gris, valor omitido), y propuesta de valores medios mensuales.	112
2.102 Evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla, según registro del OBS y muestreo mensual (abajo). Arriba, variación de niveles, registro de temperatura del aire y del índice UV.	113
2.103 Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel h , temperatura del aire y radiación.	114
2.104 Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla con las mareas en invierno y verano.	115
2.105 Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla: predicción en base a valores medios mensuales de Tabla 2.15 y contraste con mediciones del OBS.	115
2.106 Gráfico de cajas con temperatura del agua y dispersión mes a mes en los tres sitios monitoreados con OBS.	116
2.107 Temperaturas medias semanales del agua en los tres sitios de monitoreo con OBS, y temperatura media semanal del aire en Punta Quilla.	117
3.1 Dominio del modelo, donde se han indicado los contornos abiertos del mismo. . .	124
3.2 Ejemplo de discretización σ (izq.) y Z (der.). Reproducido de [10].	125
3.3 Mallas utilizadas para la simulación	129
3.4 Detalle de las mallas utilizadas para la simulación	130

3.5	Secciones interpoladas sobre el río Santa Cruz. El mapa de colores indica profundidades.	132
3.6	Modelo digital del terreno.	132
3.7	Valores medios mensuales de temperatura del agua y salinidad en el mar según la base de datos WOD13. Reproducido de [25].	134
3.8	Ubicación de estaciones de monitoreo en modelo numérico E01 a E16.	137
3.9	Ajuste de niveles en Punta Quilla. Tablas de marea del SHN (línea continua naranja) y resultados del modelo (discontinuo negro).	138
4.1	Secciones transversales para estudio de caudales, resaltando en colores las analizadas en la Figura 4.2	142
4.2	Evolución temporal de caudales instantáneos en distintas transectas: Puente Viejo, Piedrabuena, Aguas arriba de la confluencia y Boca del estuario, identificadas en la Figura 4.1. El rango de valores del eje vertical en la figura inferior es más acotado, a fin de mostrar en detalle los caudales más bajos del río Santa Cruz.	143
4.3	Nivel del agua reproducida por el modelo durante pleamar (der.) y bajamar (izq.). El mapa de colores indica cota de pelo de agua, y las zonas sin agua se representan con blanco	143
4.4	Imagen satelital del estuario durante pleamar (der.) y durante bajamar (izq.)	144
4.5	Evolución temporal del nivel del agua durante varios ciclos de marea en las estaciones ubicadas en diferentes progresivas longitudinales: Toma de agua de Piedrabuena, Estación 04, Frigorífico y Punta Quilla, identificadas en la Figura 4.3 . .	144
4.6	Mapas de magnitudes de velocidades en distintos momentos de un ciclo de marea. El gráfico de la esquina inferior muestra la altura de marea en función del tiempo, indicando con un punto rojo cada momento representado en el respectivo mapa .	145
4.7	Código QR que enlaza a un video con la animación de la magnitud de velocidad del flujo.	146
4.8	Velocidades instantáneas durante corrientes de flujo (izq.) y reflujo (der.). Las flechas indican sentido de la corriente, ingresante en la primera figura y saliente en la segunda; la escala de colores indica magnitud en [m/s]	146
4.9	Niveles a lo largo de un corte transversal de la línea de mayor profundidad, en el tramo Puente Viejo a mar, para distintos momentos del ciclo de marea. En la parte inferior se muestra en planta el sitio de corte, así como evolución temporal de niveles indicando en forma aproximada con puntos rojos los momentos representados	148
4.10	Niveles del mar modelados en el período marzo-agosto de 2017	148
4.11	Niveles de la superficie libre en Piedrabuena modelados en el período marzo-agosto de 2017	148
4.12	Velocidad de la corriente en dirección del río en Piedrabuena	149
4.13	Distribución mensual de los caudales aportados por el río Santa Cruz	150
4.14	Distribución interanual de los caudales del río Santa Cruz en el mes de junio. La línea horizontal indica el caudal medio para ese mes	150

4.15 Curvas de frecuencia acumulada de caudales del río Santa Cruz para cada mes.	151
4.16 Niveles simulados para caudales del río superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo durante diciembre, en 3 progresivas: Toma de agua Estación 01 (arriba), Estación 05 (central) y Estación 09 (abajo)	152
4.17 Magnitud de velocidades simuladas para caudales del río superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo durante diciembre, en 3 progresivas: Toma de agua Estación 01 (arriba), Estación 05 (central) y Estación 09 (abajo)	153
4.18 Niveles medios observados en las estaciones 01 a 10 para marzo y septiembre, considerando caudales correspondientes a valores superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo.	154
4.19 Velocidades medias observadas en las estaciones 01 a 10 para marzo y septiem- bre, considerando caudales correspondientes a valores superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo.	154
4.20 Niveles en el estuario para caudales del río Santa Cruz de 1100 m ³ /s (arriba) y 300 m ³ /s (abajo) considerando amplitud media de mareas. Las zonas de mojado y secado se han graficado para pleamar (izquierda) y bajamar (derecha).	155
4.21 Cálculo el tiempo de residencia. Dominio para el cual se calculan los volúmenes en función de la cota (izq.). Curva nivel-volumen del estuario (der.)	156
4.22 Volumen del trazador remanente en el estuario en función del tiempo para di- ferentes caudales del río Santa Cruz, con sus respectivos ajustes de la forma $M(t) = M_0 \exp(-\gamma t)$	158
4.23 Tiempo de residencia en función del caudal del río Santa Cruz, estimado con dis- tintos métodos.	159
4.24 Secuencia de la trayectoria de una partícula liberada en el Puente Viejo hasta que sale del estuario. Se indica el intervalo de tiempo en días, horas y minutos desde la liberación.	160
4.25 Código QR que enlaza a un video con la animación de la trayectoria de la partícula mostrada en la Figura 4.24.	161
4.26 Valores medios (arriba), máximos (medio) y mínimos (abajo) de la salinidad a lo largo del año, en las distintas estaciones de medición	163
4.27 Perfiles de salinidad para los meses desde enero hasta agosto, para Q_{90} , Q_{medio} y Q_{10}	165
4.28 Evolución temporal de la salinidad a lo largo de dos semanas, para distintas esta- ciones de monitoreo	166
4.29 Distribución de salinidad durante pleamar (izq.) y bajamar (der.)	167
4.30 Código QR que enlaza a un video con la animación de la distribución de la salinidad durante una marea de gran amplitud.	167
4.31 Distribución de salinidad durante pleamar para una amplitud de marea de 12 m (izq.) y de 6 m (der.)	167
4.32 Nivel de la superficie libre en Punta Quilla durante el mes de julio del 2016 y 2017	168

4.33 Desplazamiento en un ciclo de marea del frente salino durante las mareas extremas del mes de julio de 2016.	170
4.34 Distribución de temperatura media del agua en verano, en pleamar (izq.) y bajamar (der.)	172
4.35 Evolución temporal de temperatura media del agua en verano, por efecto de la marea, en estaciones seleccionadas	172
4.36 Distribución de temperatura media del agua en invierno, en pleamar (izq.) y bajamar (der.)	173
4.37 Evolución temporal de temperatura media del agua en invierno, por efecto de la marea, en estaciones seleccionadas	173
4.38 Hidrograma medio anual del río Santa Cruz	175
4.39 Valores medios mensuales de salinidad en el estuario durante un año medio (noviembre a abril). La escala de colores representa la salinidad y en rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km	176
4.40 Valores medios mensuales de salinidad en el estuario durante un año medio (mayo a octubre). La escala de colores representa la salinidad y en rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km	177
4.41 Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 a lo largo de un año. En la parte inferior se incluye el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados	178
4.42 Evolución temporal de la salinidad en las Estaciones 04 (arriba) y 10 (abajo) a lo largo de un año. En la parte inferior se grafica el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados	178
4.43 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada una de las 14 estaciones definidas en la Figura 3.8 para los meses de septiembre (rojo) y marzo (azul)	179
4.44 Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 100 % (azul) y comparativa con un año medio (naranja). En la parte inferior se incluye el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados	180
4.45 Evolución temporal de la salinidad en Estación 04 (arriba) y Estación 10 (abajo) a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 100 % (azul) y comparativa con un año medio (naranja)	181
4.46 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para fin de septiembre/principios de octubre, durante el caudal de excedencia 100 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)	182
4.47 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para marzo, durante el caudal de excedencia 100 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)	182

4.48 Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 95% (azul) y comparativa con un año medio (naranja). En la parte inferior se incluye el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados	183
4.49 Evolución temporal de la salinidad en Estación 04 (arriba) y Estación 10 (abajo) a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 95% (azul) y comparativa con un año medio (naranja)	184
4.50 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para fin de septiembre/inicio octubre, durante el caudal de excedencia 95% (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)	185
4.51 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para marzo, durante el caudal de excedencia 95% (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)	185
5.1 Esquema de operación de las centrales en el proyecto ejecutivo actual	191
5.2 Representación esquemática de los hidrogramas en distintos tramos del río Santa Cruz durante el llenado de JC	194
5.3 Representación esquemática de los hidrogramas en distintos tramos del río Santa Cruz durante el llenado de NK	194
5.4 Hidrograma de año medio, Q_{50}	196
5.5 Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario de modelación de año medio: hidrograma Q_{50} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo	197
5.6 Hidrograma de mínimos caudales observados, Q_{100}	197
5.7 Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario extremo: hidrograma Q_{100} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo	198
5.8 Hidrograma de excedencia 95%, Q_{95}	198
5.9 Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario de caudales pobres: hidrograma Q_{95} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo	199
5.10 Hidrograma de caudales mínimos ambientales	200
5.11 Evolución temporal de niveles y caudales durante el llenado del embalse JC. Nivel de embalse y salto útil H_u se indican en gris, mientras que caudal ingresante de año medio Q_{50} se presenta en azul, caudal mínimo ambiental de referencia Q_{H1} se representa en verde, y caudal de salida del llenado Q_{SJC} aparece en naranja .	201
5.12 Evolución temporal de niveles y caudales durante el llenado del embalse NK. Nivel de embalse se indica en negro, mientras que caudal ingresante de año medio Q_{50} se presenta en azul, caudal erogado por NK Q_{SNK} se grafica en morado, y caudal de salida del llenado Q_{SJC} aparece en naranja	202

5.13 Hidrogramas salientes de JC durante el llenado de su embalse, para distintas fechas de inicio de llenado. A modo de referencia, en línea discontinua se presenta el caudal mínimo ambiental Q_{H1}	202
5.14 Hidrogramas salientes de JC durante el llenado del embalse NK, para distintas fechas de inicio de llenado. A modo de referencia, en línea discontinua se presenta el caudal mínimo ambiental Q_{H1}	203
5.15 Representación gráfica del hidrograma de referencia de caudales mínimos ambientales Q_{H1} , superpuesto a hidrogramas de distinta excedencia que lo componen	204
5.16 Hidrogramas resultantes del llenado del embalse JC. Caudal del río Santa Cruz que ingresa a JC (azul) y erogado hacia aguas abajo (rojo). Caudal con excedencia del 95 % y 100 % indicados como referencia (naranja y gris respectivamente) . . .	207
5.17 Esquema de la modelación del estuario durante el llenado del embalse JC	207
5.18 Llenado del embalse JC. Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación .	208
5.19 Llenado del embalse JC. Evolución temporal de la salinidad en las Estaciones 04 y 10 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación	210
5.20 Máximo avance del frente salino durante el llenado del embalse JC. Distribución espacial de salinidad el 30 de agosto cerca de pleamar, para el escenario de llenado (izq.) y en un año medio (der.)	210
5.21 Llenado del embalse JC. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de agosto, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)	211
5.22 Llenado del embalse JC. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de abril, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)	212
5.23 Llenado del embalse JC. Salinidad mensual desde abril hasta noviembre, en función de las estaciones de monitoreo, comparando llenado (rojo) y situación de base (azul). Las áreas comprenden los percentiles 5 % y 95 %, y las curvas indican la media	213
5.24 Llenado del embalse JC. Aumento de la salinidad en el sector ocupado por el Macá Tobiano durante el llenado en los meses de junio y julio, respecto de un año medio	214
5.25 Llenado del embalse JC. Superación de valores de salinidad en Estaciones 08 a 11 para el mes de junio (izq.) y julio (der.) para escenario de llenado (línea continua) y año medio (línea discontinua)	215
5.26 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de junio, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)	216

5.27 Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de julio, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)	216
5.28 Evolución temporal de la salinidad en la Estación 06 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación	217
5.29 Curvas de superación de salinidad en cercanías de toma de agua Puerto Santa Cruz (Estación 06): mes de agosto (izq.); mes de abril (der.)	217
5.30 Presencia de salinidad nula en cercanías de toma de agua Puerto Santa Cruz (Estación 06)	218
5.31 Comparación de tres escenarios: Q_{50} , llenado (identificado como E02), Q_{95} y Q_{100} . En la gráfica superior se representan las envolventes de los máximos y mínimos diarios de salinidad (destacando con rayas el área delimitada para un caudal medio), y debajo se presentan a modo de referencia los hidrogramas	219
5.32 Esquema de la modelación del estuario durante el llenado del embalse NK	219
5.33 Llenado del embalse NK. Hidrograma saliente del embalse NK Q_{SNK} y erogado en el embalse JC Q_{SJC} . Se contrastan con el ingresante al sistema de aprovechamientos en un año medio Q_{50} , y las referencias de Q_{100} y Q_{95}	220
5.34 Salinidad observada durante llenado NK-01 (azul) y en un año medio (naranja) en las Estaciones 04, 07 y 10. En la parte inferior, hidrogramas de río Santa Cruz a modo de referencia	221
5.35 Modificaciones de la salinidad durante la invernada del Macá Tobiano para hidrograma NK-01	222
5.36 Tiempo en que se mantiene salinidad nula en toma de agua de Puerto Santa Cruz, en año medio y durante el escenario del proyecto de llenado de NK	223
5.37 Contraste de envolventes de salinidad durante diversos escenarios en Estaciones 04, 07 y 10: llenado de NK, y valores correspondientes a año medio, Q_{100} y Q_{95} a modo de referencia. En la gráfica inferior, los hidrogramas sirven de referencia	224
5.38 Valores medios mensuales de distribución espacial de la salinidad para distintos escenarios: de izquierda a derecha año medio, e izquierda escenario de llenado NK. En rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km	226
5.39 Diferencia entre temperaturas medias observadas ante un incremento de 1 °C en río Santa Cruz en verano	227
5.40 Diferencia entre temperaturas medias observadas en verano e invierno	228

Índice de tablas

1.1 Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Car- los Kirchner	3
1.2 Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic .	8
2.1 Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2016 para Punta Quilla	19
2.2 Retraso y altura del pico de la onda de marea, durante dos relevamientos de su pasaje	20
2.3 Muestreos mensuales y caracterizaciones simultáneas. Los números indican du- ración en meses para cada sitio.	37
2.4 Resumen de resultados de campo y laboratorio de los muestreos mensuales . . .	41
2.5 Comparación de sólidos suspendidos en muestras de fondo y de media profundidad	44
2.6 Datos obtenidos en Puente Viejo durante los aforos de la Red HM-HA	57
2.7 Parámetros hidráulicos de la sección puente RN3, para caudales máximos y míni- mos aforados.	61
2.8 Parámetros hidráulicos de la sección Puente Viejo, para caudales máximos y mí- nimos aforados.	67
2.9 Caudales medios mensuales orientativos de hidrogramas de interés ambiental: Q_{50} , Q_{95} y Q_{100}	72
2.10 Resumen de la caracterización de los sólidos suspendidos en cada sitio, consig- nando su media μ y desviación estándar σ	74
2.11 Resumen de la caracterización de nutrientes: ortofosfato, fósforo y nitrógeno, con- signando su media μ y desviación estándar σ	94
2.12 Caracterización de conductividad y salinidad en los sitios monitoreados con OBS, indicando media μ y desviación σ	104
2.13 Temperatura media mensual del río Santa Cruz y variación diaria.	108
2.14 Temperatura media mensual del río Chico y variación diaria.	111
2.15 Temperatura media mensual de Punta Quilla y variación diaria	115
2.16 Resumen de la interpretación de datos, por sitio.	119
3.1 Temperatura media mensual del mar	134
3.2 Valores de rugosidad de un modelo Delft3D-Flexible Mesh (Delft3D-FM) y Adaptive Hydraulics (AdH). Reproducido de [29].	138
3.3 Parámetros de configuración del modelo	140

4.1	Tiempo de residencia del estuario según el criterio de Sanford, para distintos valores de caudal del río Santa Cruz.	156
4.2	Tiempo de vaciado según el método de Edinger, para distintos caudales del río Santa Cruz.	158
4.3	Tiempo de residencia calculado siguiendo el procedimiento de Wang, para distintos caudales del río Santa Cruz.	158
4.4	Variación de los parámetros de salinidad (salinidad media, mínima y máxima, en ppt) en las 10 estaciones de control a lo largo de un año	164
4.5	Caudales medios mensuales y, con 10 % y 90 % de probabilidad de superación medidos en Charles Fuhr	164
4.6	Valores de salinidad media, máxima y mínima para los períodos de abril-julio durante los años 2015-2019 en las Estaciones 05, 07 y 09	169
4.7	Caudales medios mensuales ingresantes al estuario desde el río Santa Cruz para un año medio	175
4.8	Comparativa entre escenario de referencia (año medio) y los correspondientes a excedencia 100 % y 95 %, indicando valores medios mensuales de caudal de río Santa Cruz y salinidad en Estación 07	186
5.1	Caudales mínimos ambientales mensuales	200
5.2	Caudales medios mensuales correspondientes al escenario de llenado del embalse JC	207
5.3	Llenado del embalse JC. Evolución de la salinidad en la Estación 07 tras interrupciones del llenado	209
5.4	Llenado del embalse JC. Evolución de la salinidad en las Estaciones 04 y 10 tras interrupciones del llenado	211
5.5	Comparativa entre escenario de referencia (año medio) y los correspondientes a escenarios de llenado del embalse NK, indicando valores medios mensuales de caudal de río Santa Cruz y salinidad en Estación 07. NM = "no modelado" debido a que no se esperan afectaciones	225

CAPÍTULO 1

Introducción

El trabajo presentado en este libro tiene su origen en el análisis de los potenciales impactos del Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Santa Cruz —Presas Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (NK, ex Cóndor Cliff) y Gdor. Jorge Cepernic (JC, ex La Barrancosa)— sobre el estuario de los ríos Santa Cruz y Chico.

El objetivo de esta publicación es brindar información sobre la dinámica del estuario del río Santa Cruz, tanto en condiciones naturales como durante el proceso de llenado de los embalses, con el fin de aportar herramientas que contribuyan a la toma de decisiones orientadas a mitigar los efectos de las obras.

Este primer capítulo se dedica a presentar el contexto general en el que se enmarca el estudio: se describen las principales características del proyecto hidroeléctrico, una visión general del estuario y el enfoque conceptual adoptado para analizar las potenciales afectaciones. Este diagnóstico preliminar busca establecer el marco en el cual se simularán distintos escenarios vinculados tanto al régimen natural como al manejo antrópico del agua.

1.1. Descripción general de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz

Las presas Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner (Cóndor Cliff) y Gdor. Jorge Cepernic (La Barrancosa) se encuentran ubicadas en la Patagonia Argentina, en la provincia de Santa Cruz. Ambas obras, emplazadas sobre el curso del río Santa Cruz, constituyen los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz cuya finalidad es la generación de energía. En la Figura 1.1 se observa la ubicación de las presas, la hidrografía de la zona y las localidades más cercanas.

El aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner¹ está situado a una distancia de 127 km de la salida del lago Argentino, en coordenadas 50°12' 45" Sur y 70°47' 1" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de El Calafate. La obra está conformada por una presa de escollera con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba (CFRD), una central hidroeléctrica equipada con 5 turbinas Francis, descargadores de fondo y medio fondo, y un aliviadero de superficie regulado por compuertas. En la Figura 1.2 se presenta un esquema general del aprovechamiento y en la Figura 1.3 a la Figura 1.5 se pueden observar las secciones

¹El aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner se encuentra en un proceso de revisión. Algunos de los componentes que conforman la obra pueden verse modificados.

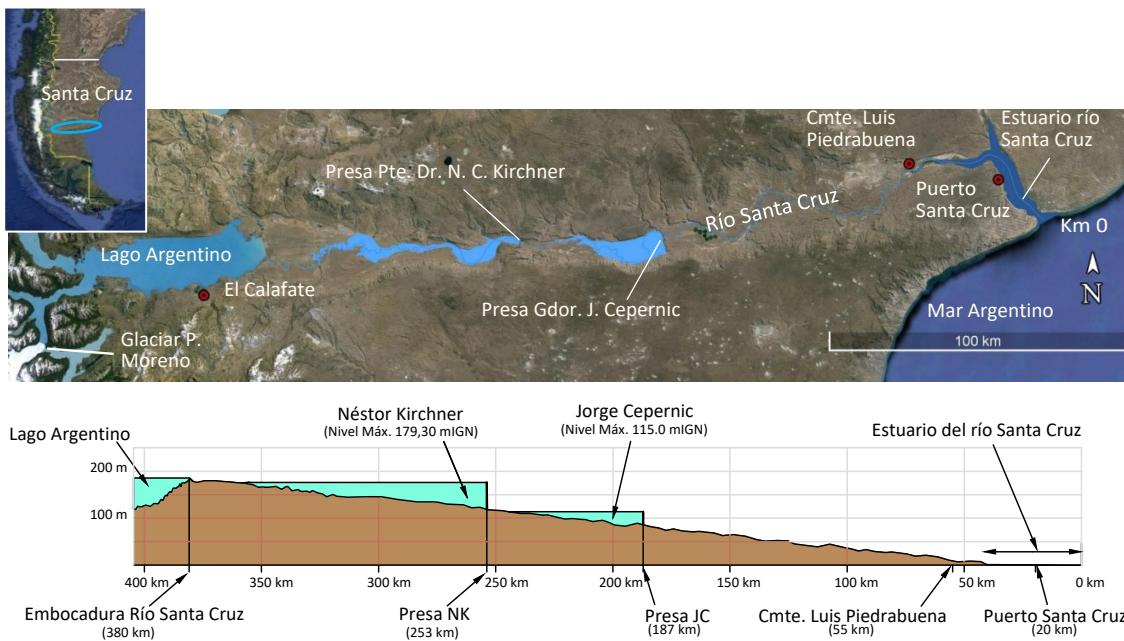


Figura 1.1: Ubicación de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz, presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y presa Gdor. Jorge Cepernic: vista en planta (superior); perfil longitudinal (inferior)

típicas de los principales componentes de la obra. La Tabla 1.1 resume las características del aprovechamiento Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner.

El aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic se encuentra localizado aguas abajo del cierre NK a una distancia de 70 km, en coordenadas $50^{\circ}11' 9''$ Sur y $70^{\circ}7' 29''$ Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de Comandante Luis Piedrabuena. La obra está conformada por una presa de escollera con pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba (CFRD), una central hidroeléctrica equipada con 3 turbinas Kaplan, descargadores de fondo y un aliviadero de superficie regulado por compuertas. En la Figura 1.6 se presenta un esquema general del aprovechamiento y de la Figura 1.7 a la Figura 1.9 se pueden observar las secciones típicas de los principales componentes de la obra. La Tabla 1.2 resume las características del aprovechamiento Gdor. Jorge Cepernic.

Tabla 1.1: Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

Embalse	Caudal medio anual (módulo del río)	720 m ³ /s
	Caudal crecida decamilenaria	4160 m ³ /s
	Caudal máximo de crecida registrado	2520 m ³ /s
	Volumen del embalse a nivel máximo normal	5800 Hm ³
Presa	Tipo	CFRD
	Altura máxima	71.6 m
	Longitud/ancho	1850 m/10.95 m
	Cota de coronamiento	180.6 mIGN
	Cota de parapeto rompeolas	181.8 mIGN
	Cota máxima extraordinaria	179.3 mIGN
	Cota máxima normal	176.5 mIGN
Vertedero	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen izquierda
	Tipo	Recto
	Caudal máximo de diseño	4160 m ³ /s
	Ancho total	60 m
	Compuertas	Cantidad
		4
		Dimensiones (alto x ancho)
	Órgano de disipación	Cuenco disipador
	Cota de cresta	167.5 mIGN
Descargador de medio fondo	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen izquierda
	Número de conductos	4
	Órgano de cierre	Cantidad
		4
		Tipo
		Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)
Descargador de fondo	Caudal máximo unitario	350 m ³ /s
	Cota de umbral del conducto	150 mIGN
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen izquierda
	Número de conductos	4
	Órgano de cierre	Cantidad
		4
		Tipo
Central	Órgano de cierre de emergencia	Compuerta radial
		Dimensiones (alto x ancho)
		4 m x 3 m
	Cantidad	4
		Tipo
		Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)
	Caudal máximo unitario	350 m ³ /s
	Cota de umbral del conducto	122 mIGN
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen izquierda
	Caracterización de la central	Punta
	Cantidad de turbinas	5
	Tipo de turbinas	Francis
	Caudal nominal turbinado	365 m ³ /s
	Caudal máximo de operación	365 m ³ /s
	Caudal mínimo de operación	242 m ³ /s
	Salto de diseño	57.9 m
	Salto máximo de operación	61.4 m
	Salto mínimo de operación	49.6
	Potencia instalada	950 MW
	Energía media anual, Escenarios 1, 2 y 3 [GWH]	3376 - 3403 – 3465
	Velocidad de rotación de turbina	100 rpm
	Número de álabes del rotor de turbina	13
	Número de álabes del distribuidor	24
	Center line del rotor de turbina	109 m
	Altura del álarbe del distribuidor	2068 mm
	Diámetro superior (D_1)	6300 mm
	Diámetro inferior (D_2)	6682 mm
	Organo de cierre	Compuerta plana
	Potencia nominal de generadores	190 MW

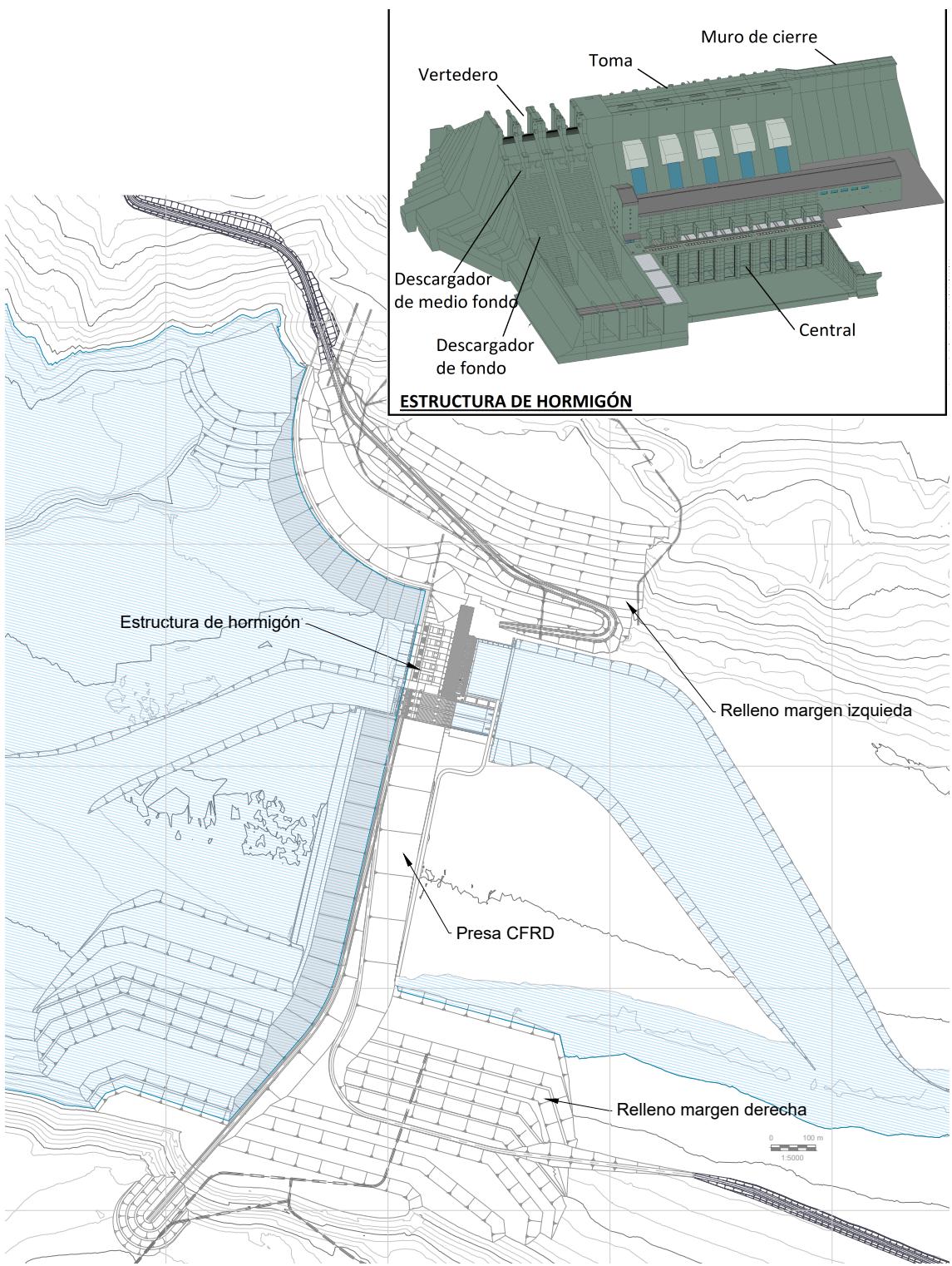


Figura 1.2: Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

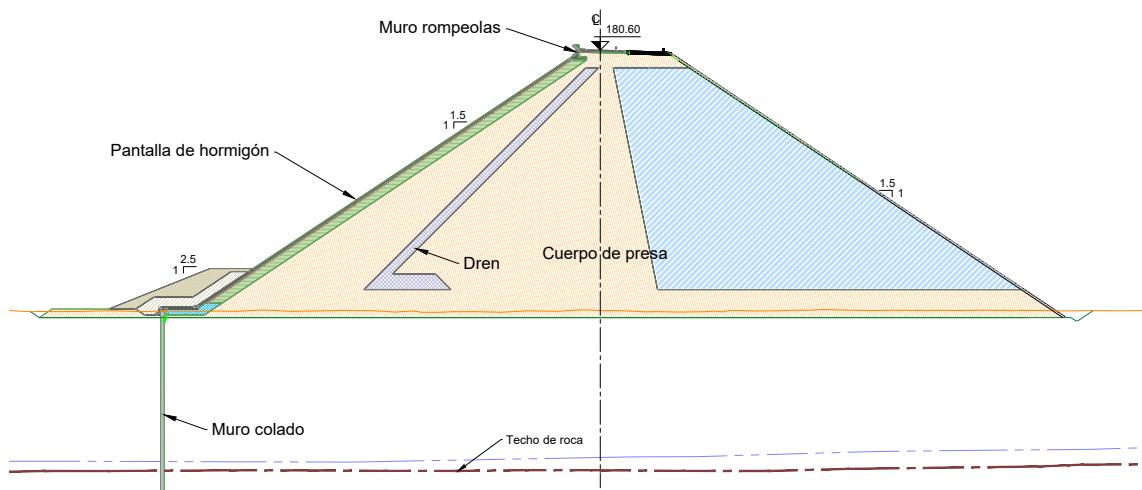


Figura 1.3: Sección típica de la presa Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

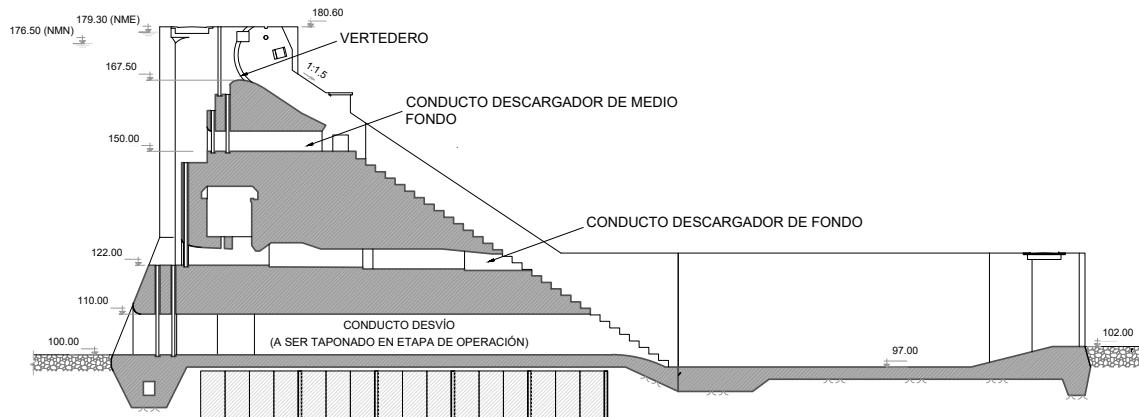


Figura 1.4: Sección típica de la obra de descarga (vertedero/descargadores de fondo y medio fondo/desvío) - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

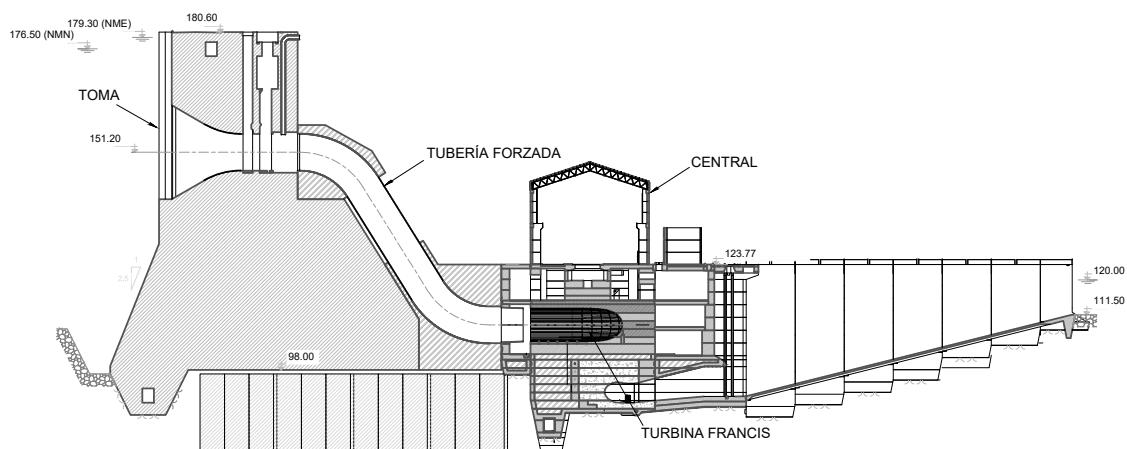


Figura 1.5: Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

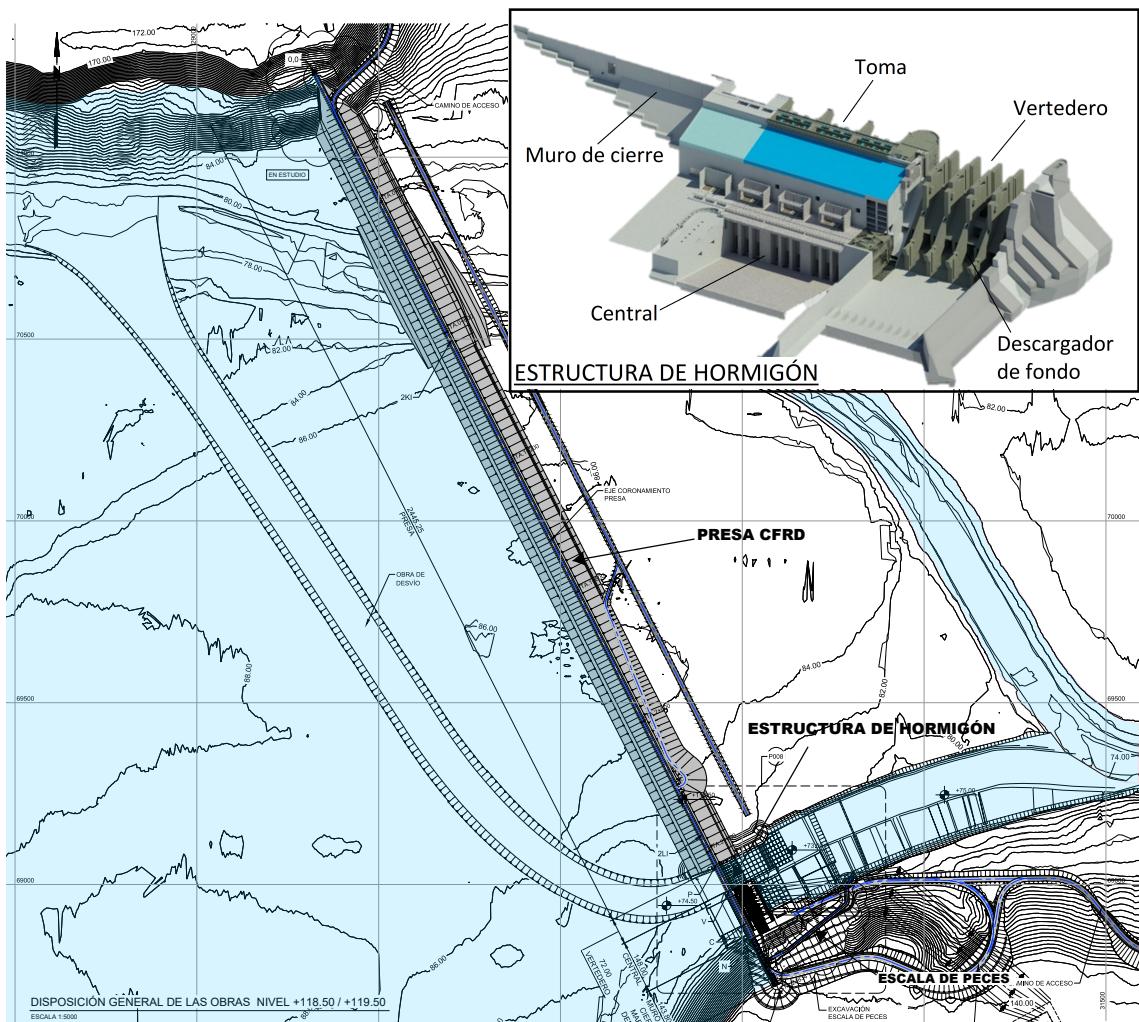


Figura 1.6: Esquema general – Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic

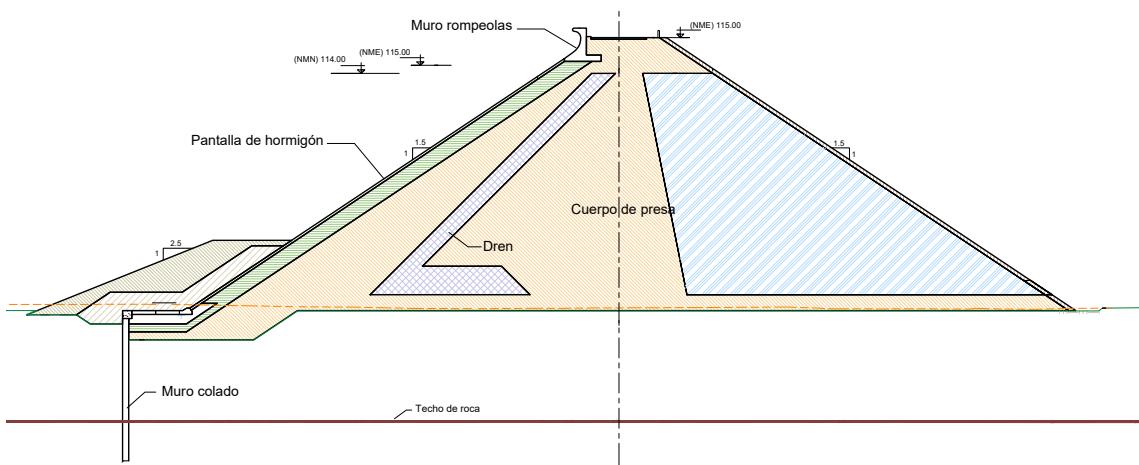


Figura 1.7: Sección típica de la presa Gdor. Jorge Cepernic

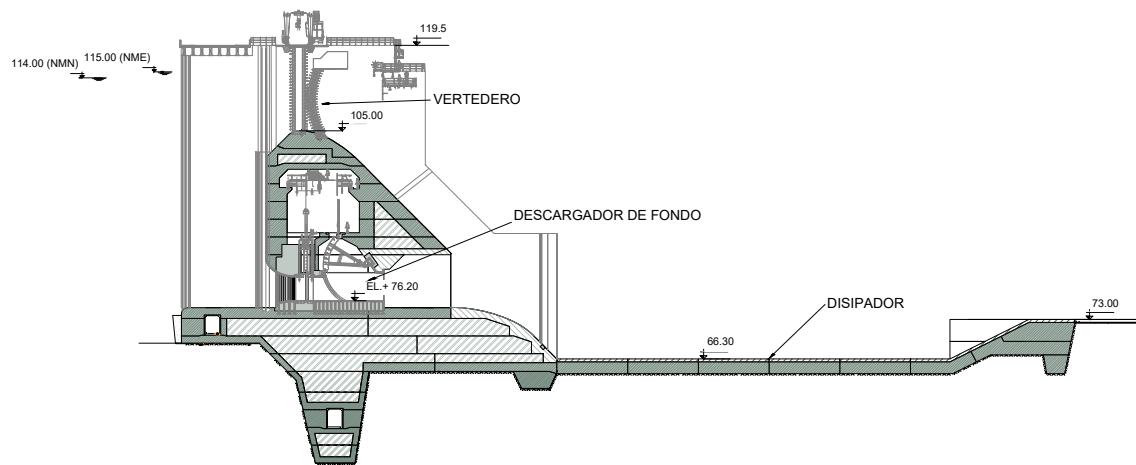


Figura 1.8: Sección típica de la obra de descarga (vertedero y descargadores de fondo) - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic

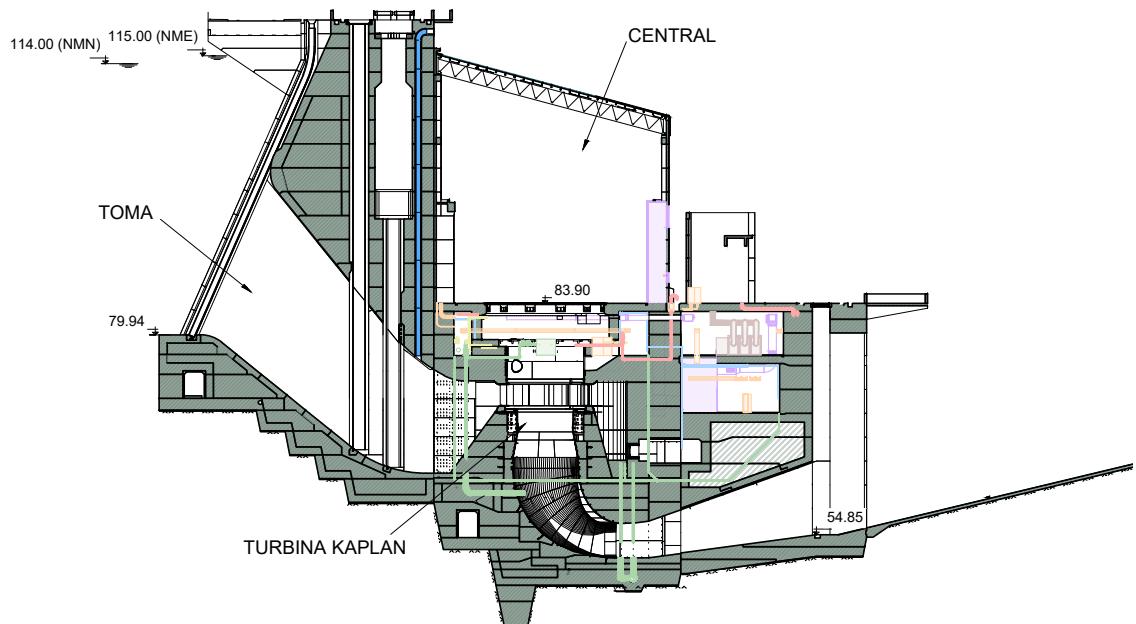


Figura 1.9: Sección típica de la central - Aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic

Tabla 1.2: Características principales del aprovechamiento hidroeléctrico Gdor. Jorge Cepernic

Embalse	Caudal medio anual (módulo del río)	720 m ³ /s	
	Caudal crecida decamilenaria	4160 m ³ /s	
	Caudal máximo de crecida registrado	2520 m ³ /s	
	Volumen del embalse a nivel máximo normal	3000 Hm ³	
Presa	Tipo	CFRD	
	Altura máxima	45.5 m	
	Longitud/ancho	2440 m/9.20 m	
	Cota de coronamiento	118.5 mIGN	
	Cota de parapeto rompeolas	119.7 mIGN	
	Cota máxima extraordinaria	115.0 mIGN	
Vertedero	Cota máxima normal	114.0 mIGN	
	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen derecha	
	Tipo	Recto	
	Caudal máximo de diseño	4160 m ³ /s	
	Ancho total	72 m	
	Compuertas	Cantidad	6
		Tipo	Radial
		Dimensiones (alto x ancho)	10.62 m x 12 m
	Órgano de disipación	Cuenco disipador	
	Cota de cresta	105 mIGN	
Descargador de fondo	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen derecha	
	Número de conductos	4	
	Órgano de cierre	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta radial
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
	Órgano de cierre de emergencia	Cantidad	4
		Tipo	Compuerta plana
		Dimensiones (alto x ancho)	4 m x 3 m
	Caudal máximo unitario	296 m ³ /s	
	Cota de umbral del conducto	76.2 mIGN	
Central	Ubicación respecto de presa (hacia aguas abajo)	Margen derecha	
	Caracterización de la central	Base	
	Cantidad de turbinas	3	
	Tipo de turbinas	Kaplan	
	Caudal nominal turbinado	382 m ³ /s	
	Caudal máximo de operación	394 m ³ /s	
	Caudal mínimo de operación	133 m ³ /s	
	Salto de diseño	34.4 m	
	Salto máximo de operación	36 m	
	Salto mínimo de operación	33.3 m	
	Potencia instalada	360 MW	
	Energía media anual	1961 GWh	
	Velocidad de rotación de turbina	107.1 rpm	
	Número de álabes del rotor de turbina	6	
	Número de álabes del distribuidor	24	
	Center line del rotor de turbina	69.3 m	
	Altura del álate del distribuidor	2625 mm	
	Diámetro del rodete	7000 mm	
	Órgano de cierre	Compuerta plana	
	Potencia nominal de generadores	120 MW	

1.2. Descripción general del estuario del río Santa Cruz

El río Santa Cruz recorre la Patagonia de oeste a este, con una traza de casi 400 km de longitud. En la zona de su desembocadura en el mar Argentino forma un amplio estuario, de unos 30 km de largo y más de 3 km de ancho, que se encuentra sujeto a mareas de gran amplitud debido a las latitudes en que se implanta. Estas mareas astronómicas son responsables de notables variaciones semidiurnas de niveles, corrientes y salinidad del estuario, evidenciándose amplias zonas de mojado y secado, tal como se observa en la Figura 1.10.

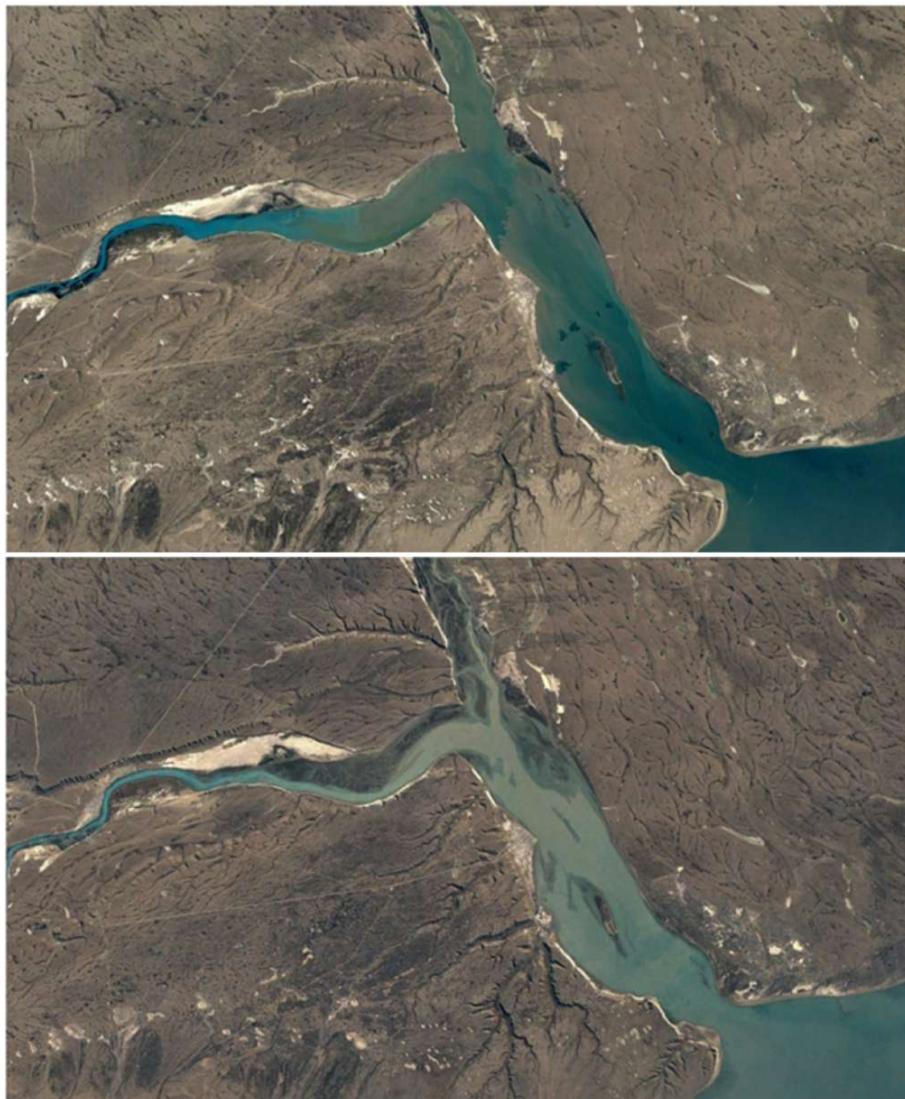


Figura 1.10: Fotografías satelitales del estuario, en que se aprecian las amplias variaciones de niveles y zonas de mojado y secado: pleamar arriba, bajamar abajo. Reproducida de Google Earth

En el mismo también desemboca desde el norte el río Chico, curso de agua sustancialmente diferente puesto que con un caudal módulo del orden de $20 \text{ m}^3/\text{s}$, presenta un régimen hidrológico condicionado por las lluvias y una mayor carga de sedimentos, en contraste con el caudal medio de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas prácticamente libres de sedimentos que el río Santa Cruz trae desde el campo glaciar.

1.2.1. Medio antrópico

En el entorno del estuario se emplazan dos centros urbanos, indicados en la Figura 1.11: Comandante Luis Piedrabuena, ciudad de unos 6500 habitantes ubicada en margen izquierda del tramo final del río Santa Cruz frente a Isla Pavón, y Puerto Santa Cruz, ciudad de unos 4500 habitantes ubicada en la margen derecha del estuario. La distancia entre ambas es de 36 km, y cuentan con sendas tomas de agua que las abastecen de agua potable obtenida del río Santa Cruz. También debe mencionarse la presencia del puerto de aguas profundas de Punta Quilla, ubicado en la margen sur de la ría a unos 17 km de Puerto Santa Cruz y a unos 4.5 km de la desembocadura del estuario en el Mar Argentino.

Otra infraestructura de interés a la que se hace referencia en esta publicación está dada por el puente de Ruta Nacional 3 (RN3) sobre río Chico, así como las pilas correspondientes a un antiguo puente tipo Bailey (hoy inexistente) ubicado unos 10 km aguas arriba del puente de RN3 sobre río Santa Cruz. Finalmente, se identifica el emplazamiento de un antiguo frigorífico.

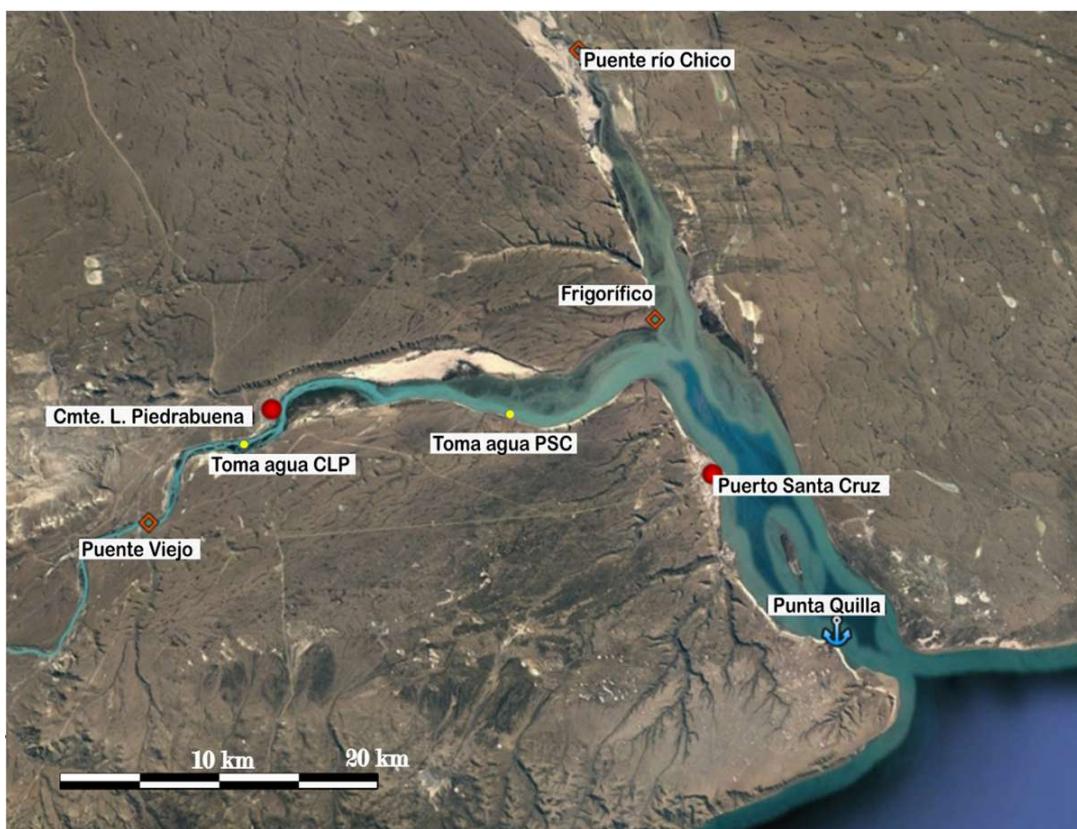


Figura 1.11: Infraestructura en las márgenes del río Santa Cruz: ciudades de Comandante Luis Piedrabuena y Puerto Santa Cruz, puerto de Punta Quilla, puente sobre río Chico (RN3), antiguo puente sobre río Santa Cruz, frigorífico y tomas de agua de ambas localidades. Editada a partir de imagen de Google Earth

1.2.2. Entorno natural

La Figura 1.12 ilustra el ambiente natural fotografiado en distintos momentos de la marea. Se aprecia en el tramo final del estuario la existencia de sarcocornias (plantas suculentas tolerantes

a salinidad de costas marinas), que son continuamente sometidas a ciclos de mojado y seco.

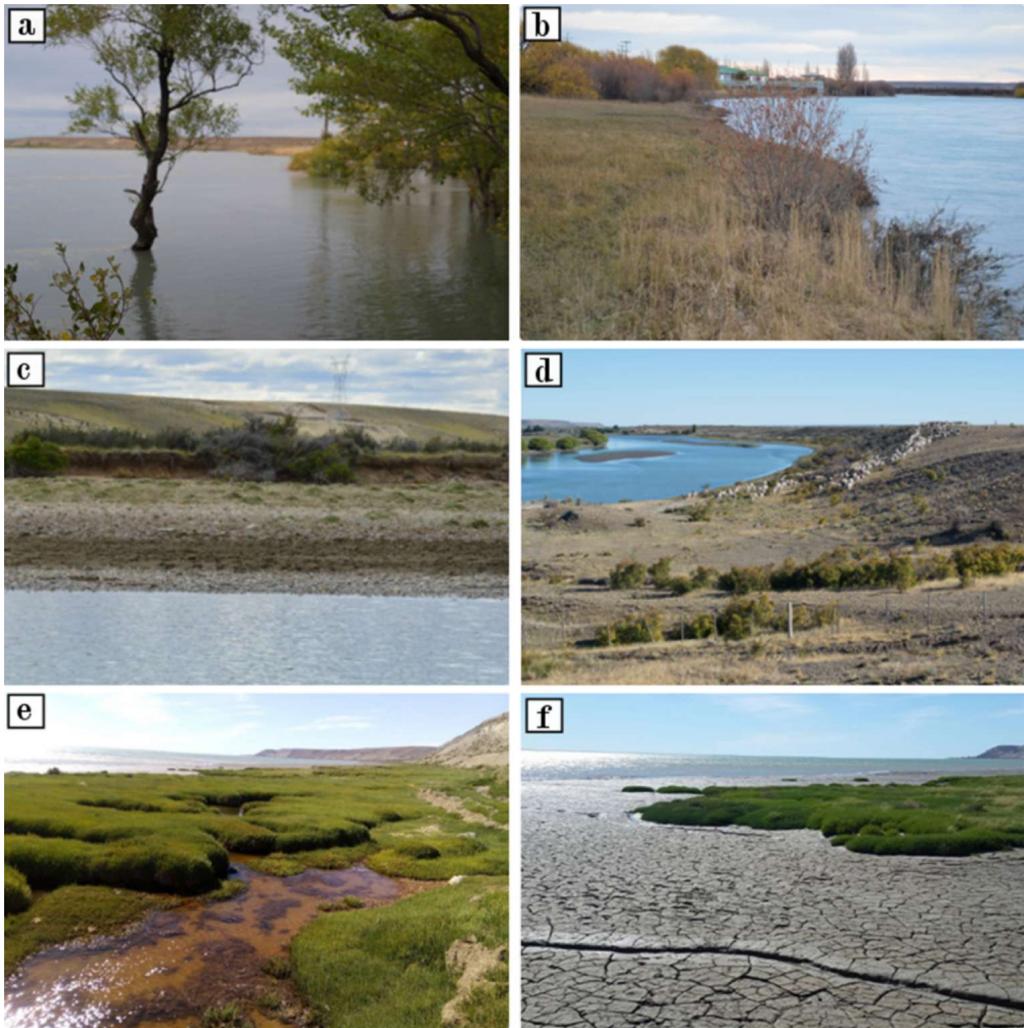


Figura 1.12: Fotografías del medio natural. a. Puente viejo durante pleamar. b. Isla Pavón durante marea media. c. Inmediaciones de Piedrabuena durante bajamar. d. Sector puente sobre río Chico. e y f. Sarcocornias en cercanías de Punta Quilla durante marea baja

1.2.3. Biota

La línea de base ambiental elaborada por Serman y Asociados en 2016 [23] indica que la diversidad íctica autóctona en el río Santa Cruz es relativamente pobre en comparación con otros ríos de la Patagonia y que se encuentran especies introducidas de interés económico. Existen escasos reptiles y anfibios, y no se prevería un impacto apreciable de las obras en las especies de mamíferos. Sí es importante destacar que la diversidad de avifauna es algo mayor en la zona de la desembocadura, constituyendo el estuario un hábitat para aves residentes y migradoras.

Entre las especies ícticas que habitan en el estuario, destacan por su interés el salmón Chinook, la trucha Steelhead y el róbalo, que motivan la celebración de eventos deportivos en las localidades vecinas de Puerto Santa Cruz y Comandante Luis Piedrabuena. Las dos primeras tienen hábitos migratorios remontando el río, mientras que el róbalo se mantiene en agua salada, y habiéndose registrado su presencia en cercanías de Piedrabuena, da una pauta del gran alcance

del frente salino.

Entre las numerosas aves pueden citarse pingüinos, la gallineta chica, el cauquén colorado y el Macá Tobiano, cuya conservación ha impulsado la ejecución de relevamientos participativos de aves durante el desarrollo del proyecto de las presas (Figura 1.13). El Macá Tobiano es endémico de la Patagonia Austral y ha sido adoptado como símbolo de la conservación en Patagonia. Habita lagos y lagunas de las mesetas de altura de la provincia de Santa Cruz, y migra hacia la costa atlántica en invierno, a los estuarios de los ríos Coyle, Gallegos y Chico-Santa Cruz. Su estado de conservación se considera “en peligro crítico”, siendo una especie amenazada por el cambio climático y la presencia de especies invasoras y exóticas en su zona reproductiva [2]. Por ello, la preservación del hábitat de invernada del Macá Tobiano es una de las directrices para toma de decisiones durante el llenado de los embalses. Específicamente, se han efectuado avistajes en Punta Quilla, Isla Leones, Punta Reparo, Ca. Misionero, Frigorífico, y Piedrabuena, sitios identificados en la Figura 1.14.



Figura 1.13: Volante para difusión de relevamiento participativo de aves

El estuario de los ríos Santa Cruz y Chico está influenciado por mareas de gran amplitud, propias de las latitudes australes en las que se encuentra. Este entorno conforma un paisaje singular, caracterizado por una notable riqueza biológica. Entre la gran diversidad de aves y peces que habitan la zona, se destaca el Macá Tobiano, una especie endémica y en peligro de extinción que utiliza el estuario como sitio de invernada. Además, las poblaciones de Comandante Luis Piedrabuena y Puerto Santa Cruz dependen del aporte de agua dulce del tramo final del río Santa Cruz —que interactúa activamente con la marea— para el abastecimiento de agua potable.

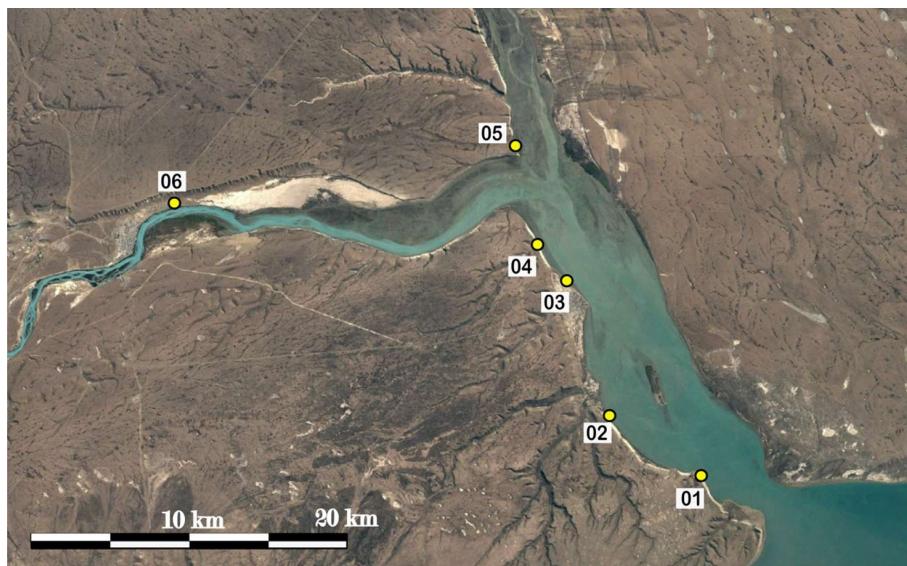


Figura 1.14: Sitios de avistaje del Macá Tobiano: 01. Punta Quilla, 02. Isla Leones, 03. Punta Reparo, 04. Ca. Misionero, 05. Frigorífico, 06. Piedrabuena

1.3. Vinculación del estuario con los aprovechamientos del río Santa Cruz

Por encontrarse el estuario aguas abajo de las presas, es posible que los cambios introducidos por las mismas resulten en modificaciones en este ambiente durante las distintas etapas de la vida de las obras.

1.3.1. El estuario en las etapas principales de la vida útil de las presas

En la etapa de construcción de las presas y desvío del río, el régimen de caudales ingresantes al estuario no sufrirá apartamientos respecto de la situación natural, por lo cual no se esperan modificaciones significativas en el ambiente del estuario. Si bien es posible que los movimientos de tierra aporten algún material en suspensión adicional al río, este efecto excede a los intereses del presente estudio.

La etapa de explotación de las obras, teniendo en cuenta la operación de base de JC respetando una erogación acorde a los caudales medidos diariamente en la cabecera del río Santa Cruz, tampoco introduciría modificaciones en el régimen hidrológico. Sólo hay un parámetro que se modificaría: el caudal, pues el balance entre precipitaciones y evaporaciones en el espejo del agua del embalse es negativo, ya que evapora una cantidad de agua mayor que la que precipita; no obstante corresponde a un orden de magnitud inferior al 1 % [18].

Es posible que la generación de los cuerpos líticos de los embalses modifique la calidad del agua en parámetros tales como temperatura o turbidez de los mismos, pero teniendo en cuenta la existencia del Lago Argentino en las nacientes, estos efectos serían de menor magnitud que potenciales afectaciones al régimen hidrológico del río.

En medio de ambas instancias, la etapa de llenado de los embalses, aunque es un evento temporal, tiene el potencial de ser la que resulte en las afectaciones más significativas al estuario, en virtud de la modificación del régimen hidrológico que supone en el tramo final del río. La acumulación de agua para generar los lagos implica que el caudal erogado aguas abajo de las represas debe ser, durante este período, menor que el registrado en el río en Charles Fuhr (estación aforadora situada en las nacientes). Consecuentemente, es necesario definir un régimen de caudales ambientales que compatibilice el interés antrópico de acumular agua para almacenar energía de posición y comenzar a operar con el objetivo de despachar potencias con aportar al río un caudal que permita preservar los ecosistemas en el tramo final del río y estuario. La definición de los caudales ambientales a erogar durante el llenado de los embalses motivan el estudio desarrollado en la presente publicación.

Aunque transitoria, la etapa de llenado de los embalses puede generar modificaciones en el estuario, al implicar una reducción en los caudales que llegan al tramo final del río. Esta disminución altera el aporte de agua dulce que sostiene los ecosistemas del área y abastece a las poblaciones costeras.

1.3.2. Criterios para definir el hidrograma de llenado

En cuanto a los criterios para definir el hidrograma de llenado, se hace notar al lector que el paradigma sobre el que se basa la selección del mismo consiste en compatibilizar desde la etapa de proyecto el interés antrópico con los requerimientos ecológicos, persiguiendo la sustentabilidad de los aprovechamientos.

Para la toma de decisiones, se ha supuesto que el río aporta un caudal dado por la media de las observaciones históricas. Es decir que el hidrograma sintético² de caudal del río Santa Cruz es el resultante de contemplar diariamente el aporte superado en un 50 % del tiempo en los registros de cada día del año. En cuanto a la propuesta de caudales a erogar hacia aguas abajo durante el llenado, su propuesta y evaluación contempla los siguientes aspectos:

- **La fecha en que se alcanza la cota objetivo del embalse.** Este aspecto atiende a que el objetivo de almacenar el agua es iniciar el despacho de potencia lo antes posible. Para la instancia anterior de inicio de generación al alcanzar el nivel mínimo, también es de interés evaluar el volumen de energía generado durante ese intervalo de tiempo.
- **La capacidad de erogación de los órganos de descarga durante el llenado.** Si bien no se profundiza en esta publicación, este cálculo se efectúa a partir de un modelo de operación de embalse (MOE). El mismo se sustenta en un balance de masas, que considera caudales ingresantes, salientes y volúmenes acumulados en los embalses que inciden en

²Un hidrograma sintético de excedencia de ocurrencia se elabora a partir del análisis estadístico de datos históricos, identificando para cada día del año el caudal correspondiente a un nivel de excedencia específico. Este método permite construir una representación anual del caudal con base en probabilidades de ocurrencia.

la evolución de los niveles de los lagos y saltos disponibles para la generación.

- **El caudal ambiental del tramo final del río Santa Cruz.** La Universidad de Valladolid [9] lo trata a partir de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Ésta ofrece una perspectiva integradora de los componentes y los procesos ambientales. La misma evalúa los efectos de cambios incrementales de caudal en la estructura del cauce y en la disponibilidad de hábitat físico utilizable, combinando modelos hidráulicos y biológicos con datos hidrológicos. Los resultados espaciales y temporales indican el grado de aproximación con que el río mantendrá su integridad ecológica. Para su implementación se aplicó el modelo PHABSIM, recurriendo a funciones de preferencia de hábitat vinculadas a las variables hidráulicas de profundidad, velocidad, y sustrato. El estudio concluyó que caudales con una permanencia de entre 95 % y 100 % permiten mantener niveles suficientes de hábitat en el río.
- **La minimización de afectaciones en el estuario del río Santa Cruz.** Se selecciona la salinidad como principal variable susceptible de modificación para caracterizar el medio, contemplando que la modificación de los caudales ingresantes desde río Santa Cruz implica un menor aporte de agua dulce. Considerando la aplicación del principio precautorio durante la invernada del Macá Tobiano, se impone la premisa de pausar el llenado durante los meses de junio y julio. Adicionalmente, se propone el estudio detallado de su evolución espacio-temporal ante diferentes hidrogramas de llenado.

Este último aspecto es el tratado en detalle en la presente publicación.

Los criterios de maximizar la generación energética y preservar el hábitat del tramo final del río Santa Cruz han sido respetados al momento de proponer los hidrogramas de llenado estudiados en el presente trabajo.

1.3.3. Metodología para caracterizar afectaciones potenciales

La operación de llenado de los embalses producirá una reducción temporal de los caudales del río Santa Cruz, lo cual *podría* modificar la dinámica del estuario durante esa etapa. Con el fin de analizar su influencia en el comportamiento hidrodinámico del estuario , se consideran dos grandes grupos de escenarios:

- El estado natural previo a la construcción de los aprovechamientos, que constituye el escenario de referencia. Su diagnóstico se aborda tanto mediante mediciones en campo como a través de modelaciones numéricas, lo que permite comprender y cuantificar su hidrodinámica.
- La reducción temporal de caudales durante el llenado de los embalses, evaluada mediante simulaciones numéricas que permiten anticipar su impacto en la dinámica del sistema.

Para ambos grupos de escenarios —sin y con obras— se realizan simulaciones del comportamiento hidrodinámico utilizando el software Delft3D, desarrollado por Deltares y ampliamente empleado en el estudio de zonas costeras. En ambos casos se consideran las mismas condiciones de entrada para el río Chico y para las mareas, que no varían entre escenarios aunque sí fluctúan en el tiempo. La diferencia entre variantes radica en el caudal del río Santa Cruz, cuyo aporte natural se ve reducido durante el llenado del embalse.

1.4. Estructura de la publicación

La presente publicación cubre las tareas que permiten analizar los impactos que las presas tendrán en el estuario del río Santa Cruz, identificando como herramienta idónea la modelación con el software Delft3D. En primer lugar se recopila y describe la información de base (mediciones recientes en campo, series históricas, entre otras) que permite caracterizar al estuario y su dinámica, y que servirá para alimentar y calibrar el modelo numérico. A continuación se describe el modelo desarrollado en Delft3D y la calibración del mismo, que garantiza que los resultados obtenidos con las simulaciones reflejen fielmente la dinámica del estuario. Seguidamente se usa el modelo para valorar la situación del estuario sin obras, describiendo el efecto que tienen en su dinámica las fluctuaciones de sus principales forzantes, es decir las mareas y los caudales del río Santa Cruz. Finalmente, se presentan escenarios considerando el llenado de las presas, que permiten cuantificar el efecto que las obras tendrán en la dinámica del estuario.

De entre las etapas principales de vida útil de las presas (construcción, llenado y operación), el llenado de los embalses podría modificar de forma transitoria la dinámica del estuario, debido a la reducción temporal de caudales durante ese proceso. Definir un régimen de caudales ambientales resulta clave para compatibilizar el aprovechamiento hidroeléctrico con la preservación de las condiciones en el río y su estuario.

CAPÍTULO 2

Caracterización del medio físico

Las mediciones en campo son fundamentales en primera instancia para formar un modelo conceptual del funcionamiento del estuario. Identificar los fenómenos más relevantes y esbozar la interrelación entre variables físicas permite delimitar el alcance del modelo a formular y los parámetros que debe contemplar.

A continuación, el tratamiento sistemático de la información de campo, su articulación y la cuantificación de los parámetros dependientes e independientes constituyen la información que sustenta el desarrollo, calibración y validación del modelo numérico que permitirá la consecución de los objetivos de esta publicación.

Cabe mencionar que el avance en el conocimiento del medio físico aquí reportado fue avanzando a la par que el desarrollo del modelo numérico, de manera que el diálogo entre ambas metodologías permitió ajustar el diseño del muestreo según los hallazgos y requerimientos del modelo numérico, a la par que éste era calibrado.

2.1. Definición del área bajo estudio

A lo largo de los últimos 50 años, se han dado muchas definiciones de estuario. Las mismas a veces se contradicen y abarcan zonas muy variadas, que van desde la desembocadura del río hasta la plataforma continental misma [22]. Dado que el objetivo de este trabajo es analizar el impacto de la construcción y puesta en funcionamiento de las represas, se abarcará desde el último punto aguas arriba del río Santa Cruz en el que las mareas tienen influencia, hasta algunos kilómetros afuera de la boca del estuario. Debido a la gran amplitud de la marea en la zona de Punta Quilla (la cual alcanza amplitudes de hasta 12.50 m), la zona de influencia de la misma en el río Santa Cruz se extiende varios kilómetros aguas arriba de la desembocadura. En un relevamiento se determinó que la influencia de la marea era prácticamente nula a la altura del Puente Viejo (puente de la antigua traza de la Ruta Nacional 3), donde el río presenta unos 300 m de ancho. A partir de esto, se delimitó como área de trabajo a la zona comprendida entre la desembocadura del estuario y un tramo del río Santa Cruz hasta el Puente Viejo (ver ubicaciones en Figura 1.11). En consecuencia, la zona a estudiar se encuentra más de 110 km aguas abajo del eje de Jorge Cépernic, abarcando 42 km del río Santa Cruz, su confluencia con el río Chico y una zona de estuario de 27 km de largo que presenta 3 km de ancho en su desembocadura en el océano Atlántico.

2.2. Relevamientos efectuados

La caracterización del medio físico fue abordada en distintas campañas, algunas exclusivas del estuario y otras que abarcaron en forma integral al río Santa Cruz:

1. Relevamiento de niveles en varios sitios del estuario durante pasaje de una onda de marea en dos ocasiones.
2. Visualización con dron de las áreas de mojado y secado.
3. Relevamientos batimétricos del río Santa Cruz y su estuario, incluyendo secciones transversales, *thalweg* y márgenes.
4. Campañas de toma de muestras de lecho, en *thalweg* y en zonas de mojado y secado. El lecho fue igualmente analizado como parte de la caracterización de una sección llevada a cabo en el marco de estudios para la determinación del caudal ecológico.
5. Determinación de perfiles verticales de temperatura, salinidad y turbidez en distintos sitios.
6. Instalación de estaciones de la red hidrometeorológica, cuyos parámetros incluyen temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica, radiación solar, dirección y velocidad del viento, con registros cada 6 horas según proyecto.
7. Campañas mensuales de caracterización del estuario del río Santa Cruz a lo largo de 20 meses: determinación mensual de sólidos suspendidos totales (SST) y nutrientes.
8. Monitoreo continuo del estuario del río Santa Cruz a lo largo de 20 meses: medición de niveles, temperatura, turbidez y salinidad.
9. Aforos líquidos y sólidos, acompañados de determinación granulométrica de los sólidos suspendidos totales, efectuados con periodicidad mensual.
10. Relevamientos limnológicos estacionales.

En las siguientes secciones se expone la metodología seguida en cada actividad.

2.2.1. Caracterización de ondas de marea

Las mareas en el estuario del río Santa Cruz presentan un régimen semidiurno, caracterizado por grandes amplitudes, las cuales se deben a la posición global respecto a las ondas de marea y a las amplificaciones que sufren las ondas por la geomorfología local. Las ondas semidiurnas principales de marea que afectan nuestra plataforma se propagan en la cuenca del Atlántico Sur alrededor de dos puntos anfidrómicos (como se denomina a los puntos de marea nula), situados uno entre 30 °y 40 °S y entre 20 °y 30 °W, con rotación anticiclónica, y el otro, ciclónico, aproximadamente en 60 °S y el meridiano de Greenwich. Asimismo, la presencia de las Islas

Malvinas genera una modificación en la propagación de las ondas de marea hacia el continente. Como puertos de referencia para la determinación de las mareas, el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) presenta las mediciones de mareas correspondientes a Punta Quilla. Los datos proporcionados por el SHN [26] se resumen en Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2016 para Punta Quilla

Altura sobre el plano de reducción correspondientes a la predicción 2016				Amplitud	
Pleamar		Bajamar		Máxima	Media
Máxima	Media	Más baja	Media		
12.69	10.36	0.05	2.25	12.63	8.11

La marea astronómica constituye una de las principales forzantes del sistema bajo estudio, en cuanto a que la variación de niveles inducida en el mar condiciona niveles y corrientes (y fenómenos de transporte que de ellos dependen) que tienen lugar en el estuario. La marea es un fenómeno global y ésta es la manera en que puede ser tratada más rigurosamente. Los modelos globales de marea consideran el efecto de todos los forzantes astronómicos y representan su propagación alrededor de la Tierra. Para el presente trabajo los niveles de mareas son obtenidos a partir de la aplicación de un modelo de generación global, el cual presenta calibraciones y validaciones para zonas costeras. El modelo del cual se extrajeron los datos de componentes de marea es el OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse solution TPXO [12]. En él, las mareas son descriptas a través de trece componentes (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, M4, MS4, MN4) en una grilla de 1440x721 (resolución de 0.25 °).

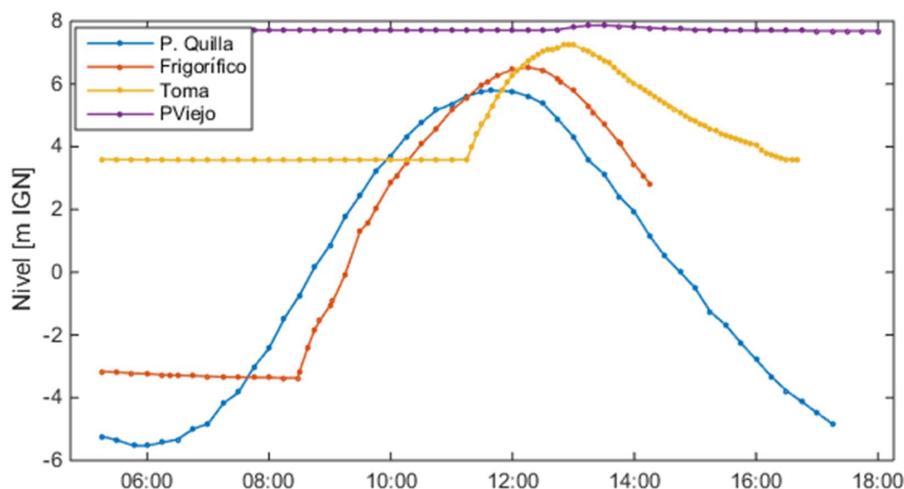


Figura 2.1: Niveles en el río Santa Cruz el 17 de octubre de 2016

El relevamiento de pasaje de una onda de marea fue una de las primeras caracterizaciones abordadas, entendiendo su importancia para esbozar el alcance de la influencia de la dinámica marina y, consiguentemente, definir el área bajo estudio. Se efectuaron mediciones en dos ocasiones [7, 8]: en octubre de 2016 con caudal de 304 m³/s y marea de sicigia (lo cual genera una afectación máxima), y en marzo de 2017 con un caudal de 1355 m³/s. Para la ejecución de estas campañas se instalaron escalas vinculadas altimétricamente, empleadas por sendos observadores para efectuar determinaciones de cota de pelo de agua cada 10 minutos. Los sitios

comprenden Punta Quilla (donde se considera onda de referencia y tiempo cero), Ex Frigorífico en el encuentro de los ríos Santa Cruz y Chico, Toma de Agua frente a Isla Pavón, Puente Viejo y río Chico en Ruta Nacional 3 (RN3). La Figura 2.1 reproduce los resultados de un relevamiento que da cuenta del efecto de las tensiones de corte del lecho sobre el traslado de la onda de marea. En la Tabla 2.2 se sintetiza la caracterización que surge de dichas observaciones, consistente en retraso temporal del máximo Δt , cota máxima alcanzada h_{\max} e incremento de niveles $\Delta h_{\text{río}}$.

Tabla 2.2: Retraso y altura del pico de la onda de marea, durante dos relevamientos de su pasaje

Sitio	$Q = 304 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q = 1355 \text{ m}^3/\text{s}$		
	Δt	$h_{\max} [\text{m IGN}]$	$\Delta h_{\text{río}} [\text{m}]$	Δt	$h_{\max} [\text{m IGN}]$	$\Delta h_{\text{río}} [\text{m}]$
Punta Quilla	—	5.79	—	—	5.57	—
Frigorífico (25 km)	00:36	12:28	9.68	00:25	6.28	?
Toma Agua (51 km)	01:16	05:45	3.67	00:47	7.15	1.87
Puente Viejo (62 km)	01:51	7.87	0.16	—	—	0.02
Río Chico (43 km)	—	—	—	00:48	6.99	1.36

Como información adicional vinculada a este aspecto, cabe mencionar que en el apartado 2.2.8 *Monitoreo continuo* se detalla la evolución temporal de niveles monitoreada cada 10 minutos en otros sitios durante largos períodos de tiempo.

2.2.2. Inspección visual de áreas de mojado y secado

Como se mencionó previamente, la gran magnitud de las mareas conlleva la existencia de amplias zonas sometidas a mojado y secado en forma semidiurna. La caracterización de las mismas amerita su descripción, especialmente en las instancias iniciales de toma de conocimiento del entorno. Se realizaron vuelos con dron sobre el estuario que permitieron observar las extensiones del lecho del estuario que quedan secas durante bajamar, tal como se aprecia en la Figura 2.2. Dicho estudio comprendió el sector entre Puerto Santa Cruz e Islas Leones, así como en la margen izquierda frente al frigorífico.



Figura 2.2: Montaje de fotografías de la vista aérea próxima a margen izquierdo cerca del Frigorífico, en sentido antihorario de Este a Norte. Se aprecian las grandes extensiones que quedan expuestas en bajamar

Dada la baja densidad de información batimétrica en sectores por encima del nivel medio del mar, esta información ha sido indispensable para decidir incorporar, luego de modelaciones preliminares del estuario, la información de las curvas de nivel de la carta del puerto Santa Cruz a fin de representar correctamente la batimetría del estuario (que se describe en el siguiente apartado). Cabe mencionar que a la vez estos vuelos han brindado una observación preliminar

del transporte de sedimentos, al apreciarse la turbidez de río Chico y sitios de deposición de material.

2.2.3. Caracterización batimétrica

Disponer de un modelo digital topobatimétrico es fundamental en cualquier estudio que requiera implementar un modelo numérico. La calidad del mismo condicionará la representatividad de niveles y velocidades modelados, que a su vez inciden en los resultados de otras cantidades transportadas. La información batimétrica consultada comprende las siguientes fuentes:

- Perfiles transversales correspondientes al tramo inferior del relevamiento del río Santa Cruz 120 km aguas abajo de JC hasta el encuentro con río Chico. Un total de 81 perfiles fueron relevados en el marco del proyecto; de ellos, las 42 secciones mostradas en la Figura 2.3 fueron usadas como insumo para el modelo numérico.
- Batimetría obtenida *ad hoc* en cercanías de confluencia de ríos Chico y Santa Cruz consistente en 15 km del río Santa Cruz, 8 km del río Chico y 6 km del estuario (representados en la Figura 2.3).
- Cartas náuticas del SHN, correspondientes a la zona del estuario e inmediaciones del Mar Argentino. Específicamente Carta H413 “De Puerto San Julián a Río Gallegos” y Carta 2 “Puerto Santa Cruz” (reproducida en la Figura 2.4).



Figura 2.3: Ubicación de los puntos y perfiles batimétricos levantados aguas abajo de JC en el tramo final del río Santa Cruz (naranja) y relevamientos específicos del estuario (granate)

La carta náutica del puerto ofrece información consistente en puntos separados unos 250 metros, si bien la densidad de información es considerablemente menor en sectores donde el terreno se encuentra por encima del nivel medio del mar. Las primeras simulaciones han revelado que es imprescindible digitalizar no sólo los puntos sino también algunas curvas de nivel de la carta para una adecuada representación del terreno. Los relevamientos adicionales correspondientes a 15

secciones transversales actualizan y complementan dicha información.

En el sector en que tiene lugar la confluencia del río Santa Cruz con el Río Chico se cuenta con información de diferentes fuentes. En tal caso la carta del Puerto Santa Cruz tiende a indicar valores de profundidad 1 metro menores que los relevados, tomándose la decisión de dar preponderancia al valor relevado en función de su mayor densidad espacial y su más reciente fecha de adquisición. Las mismas consideraciones se aplican a discrepancias entre la carta del puerto y los relevamientos.

El modelo de terreno se obtuvo triangulando esta información. Para construir la batimetría del río, se desarrolló un código que permitió interpolar entre las secciones relevadas. El tramo de río Chico ubicado aguas arriba del relevamiento se generó sobre la traza del cauce, extrapolando la información disponible.

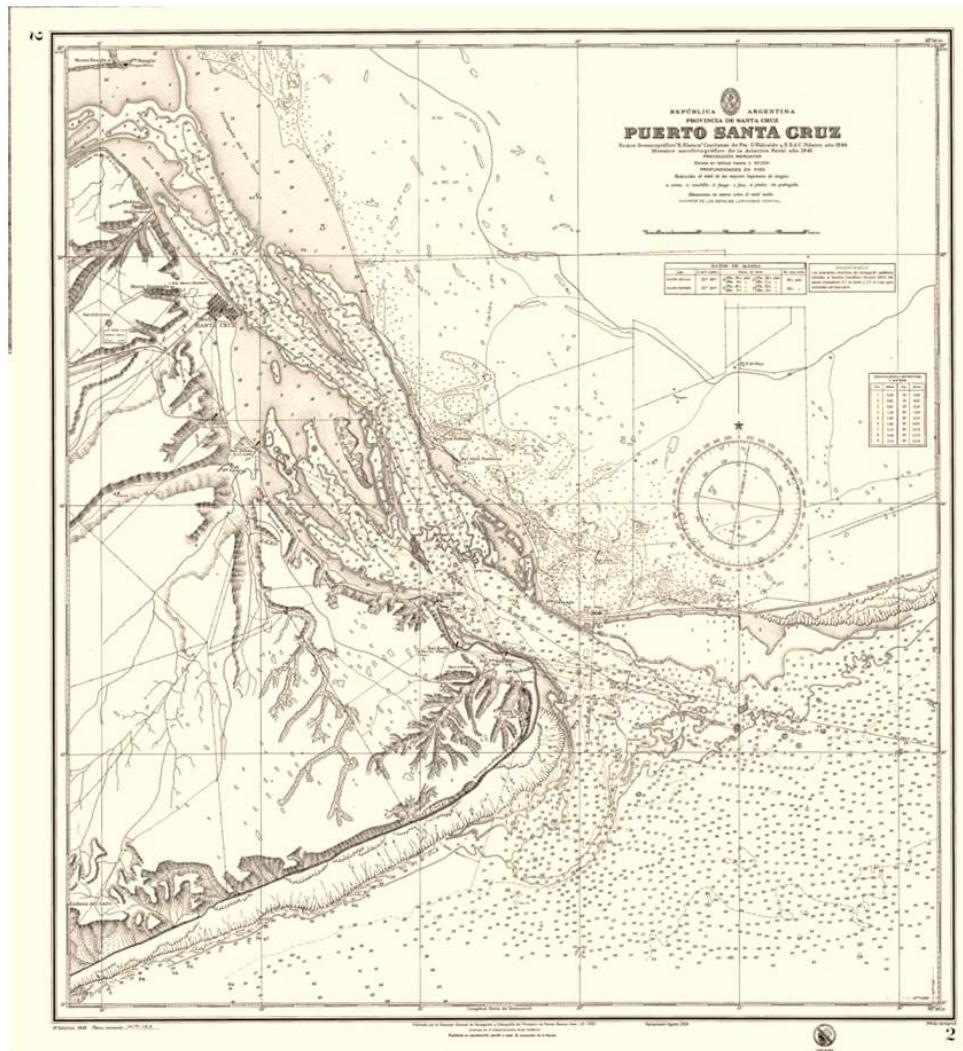


Figura 2.4: Carta Náutica 2, "Puerto Santa Cruz". Fuente: Servicio de Hidrografía Naval.

Los relevamientos batimétricos son imprescindibles para describir la morfología de un cuerpo de agua y comprender su dinámica. La calidad del modelo digital topobatimétrico incorporado a un modelo numérico condiciona su capacidad de representar niveles y velocidades, y, en consecuencia, los procesos de transporte asociados.

2.2.4. Muestreo del lecho

La caracterización del material del lecho es particularmente relevante para el estudio de la evolución morfológica del río, en cuanto a que el mismo es determinante de los fenómenos de transporte de sedimentos. Las observaciones de campo revelan que el río Santa Cruz presenta un acorazamiento de gravas en su capa superficial, mientras que el estrato subsuperficial presenta material de menor diámetro, siendo típico observar configuraciones como las de la Figura 2.5.



Figura 2.5: Fotografías representativas del acorazamiento observado en el río Santa Cruz. Corresponden a los sitios Charles Fuhr (izq.) y Puente Viejo (der.)

La caracterización del material del lecho abarca campañas de obtención de muestras y determinación de granulometría. Para favorecer la brevedad de la presente publicación, se omite la descripción de la caracterización del río Santa Cruz, exponiendo en detalle sólo lo concerniente al área bajo estudio:

- En Puente Viejo, una campaña obtuvo muestras correspondientes a las capas superficial y subsuperficial en una de las márgenes (Figura 2.7). La metodología incluye una caracterización de la coraza superficial con método de Wolman, seguida de la remoción de la misma para estudio del material del substrato inferior por medición del eje B de partículas mayores a 8 mm y tamizado en laboratorio de la facción más fina. Por tratarse de dos metodologías diferentes, la obtención de una curva requirió un tratamiento de unificación.
- En el tramo de río aguas abajo de JC, destaca la toma de muestras tomadas de las márgenes en inmediaciones de Isla Pavón. La misma forma parte del muestreo de varias secciones en el marco de determinación de caudal ecológico.
- En el sector estuario se efectuaron dos campañas en sitios de la Figura 2.6. La toma de muestras se efectuó con equipo Coring y draga van Veen. La primera campaña comprendió

muestras de los canales más profundos, donde la presencia de cantos de tamaño demasiado grande para la draga ocasionó pérdida de material, por lo cual se omiten los resultados. La segunda apuntó a evaluar la existencia de sedimentos finos fuera de los cauces o canales principales.

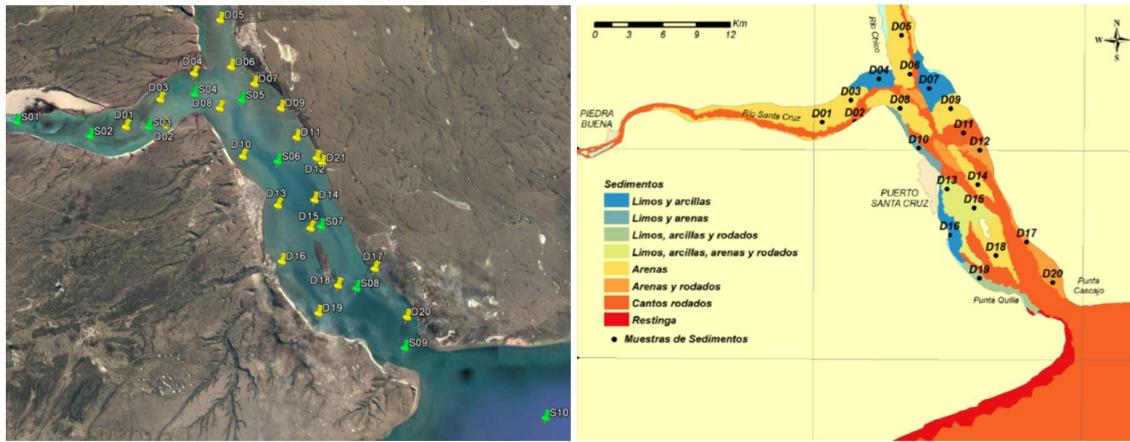


Figura 2.6: Caracterización del lecho del estuario. Izq: sitios de toma de muestra (marcadores verde para la primera campaña y amarillos para la segunda). Der: zonificación basada en el segundo muestreo, reproducida de [25].

Curvas granulométricas

En Figuras 2.7 a 2.10 se presentan las curvas granulométricas de todas las muestras identificando las fracciones de arenas ($0,0625 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$), gravas ($2 \text{ mm} < D < 62 \text{ mm}$) y cantos rodados ($D > 62 \text{ mm}$). Considerando el acorazamiento del río, se distinguen muestras superficiales y subsuperficiales, así como muestras tomadas en el centro del cauce. La distribución subsuperficial es más extendida e incluye arenas, mientras que la coraza y el material recuperado del centro del cauce comprenden gravas y cantos rodados.

Para la presentación de resultados de Figura 2.10, el estuario se ha sectorizado en 4 regiones de acuerdo con la Figura 2.9.

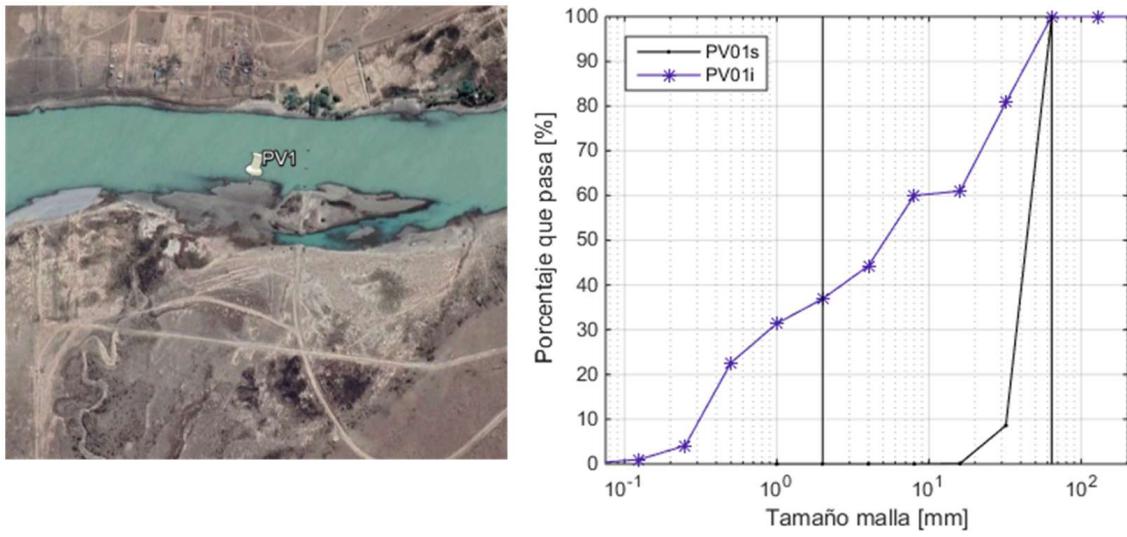


Figura 2.7: Muestreo de lecho en Puente Viejo. Izq: sitio de toma de muestras. Der: granulometría (muestras superficiales en línea continua, y muestras subsuperficiales con asteriscos)

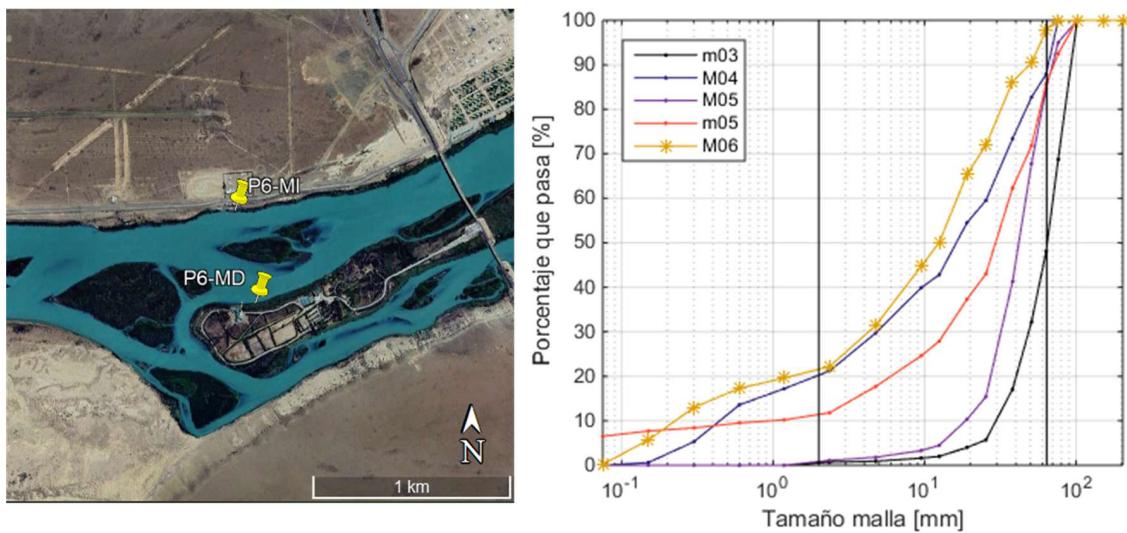


Figura 2.8: Muestreo del lecho en Isla Pavón, como parte de la campaña aguas abajo de JC. Izq.: Sitio de toma de muestras en margen izquierdo (MI) y derecho (MD). Der.: curvas granulométricas, indicando en línea continua muestras superficiales y con asterisco muestra subsuperficial; las dos primeras corresponden a MI y las tres finales a MD)

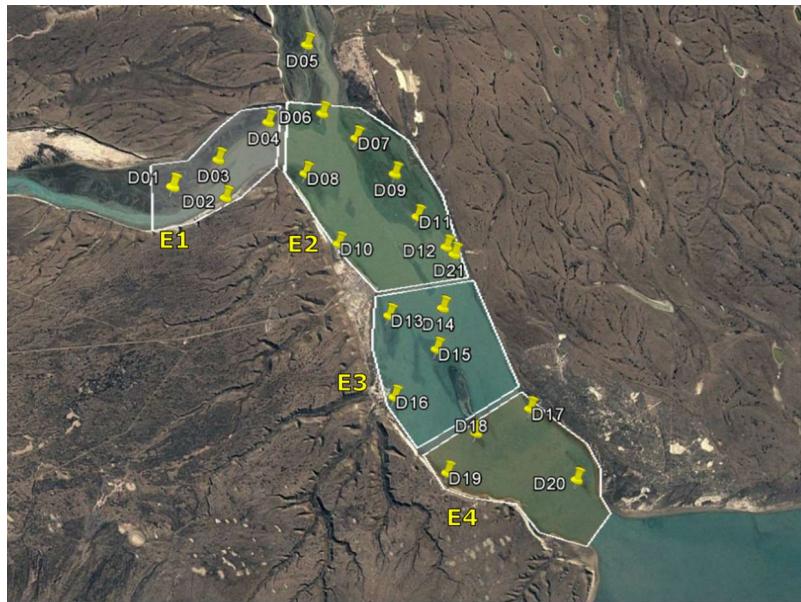


Figura 2.9: Sitios de muestreo de lecho del estuario, incluyendo zonificación adoptada para presentación de resultados de Figura 2.10

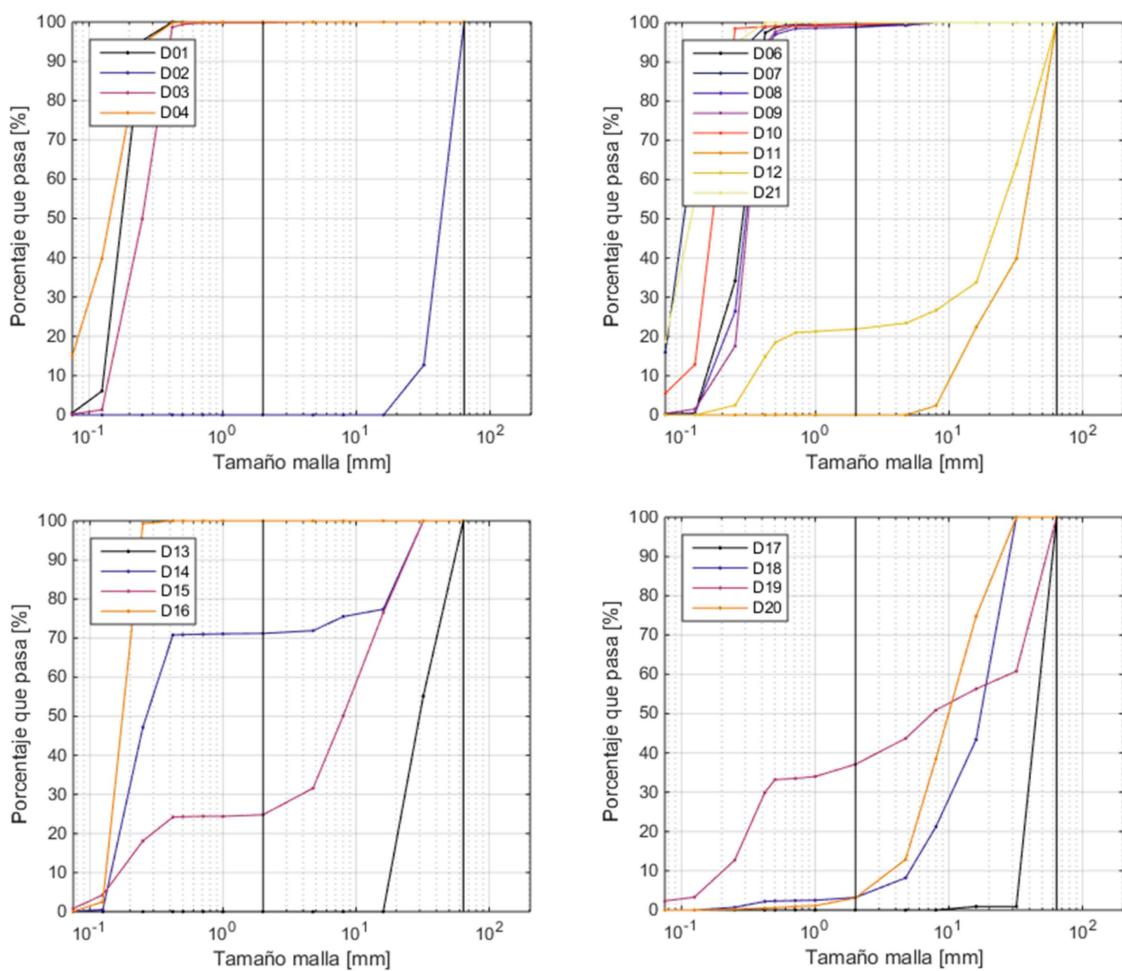


Figura 2.10: Curvas granulométricas de muestras del lecho obtenidas en el estuario.

2.2.5. Determinación de perfiles verticales

Una de las primeras campañas efectuadas (diciembre de 2016) tuvo por finalidad, entre otros aspectos, caracterizar la variación de parámetros físicos en función de la profundidad. Esta información es fundamental para conceptualizar el funcionamiento del estuario.

Se midieron perfiles verticales de corrientes, velocidad y dirección, usando un equipo ADCP¹ Nortek AWAK de 1000 kHz, y perfiles verticales *CTDTu* de conductividad (salinidad), temperatura, turbidez, y profundidad (como presión hidrostática) con un equipo OBS 3A², en 10 estaciones a lo largo del estuario (definidas en Figura 2.11), en situación de bajante y creciente en cada punto.

La turbidez varía en su valor y distribución vertical a medida que se recorren los puntos de muestreo hacia el mar. Típicamente, las estaciones en el río Santa Cruz muestran una distribución vertical uniforme. A partir de la Estación 07, los perfiles de turbidez muestran valores más altos cerca del fondo que en la superficie. La temperatura varía en su valor a medida que se recorren los puntos de muestreo hacia el mar; en estos perfiles tomados en verano se aprecian valores de temperatura mayores en creciente que en bajante. Los perfiles de salinidad indican cero en estaciones del río (Estaciones 01 a 07), mientras que aguas abajo muestran valores de salinidad hasta algo más de 15 UPS, con valores mayores cerca del fondo.

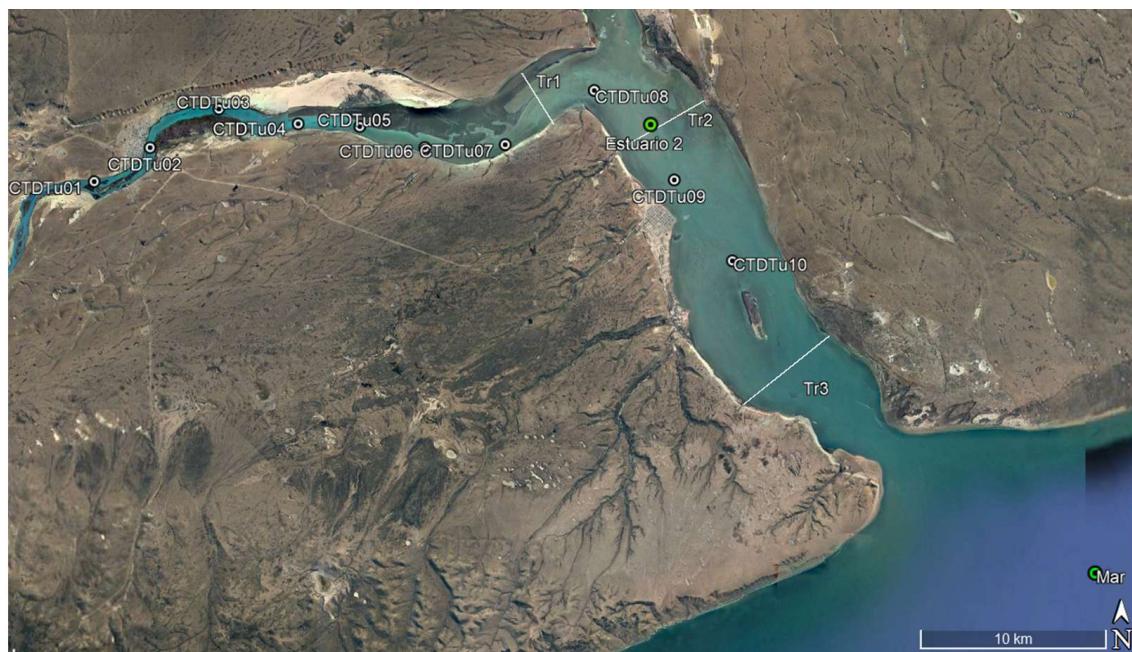


Figura 2.11: Sitios de medición en que se determinaron perfiles verticales. Perfiles puntuales *CTDTu* y transectas *Tr* en que se midieron velocidades. También se indican las estaciones Estuario2 y Mar en las que se efectuaron mediciones continuas durante unos pocos días

Resta mencionar que, como parte de la misma campaña, se efectuó la medición de perfiles de velocidades en las tres transectas identificadas en la Figura 2.11 (cuatro perfiles sobre transectas 1 y 2, y cinco sobre transecta 3).

¹Siglas en inglés de Acoustic Doppler Current Profiler, instrumento que permite medir perfiles de velocidad en la columna de agua mediante efecto Doppler.

²OBS corresponde a las siglas en inglés Optical Backscatter Sensor, y hace referencia a un sensor óptico.

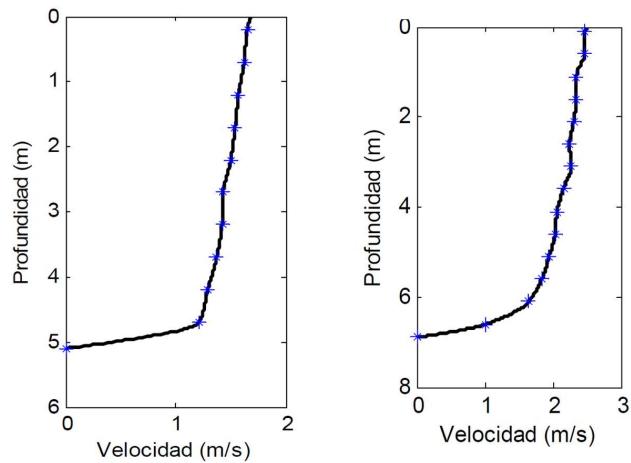


Figura 2.12: Perfil vertical de velocidades en zona central del cauce en Puente Viejo, correspondiente a uno de los tantos perfiles transversales realizados durante aforos de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (octubre 2017, izq.) y de $2160 \text{ m}^3/\text{s}$ (febrero 2018, der.). Reproducido de [1].

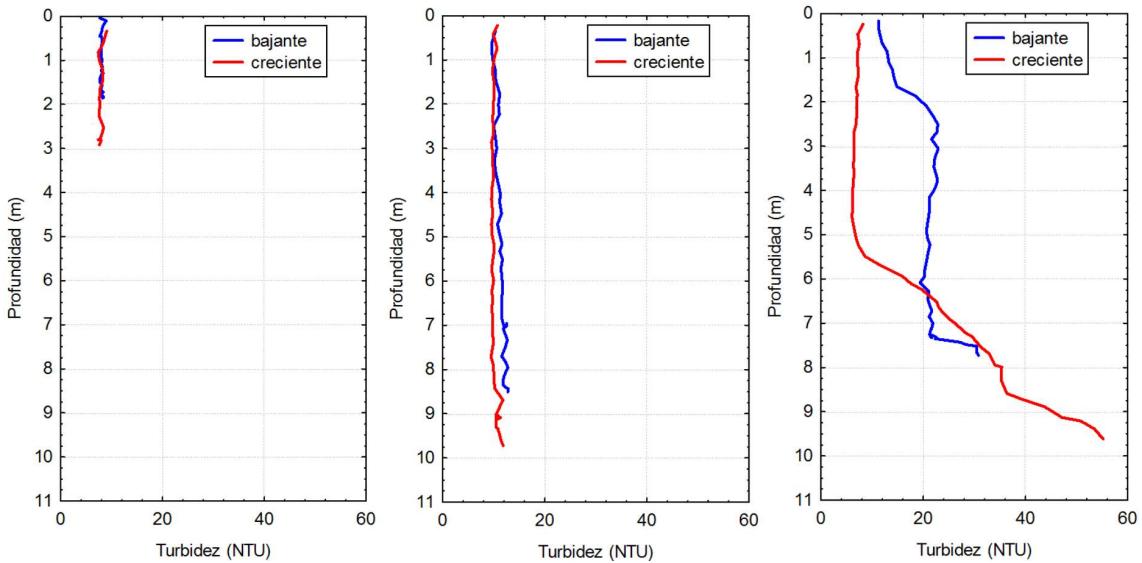


Figura 2.13: Perfiles verticales de turbidez en Estaciones 03, 07 y 09, distinguiendo bajante y creciente. Reproducida de [25].

De lo expuesto, se desprende una conclusión fundamental que se retoma en el desarrollo del modelo numérico: los fenómenos de mezcla promovidos por la amplia variación de la marea son lo suficientemente efectivos como para que las distribuciones verticales sean relativamente uniformes. Este aspecto justifica que las variables físicas se vean razonablemente descriptas por su valor promediado en la vertical. Respecto a la evolución temporal de estos parámetros en distintos momentos del ciclo de marea y épocas del año, se invita al lector a revisar la información que arrojaron los monitoreos continuos (sección 2.2.8 *Monitoreo continuo*).

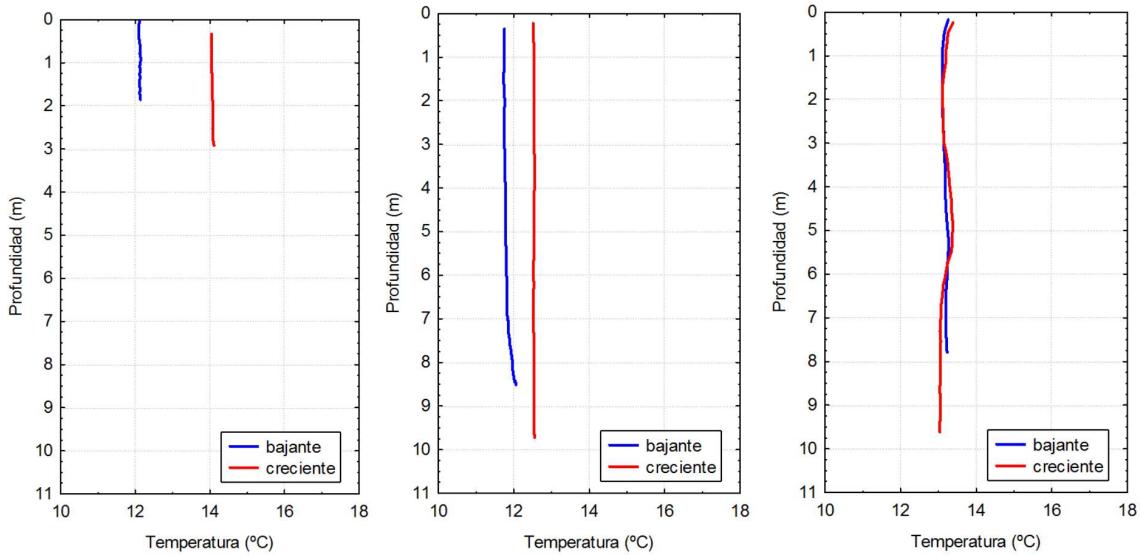


Figura 2.14: Perfiles verticales de temperatura en Estaciones 03, 07 y 09, distinguiendo bajante y creciente. Reproducida de [25].

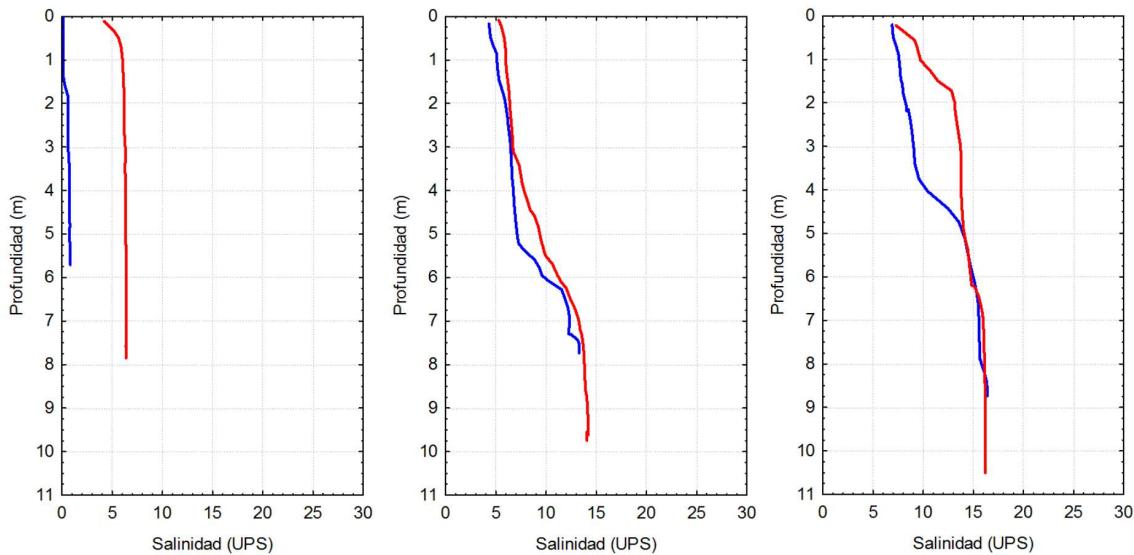


Figura 2.15: Perfiles verticales de temperatura en Estaciones 08, 09 y 10, distinguiendo bajante y creciente (aguas arriba, la salinidad observada fue nula). Reproducida de [25].

La amplia variación mareal promueve fenómenos de mezcla suficientemente efectivos como para generar distribuciones verticales relativamente uniformes. Este comportamiento respalda que las variables físicas del sistema puedan describirse razonablemente por su valor promediado en la vertical, con una variación bidimensional en planata.

2.2.6. Red hidrometeorológica

La zona del estuario del río Santa Cruz se caracteriza como una zona seca. Es una transición del subtropical con estepa a la tundra o a zonas boscosas. Las condiciones edáficas, las escasas

precipitaciones y la gran intensidad del viento la convierten en una zona desfavorable para el desarrollo de una vegetación arbórea. La temperatura media es de 8.5 °C, con un promedio para enero de 14.6 °C y 1.9 °C para los meses de julio. Con respecto a la humedad relativa, los promedios anuales 1900-1950 arrojaron un valor de 63 %, siendo los inviernos más húmedos con 70-80 % y los veranos con valores de 50 a 60 %. Los registros para la nubosidad media son altos, de alrededor de 5 octas. La precipitación media es de 171 mm por año, con máximos de 27 mm en enero y mayo, y un mínimo de 8 mm en abril. Respecto a los vientos, predominan los del SO, O y NO durante todo el año. En noviembre y diciembre, los vientos alcanzan su mayor intensidad, con una velocidad media de 24 km/h. Estos vientos suelen aumentar gradualmente desde el amanecer hasta la tarde, registrando su máximo pico en horas vespertinas. Las velocidades máximas alcanzan los 86 km/h en este puerto.

El proyecto del aprovechamiento del río Santa Cruz incluye el diseño, la implementación y la operación de una Red Hidrometeorológica e Hidroambiental (Red HM-HA). El objetivo de ésta, además de permitir el monitoreo permanente de la cuenca, es generar una base de datos y robustecer la información disponible para la caracterización hidrometeorológica, sedimentológica e hidroambiental de la cuenca, para la gestión adecuada del recurso hídrico y la operación de las presas. El proyecto comprende estaciones hidrométricas, hidrometeorológicas e hidroambientales distribuidas en toda la cuenca. La ejecución de campañas mensuales de aforos líquidos y sólidos también se contempla como parte integrante de la red.

Los registros existentes no son extensos actualmente, debido a demoras en la implementación y deficiencias en el mantenimiento de los equipos y control de calidad de la información. En lo que respecta a la zona del estuario, la única estación de medición continua operativa es la hidrométrica Punta Quilla, ubicada en el puerto homónimo (Figura 2.16). Asimismo, es de interés mencionar la ejecución de aforos líquidos y sólidos en inmediaciones de Puente Viejo, actividad que se discute en otro apartado.



Figura 2.16: Estación hidrometeorológica Punta Quilla. Casetta sobre la cual se emplaza (izq.), y ubicación general en la zona de la boca del estuario (der.).

Respecto a los registros de la estación hidrometeorológica automática (EHMA) Punta Quilla, la misma opera desde abril de 2019, si bien pasó largos períodos fuera de operación, particularmente durante los años 2021 y 2022. En la Figura 2.17 puede consultarse la disponibilidad de

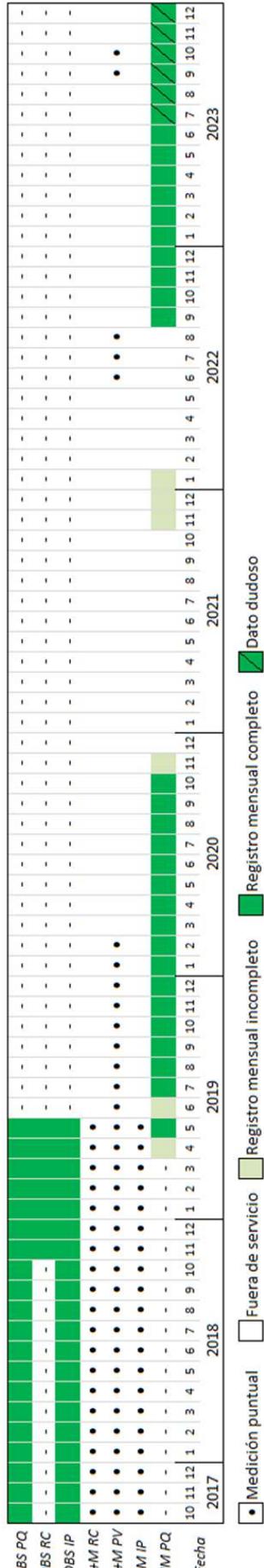


Figura 2.17: Período de registros de estación hidrometeorológica Punta Quilla *HM PQ*, y solapamiento con otros monitores periódicos: equipos OBS fondeados en forma continua en Punta Quilla *OBS PQ*, Río Chico *OBS RC* e Isla Pavón *OBS IP*; aforos y toma de muestras de agua puntuales en Río Chico *Q+M RC* y Puente Viejo *Q+M PV*, y toma de muestras en Isla Pavón *Q+M IP*.

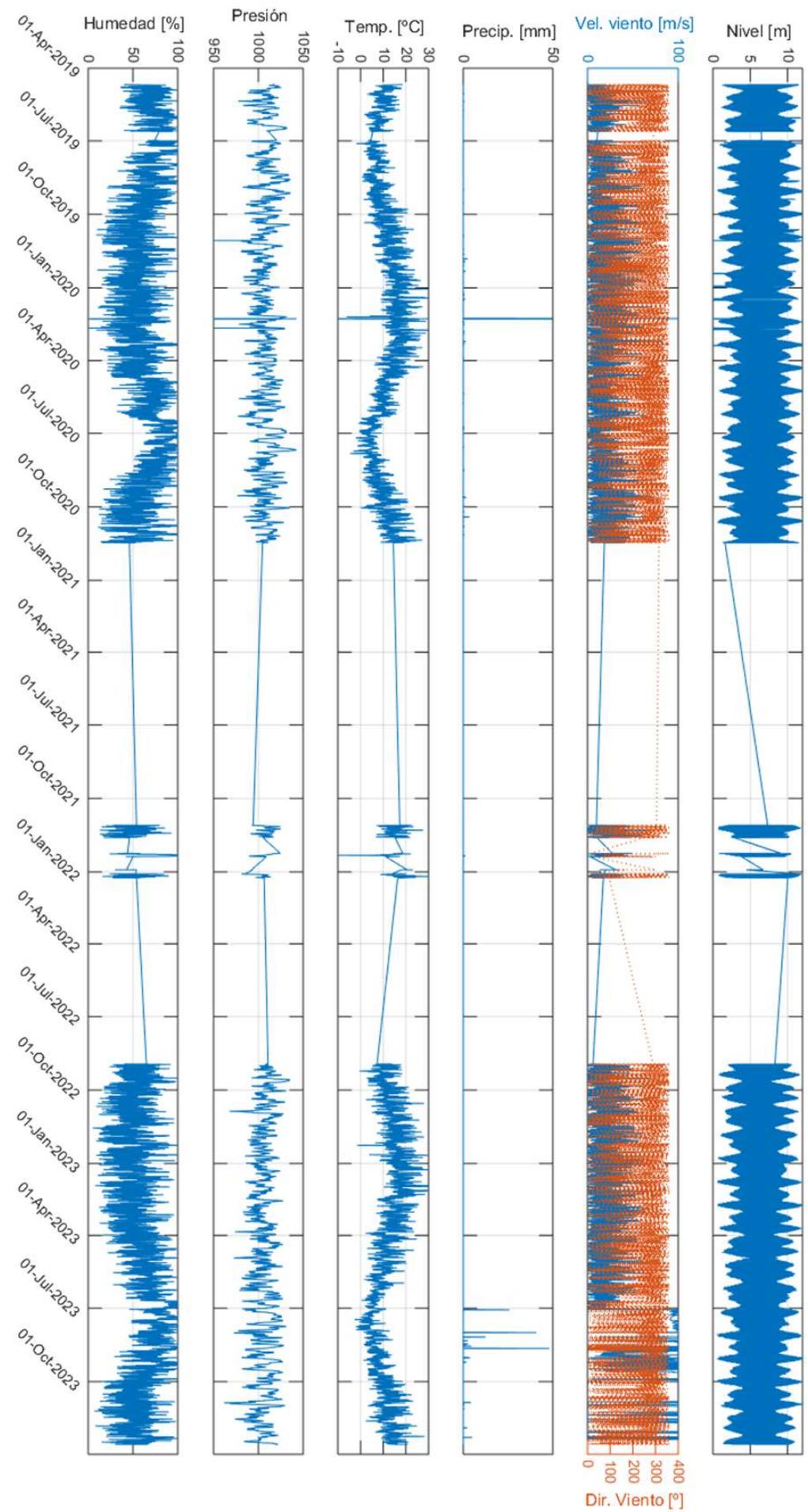


Figura 2.18: Registros temporales de estación hidrometeorológica Punta Quilla

registros y su solapamiento con otros monitoreos de interés. Los primeros meses de operación presentan simultaneidad con el monitoreo continuo del cuerpo de agua, siendo de utilidad para buscar correlaciones entre parámetros del mismo y la meteorología. En la Figura 2.18 se grafican las variables registradas cada 10 minutos: nivel de agua, velocidad y dirección del viento, precipitación, temperatura del aire, presión barométrica y humedad (además de control de la batería). Allí se observaron variaciones de niveles semidiurnas de entre 4 y 12 m según las mareas fueran de cuadratura o siccia. En cuanto a los vientos, las magnitudes más observadas fueron de 7.5 m/s con una media de 17 m/s, soplando mayormente desde el noroeste hacia el sureste y en menor medida del suroeste hacia el noreste, según se aprecia en los histogramas de la Figura 2.19. De acuerdo con la Figura 2.20, las temperaturas oscilan entre unos 16 °C en enero y 4 °C en julio, mientras que los acumulados mensuales de las precipitaciones se presentan en la Figura 2.21, sin ser posible extraer tendencias del registro.

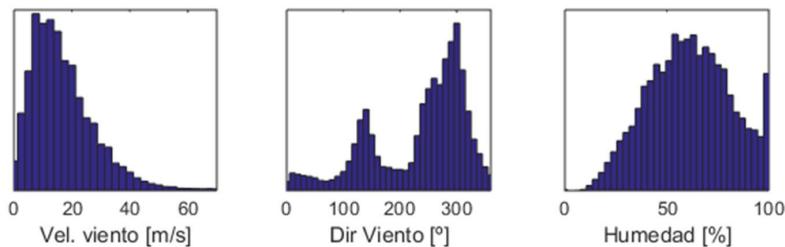


Figura 2.19: Histogramas correspondientes a parámetros medidos por la estación hidrometeorológica Punta Quilla.

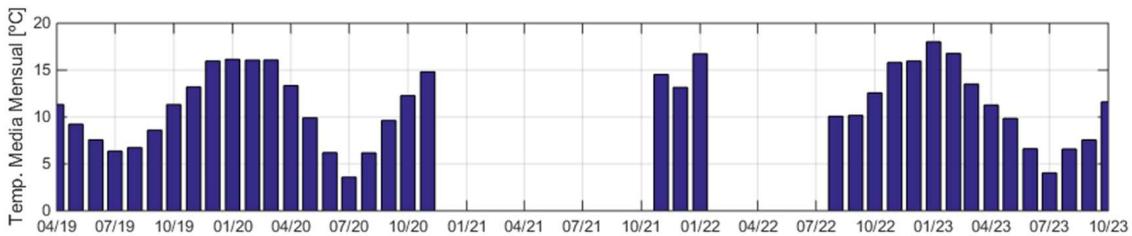


Figura 2.20: Temperaturas medias mensuales obtenidas de los registros de la estación hidrometeorológica Punta Quilla.

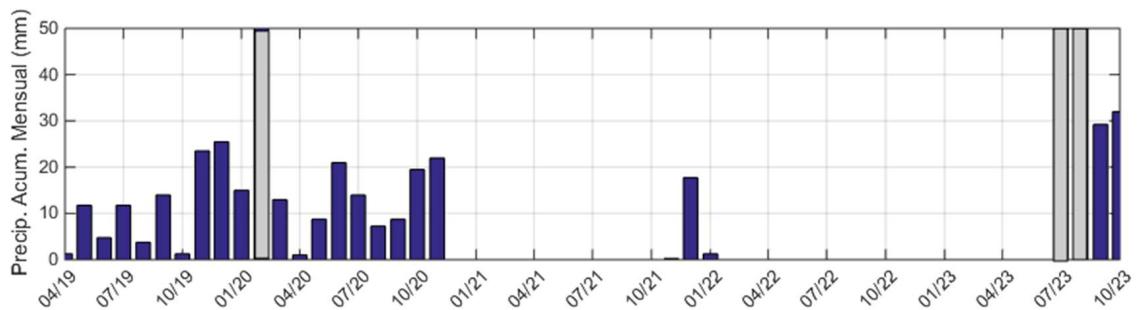


Figura 2.21: Precipitación acumulada mensual obtenida de los registros de la estación hidrometeorológica Punta Quilla. Se han sombreado valores anómalos que superaban los 200 mm mensuales.

Además de las generalidades ya discutidas respecto a la meteorología del estuario, resulta indispensable evaluar el efecto de la misma sobre otras variables físicas del entorno. Por este motivo, se considera de interés para el lector la reproducción de registros de Charles Fuhr y Punta Quilla efectuados en coincidencia con el período de realización de las campañas mensuales (que se

detallan en la sección 2.2.7 *Muestreos mensuales*). Dicha información puede inspeccionarse en Figuras 2.22 y 2.23. Los registros comprenden nivel del río, índice UV, temperatura del aire, precipitación y velocidad y dirección del viento. La interrelación de estas variables con parámetros de calidad del agua es evaluada en la sección 2.3 *Análisis e interpretación de los datos medidos*.

Por último, en esta revisión de datos hidrometeorológicos existentes debe mencionarse que la Red Hidrológica Nacional cuenta con dos estaciones automáticas en el estuario, identificadas como 2836 – RN3 sobre el río Chico y 2839 – Comandante Luis Piedrabuena sobre el río Santa Cruz. Los primeros datos fueron tomados a partir de 2015 y 2019, respectivamente, y pueden consultarse en la página web del Sistema Nacional de Información Hídrica [6]. Entre otros, incluyen registros de niveles, caudales medios diarios y aforos, parámetros de calidad de agua (oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, turbidez, temperatura del agua) y, en el caso del río Santa Cruz, también son de interés las precipitaciones.

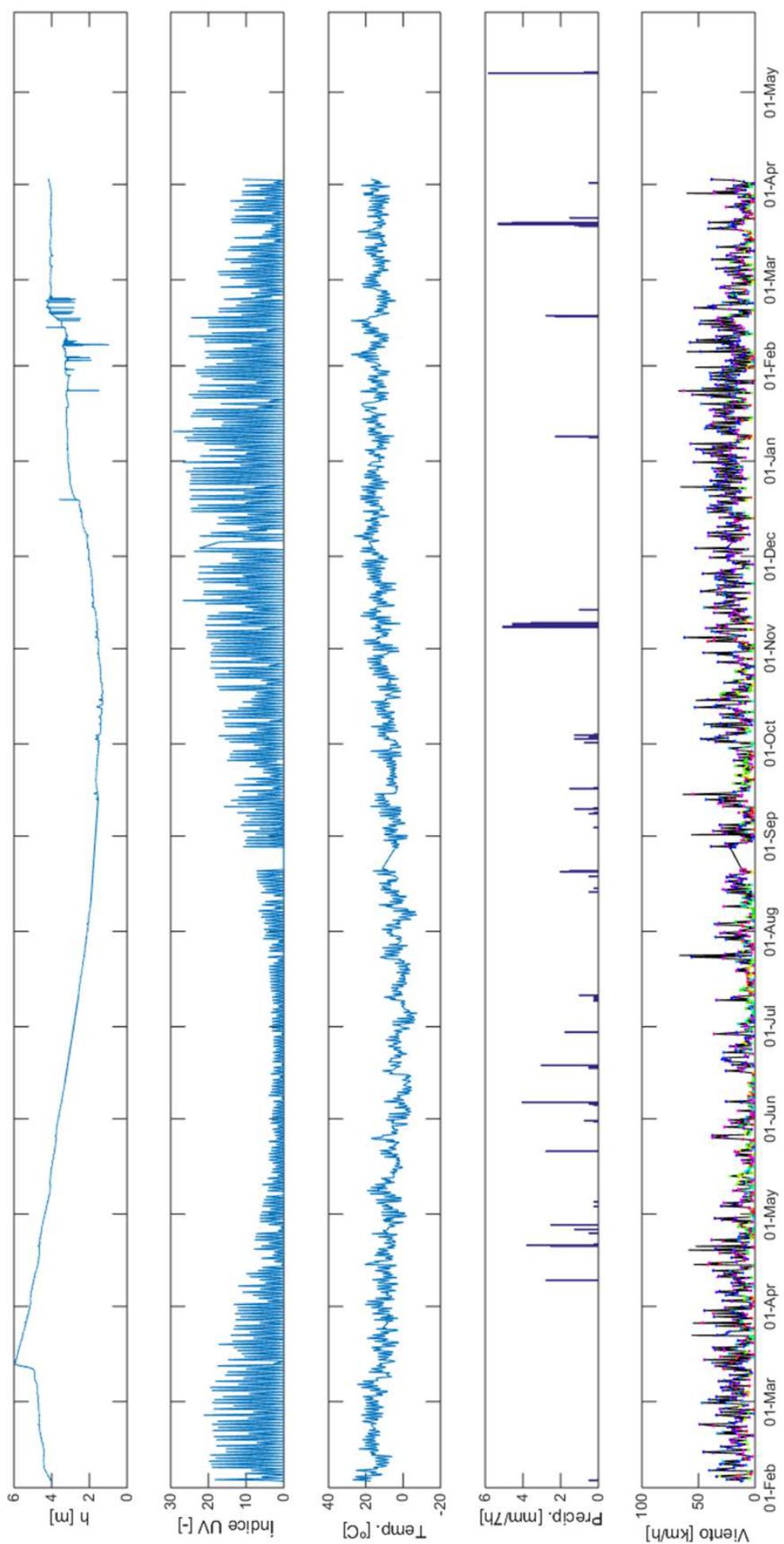


Figura 2.22: Datos meteorológicos. Estación Charles Fuhr

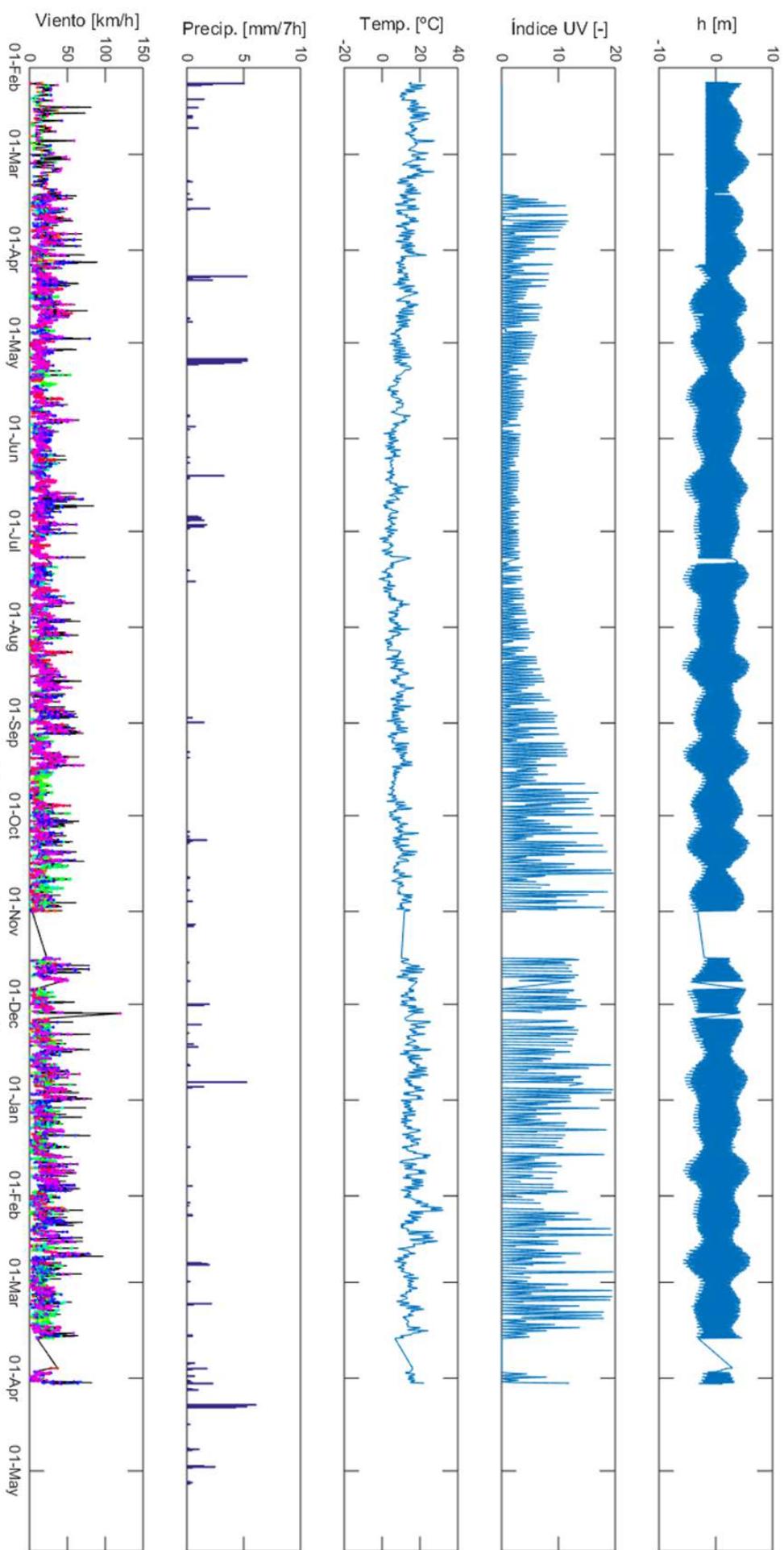


Figura 2.23: Datos meteorológicos. Estación Punta Quilla

2.2.7. Muestreos mensuales

Las campañas mensuales de muestreo del estuario del río Santa Cruz totalizaron 20 meses de registros. Las determinaciones se hicieron sobre el río Santa Cruz en Charles Fuhr ³, Puente Viejo e Isla Pavón, en río Chico en el puente de RN3 y en el estuario en Punta Quilla (ubicaciones indicadas en Figura 2.24). En cada campaña, se efectuaron determinaciones *in situ* de temperatura del agua, conductividad y turbidez, y se tomaron muestras de agua para filtrado y para posterior determinación en laboratorio de nutrientes y sólidos suspendidos (refrigeradas y no refrigeradas, respectivamente). Cabe mencionar que todas las tareas se efectuaron en bajante para minimizar la afectación de las mareas.

Este muestreo fue acompañado de la realización simultánea de aforos líquidos y fondeo de equipos de medición continua de niveles, temperatura, turbidez y conductividad, aspectos que se tratan en otras secciones de la presente publicación. La Tabla 2.3 da cuenta de la extensión temporal de estas mediciones en los distintos emplazamientos.

Tabla 2.3: Muestreos mensuales y caracterizaciones simultáneas. Los números indican duración en meses para cada sitio.

	Charles Fuhr	Puente Viejo	Isla Pavón	Río Chico	Punta Quilla
Aforo líquido	12	12	-	20	-
Muestra nutrientes	12	12	20	20	20
Muestra SST	12	12	20	20	20
Medición OBS	-	-	20	7	20

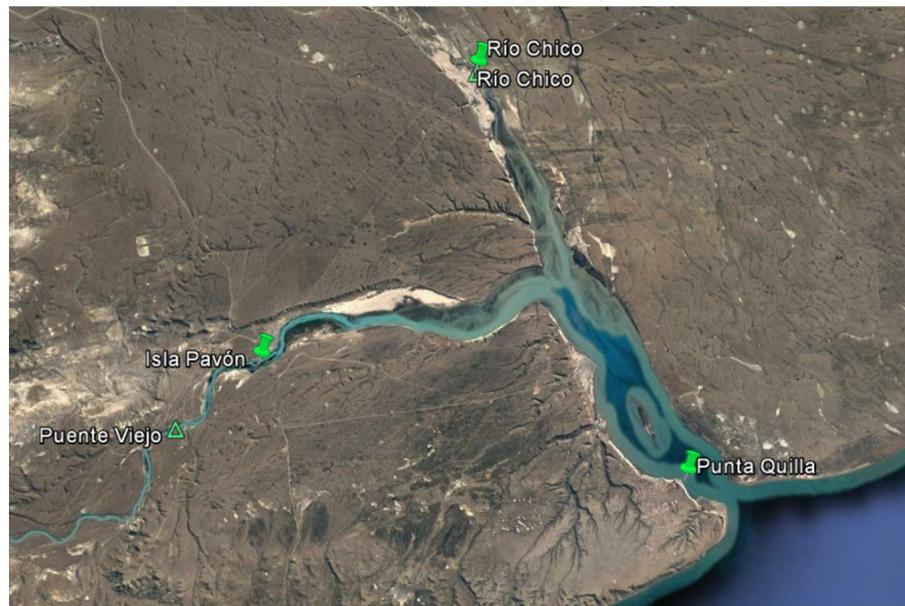


Figura 2.24: Sitios de los relevamientos en el sector del estuario. Las estaciones marcadas con triángulo comprenden aforos

³El sitio Charles Fuhr se ubica próximo a las nacientes del río, por lo cual no se profundiza en su descripción en esta publicación.

Metodología de muestreo

Las muestras de agua fueron tomadas en campo con botella Niskin a media profundidad en la progresiva de máxima profundidad de cada sección, y posteriormente fueron analizadas en laboratorio.

A partir de muestras de agua de 2 litros refrigeradas, se efectuaron por triplicado las siguientes determinaciones de nutrientes :

- ortofosfato: aplicando el método estandarizado APHA 1998 SM 4500-P-F.
- fósforo total: con método estandarizado APHA 1998 SM-4500-P-B-5 y 4500-P-F. Incluye el fósforo particulado (combinado o no con materia orgánica) y el soluble.
- nitrógeno total: por método estandarizado APHA 1998 SM-4500-N. Cuantifica la cantidad presente como nitritos y nitratos, tanto en formas orgánicas como inorgánicas.

En todos los casos el límite de detección fue de 10 $\mu\text{g/L}$. Adicionalmente el laboratorio, como parte de los análisis de rutina, determinó:

- pH
- conductividad eléctrica

A partir de las muestras de 2 litros no refrigeradas, se determinó mineralogía y concentración de los sólidos suspendidos, pero no granulometría debido a que las bajas concentraciones imposibilitaron reunir suficiente material sólido para aplicar la técnica. Las determinaciones efectuadas comprenden:

- sólidos suspendidos totales (SST): por método gravimétrico estandarizado APHA 1998 (expresado en mg/l).
- mineralogía por difracción de rayos X en muestra total: procesando el total de residuo retenido por filtrado. Las reflexiones en los difractogramas revelan la muy escasa presencia (trazas) de minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, argilominerales y halita (sal).
- mineralogía por difracción de rayos X en material sólido insoluble menor de 4 micrones: estudio realizado ocasionalmente a las muestras filtradas en campo de río Chico y Punta Quilla, cuando se pudo contar con cantidades suficientes para efectuar un análisis composicional más completo. Se estudiaron muestras en etapas de procesamiento natural, glicolizada y calcinada. Se detectó la presencia de esmectita, caolinita, ilita, plagioclasa y cuarzo (este último con participación más importante), junto con sal halita disuelta que precipitó cuando la muestra fue secada.

Las mediciones en campo se efectuaron sobre la misma botella Niskin para recolección de muestras recién sacada del río, e incluyeron:

- temperatura del agua.
- conductividad: con sonda Sper Scientific 850084, cuyo rango según manual es 0.2 a 20 mS. El uso de este equipo no es apropiado en Punta Quilla.

- turbidez: con turbidímetro Lutron TU-2016 calibrado con soluciones patrón de 1 y 100 NTU justo antes de hacer la determinación sobre una muestra de 10 ml.

Ajustes de la metodología

Las concentraciones de sólidos suspendidos del río Santa Cruz resultaron ser muy bajas al punto de dificultar su caracterización. Por ello, además de la metodología arriba descripta se ensayaron otras alternativas:

- Considerando la baja concentración de sedimentos en suspensión y la necesidad de contar con una masa mínima de muestra sólida para su análisis de calidad, se procedió a filtrar a baja velocidad varias decenas de litros de agua mediante filtros de papel, con el fin de promover su colmatación y así concentrar los sedimentos retenidos. Esta metodología se implementó una única vez y no fue satisfactoria.
- Ante la posibilidad de que una mayor concentración de sólidos en proximidad al fondo facilitara su caracterización, en algunas campañas también se bajó la botella Niskin a mayor profundidad y se envió a laboratorio una muestra adicional para análisis de SST.
- Por último, ha de mencionarse que en las campañas de aforo sólido sí fue posible efectuar un análisis granulométrico de las muestras con un equipo de difracción láser (disponible en otro laboratorio). Esto se expone en la sección correspondiente.

Recopilación de mediciones

En la Tabla 2.4 se ha sistematizado la información recolectada en cada campaña para facilitar su estudio. Se han tenido en cuenta ciertas consideraciones para su elaboración:

- La escala de colores para cada columna facilita la identificación de tendencias de valores de cada parámetro (rojo = bajo, verde = alto).
- En la determinación composicional de los sólidos suspendidos, se indican con guión las determinaciones sobre fracción arcilla que no se hicieron por falta de material suficiente, así como ciertos minerales no reportados dentro de esa campaña. Se anotó uno para mineral cuya presencia fue detectada, cero si no se detectó en esa muestra pero sí en otras de esa campaña, y 0.5 en casos en que fue dudosa la identificación del mineral.

En Tabla 2.5 se presentan, para tres sitios, las determinaciones de sólidos suspendidos en muestras de agua tomadas próximas al fondo, acompañadas por los resultados para muestras tomadas a media profundidad obtenidas simultáneamente. Dado que la carga de sedimentos también resultó baja a mayor profundidad, no supuso una mejora en la capacidad de caracterización de SST.

Las campañas mensuales de caracterización de los ríos afluentes al estuario incluyeron toma de muestras de agua y ejecución de aforos. Las tareas se ejecutaron en horarios próximos a bajamar, para minimizar afectaciones por las mareas y lograr que la caracterización resultante respondiese a variaciones en el régimen fluvial.

Tabla 2.4: Resumen de resultados de campo y laboratorio de los muestreos mensuales

Campaña	Mes	Sitio	Determinaciones laboratorio												Determinaciones campo										
			pH	Conductividad [µS/cm]	Ortofósfato [µg P/L >10]	Fósforo Total [µg P/L > 10]	Nitrógeno Total [µg N/L > 10]	SST (poro <15 µm)	Cuarzo (Qz)	Plagiocla Feldespato potásico (Pl)	Argilomin erales (Fr)	Sal Halita (no SST)	Esmectita (Ha)	Caolinita (Sm)	(K)	(Qz)	Cuarzo Illa (I)	Plagio clasa (P)	Sal Halita (no SST) (Ha)	Caudal [m³/s]	Temp. [°C]	Conductividad [µS/cm]	Turbidez [NTU]	Cota Pelo Agua [IGN]	Fecha
1	10	C. Fuhr	7.5	38	60	130	<10	9.4	1	0	1	0	-	-	-	-	-	-	500.6	8	0	0	18	174.03 25/10/2017	
1	10	Puente Viejo	7.5	36	60	130	214	1.8	1	1	0	0	-	-	-	-	-	-	499.9	10	0	0	13	8.15 27/10/2017	
1	10	I-Pavón	7.7	37	50	100	802	5	1	0	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.96 27/10/2017		
1	10	Punta Quilla	8.1	39500	120	250	1070	52.2	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	-	8.9	40274	26.5	15	-	28/10/2017
1	10	Río Chico	7.9	139	170	430	6872	176.8	1	1	0	1	-	-	-	-	-	-	25.4	12.3	0	0	113	4.75 28/10/2017	
2	11	C. Fuhr	7.55	42	58	172	<10	143.4	1	0.5	-	0	0	-	-	-	-	-	-	537.4	9.1	11	0.01	17.9	174.13 20/11/2017
2	11	Puente Viejo	7.38	40	46	154	1684	0.3	0	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	521.9	8.9	11	0.01	16.8	8.26 22/11/2017
2	11	I-Pavón	7.37	38.5	54	90	3930	137.7	0	1	-	0	0	-	-	-	-	-	-	9.4	12	0.01	16.1	3.46 21/11/2017	
2	11	Punta Quilla	8.13	41400	103	279	989	80.2	1	1	-	1	1	1	1	1	1	0	-	8.9	33600	22.11	28.5	4.73 23/11/2017	
2	11	Río Chico	7.73	126	107	485	10642	479.3	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	23.6	7.9	61	0.04	212	4.10 23/11/2017
3	12	C. Fuhr	8.29	43	51	63	134	4	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	111.1	12	0.01	12.6	174.84 17/12/2017	
3	12	Puente Viejo	7.27	43	46	113	695	7.03	0.5	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	728	12.6	12	0.01	19.1	8.63 18/12/2017
3	12	I-Pavón	7.9	42	53	78	214	9.44	1	0	1	0	0	-	-	-	-	-	-	13.5	11	0.01	20.5	4.41 19/12/2017	
3	12	Punta Quilla	8.25	41800	85	148	374	72.9	1	0.5	0	1	1	1	1	1	1	1	-	10.89	32800	21.58	14.6	4.13 19/12/2017	
3	12	Río Chico	7.97	119	135	470	11310	214.53	1	0	1	0.5	1	1	1	1	1	1	1	36.8	14.1	72	0.05	208	4.79 18/12/2017
4	1	C. Fuhr	8.25	50	55	75	1257	5.15	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	1118.2	13.2	15	0.01	21.8	175.90 22/01/2018
4	1	Puente Viejo	7.84	46	53	66	1043	2.43	0.5	0	0	0	1	-	-	-	-	-	-	1108.6	13.3	15	0.01	27.7	9.22 24/01/2018
4	1	I-Pavón	7.57	41	42	60	588	11.91	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	14.2	12	0.01	19	4.95 25/01/2018	
4	1	Punta Quilla	8.17	39800	70	116	882	572	1	1	0	0	1	-	-	-	-	-	-	12.7	33200	21.85	6.5	3.52 19/01/2018	
4	1	Río Chico	7.86	134	62	202	1711	56.18	1	0	0	1	0	-	-	-	-	-	17.1	13.5	75	0.05	51	4.68 23/01/2018	
5	2	C. Fuhr	8.75	56	31	45	2968	1.74	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	1522.4	13.5	15	0.01	19.2	176.83 19/02/2018	
5	2	Puente Viejo	8.32	47	32	85	1738	9.89	1	0	0	1	-	-	-	-	-	-	1514.4	13.4	14	0.01	30.3	9.79 22/02/2018	
5	2	I-Pavón	7.23	44	32	51	1417	12.55	1	1	0	1	-	-	-	-	-	-	13.6	14	0.01	30.7	5.47 20/02/2018		
5	2	Punta Quilla	8.28	38600	43	103	1791	6.17	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	10.2	14.6	91	0.06	22	4.59 20/02/2018	
5	2	Río Chico	8.55	136	31	53	1684	7.6	1	0	1	1	-	-	-	-	-	-	31900	20.99	13.2	4.63	23/01/2018		
6	3	C. Fuhr	7.68	44	49	51	40	5.73	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	2122	11.5	11	0.01	8.05	177.85 19/03/2018	
6	3	Puente Viejo	7.58	39	61	96	1885	2.11	1	1	0	1	0	-	-	-	-	-	2102.9	13.4	14	0.01	30.3	10.33 21/03/2018	
6	3	I-Pavón	7.47	43	59	118	3196	1	1	1	0	0	-	-	-	-	-	-	14	14	0.01	25.8	5.99 26/03/2018		
6	3	Punta Quilla	8.3	36900	92	315	6671	2.11	0	1	0	1	1	1	1	1	1	-	-	11.2	32690	21.51	12.9	4.76 20/03/2018	
6	3	Río Chico	7.83	133	60	82	3583	22.95	1	0	0	1	-	-	-	-	-	-	9.8	5.7	57	0.04	26.4	4.59 20/03/2018	
7	4	C. Fuhr	7.75	42	41	135	1123	21.03	1	1	0	0	0	-	-	-	-	-	1942.2	8.8	11	0.01	25	176.77 23/04/2018	
7	4	Puente Viejo	7.77	41	31	91	1551	18.46	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	1486.4	8.4	0	0.00	21	9.74 25/04/2018	
7	4	I-Pavón	7.92	40	30	69	28	10.86	1	1	0	1	0	-	-	-	-	-	8.7	0	0.00	23	4.90 24/04/2018		
7	4	Punta Quilla	8.15	37200	20	319	2406	117.8	1	1	0	1	1	1	1	1	1	-	-	32690	21.51	31	5.41 24/04/2018		
7	4	Río Chico	8.05	106	140	1681	4759	718.41	1	1	0	1	1	1	1	1	1	-	37.8	8	48	0.03	759	3.56 25/04/2018	

Resumen de resultados de campo y laboratorio de los muestreos mensuales (cont.)

Campaña	Mes	Sitio	Determinaciones laboratorio												Determinaciones campo											
			pH	Conductividad [µS/cm]	Oxitosfato [µg P/L > 10]	Fósforo Total [µg P/L > 10]	Nitrógeno Total (poro <15 µm)	SST [mg/l]	Cuarzo (Qz)	Plagiocla sa (Pl)	Feldespato potásico (Fk)	Argilomin erales (Am)	Sal Halita (no SST)	Arcillas < 4 µm	Clorita (Cl)	Plagi o casa (Pl)	Sal Halita (no SST)	Caudal [m³/s]	Temp. [°C]	Conductividad [µS/cm]	Turbidez [NTU]	Cota Pelo Agua [IGN]	Fecha			
8	5	C. Fuhr	6.48	38	36	38	348	0.15	0	0	0	0	0	-	-	-	-	1167.2	8	0	0.00	4.6	175.99	23/05/2018		
8	5	Puente Viejo	7.08	36	20	36	668	0.75	1	0	0	0	0	-	-	-	-	1140.7	8	0	0.00	7.4	9.31	24/05/2018		
8	5	I-Pavón	7.74	37	19	49	1631	1.37	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	8	0	0.00	8.4	4.57	26/05/2018		
8	5	Punta Quilla	7.26	36900	80	242	4973	56.73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	8.01	30600	20.13	24	4.95	25/05/2018		
8	5	Río Chico	7.96	143	60	152	3663	11.32	1	0	0	0	0	-	-	-	-	13.7	7.8	710	0.47	43	3.59	25/05/2018		
9	6	C. Fuhr	6.91	41	26	45	856	10.38	1	0.5	0	0	0	-	-	-	-	833.9	5.1	0	0.00	13.8	175.22	22/06/2018		
9	6	Puente Viejo	7.07	40	75	38	107	9.44	1	0.5	0	0	0	-	-	-	-	851.9	4.2	0	0.00	10.9	8.82	25/06/2018		
9	6	I-Pavón	7.25	41	22	45	<10	9.26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	2.9	0	0.00	12.4	4.61	23/06/2018		
9	6	Punta Quilla	7.83	37200	98	374	668	116.52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	69	4.72	25/06/2018	52	4.69	23/06/2018		
9	6	Río Chico	7.36	200	81	159	2834	52.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	2.7	0.2	73	0.05	4.52	23/07/2018		
10	7	C. Fuhr	7.8	47	25	42	829	1.74	1	0	0	0	0	-	-	-	-	691	3.6	0	0.00	12.1	174.50	20/07/2018		
10	7	Puente Viejo	7.5	38	27	32	1417	0.15	0	0	0	0	0	-	-	-	-	633.2	2.9	0	0.00	9.4	8.46	21/07/2018		
10	7	I-Pavón	7.58	44	26	40	1364	2.3	1	0	0	0	0	-	-	-	-	2.7	0	0.00	9.3	4.24	22/07/2018			
10	7	Punta Quilla	8.02	35600	108	242	6444	88.35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	32.5	3.67	21/07/2018	31	3.97	18/08/2018	
10	7	Río Chico	8.04	176	30	134	8930	11.31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	3.1	0.9	77	0.05	35.8	4.52	23/07/2018	
11	8	C. Fuhr	7.18	42	48	147	1230	32.15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	516.9	5	0	0.00	43	173.96	17/08/2018	
11	8	Puente Viejo	7.26	40	35	48	1979	11.86	1	0	0	0	0	-	-	-	-	490.9	5	0	0.00	18.6	8.15	20/08/2018		
11	8	I-Pavón	7.35	42	30	33	695	5.09	1	0	0	0	0	-	-	-	-	4.2	0	0.00	15	4.35	18/08/2018			
11	8	Punta Quilla	7.85	39900	143	246	2059	72.63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	31	3.97	18/08/2018		
11	8	Río Chico	7.46	169	109	168	8182	69.21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	6.8	4	790	0.52	78	3.67	19/08/2018	
12	9	C. Fuhr	7.45	39	30	39	2313	3.12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	441.1	5.7	0	0.00	6.4	173.75	23/09/2018	
12	9	Puente Viejo	7.37	36	30	42	4492	1.52	0	0	0	0	0	-	-	-	-	483.3	7	0	0.00	6.5	8.04	25/09/2018		
12	9	I-Pavón	7.26	36	31	32	3048	2.99	1	0	0	0	0	-	-	-	-	7	0	0.00	7.2	4.64	26/09/2018			
12	9	Punta Quilla	7.93	38600	74	236	1684	67.69	1	1	0.5	0	0	-	-	-	-	-	-	-	30	3.85	24/09/2018			
12	9	Río Chico	8.08	147	151	569	9465	163.65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	10.5	7.9	70	0.05	200	3.27	24/09/2018	
13	10	I-Pavón	7.81	51	61	109	6283	19.04	1	0	0	0	0	-	-	-	-	10.7	15	0.01	60	3.83	31/10/2018			
13	10	Punta Quilla	7.63	43600	116	252	4706	61.64	1	0	0	0	0	-	-	-	-	7.7	31950	21.02	27.4	4.34	30/10/2018			
13	10	Río Chico	7.47	144	268	914	18877	430.42	1	1	0	0	0	-	-	-	-	27.6	12.3	91	0.06	530	4.81	31/10/2018		
14	11	I-Pavón	7.54	40	41	137	2487	8.15	1	0	0	0	0	-	-	-	-	13	11	0.01	17.7	3.97	20/11/2018			
14	11	Punta Quilla	7.86	4300	91	139	27	79.74	1	1	0	0	0	-	-	-	-	325.0	21.42	12.8	4.28	21/11/2018				
14	11	Río Chico	7.49	116	179	578	6845	565.56	1	1	0	1	1	0.5	1	-	-	23.44	12.9	72	0.05	335	4.74	21/11/2018		
15	12	I-Pavón	7.36	51	24	62	1150	10.15	1	0	0	0	0	-	-	-	-	14.8	14	0.01	19.7	4.37	17/12/2018			
15	12	Punta Quilla	7.86	42500	58	114	428	40.48	0.5	0	0	0	0	-	-	-	-	12	30100	19.81	7.58	3.04	17/12/2018			
15	12	Río Chico	7.56	113	79	272	3075	72.18	1	1	1	1	1	0.5	1	0	-	15.8	16.7	87	0.06	83	4.65	18/12/2018		
16	1	I-Pavón	7.5	44	28	45	534	11.79	1	0	0	0	0	-	-	-	-	13.6	0	0.00	19.8	4.65	21/01/2019			
16	1	Punta Quilla	7.66	34600	72	220	3716	50.21	1	1	1	0	0	-	-	-	-	12.1	33120	21.79	14.79	5.21	22/01/2019			
16	1	Río Chico	7.45	195	92	294	100.78	1	1	0	1	1	0.5	1	0.5	-	-	5.7	11.8	167	0.11	45.5	4.49	23/01/2019		

Resumen de resultados de campo y laboratorio de los muestrados mensuales (cont.)

Campaña	Mes	Sitio	Determinaciones laboratorio										Determinaciones campo												
			pH	Conductividad	Ortofósforato	Fósforo Total	Nitrógeno Total	SST (poro <15 µm)	Cuarzo	Plagiocla- sa	Feldespato potásico	Argillomin- erales	Sal Halita (no SST)	Acillas < 4 µm	Esmerrita	Cadinita	Quarzo	Illita	Plagio- clasa	Gaudal	Temp.	Conductividad	Turbidez	Cota Pelo Agua	Fecha
[-]	[µS/cm]	[µg P/L >10]	[µg P/L >10]	[µg N/L > 10]	[mg/l]	(poro <15 µm)	(Qz)	(Fk)	(Ar)	(Ha)	(Sm)	(K)	(Qz)	(I)	(P)	(Ha)	[m³/s]	[°C]	[µS/cm]	[NTU]	[GN]				
17	2	I-Pavón	7.62	45	53	59	1620	13.15	1	0	0	0	-	-	-	-	-	11.7	11	0.01	20.1	5.12	26/02/2019		
17	2	Punta Quilla	7.4	34400	50	248	3021	83.1	1	1	0	0	-	-	-	-	-	11.3	33590	22.10	24.4	4.50	25/02/2019		
17	2	Río Chico	7.47	119	98	637	15802	177.52	1	1	0	0	0	0.5	1	0.5	1	8.6	14.7	75	0.05	380	4.57	27/02/2019	
18	3	I-Pavón	7.97	44	38	97	695	11.91	1	0	0	0	-	-	-	-	-	13.1	15	0.01	19.7	5.10	02/04/2019		
18	3	Punta Quilla	8.1	38100	43	166	1336	47.15	1	0	0	0	0.5	1	0.5	1	0	11.66	30240	19.90	11.7	4.50	02/04/2019		
18	3	Río Chico	8.07	165	51	176	6684	61.14	1	1	0	0	0	0.5	1	0.5	1	5.4	14.9	105	0.07	40.1	4.54	02/04/2019	
19	4	I-Pavón	6.92	41	23	35	267	8.89	1	0	0	0	-	-	-	-	-	8.5	0	0.00	15.1	5.10	29/04/2019		
19	4	Punta Quilla	7.89	38700	96	301	9385	104	1	1	0	0	0.5	-	1	1	0	-	9.3	2601	1.71	35.8	2.09	29/04/2019	
19	4	Río Chico	7.27	131	49	188	5535	48.16	1	1	0	0	0	-	1	1	0	-	10.5	7.9	620	0.41	55	4.60	30/04/2019
20	5	I-Pavón	7.94	64	39	59	187	5.92	1	0	0	0	-	-	-	-	-	7.8	0	0.00	10.2	4.88	27/05/2019		
20	5	Punta Quilla	7.58	38000	107	135	53	30.97	1	0	0	0	-	-	-	-	-	-	6.9	2.89	27/05/2019	4.85	28/05/2019		
20	5	Río Chico	7.89	126	95	765	13476	342.62	1	1	1	1	1	-	1	1	-	37.2	3	400	0.26	237.0			

Tabla 2.5: Comparación de sólidos suspendidos en muestras de fondo y de media profundidad

2.2.8. Monitoreo continuo

Como parte de las campañas de caracterización, se fondearon equipos OBS 3A para medición continua de nivel, conductividad, temperatura y turbidez, con un intervalo de adquisición de 10 minutos. Los sitios monitoreados fueron:

- Isla Pavón: Tramo final del río Santa Cruz, cuya dinámica es en parte fluvial y en parte afectada por las mareas. Para conocer el comportamiento del río Santa Cruz, y como condición de contorno para un modelo numérico hubiera sido deseable monitorear Puente Viejo (no afectado por mareas). Los registros, que se muestran en la Figura 2.25, abarcan 20 meses.
- Punta Quilla: representativo de la dinámica del estuario, cercano al encuentro del mismo con el mar y donde las mareas son las principales forzantes. Las mediciones disponibles a lo largo de 20 meses se presentan en la Figura 2.26.
- Río Chico: sobre el puente de RN3, la dinámica del río Chico se ve afectada por las mareas. El equipo de medición se ubicó en fecha posterior a los otros sensores, por lo que sus registros, mostrados en la Figura 2.27, abarcan 7 meses.

La evolución de los registros y dependencia con otras variables se discuten en las próximas secciones.

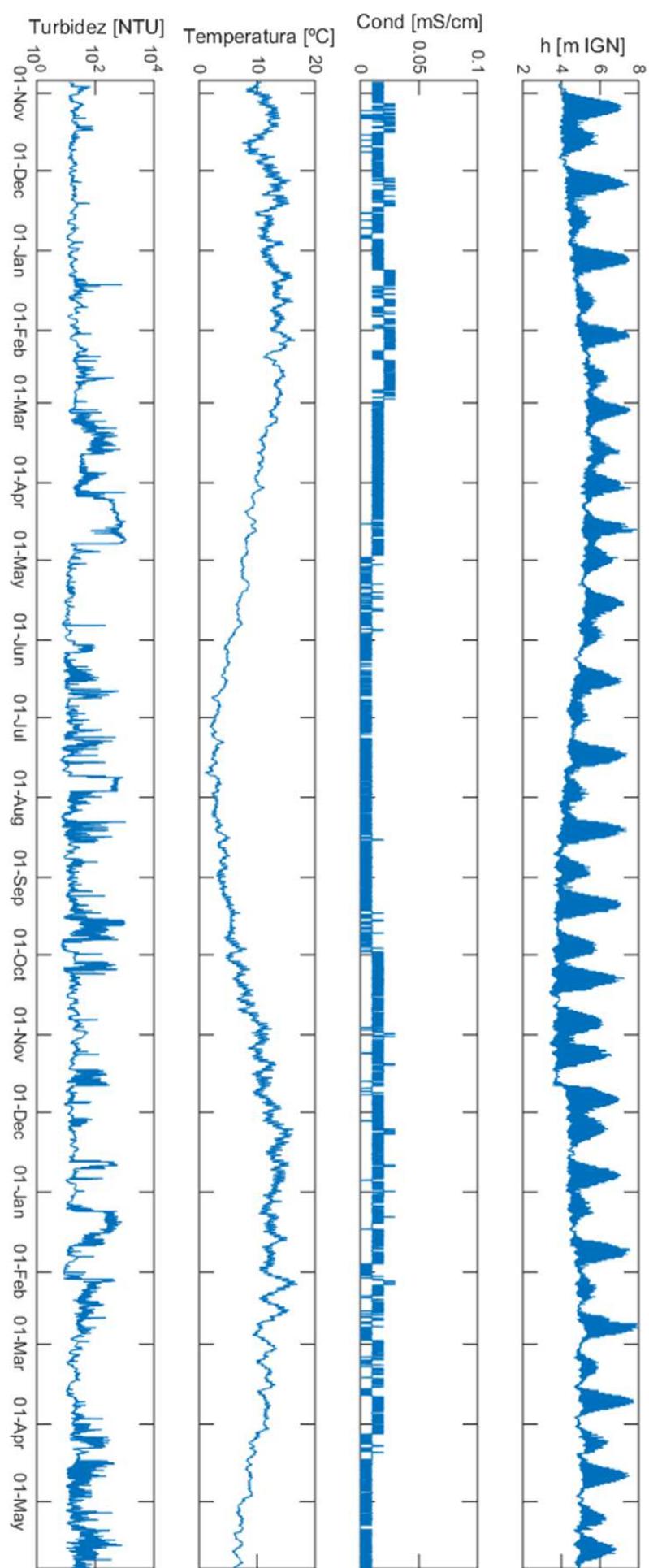


Figura 2.25: Registros continuos del OBS de Isla Pavón: nivel, conductividad, temperatura y turbidez

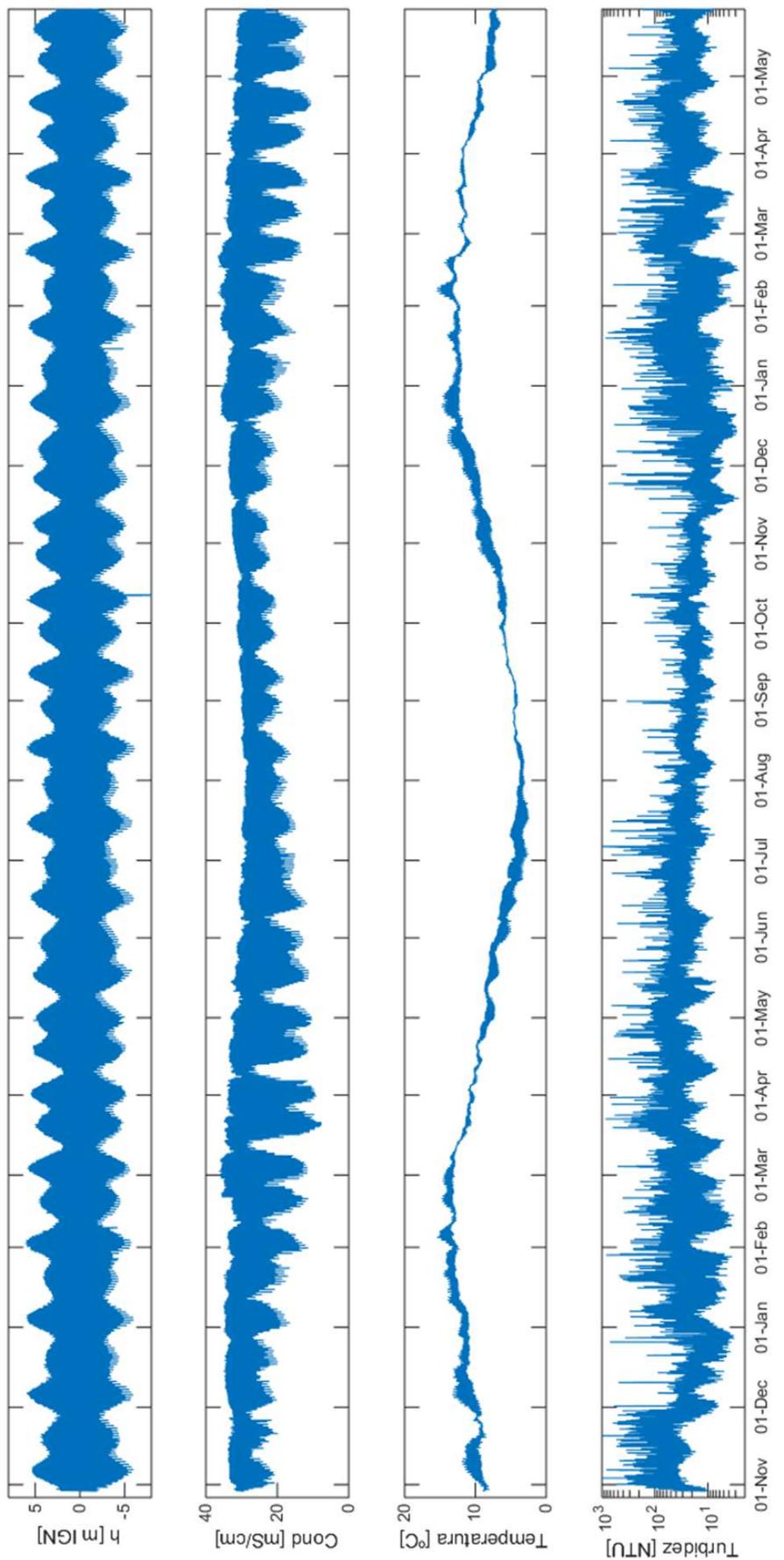


Figura 2.26: Registros continuos del OBS de Punta Quilla: nivel, conductividad, temperatura y turbidez

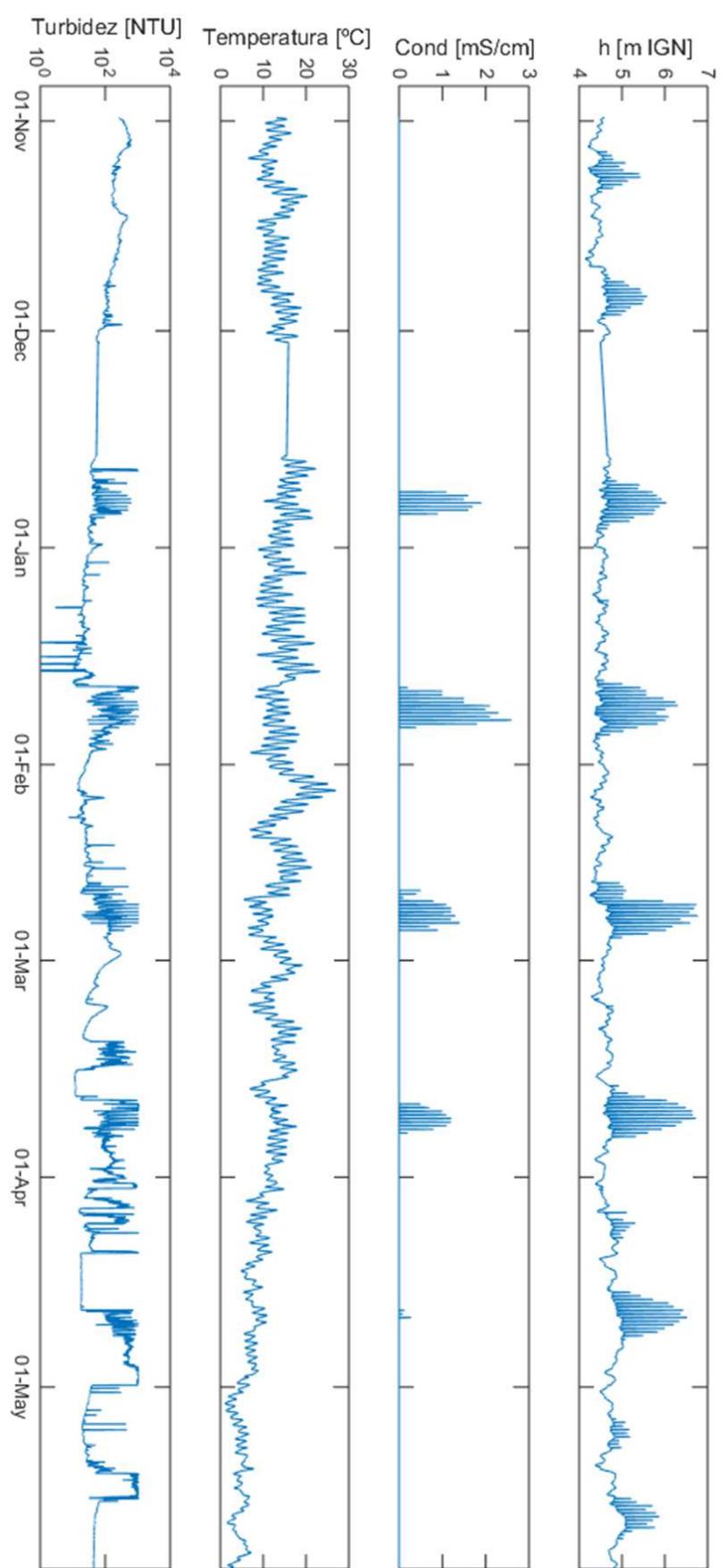


Figura 2.27: Registros continuos del OBS de río Chico: nivel, conductividad, temperatura y turbidez

Por último, resta mencionar un monitoreo continuo de menor duración efectuado durante los primeros reconocimientos del estuario, ejecutado en diciembre de 2016. Consistió en la instalación de dos estaciones oceanográficas completas de registro automático, una en el mar y otra dentro del estuario, cuyas ubicaciones están identificadas en la Figura 2.11. Las mismas permitieron medir durante 10 ciclos completos de mareas semidiurnas las siguientes variables oceanográficas:

- Perfil vertical de velocidades, cada 10 minutos, con 2 equipos ADCP Nortek AWAC, de 600 kHz y 400 kHz de frecuencia acústica.
- Salinidad, temperatura, mareas y turbidez en el fondo cada 10 minutos, con 2 equipos turbidímetros nefelométricos digitales OBS-3A.

En la Figura 2.28 se aprecia la evolución temporal del perfil vertical de velocidades horizontales, en que los vectores representados dan cuenta de la magnitud y dirección de las corrientes. Se advierte el desplazamiento armónico de la superficie libre, y cómo el mismo incide en la distribución de velocidades. En las Figuras 2.29 y 2.30 se detalla la evolución temporal de las restantes variables próximas al fondo.

Según se verá en el próximo capítulo, la información provista por el monitoreo continuo resulta fundamental para garantizar la representatividad de las modelaciones numéricas.

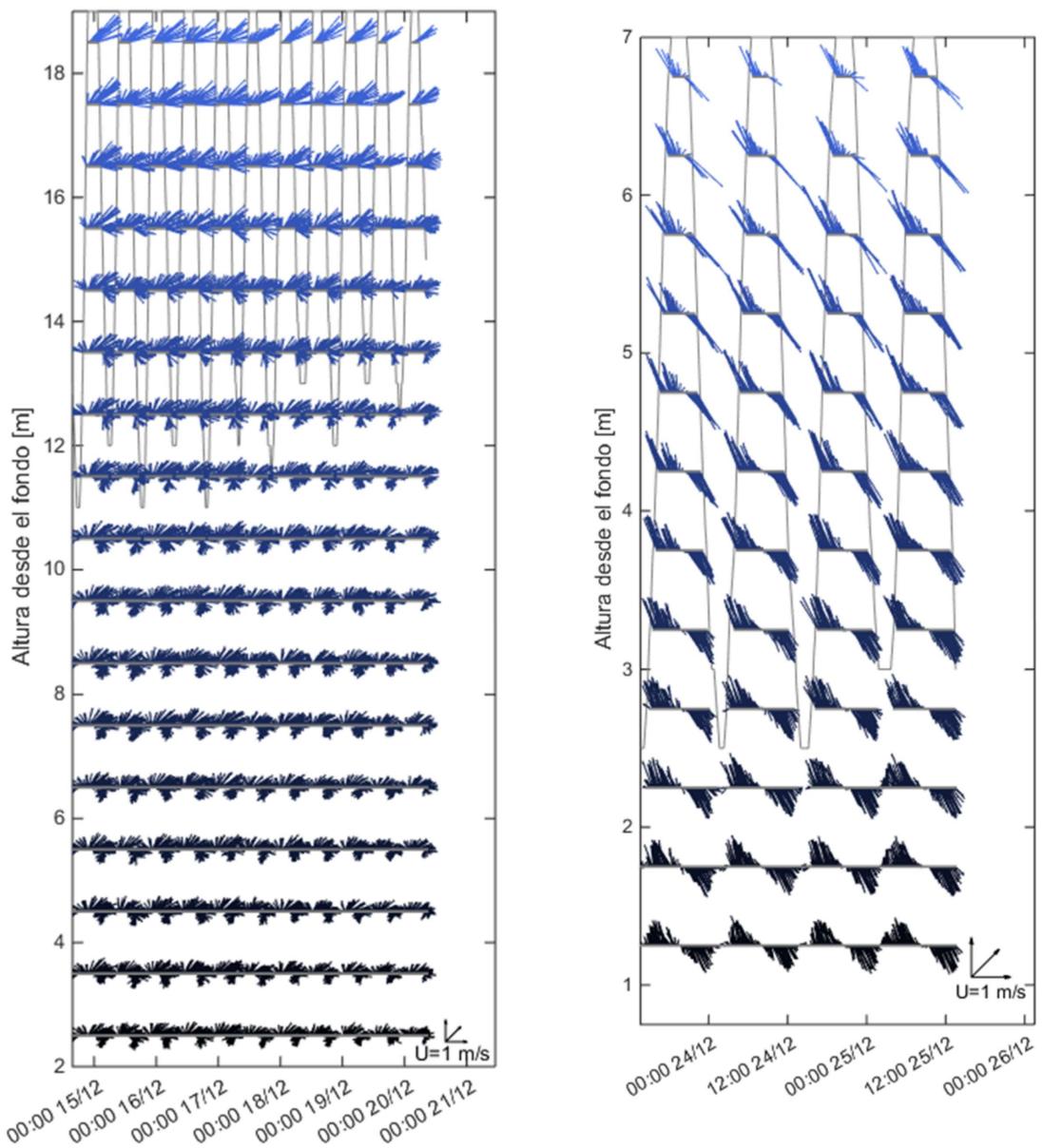


Figura 2.28: Registros continuos de perfil vertical de velocidades horizontales (magnitud y dirección) en estaciones Mar (izq.) y Estuario 2 (der.). La línea gris referencia ascenso y descenso de la cota de pelo de agua.

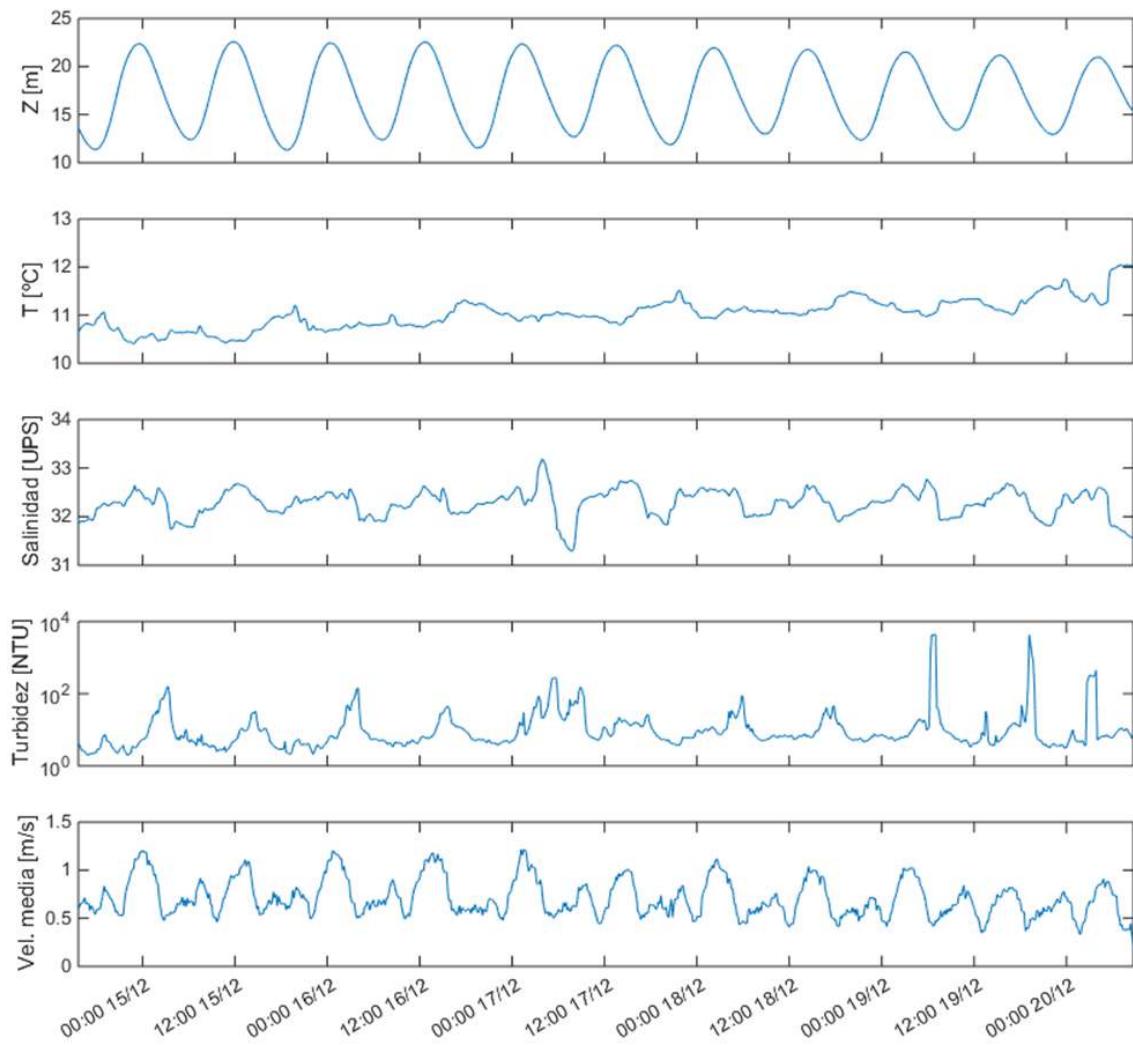


Figura 2.29: Registros continuos en estación Mar: profundidad, temperatura en el fondo, salinidad en el fondo, turbidez en el fondo y velocidad media vertical.

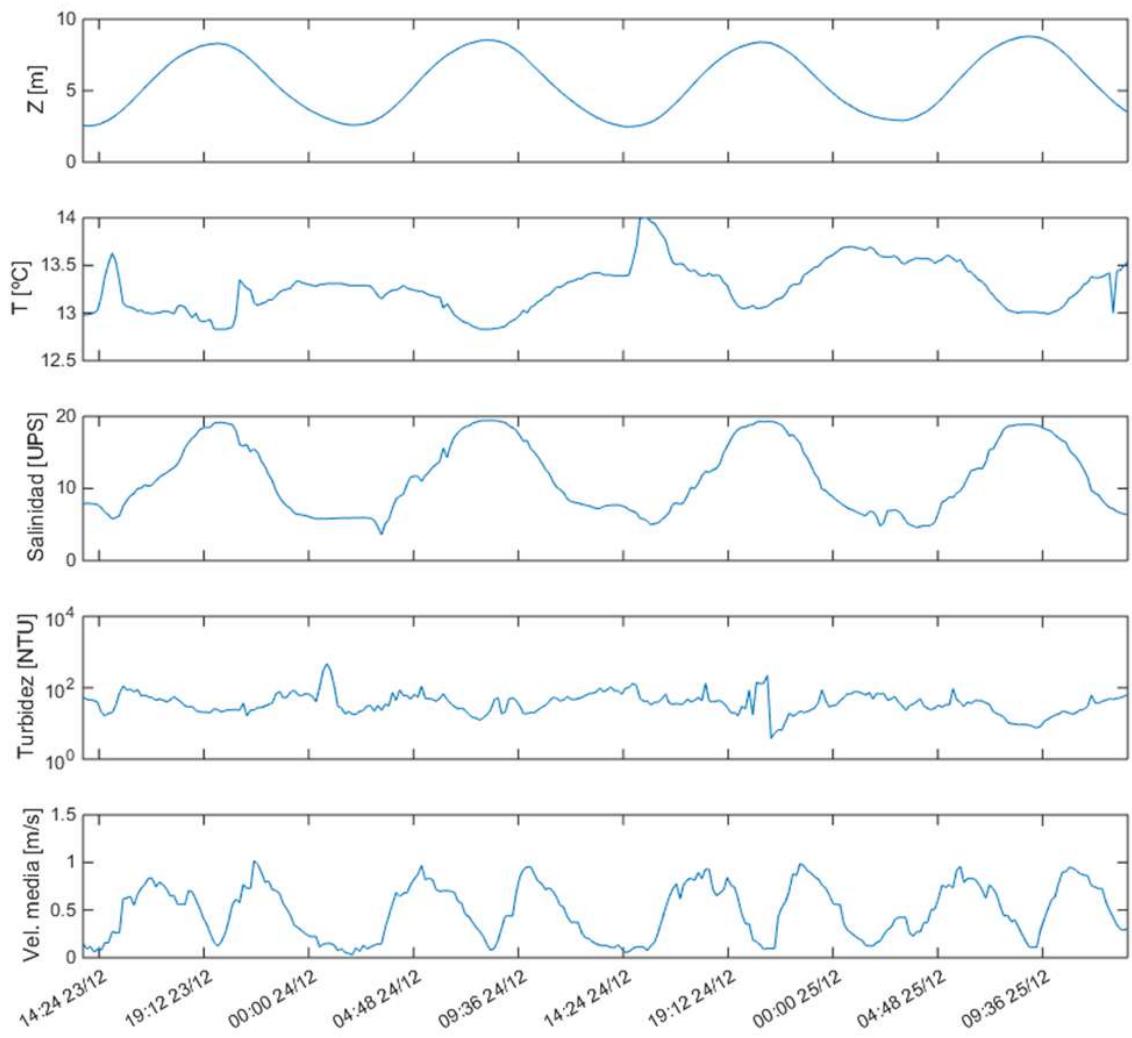


Figura 2.30: Registros continuos en estación Estuario 2: profundidad, temperatura en el fondo, salinidad en el fondo, turbidez en el fondo y velocidad media vertical.

2.2.9. Aforos líquidos y sólidos

Los aportes de agua dulce al estuario están dados por el ingreso de los ríos Santa Cruz y Chico, con valores módulo del orden de 700 y 20 m³/s respectivamente, según se analiza más adelante. Aguas abajo del estuario, ocurre el ingreso y egreso de agua de mar en magnitudes significativamente mayores por acción de las mareas astronómicas, según se discutirá al evaluar el modelo numérico. En esta sección se da cuenta de cómo se caracterizaron los caudales ingresantes desde los ríos Santa Cruz y Chico.

Antes de presentar los estudios *ad hoc* motivados por la construcción de las presas, cabe mencionar el conocimiento antecedente. El hidrograma del río Santa Cruz es bien conocido. Desde el año 1955 opera en la cabecera del río la estación hidrométrica Charles Fuhr (estación 2802 de la Red Hidrológica Nacional [6]), en la cual la conjunción de ejecución de aforos de frecuencia mensual y registro diario de niveles ofrece una sólida ley altura-caudal y una serie ininterrumpida de caudales medios diarios, graficada en Figura 2.31. Esto, sumado a la ausencia de cursos de agua que realicen aportes significativos aguas abajo, resultan en un sólido conocimiento del régimen hidrológico del río y la posibilidad de generar hidrogramas de distinta probabilidad de excedencia. Queda así caracterizada la variabilidad temporal de los aportes del río Santa Cruz al estuario. El régimen del río es de origen glaciar. El caudal medio es de 696 m³/s, y el máximo observado corresponde al día 18 de febrero de 1988, con un valor de 2520 m³/s. La serie anual muestra una elevada regularidad, con máximos a fines del verano (con caudales del orden de 1200 m³/s) y mínimos en el invierno (con caudales del orden de 250 m³/s).

Se invita al lector a consultar el libro de esta colección *Crecidas de diseño del río Santa Cruz* [17] para acceder a un estudio pormenorizado del régimen de caudales del río Santa Cruz.

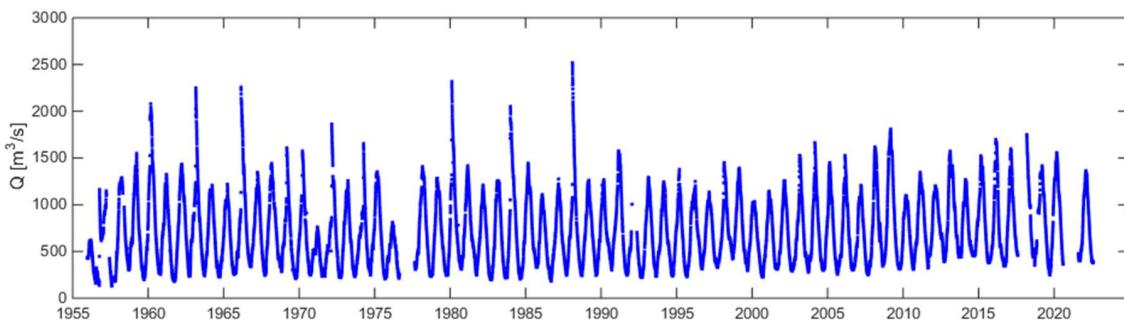


Figura 2.31: Serie de caudales diarios en la estación Charles Fuhr.

En cuanto al río Chico, el conocimiento es más limitado. La Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRRHH) ha implantado recientemente una estación hidrométrica en el puente de la RN3, pero el análisis de dicha información resulta más desafiante. A diferencia del río Santa Cruz, cuyo hidrograma presenta un patrón anual relativamente estable, el régimen del río Chico está dominado por eventos de lluvia, lo que da lugar a caudales más irregulares y variables entre años. Además, los registros disponibles corresponden a una sección influenciada por el remanso de la marea, lo que introduce una complejidad adicional en la interpretación de los datos.

Respecto a la ejecución de campañas de aforos líquidos en el marco de caracterización del

estuario del río Santa Cruz, las mismas fueron motivadas por las siguientes necesidades:

- Caracterizar el estado hidrológico al momento de efectuar otras mediciones. Es decir, ejecución de aforo simultáneo a la toma de muestras de agua para determinación de calidad de agua.
- Ejecutar aforos sólidos, entendidos como la determinación de la masa total de sedimentos transportados por el flujo que pasan por una sección transversal del cauce en una unidad de tiempo. Esta información no existía previamente.
- Generar leyes altura-caudal en sitios del estuario. Se trata de información útil para desarrollar un modelo numérico del mismo.
- Caracterizar secciones transversales del río en lo concerniente a tirantes y velocidad del flujo. Este aspecto reviste interés ambiental.

Por esta razón, se implementó un programa de monitoreo mensual de caudales en Puente Viejo para el río Santa Cruz, y en puente de la RN3 sobre río Chico, de acuerdo con el cronograma de la Figura 2.17. Con inicio en octubre de 2017, los aforos en río Chico se extendieron durante 20 meses según lo previsto, y totalizaron 34 campañas en Puente Viejo, de las cuales 29 tuvieron lugar ininterrumpidamente hasta la imposición de restricciones asociadas a la pandemia de COVID en 2020. El régimen mensual de caracterización en Puente Viejo debería continuar vigente actualmente, pero su ejecución ha sido suspendida temporalmente.

Resta mencionar que los aforos líquidos ejecutados en Puente Viejo hasta octubre de 2018 formaron parte del programa de campañas de caracterización del estuario, y posteriormente a esa fecha se ejecutaron en el marco de la Red Hidrometeorológica e Hidroambiental de la cuenca. Por este motivo, a partir de entonces la metodología cambió ligeramente y se incorporó la ejecución de aforos sólidos, manteniendo una periodicidad mensual.

Metodología de los aforos

La sección de aforo que caracteriza el tramo final del río Santa Cruz se ubica en inmediaciones de Puente Viejo, 12 km aguas arriba de la ciudad de Comandante Luis Piedrabuena (Figura 2.32). Este sitio se encuentra fuera de la zona de influencia de las mareas, según se expuso en la sección 2.2.1 *Caracterización de ondas de marea*. Como referencia altimétrica para los niveles de cota de pelo de agua se consideró el estribo de un puente hoy desmantelado, ubicado aproximadamente 1.5 km hacia aguas abajo de la sección de trabajo. En la sección de interés el río presenta condiciones aptas para realización de aforo, con menor ancho superficial que los alrededores y ausencia de canales secundarios. Según el caudal del río, los anchos superficiales están entre 160 y 260 m, los tirantes máximos son de entre 6 m y 8 m, mientras que las mayores velocidades pueden alcanzar hasta 1.5 m/s o 3 m/s según se trate de estiaje o creciente.

Las mediciones de caudal líquido se hicieron desde lancha semirrígida, empleando un equipo ADCP. En las primeras campañas, tras delimitar la sección con postes verticales se tomaron perfiles estáticos separados del orden de 10 m, habiendo posicionado dinámicamente la lancha



Figura 2.32: Sección de aforo Puente Viejo. Localización y fotografía de los estribos del antiguo puente

y permaneciendo en cada punto unos segundos. De esta manera se obtuvieron profundidades y perfiles de velocidades con su correspondiente coordenada GPS. En campañas posteriores a octubre de 2018, la sección se recorrió varias veces con ADCP SonTek S5 (habitualmente 6 pasadas), midiendo profundidades y perfiles de velocidades en forma continua mientras se desplazaba la embarcación. La caracterización del perfil de velocidades se complementó con la medición de la cota de pelo de agua respecto a un punto fijo auxiliar sobre el estribo del puente, cuya cota se determinó en 10.916 m IGN⁴.

Respecto a aforo sólido, en las primeras campañas no se dio como tal, si bien en la progresiva de mayor profundidad se capturó agua con la botella tipo Niskin de 8 l de capacidad, llenando un bidón de 2 l para posterior análisis en laboratorio de sólidos suspendidos (según se detalló en 2.2.7 *Muestreos mensuales*). Cabe mencionar que con el conocimiento actual concerniente a los sólidos suspendidos del río, la incertidumbre en las concentraciones determinadas a partir de estas muestras parece significativa. A partir de octubre de 2018 sí se efectuó aforo sólido, si bien las características de la embarcación no permitieron emplear un muestreador integrador en la vertical. Concretamente, para la evaluación del transporte en suspensión, la toma de muestras de agua se realizó en tres verticales utilizando el método de igual incremento de ancho (EWI, por sus siglas en inglés Equal Width Increment), posicionando el muestreador a profundidades correspondientes al 40 % y 90 % del tirante total, medidas desde la superficie. El análisis granulométrico de las muestras fue realizado con equipo de difracción láser HORIBA LA-910, y resultó en la obtención de curvas granulométricas que se presentan en las próximas secciones.

En lo concerniente a transporte de fondo, para evaluarlo se empleó la función bottom track del ADCP, manteniendo el minicatamarán fijo y evaluando desplazamientos registrados. Dado que todas las trayectorias con referencia bottom track se ubicaron hacia aguas abajo respecto de la trayectoria registrada con GPS, se concluyó que el fondo se encuentra inmóvil sin transporte de material de fondo apreciable.

⁴IGN: Instituto Geográfico Nacional, organismo oficial que define y mantiene los sistemas de referencia geodésicos en Argentina.



Figura 2.33: Aforo líquido con ADCP y sólido con botella Niskin en Puente Viejo.

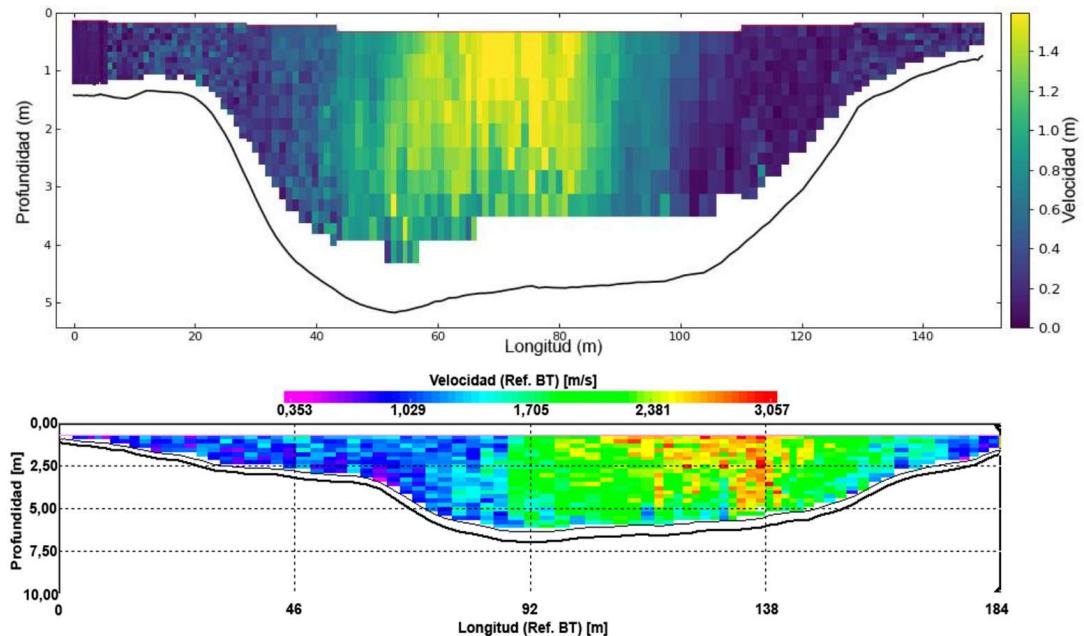


Figura 2.34: Perfiles transversales de velocidades en Puente Viejo. Arriba, para un caudal de $295 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre de 2022, y abajo, para caudal de $1338 \text{ m}^3/\text{s}$ en abril de 2019. Reproducidos de los informes de campaña [14] y [13].

En río Chico, los aforos se efectuaron desde el puente vial de RN3 (ver Figura 2.35). Allí la sección presenta un ancho superficial que ronda los 70 m, con tirantes máximos del orden de un metro. A diferencia del río Santa Cruz, la turbidez del agua es significativa y en las márgenes se observan arenas con alto contenido de finos. Para efectuar el aforo líquido se utilizó un correntómetro de hélice OTT, permaneciendo el equipo en cada punto durante unos 10 segundos, hasta contabilizar un número de vueltas prefijado. Cada progresiva se relevó midiendo en puntos espaciados verticalmente unos 20 cm, totalizando del orden de 12 progresivas relevadas. En cuanto a la caracterización del transporte de sedimentos, se incluyó la toma de una única muestra de agua de 2 l con una botella tipo Niskin para posterior análisis.

Cabe mencionar que todas las mediciones descriptas se efectuaron en horarios alejados de pleamar, a fin de minimizar el efecto de las mareas. En la Tabla 2.6 se presenta un resumen de la información recabada en las campañas posteriores a octubre de 2018, mientras que un análisis detallado se presenta en las siguientes secciones de la publicación.

Tabla 2.6: Datos obtenidos en Puente Viejo durante los aforos de la Red HM-HA

N.	Fecha	Resumen de aforos						Granulometría de sólidos suspendidos						Parámetros hidráulicos					
		Caudal líq. [m ³ /s]	Concentración [mg/l] Finos	Concentración [mg/l] Gruesos	Total	Transporte suspensión [kg/s] Finos	Transporte suspensión [kg/s] Gruesos	Media [μm]	Mediana [μm]	Varianza [μm ²]	Desvio [μm]	Moda [μm]	Tempo. [°C]	Ancho [m]	Área [m ²]	Prof. med [m]	Vel. med [m/s]	Cota [m]	
1	25/10/2018	377	13.1	1.9	4.9	0.7	5.6	10	66	22341	150	27	172	371	2.35	1.24	8.22		
2	22/11/2018	460	6.6	1.9	3.02	0.88	3.9	7	21	1117	33	7	327	509	2.3	0.97	8.52		
3	13/12/2018	685	9.8	2.5	6.7	1.7	8.4	8	37	5441	74	8	200	696	-	1.34	8.92		
4	31/01/2019	931	8.4	5.9	7.81	5.51	13.3	16	107	29099	171	366	284	12.9	212	836	3.9		
5	28/02/2019	1296	17.1	12.2	22.1	15.8	37.9	40	122	19341	139	28	11.8	210	811	3.9	1.55		
6	28/03/2019	1235	9.4	7.4	11.6	9.1	20.7	12	44	5076	71	320	9.6	226	843	3.7	1.52		
7	25/04/2019	1338	6.7	5.1	9	6.8	15.8	36	138	26566	163	48	6.2	205	758	3.7	9.4		
8	30/05/2019	1060	7.6	1.9	8	2.1	10.1	12	39	3793	62	48	6.2	205	758	3.7	1.4		
9	27/06/2019	675	5.7	2.2	3.83	1.45	5.3	11	36	3793	62	16	3.6	203	661	3.25	1.02		
10	01/08/2019	513	11.1	3.1	5.7	1.59	7.3	8	43	6407	80	8	6.6	191	564	3	0.91		
11	29/08/2019	393	10.6	2.8	4.18	1.09	5.3	5	25	2112	46	2	4.7	191	519	2.7	0.76		
12	03/10/2019	317	13.8	0.8	4.36	0.24	4.6	4	52	11098	105	2	7.9	175	477	2.73	7.92		
13	31/10/2019	324	4.1	0.2	1.34	0.07	1.4	8	35	4574	68	9	11.9	170	483	2.85	0.67		
14	21/11/2019	446	11.1	2.1	4.95	0.91	5.9	5	43	7806	88	2	12.6	184	539	2.93	0.83		
15	12/12/2019	611	109.4	2.6	66.8	1.6	68.4	4	55	10108	101	244	12.6	194	599	3.08	1.02		
16	16/01/2020	919	25.6	3.9	23.5	3.6	27.1	9	73	17265	131	322	12.2	216	733	3.4	1.26		
17	21/02/2020	1270	7.5	1.5	9.5	1.9	11.4	10	61	12474	112	323	13.3	225	873	3.87	9.43		
18	23/06/2022	576	2.4	0.5	1.38	0.27	1.7	12	33	2610	51	11	3.95	186	628	3.39	0.92		
19	01/08/2022	366	5.4	1.4	1.98	0.51	2.5	7	60	10683	103	2	2.6	171	528	3.09	0.69		
20	02/09/2022	295	4.4	0.5	1.29	0.15	1.4	16	53	7487	87	42	7	162	488	3.01	0.72		
21	28/09/2023	315	7.2	0.7	2.27	0.23	2.5	6	68	12308	111	280	6.7	171	504	2.4	0.62		
22	Oct-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		



Figura 2.35: Puente de la RN3 sobre el Río Chico. Fotografía del flujo tomada desde margen izquierdo (izq.), y recolección de la muestra de agua de botella Niskin de 8 lts. (der.).

2.2.10. Limnología

El programa de monitoreo limnológico tiene por objetivo realizar la caracterización estacional de la comunidad limnológica del río Santa Cruz (riqueza, abundancia y diversidad de zooplancton y fitoplancton, bentos y macroinvertebrados acuáticos), así como monitorear posibles cambios durante la construcción y operación de las obras, incluyendo además parámetros físicos y químicos, calidad del agua, nutrientes, presencia de especies exóticas, etc. Las campañas realizadas estacionalmente para la toma de muestras de comunidades bentónicas, planctónicas y de agua para análisis hidroquímicos, comprenden 16 estaciones a lo largo de la cuenca del río Santa Cruz. Concretamente, las pertenecientes al área del estuario son las identificadas como SC14 en Puente Viejo, SC9 en puente RN3 en Piedrabuena, SC10 aguas abajo de la planta de tratamiento, SC11 cercana a la desembocadura de río Santa Cruz en el estuario, RC11 en río Chico a la altura del puente de RN3, y PSC13 o PQ13 en el estuario Puerto Santa Cruz o Punta Quilla, todas ellas indicadas en la Figura 2.36. La toma de muestras se efectúa en centro de cauce o litoral según el sitio y las condiciones climáticas. En las primeras campañas las muestras para análisis físico-químicos eran enviadas a cierto laboratorio, pero ante el reiterado reporte de resultados anómalos, a partir de primavera de 2019 se enviaron a otro. Además de este inconveniente, las campañas no se ejecutaron con la regularidad prevista, pudiendo consultarse en la Figura 2.37 las fechas en las cuales se efectuaron relevamientos en la zona del estuario.

Considerando las limitaciones ya mencionadas y atendiendo a que los parámetros monitoreados no han sido incorporados al modelo numérico del estuario, se ha optado en este libro por no brindar más detalles sobre los mismos.

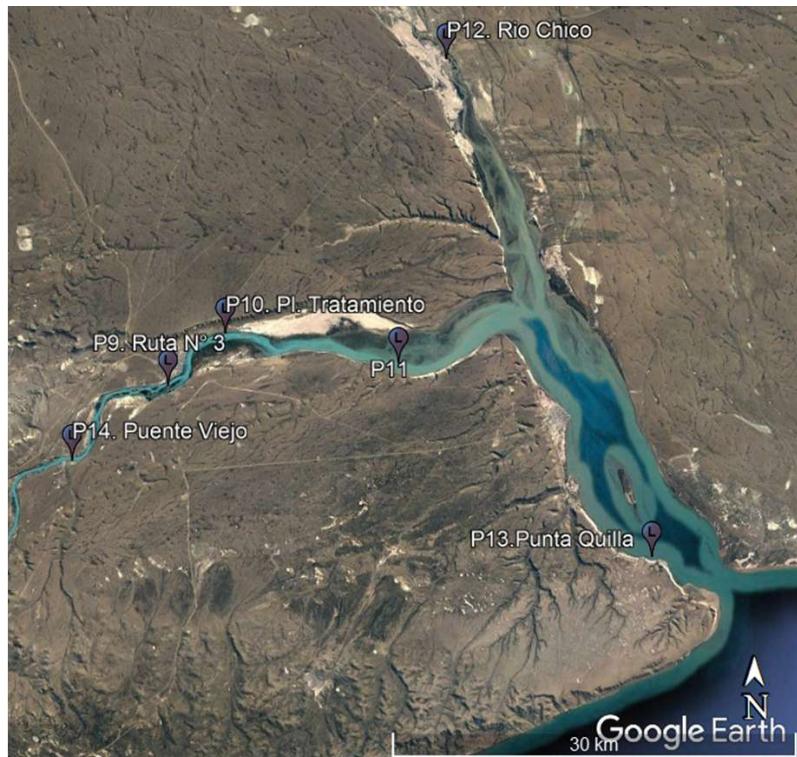


Figura 2.36: Sitios monitoreados durante las campañas de limnología.

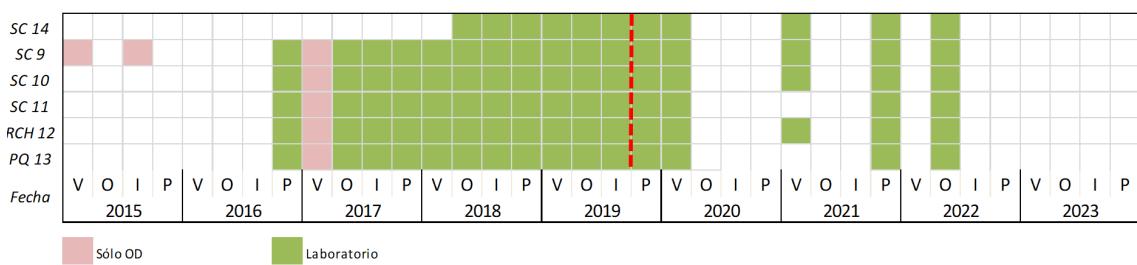


Figura 2.37: Fechas de caracterización limnológica de estaciones de monitoreo del estuario SC14 a PQ13, indicando visitas sólo con medición *in situ* de OD (rosa) y las que proveyeron análisis de laboratorio (verde). La línea roja indica cambio de laboratorio responsable de análisis.

2.3. Análisis e interpretación de los datos medidos

El objetivo de la realización de las campañas es recolectar información para identificar las variables que inciden en la dinámica del estuario y posteriormente calibrar un modelo numérico del mismo. A continuación se analiza la información proporcionada por las mediciones de campo, proponiendo algunas correlaciones entre variables y reglas para elaboración de condiciones de contorno para el modelo numérico que evolucionan en el tiempo, todas de carácter muy sencillo.

2.3.1. Hidrología e hidrodinámica

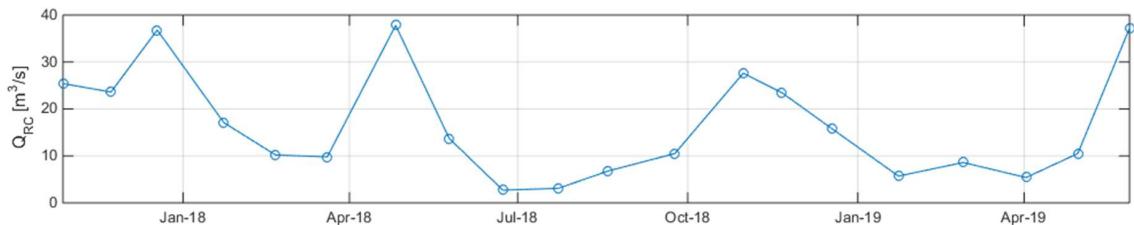
La descripción de la hidrología e hidrodinámica del estuario se aborda a partir de la información recolectada durante las campañas de aforos (en Isla Pavón en río Santa Cruz y en puente de RN3 sobre río Chico), así como a partir de los registros continuos de niveles (equipos OBS de Isla

Pavón, río Chico y Punta Quilla). Con esta información se examina la distribución de velocidades en la sección, la obtención de ley altura-caudal y la caracterización de la influencia de la onda de marea.

Hidrología e hidrodinámica del río Chico

En río Chico se efectuaron aforos durante 12 meses, y adicionalmente se dispone de 7 meses de registros continuos de niveles. La estación monitoreada se encuentra en el puente de la RN3.

Los aforos fueron realizados con molinete OTT, tomando valores en tres puntos en cada vertical (superficial, media profundidad y fondo) siempre que fuera posible. La serie temporal de caudales medidos se muestra en la Figura 2.38. Se observaron valores de entre 2.7 y 37.8 m³/s, dándose estos valores extremos en junio y abril de 2018 respectivamente.



Las distribuciones de velocidades ante estos caudales extremos se presentan en las Figuras 2.39 y 2.40⁵. En cada una de ellas se indica con puntos negros las posiciones en que midió el moliente. A partir de estos datos, se efectuó una interpolación lineal⁶ para obtener el mapa de velocidades al que se superponen isotáqueas. De estas figuras se desprende que el tirante máximo presenta entre 0.8 m y 1.2 m según el escenario, mientras que las velocidades no superan los 0.5 m/s y 1.1 m/s respectivamente.

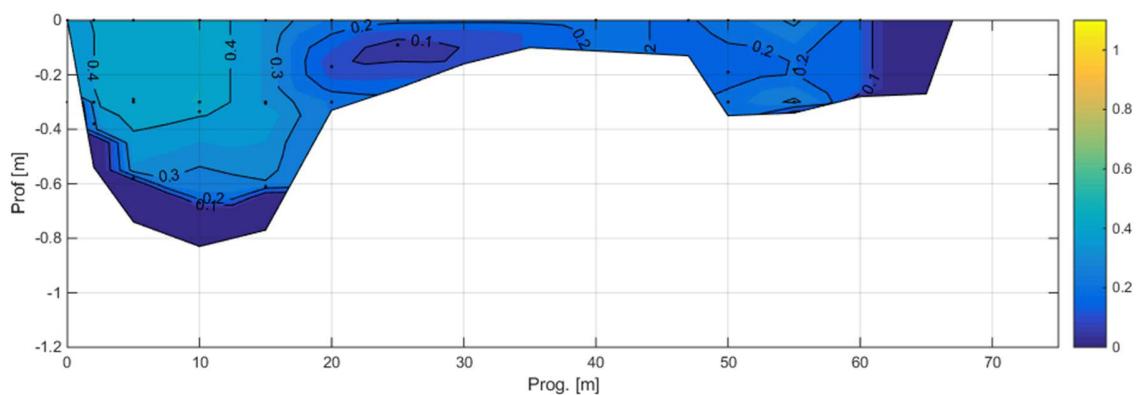


Figura 2.39: Perfil transversal de velocidades registradas en río Chico para un caudal 3.1 m³/s (julio de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s y la progresiva 0 está en margen izquierdo.

Se determinaron parámetros hidráulicos de la sección para los escenarios de caudales máximos

⁵ Debido a ciertas limitaciones operativas en las fechas consideradas (en particular, la imposibilidad de realizar mediciones subsuperficiales en abril y la presencia de hielo en julio) se optó por representar los datos correspondientes a otras fechas con caudales similares.

⁶ En realidad, el perfil de velocidades es logarítmico en cercanías del fondo, pero se adoptó una interpolación lineal para simplificar el postproceso respetando el objetivo de visualizar el patrón general de distribución de velocidades.

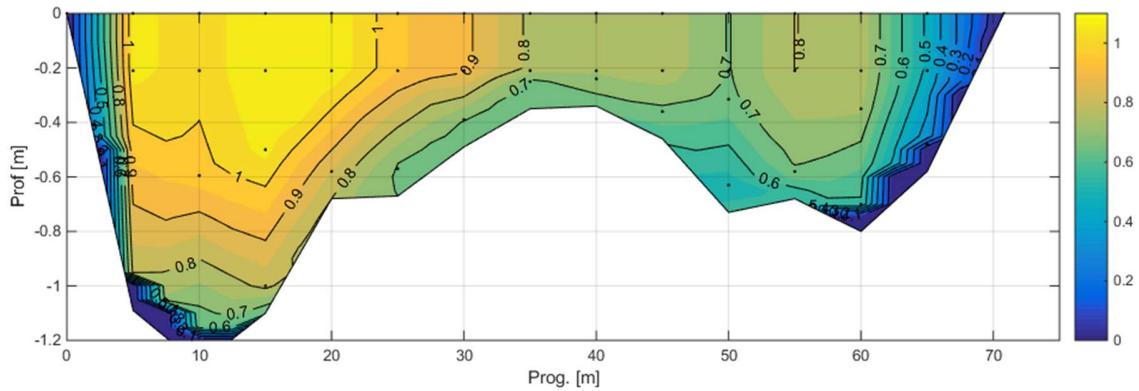


Figura 2.40: Perfil transversal de velocidades registradas en río Chico para un caudal $36.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (diciembre de 2017). El mapa de colores indica velocidades en m/s y la progresiva 0 está en margen izquierdo.

y mínimos aforados, incluyendo ancho superficial B_s , área mojada Ω , tirante máximo h_{\max} , tirante medio $h_{\text{med}} = \Omega/B_s$, velocidad máxima U_{\max} , velocidad media $U_{\text{med}} = Q/\Omega$, y número de Froude $Fr = U_{\text{med}}/\sqrt{2gh_{\text{med}}}$. Ellos se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Parámetros hidráulicos de la sección puente RN3, para caudales máximos y mínimos aforados.

Q [m^3/s]	B_s [m]	Ω [m^2]	h_{\max} [m]	h_{med} [m]	U_{\max} [m/s]	U_{med} [m/s]	Fr [-]
36.8	71	47	1.29	0.66	1.09	0.79	0.31
3.1	67	23	0.83	0.35	0.45	0.13	0.07

La evolución temporal de niveles en río Chico se muestra en Figura 2.41, que presenta las mediciones continuas efectuadas con OBS-3A. Se aprecia la influencia del régimen fluvial en los niveles mínimos, a la par que se evidencia que las pleamaras de cierta amplitud resultan en el pasaje de ondas que aumentan el nivel del río. Adicionalmente, en la misma figura se han superpuesto los datos provistos por la estación hidrométrica de la SsRRHH⁷, cuyos registros no capturan los efectos de la onda de marea. Al comparar ambas series de datos es difícil advertir una correlación entre los niveles medios de uno y otro aparato; no obstante, dado que la serie de la SsRRHH es más extensa (inicia en octubre de 2016, según se observa en la Figura 2.42) se considera de utilidad para examinar la hidrología del río.

Los efectos del pasaje de la onda de marea en los niveles en río Chico se presentan en la Figura 2.43, durante los 6 meses en que operó el OBS. En ella se han superpuesto los registros de los OBS implantados río Chico (línea continua color mostaza)⁸ y Punta Quilla (línea continua azul). También se graficaron los registros de la estación hidrométrica Punta Quilla que es parte de la Red HM-HA (línea continua naranja). Ésta última presenta falta de continuidad de los registros, pero muestra excelente acuerdo con las mediciones del OBS situado en sus inmediaciones. En cuanto a la influencia de la marea en sí, se observa que durante pleamaras de gran amplitud el nivel en el estuario supera a la cota de pelo de agua de río Chico correspondiente a régimen

⁷Los datos de la estación denominada 2836 - Chico - Ruta Nacional Nº 3 se encuentran disponibles en la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) [20]. El cero del equipo no ha sido informado, por lo cual para comparar registros se ha adoptado de un ajuste *ad hoc*.

⁸Las cotas de pelo de agua proporcionadas por el OBS de río Chico se han ajustado a valores IGN haciendo uso de las cotas de pelo de agua registradas en los muestreos mensuales, buscando minimizar las diferencias entre ambas series.

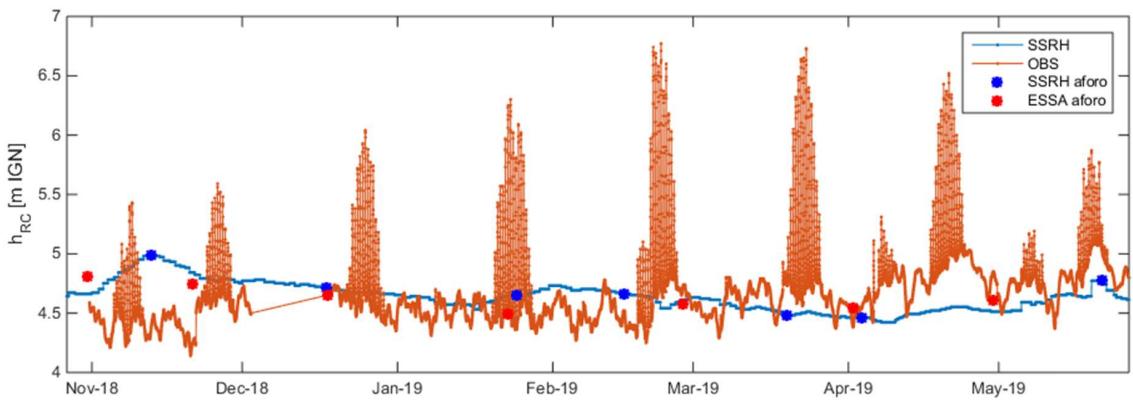


Figura 2.41: Evolución temporal de niveles h registrados en río Chico. Mediciones propias continuas con OBS y puntuales durante aforos (naranja), y registros continuos y puntuales de aforos de la SsRRHH (azul).

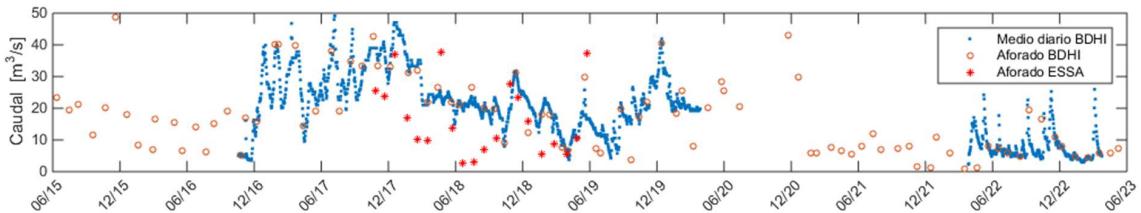


Figura 2.42: Evolución temporal de caudales en río Chico: aforos puntuales durante campañas, aforos de la SsRRHH y valores diarios de SsRRHH.

puramente fluvial (alrededor de los 4.5 m IGN). Pero incluso con niveles más bajos en el estuario es de esperar que se genere una curva de remanso, que se manifiesta en las fluctuaciones de pequeña amplitud que se ven en parte del resto del registro. Los niveles responden con mayor sensibilidad a las mareas que a las variaciones en el caudal del río Chico (ver gráfico inferior de la misma Figura 2.43).

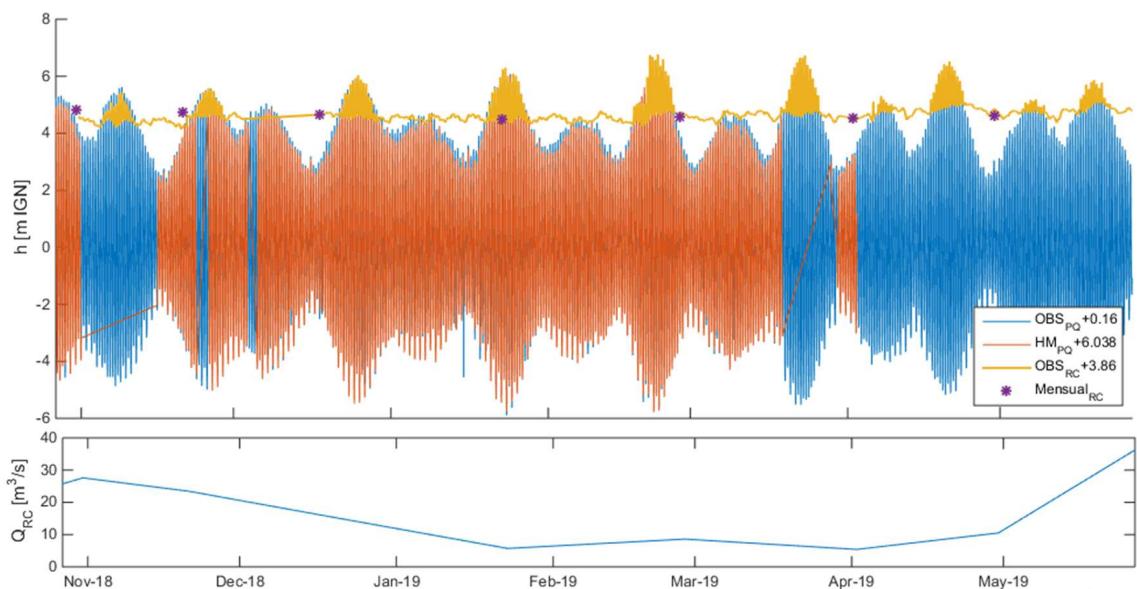


Figura 2.43: Influencia de ondas de marea sobre niveles de río Chico. Arriba, registros de niveles h en río Chico y Punta Quilla. Para río Chico, mediciones continuas con OBS y mediciones mensuales puntuales; para Punta Quilla, registros del OBS y de la estación hidrometeorológica. Abajo, serie de caudales Q aforados en las campañas mensuales.

La Figura 2.44 permite una apreciación más detallada de los efectos de mareas de gran amplitud.

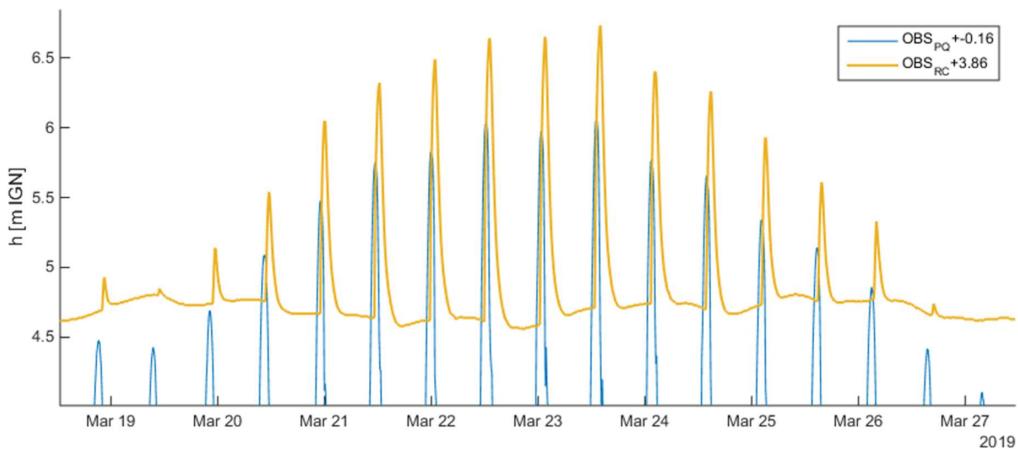


Figura 2.44: Detalle de los registros de niveles de los OBS ubicados en río Chico y Punta Quilla

El retraso que experimenta el máximo de la onda de marea en llegar a río Chico es de aproximadamente una hora. Se observa una asimetría en el pasaje de la misma, ocurriendo el descenso de niveles más lentamente que el ascenso. Los días en que las pleamaras son mayores, también son menores las cotas de bajamar, de ahí que los niveles mínimos que experimenta el río también sean menores en esos días.

Un análisis alternativo de la afectación por las mareas se presenta en la Figura 2.45, en que se grafican pares de valores correspondientes a niveles simultáneos⁹ en Punta Quilla y río Chico. En general, la nube de puntos es más densa para niveles de río Chico entre 4.2 y 4.8 m IGN para mareas que no superan los 4 m en Punta Quilla. Las mayores cotas en río Chico pueden comenzar a ocurrir cuando los niveles en la boca del estuario presentan al menos 3 m (aunque no siempre), siendo a partir de allí cada vez más marcado el efecto remanso de las mismas¹⁰. Teniendo en cuenta que durante los aforos se observaron profundidades máximas del orden de 1 m, los incrementos de tirante de hasta 2 m provocados por mareas de sicigia son de gran relevancia.

Según se ha expuesto en la metodología de los trabajos de campo, ejecutar un aforo es una tarea laboriosa que requiere equipamiento especial y operarios, mientras que registrar niveles en forma continua es una tarea mucho más sencilla. Dado que los niveles de un río están condicionados por su caudal, es de interés conocer la ley altura-caudal (H-Q) que permita calcular caudal en el río a partir del registro de cota de pelo de agua. Entendiendo que las mareas altas introducirían una variable adicional a esta caracterización, es apropiado estudiar la relación H-Q durante el momento de bajamar.

Se mostró que no existe afectación significativa en el puente de RN3 por parte de las mareas durante bajamar. En la Figura 2.46 se presentan los pares de valores altura-caudal (H-Q) obtenidos durante aforos correspondientes a las campañas mensuales (ejecutados cerca del horario

⁹En realidad no es estrictamente simultáneo, ya se ha aplicado una corrección que contempla el retraso de 1 h observado en el pasaje de la onda de marea. Los datos corresponden a los registros de sendos OBS.

¹⁰Se ha ensayado presentar la Figura 2.45 discriminando caudales en río Chico, tal como se hace más adelante en la Figura 2.54. Si se usa la serie de niveles de la SsRRHH (que no da cuenta del pasaje de ondas de marea) para estimar caudales, la discrepancia de niveles entre equipos observada en la Figura 2.41 resultaría en que la Figura 2.45 presentaría niveles del OBS bajos cuando los caudales son altos, lo cual carece de sentido físico.

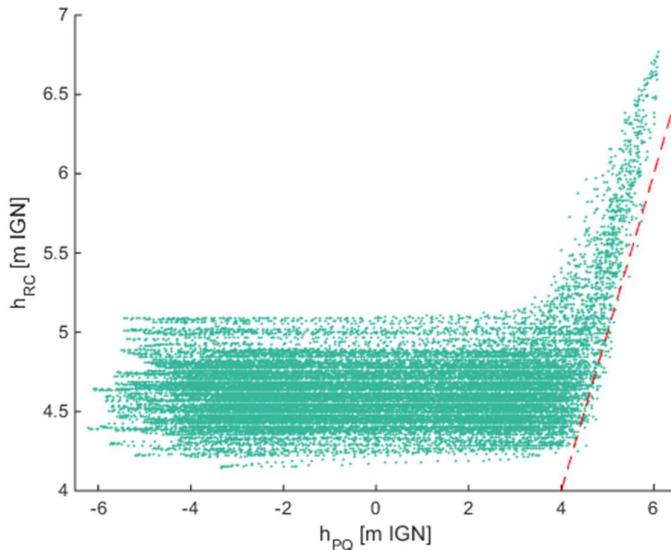


Figura 2.45: Niveles en río Chico h_{RC} frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} . La línea discontinua marca igualdad de niveles.

de bajamar) y los de la SsRRHH¹¹. Se ha propuesto una ley H-Q en base a los datos de las campañas de caracterización, tras descartar los puntos alejados de la nube principal (datos con cotas menores a 4.2 m, representados con círculos vacíos en color gris). Tras un ajuste por mínimos cuadrados, se llega a una expresión de la forma habitual para las curvas H-Q:

$$Q = 136(H - 4,21)^{2,9} \quad (2.1)$$

donde el caudal del río Chico Q queda expresado en m^3/s y la cota de la superficie libre H se ingresa en m IGN. Se observa en la Figura 2.46 que los aforos de la subsecretaría también son adecuadamente representados por esta ley¹².

Finalmente, queda por explorar la evolución anual de la hidrología del río. Los valores aforados durante la caracterización coabarcan sólo 20 meses (graficados en Figura 2.38), por lo cual es necesario usar los registros de la SsRRHH. Para obtener la serie de caudales¹³ los niveles reportados se introducen en la Ecuación (2.1). En la Figura 2.47 se presenta el hidrograma multianual superpuesto, construido a partir de los valores diarios de caudal desde 2016 a 2023, donde cada curva representa un año hidrológico. Con la longitud actual de la serie, no se pueden identificar patrones estacionales. Se aprecia una significativa variabilidad interanual, que podría indicar que el régimen de río responde a lluvias puntuales, pero se requeriría un estudio meteorológico que excede a esta publicación para avanzar en dicha hipótesis.

En función de lo expuesto, para caracterizar al río Chico no es posible elaborar un hidrograma medio anual, pero sí una curva de duración de caudales. Ésta es una representación gráfica que

¹¹Se desconoce si los aforos de la SsRRHH han sido efectuados en bajamar. La gráfica H-Q de los puntos de la SsRRHH (marcadores pequeños) presentan una tendencia similar a los datos de campañas mensuales (marcadores grandes), lo que hace suponer que no estarían afectados por el pasaje de una onda de marea.

¹²Los aforos que se apartan del ajuste, indicados en puntos color gris claro, son posteriores a la interrupción de mediciones continuas en invierno de 2020, por lo cual es posible que una modificación del cero de escala sea responsable de estas lecturas.

¹³La SsRRHH provee una serie continua de caudales pero no indica la ley por la que se han obtenido, y tampoco coinciden con los valores de sus aforos puntuales.

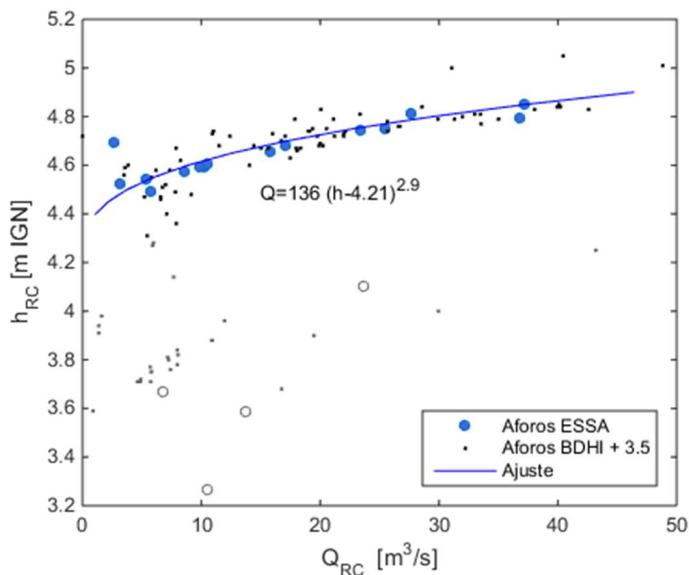


Figura 2.46: Ley altura-caudal en río Chico. Aforos en campañas mensuales (círculos) y de la SsRRHH (puntos), y ajuste según Ec. (2.1) (en línea continua).

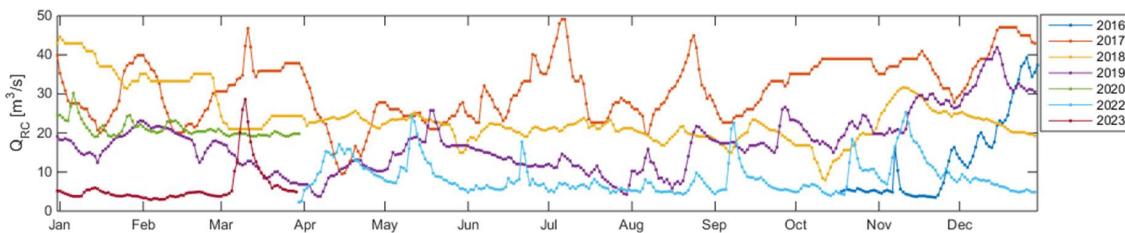


Figura 2.47: Hidrogramas anuales observados en río Chico. Series de datos obtenidas a partir de las alturas registradas por la SsRRHH entre 2016 y 2023.

muestra el porcentaje del tiempo en que determinados caudales son igualados o superados, permitiendo caracterizar el régimen de un río a lo largo del tiempo. Según se observa en Figura 2.48, el caudal medio de río Chico es de $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

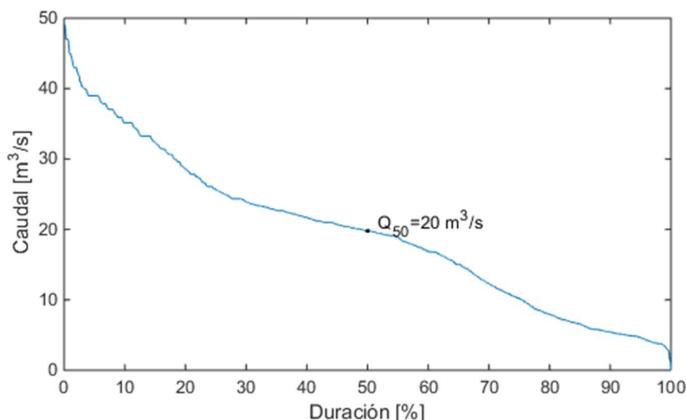


Figura 2.48: Curva de duración de caudales de río Chico, elaborada a partir de los datos diarios de la SsRRHH.

El río Chico está sujeto al pasaje de ondas de marea a la altura del puente de RN3. En bajamar se observaron profundidades máximas del orden de 1 m, pero las mareas de sicigia pueden provocar incrementos de hasta 2 m en el tirante. Su régimen hidrológico se caracteriza por una marcada irregularidad, con caudales que presentan variaciones significativas sin un patrón estacional definido. Su caudal medio es de 20 m³/s.

Hidrología e hidrodinámica del tramo final de río Santa Cruz

En el tramo final de río Santa Cruz se monitorearon dos sitios, identificados en Figura 2.24:

- Puente Viejo, sin influencia de mareas, donde se aforó un total de 34 campañas usando un equipo ADCP.
- Isla Pavón, donde se instaló un equipo OBS de medición continua durante 20 meses.

En Puente Viejo se aforaron caudales de entre 295 y 2103 m³/s, dándose estos valores extremos en septiembre de 2022 y abril de 2018 respectivamente. En la parte inferior de la Figura 2.51 se observa la serie de caudales aforados durante el primer año de monitoreo (línea continua azul con marcadores), y se comprueba un muy buen acuerdo con los caudales Q que se extraen aplicando la ecuación de Lara [16], $Q = 14,3(h + 2,6)^{2,36}$, a los registros de la SsRRHH correspondientes a Charles Fuhr (línea continua naranja). Se hace notar que en marzo de 2018 ocurrió un evento de rotura.

La distribución de velocidades en Puente Viejo correspondiente a aguas altas y bajas se presenta en las Figuras 2.49 y 2.50. El mapa de colores indica velocidades (blanco indica flujo retrocedente), a las que se superponen isotáqueas. Los puntos negros indican centros de celdas del ADCP. Se observa que los anchos superficiales están entre 160 y 260 m, los tirantes máximos son de entre 6 m y 8 m, y las velocidades máximas pueden alcanzar hasta 1.5 m/s o 3 m/s según se trate de estiaje o creciente.

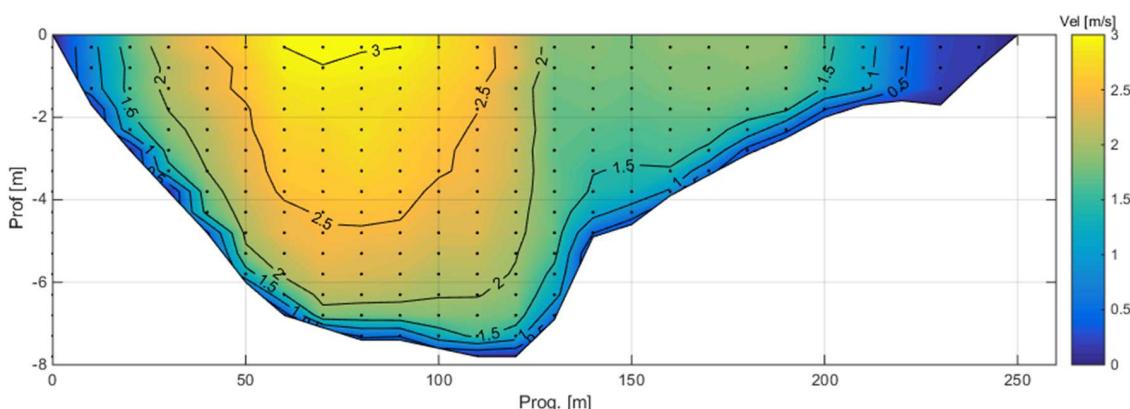


Figura 2.49: Velocidades registradas en Puente Viejo para un caudal de 2103 m³/s (abril de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s, y la progresiva 0 está en margen izquierdo.

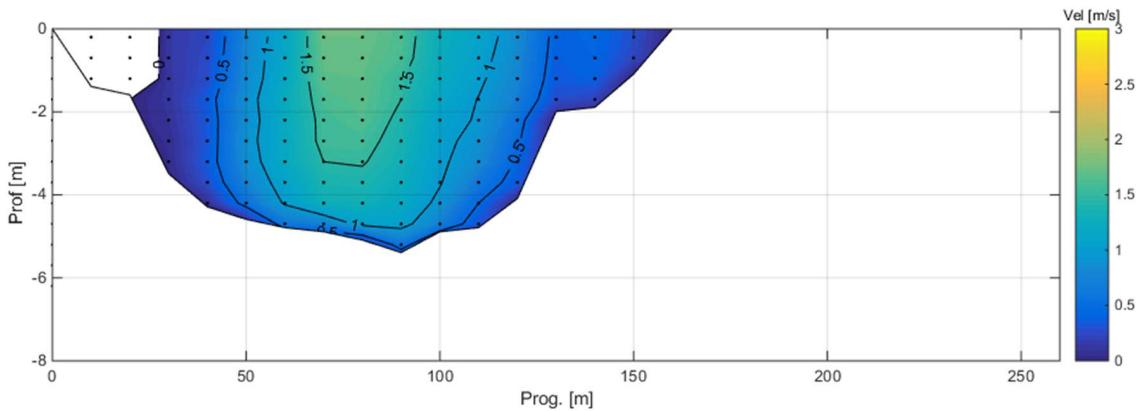


Figura 2.50: Velocidades registradas en Puente Viejo para un caudal de $483 \text{ m}^3/\text{s}$ (junio de 2018). El mapa de colores indica velocidades en m/s, y la progresiva 0 está en margen izquierdo.

Se determinaron parámetros hidráulicos de la sección para los escenarios de caudales máximos y mínimos aforados, incluyendo ancho superficial B_s , área mojada Ω , tirante máximo h_{\max} , tirante medio $h_{\text{med}} = \Omega/B_s$, velocidad máxima U_{\max} , velocidad media $U_{\text{med}} = Q/\Omega$, y número de Froude $Fr = U_{\text{med}}/\sqrt{2gh_{\text{med}}}$. Ellos se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Parámetros hidráulicos de la sección Puente Viejo, para caudales máximos y mínimos aforados.

Q [m^3/s]	B_s [m]	Ω [m^2]	h_{\max} [m]	h_{med} [m]	U_{\max} [m/s]	U_{med} [m/s]	Fr [-]
2103	250	1079	7.8	4.3	3.06	1.95	0.30
483	160	543	5.4	3.4	1.75	0.89	0.15

Respecto a las mediciones continuas de niveles, los registros completos del equipo OBS instalado en Isla Pavón se presentan en la Figura 2.51 (serie naranja). También se grafican los registros continuos del OBS de Punta Quilla (serie azul), a fin de visualizar la correspondencia con las variaciones de nivel producto de la marea, y se incluyen los valores puntuales de niveles relevados durante los aforos mensuales (marcadores amarillos), para corroborar su consistencia ¹⁴. Adicionalmente, en la parte inferior de la figura se representa la evolución temporal de los caudales del río, para facilitar la interpretación de la dependencia de los niveles con el régimen fluvial.

En Isla Pavón el hidrograma del río Santa Cruz modula los valores medios de los niveles. Se evidencia que los niveles mínimos responden a la hidrología del río; así por ejemplo, en octubre ocurren los menores valores de la cota de pelo de agua, en coincidencia con el estiaje del río. A esta lenta variación anual se le superpone la variabilidad semidiurna impulsada por las mareas: se aprecia que las pleamaras ocasionan aumentos del nivel durante el pasaje de la onda de marea. Se observa claramente en los registros de ambos OBS la modulación que experimenta la onda de marea, con menores incrementos de niveles en cuadratura y los mayores en sicigia.

A fin de estudiar en profundidad el efecto del pasaje de la onda de marea, en la Figura 2.52 se presenta un detalle de las series de niveles registrados con OBS en el estuario y en Isla Pavón.

¹⁴En general el acuerdo es bueno, con excepción de las campañas 2, 6, 7, 8, 11 y 12. En la Figura 2.55 se aprecia esta dispersión de los datos. Quizá se deba a errores en la toma de lecturas, que se recuerda vienen dadas por la distancia desde el tablero del muelle de piscicultura hasta la cota de pelo de agua, sin uso de escala o equipo más preciso.

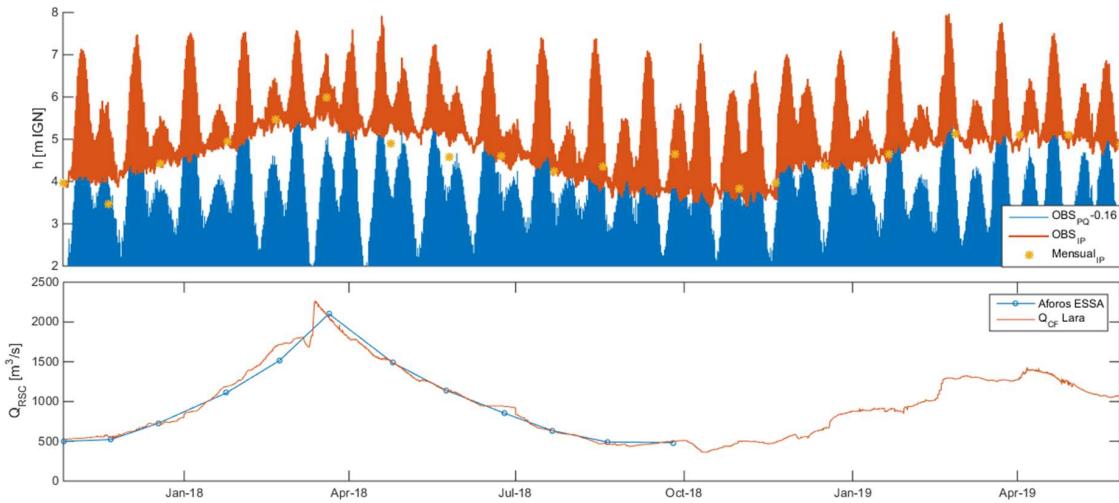


Figura 2.51: Evolución temporal de niveles en Isla Pavón. Arriba, medición continua de niveles h con OBS en Isla Pavón (naranja), en Punta Quilla (azul) y cota de pelo de agua medida durante los aforos mensuales (amarillo). Abajo, serie de caudales del río Q_{SC} , proveniente de aforos en Puente Viejo (azul) y según la ley H-Q de Charles Fuhr (naranja).

Corresponden al mes de noviembre, cuando el bajo caudal (menos de $500 \text{ m}^3/\text{s}$) resulta en que las influencias de marea sean más marcadas que en el resto del año. Se aprecia que cuando los niveles en Punta Quilla durante pleamar superan los 2.5 m, el pasaje de la onda puede detectarse en Isla Pavón. El retraso en la ocurrencia del máximo entre ambos sitios es de exactamente una hora.

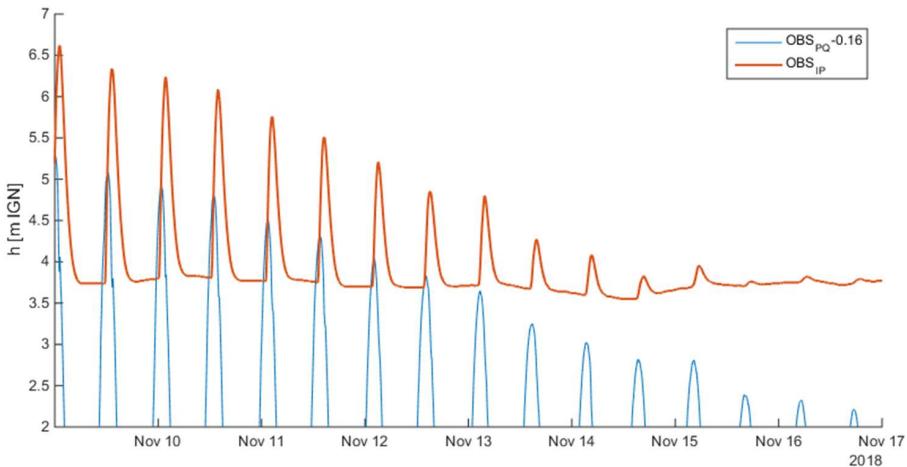


Figura 2.52: Detalle de la evolución temporal de niveles en Isla Pavón. Medición continua de niveles h con OBS en Isla Pavón (naranja) y en Punta Quilla (azul).

Teniendo en cuenta que la profundidad del cauce puede influir en la velocidad de traslado de la onda de marea, se han seleccionado diferentes caudales y se ha contrastado el retardo entre el momento de ocurrencia del máximo en Punta Quilla y el de Isla Pavón. Los resultados se muestran en la Figura 2.53, evidenciando un retraso de entre 50 y 70 minutos en el pasaje de la onda de marea. Considerando que los equipos OBS registran datos cada 10 minutos, quedaría explicada la dispersión que presentan los puntos.

La afectación que provoca la onda de marea se analiza en la Figura 2.54. Allí se presentan pares de valores de niveles en Punta Quilla e Isla Pavón, aplicando un retraso de 1 h a la serie de

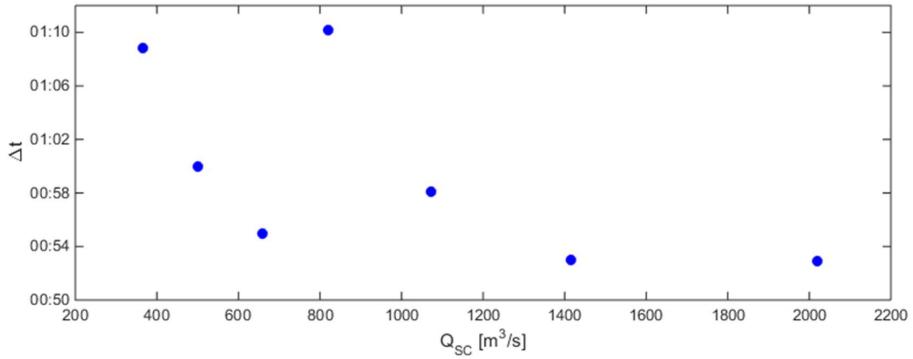


Figura 2.53: Retraso en el pasaje de la onda de marea ΔT para diferentes caudales de río Santa Cruz Q_{SC} .

Punta Quilla (atendiendo al retraso que experimenta la onda de marea) a fin de que los datos sean comparables. Los puntos se presentan con un código de colores que responde al caudal del río Santa Cruz a fin de considerar también la incidencia del mismo. Como es de esperar, la franja superior de puntos coincide con los mayores caudales del río. Cuando los niveles de Punta Quilla superan los 3.5 m IGN, ocurre un incremento de tirantes en Isla Pavón. Por ejemplo, en caso de mareas de sicigia (parte derecha del gráfico), la cota de pelo de agua que sin influencia de la marea estaba en unos 4.5 m IGN puede llegar hasta cerca de los 8 m IGN. Es decir que en ese escenario los tirantes máximos pasarían de 7 m a 11 m en un lapso de 6 hs.

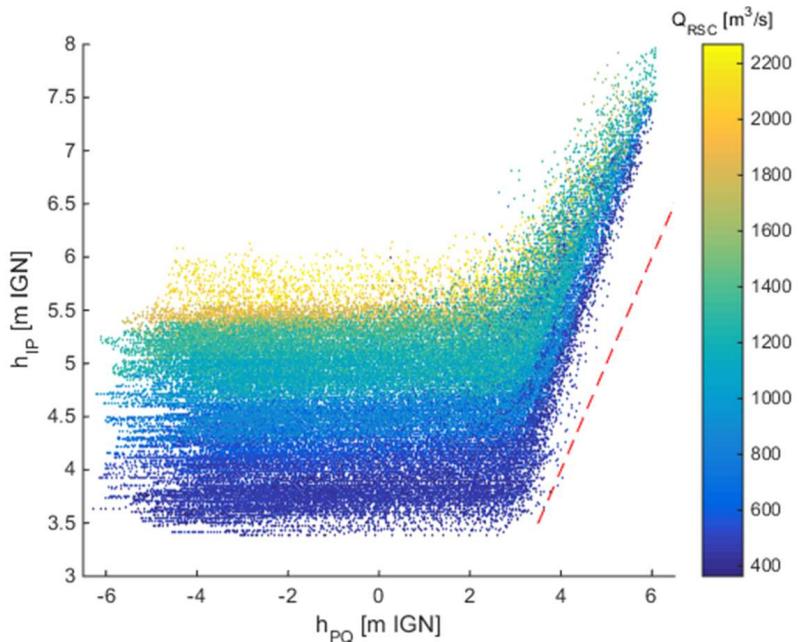


Figura 2.54: Afectación de mareas en Isla Pavón. Niveles en Isla Pavón h_{IP} frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} , indicando en colores el caudal del río Santa Cruz en cada condición. La línea roja discontinua indica igualdad de niveles.

Resta definir la ley H-Q de cada sección, válida para momentos alejados de pleamar. Para ello sirven como insumo los pares de valores de caudal y nivel obtenidos durante las campañas de aforo (ejecutadas próximas a bajamar para minimizar afectación de mareas).

En primer lugar se estudia la sección de Isla Pavón. Allí se efectuó la determinación de cota de pelo de agua durante las 12 primeras campañas de aforo, haciendo la lectura de la escala de

la toma de agua de la ciudad. Si bien no se aforó en esa sección específica, dichas lecturas fueron tomadas al desplazarse para aforar en Puente Viejo, por lo cual se cuenta con una valor representativo del caudal. En la Figura 2.55 se presentan los pares de valores altura-caudal, que responden a la forma típica de las leyes H-Q. En base a ellos, y descartando los datos de las campañas 2, 7, 8 y 12 que se alejan de la tendencia principal, se propone el siguiente ajuste para Isla Pavón:

$$Q = 17,5 (H - 0,751)^{2,9} \quad (2.2)$$

donde Q es el caudal del río Santa Cruz en m^3/s y H es la cota de pelo de agua de Isla Pavón, expresada en m IGN. Se hace hincapié en que esta ley aplica cuando la marea no afecta a la sección (niveles en Punta Quilla menores a 2.5 m IGN).

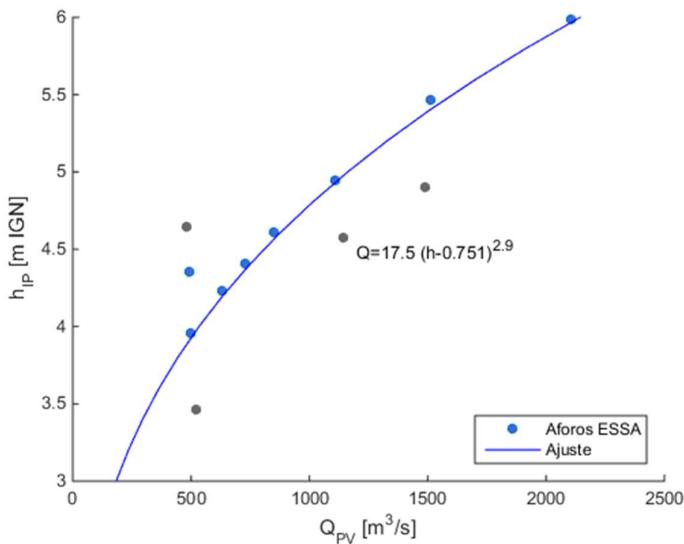


Figura 2.55: Ley H-Q en Isla Pavón. Nivel h_{IP} en función del caudal aforado en Puente Viejo Q_{PV} (círculos), y ajuste según Ec. (2.2) (línea continua).

A continuación se examina la sección de Puente Viejo, ubicada aguas arriba. Según se expuso en la sección 2.2.1 *Caracterización de ondas de marea*, en ese sitio la cota de pelo de agua responde exclusivamente al régimen fluvial. Se cuenta con 34 lecturas de nivel efectuadas respecto al estribo del antiguo puente, efectuadas en coincidencia con la ejecución de aforos. En la Figura 2.56 se presentan los pares de valores H-Q, y se propone un ajuste:

$$Q = 12,3 (H - 4,5)^{2,9} \quad (2.3)$$

donde Q es el caudal del río Santa Cruz y H la cota de pelo de agua en la sección del viejo puente expresada en m IGN. Por no extenderse hasta ese punto la influencia de la onda de marea, esta expresión es válida en todo momento.

Teniendo en cuenta las leyes H-Q propuestas, para el caudal módulo del río ($700 \text{ m}^3/\text{s}$) corresponden cotas de pelo de agua de 8.53 m IGN en Puente Viejo y 4.32 m IGN en Isla Pavón. Considerando que la distancia entre ambos sitios es de aproximadamente 11.1 km, la pendiente media de la superficie libre resulta ser de 0.38%.

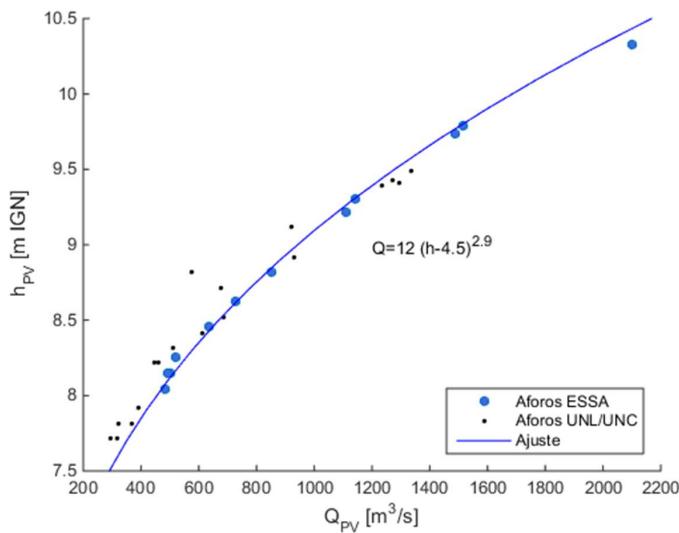


Figura 2.56: Ley H-Q en Puente Viejo. Nivel h_{PV} en función del caudal aforado en Puente Viejo Q_{PV} , distinguiendo campañas del estuario (círculos) y de la Red HM-HA (puntos), y ajuste y ajuste según Ec. (2.3) (línea continua).

Se propuso una ley altura-caudal en Puente Viejo sobre río Santa Cruz, donde no existe influencia mareal. En Isla Pavón los niveles responden tanto al régimen del río como a la marea. Cuando los niveles en Punta Quilla superan los 3.5 m IGN, la onda de marea llega hasta allí con una hora de retraso. Por ejemplo, durante mareas de sicigia los tirantes máximos pueden pasar de 7 m a 11 m en un lapso de 6 hs.

Caudales del río Santa Cruz

Al caracterizar el funcionamiento del estuario en los próximos capítulos se definen escenarios de interés que están asociados a hidrogramas representativos del río Santa Cruz. Si bien no es el objetivo de esta publicación analizar la hidrología del río, se expone a continuación una descripción expeditiva para garantizar que el presente libro sea autocontenido. En caso de requerir una caracterización detallada, se sugiere consultar el libro de esta colección *Crecidas de diseño del río Santa Cruz* [17].

Más adelante en este libro se hace referencia tanto a hidrogramas medios como a caudales de relevancia ambiental. Para definirlos se recurre a los registros de la estación hidrométrica y de aforo Charles Fuhr de la SsRRHH. La misma se ubica en la naciente del río, cerca de la embocadura del Lago Argentino, y comenzó a operar en 1955. La serie de caudales diarios, obtenida aplicando la ley altura-caudal de Lara [16] a los registros de niveles, fue presentada en la Figura 2.31.

Un hidrograma es una representación gráfica que muestra cómo varía el caudal de un río en función del tiempo. El hidrograma medio anual representa la evolución promedio del caudal a lo largo del año, y se construye promediando, para cada fecha, los valores observados ese día en distin-

tos años. Por su parte, los hidrogramas definidos por un porcentaje de excedencia (por ejemplo, 10 %, 50 % o 90 %) indican el caudal que es igualado o superado ese porcentaje del tiempo, permitiendo caracterizar condiciones hidrológicas típicas de años hídricamente ricos, medios o de bajos caudales, respectivamente. El hidrograma del año medio corresponde justamente al de excedencia del 50 %, mientras que los caudales mínimos registrados presentan una excedencia del 100 %.

La Figura 2.57 presenta hidrogramas con los caudales Q_{100} , Q_{95} , Q_{50} , Q_5 y Q_{\max} del río Santa Cruz, que corresponden a los valores que han sido superados el 100 %, 95 %, 50 % y 5 % del tiempo y al valor máximo registrado ¹⁵, respectivamente.

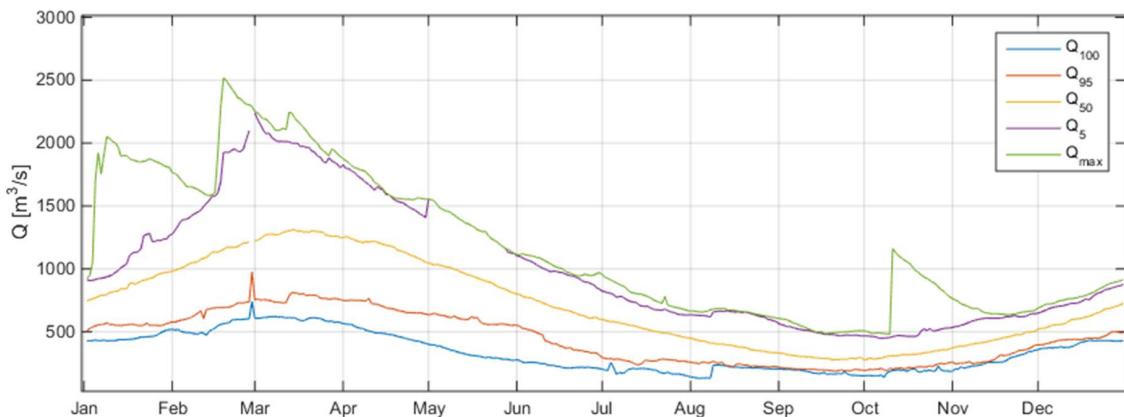


Figura 2.57: Hidrogramas de interés ambiental del río Santa Cruz. Curvas de excedencia de 100 %, 95 %, 50 %, 5 % y caudal máximo.

Este tipo de hidrogramas de paso diario se imponen al modelo numérico como condición de contorno para estudiar el comportamiento del estuario bajo distintos escenarios. Como condición de referencia interesa la situación de año medio, en que ingresan al estuario los caudales del hidrograma Q_{50} . Por su parte, los posibles hidrogramas de llenado respetan premisas tales como mantener Q_{95} o Q_{100} en ciertos períodos del año. A modo de referencia, valores orientativos de los caudales medios mensuales de estos tres hidrogramas de relevancia ambiental se presentan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Caudales medios mensuales orientativos de hidrogramas de interés ambiental: Q_{50} , Q_{95} y Q_{100}

Mes	Q_{50} [m³/s]	Q_{95} [m³/s]	Q_{100} [m³/s]
Enero	860	553	440
Febrero	1121	687	520
Marzo	1280	764	608
Abril	1192	696	486
Mayo	945	601	313
Junio	687	396	224
Julio	523	272	194
Agosto	389	236	211
Septiembre	293	199	171
Octubre	317	213	188
Noviembre	434	277	257
Diciembre	605	440	417
Promedio	721	444	336

¹⁵Los aumentos abruptos de caudal máximo corresponden a eventos de rotura del glaciar. Habitualmente tienen lugar hacia el mes de marzo.

Un hidrograma es una representación gráfica que muestra cómo varía el caudal de un río en función del tiempo. Empleando los datos diarios registrados durante más de 60 años, se determinaron hidrogramas de relevancia ambiental del río Santa Cruz, que permiten proponer escenarios bajo los cuales estudiar el comportamiento del estuario, tales como un año medio y el llenado de los embalses.

Se ha mencionado que los valores registrados en la naciente del río se consideran como ingresantes al estuario. Esto se justifica por la ausencia de cursos de agua afluentes relevantes que hagan aportes de caudales al río Santa Cruz. De hecho, en cada campaña de aforo se ha determinado el caudal en Charles Fuhr y en Puente Viejo, corroborado la validez de esta hipótesis simplificativa.

2.3.2. Transporte de sedimentos

La caracterización de transporte de sedimentos en la zona del estuario comprende dos fuentes de información:

- determinaciones de sólidos suspendidos totales (SST) efectuados sobre muestras de agua tomadas mensualmente. En los primeros 20 meses de monitoreo, sólo pudo determinarse concentración (expresada en mg/l); pero en las 21 campañas posteriores a octubre de 2018 también fue posible determinar granulometría como parte del aforo sólido.
- registros continuos de turbidez de equipos OBS. Esta fuente información tiene el potencial de calibrarse con datos de campo para estimar el transporte de sedimentos.

Estas mediciones se efectuaron en dos etapas. La virtud de las campañas previas a octubre de 2018 radica en la simultaneidad de toma de muestras de agua y mediciones continuas, mientras que las posteriores destacan por los análisis de laboratorio de mejor calidad.

Sólidos suspendidos totales

Los datos de sólidos suspendidos obtenidos mensualmente de las muestras tomadas a media profundidad y cerca del fondo durante las primeras campañas se presentaron en Tablas 2.4 a 2.5. La evolución temporal de esas concentraciones de sólidos suspendidos se grafica en la Figura 2.58. Los sitios monitoreados incluyen Charles Fuhr (azul oscuro), Puente Viejo (azul claro)¹⁶ e Isla Pavón (verde) sobre río Santa Cruz, así como puente RN3 en río Chico (amarillo) y el puerto de Punta Quilla (beige). Se observa que Punta Quilla presenta una concentración de mayor magnitud que los restantes sitios, pero esto no implica que la concentración de sedimentos sea mayor: la metodología de laboratorio implica evaporar el agua y pesar el remanente, con lo cual las sales disueltas precipitan y contribuyen a estos guarismos. Por otra parte, también es evidente que las concentraciones en río Chico son mayores que en río Santa Cruz: este hecho ya podía

¹⁶En estos dos sitios la toma de muestras se efectuó sólo durante 12 meses. En el resto, 20 meses.

anticiparse a partir de la apariencia del agua de cada río (ver fotografías en Figuras 2.32 y 2.35). Será necesario en estudios futuros evaluar el rol de la floculación inducida por los cambios de salinidad sobre los sedimentos aportados por el río al estuario.

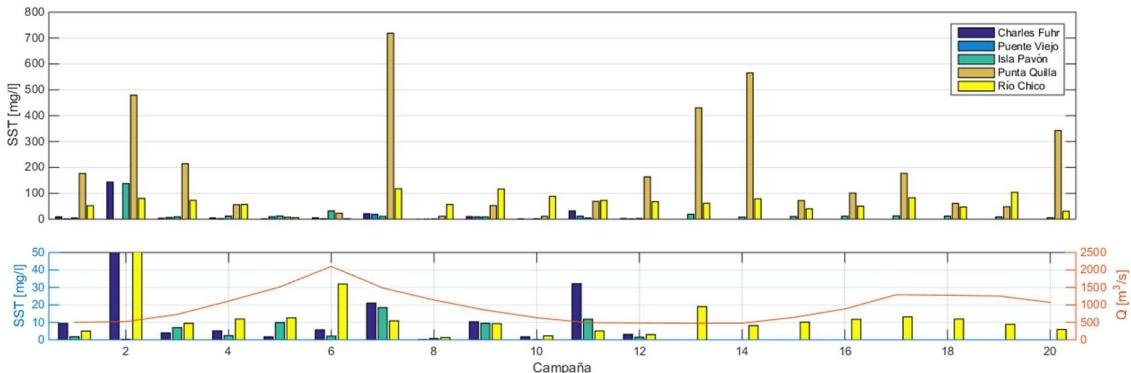


Figura 2.58: Evolución temporal de concentraciones de sólidos suspendidos totales en río Santa Cruz, río Chico y Estuario. En el gráfico inferior, detalle del río Santa Cruz, superponiendo serie de caudales en línea continua

La Tabla 2.10 recoge valores representativos de concentraciones de sólidos suspendidos, incluyendo media μ y desviación estándar σ calculados considerando las primeras campañas de caracterización del estuario. Se trata de una descripción que, a pesar de ser grosera, tiene la virtud de permitir la comparación expeditiva de distintos sitios.

Tabla 2.10: Resumen de la caracterización de los sólidos suspendidos en cada sitio, consignando su media μ y desviación estándar σ .

Sitio	Concentración [mg/l]	
	μ_{SST}	σ_{SST}
Charles Fuhr	20	40
P. Viejo	5	6
I. Pavón	16	29
Punta Quilla	64	31
Río Chico	189	208

SST en río Santa Cruz. Se detalla en la parte inferior de la Figura 2.58 la evolución temporal de la concentración de sólidos suspendidos en los tres sitios del río Santa Cruz. No se distingue una tendencia espacial de evolución. Se superpone el caudal del río (línea continua naranja, cuantificada en el eje vertical secundario) a fin de evaluar si la capacidad de transporte se incrementa con el mismo. A partir de este set de datos, no se advierte dependencia de las concentraciones con el caudal; este aspecto se retoma en los próximos párrafos incorporando información de otras campañas.

Atendiendo a que la determinación de SST es laboriosa en cuanto a obtención y análisis de las muestras de agua, mientras que la turbidez es de medición expeditiva y permite un monitoreo continuo, es conveniente hallar una ley que permita obtener concentraciones en función de la turbidez. Resulta de interés la información recabada en las primeras 20 campañas, en las cuales se empleó un turbidímetro al momento de extraer las muestras. En la Figura 2.59 se presentan pares de valores de concentración determinada en laboratorio y turbidez medida *in situ*. La recta discontinua 1:1 se ha superpuesto ya que es una regla de estimación grosera que la literatura

reporta como útil en numerosos cursos de agua (1 mg/l por cada NTU), pero se ve en este caso que no resulta aplicable. Ante la gran dispersión de los puntos, se concluye que el set de datos no permite obtener una ley de ajuste SST-turbidez para río Santa Cruz. Resta recordar que esta caracterización de laboratorio presenta imprecisión debido a la baja masa de sedimentos, y que se ensayaron infructuosamente cambios en la metodología de muestreo para intentar subsanarlo.

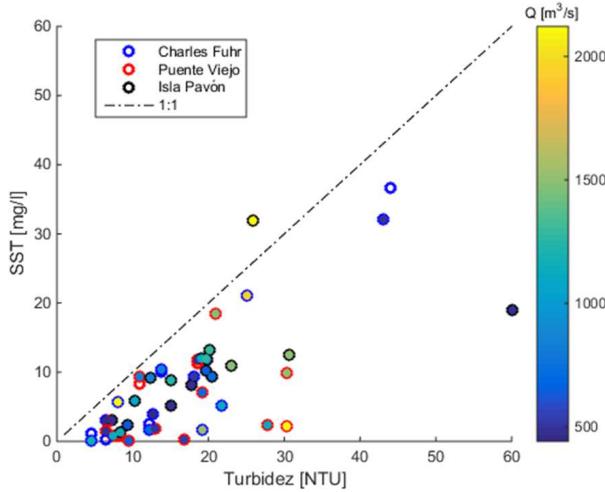


Figura 2.59: Relación entre sólidos suspendidos y turbidez en río Santa Cruz. El contorno de los marcadores indica el sitio muestreado, el color de relleno el caudal.

En campañas posteriores a octubre de 2018 se efectuaron aforos sólidos en la sección de Puente Viejo, y las muestras de agua se enviaron a un laboratorio con la tecnología adecuada para caracterizar sedimentos incluso con bajas concentraciones. En la Figura 2.60 se presenta la granulometría de sedimentos en suspensión, aspecto que no había podido caracterizarse previamente. Cada serie de datos corresponde a una campaña diferente. A la izquierda se muestra la distribución acumulada del tamaño de grano (porcentaje más fino), y a la derecha, la distribución de frecuencias, que refleja la proporción retenida por el tamiz en cada fracción granulométrica. El diámetro D_{50} (es decir, el tamaño de partícula para el cual el 50 % de la muestra es más fina) se encontró entre los 4 y 40 micrómetros, con cierta predominancia de tamaños de partículas en torno a los 2 y 300 micrómetros.

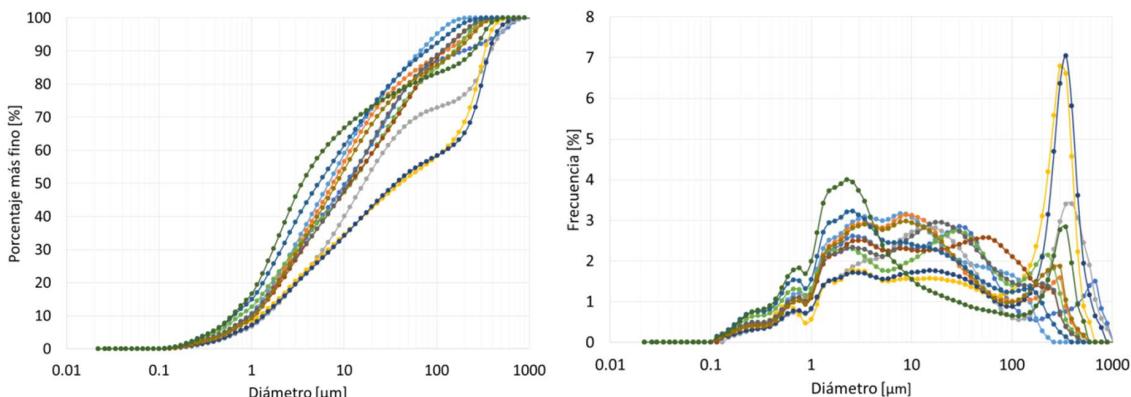


Figura 2.60: Granulometría de sólidos suspendidos en Puente Viejo. Curva de distribución acumulada (izq.) y distribución de frecuencias (der.). Cada serie de datos corresponde a un mes diferente.

Con la incorporación de estos datos que presentan mayor precisión se retoma el análisis de la

dependencia del transporte en suspensión con el caudal del río. En Figura 2.61 se presenta a la izquierda la concentración de sedimentos en suspensión, que indica la cantidad de sólidos presentes por unidad de volumen de agua, y a la derecha el transporte sólido instantáneo, que se calcula multiplicando la concentración por el caudal instantáneo y representa la masa de sedimentos que atraviesa la sección por unidad de tiempo. Recordando que el diámetro de $63 \mu\text{m}$ marca la distinción entre limos y arenas, se distingue fracción fina (círculos) y gruesa (asteriscos). Se aprecia que la carga de lavado asociada a los finos es relativamente constante, mientras que la capacidad de transporte de material grueso tiene tendencia a aumentar con el caudal líquido. Esto concuerda con la física que gobierna los fenómenos de transporte.

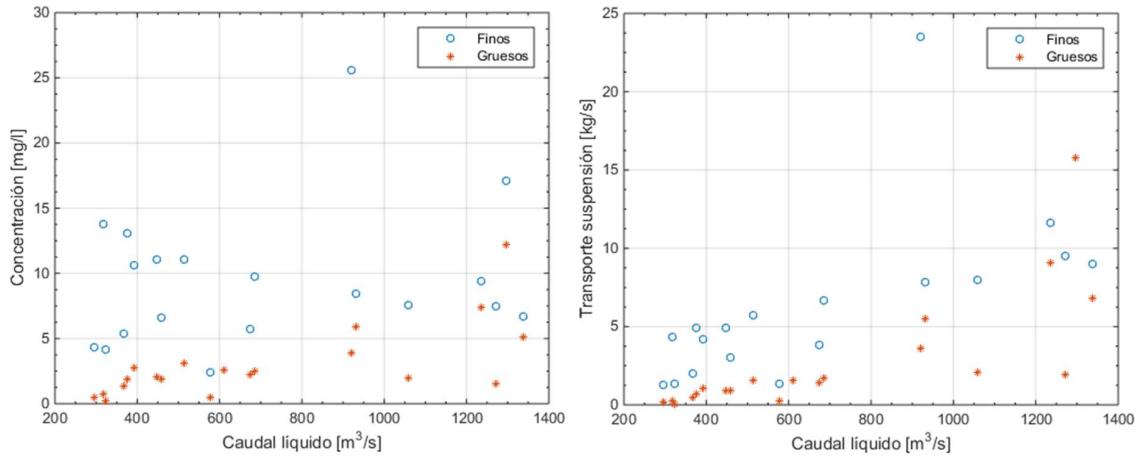


Figura 2.61: Transporte de sedimentos en Puente Viejo en función del caudal líquido, distinguiendo fracción fina y gruesa. Concentración de sólidos suspendidos (izq.) y caudal sólido (der.)

Considerando la totalidad de las campañas (círculos para las primeras, asteriscos para las posteriores), en la Figura 2.62 se presenta la relación entre concentración y caudal líquido. La dispersión de los datos disponibles impide proponer una ley de ajuste.

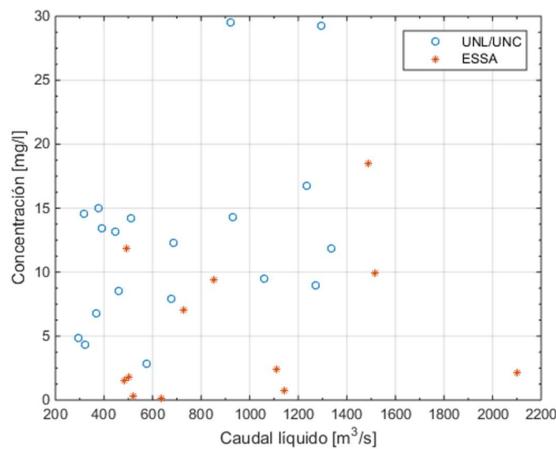


Figura 2.62: Concentración de sólidos en suspensión en Puente Viejo en función del caudal líquido.

SST en río Chico. A lo largo de las 20 primeras campañas se tomaron muestras de agua para determinación de SST, acompañadas de medición de turbidez *in situ* y aforo líquido. En la Figura 2.63 se evalúa la dependencia de las concentraciones del material suspendido con el caudal de

río Chico (a la izquierda) y con la turbidez (a la derecha).

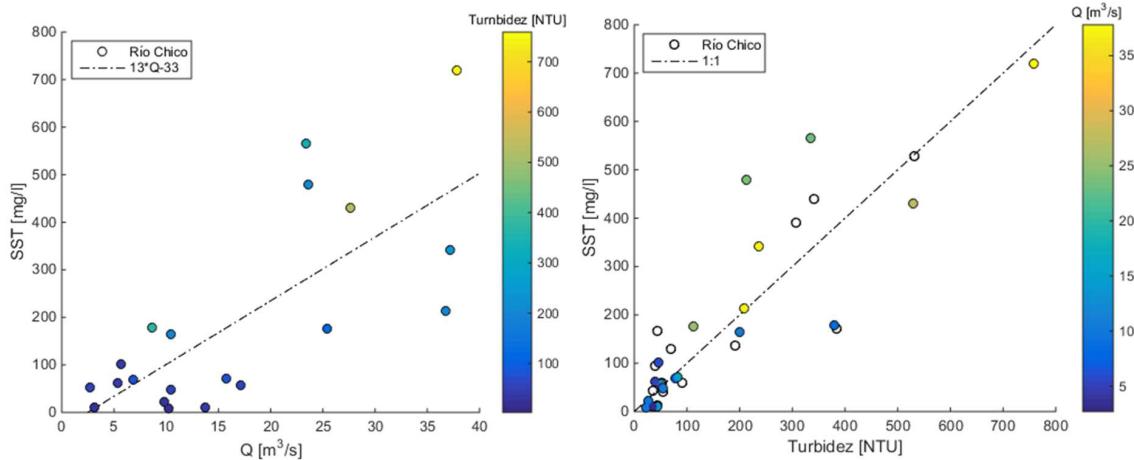


Figura 2.63: Concentración de sólidos suspendidos en río Chico. Dependencia con el caudal (izq.) y con la turbidez (der.). El relleno de marcadores responde a la otra variable no graficada (turbidez y caudal, respectivamente). En la figura de la derecha, se han incorporado con fondo blanco las muestras de fondo.

Respecto a la relación entre concentración y caudal, a pesar de la gran dispersión de los puntos¹⁷ se aprecia una proporcionalidad directa. Aunque se recomienda extender el muestreo para disponer de un registro más extenso y dar robustez al análisis, se ha propuesto tentativamente una relación lineal entre ambos parámetros (línea discontinua),

$$SST_{RC} [\text{mg/l}] = 13 Q [\text{m}^3/\text{s}] - 33. \quad (2.4)$$

Esta expresión podría emplearse en futuras modelaciones del estuario para imponer la condición de contorno de ingreso de sedimentos desde el río Chico.

Respecto a la relación entre sólidos suspendidos y turbidez, a diferencia de lo que ocurría en río Santa Cruz, en río Chico sí es posible apreciar una correlación. De hecho, la habitual relación 1 mg/l por NTU, representada en la línea discontinua, es aceptable para convertir orientativamente registros de turbidez a concentraciones de sólidos,

$$SST_{RC} [\text{mg/l}] = \text{Turbidez [NTU]}. \quad (2.5)$$

SST en Punta Quilla. En el puerto también se dispone de caracterización simultánea de concentración SST y turbidez. La Figura 2.64 muestra que existe la posibilidad de calcular los sólidos suspendidos a partir del registro continuo de turbidez provisto por el OBS, de acuerdo con

$$SST_{PQ} [\text{mg/l}] = 1,5 \text{ Turbidez [NTU]} + 30. \quad (2.6)$$

No obstante, no debe perderse de vista el hecho de que el contenido de SST medido en laboratorio incluye las sales precipitadas.

¹⁷Se hace notar que estas muestras fueron analizadas por el primer laboratorio, que ofrecía menor precisión en sus determinaciones.

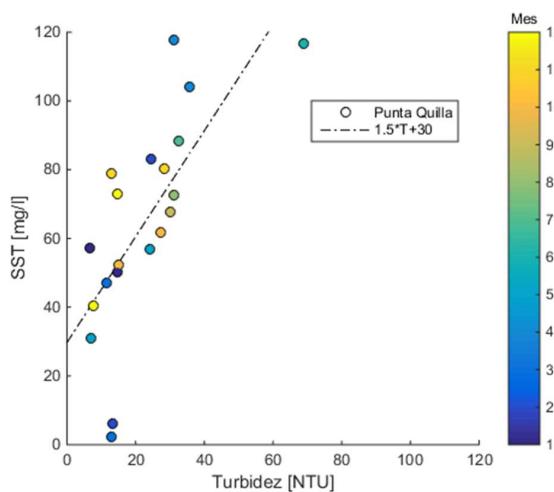


Figura 2.64: Concentración de sólidos suspendidos en Punta Quilla. Dependencia con la turbidez. El color de relleno indica mes del año.

Los sólidos suspendidos son partículas como arcillas, limos y sedimentos finos que se mantienen en suspensión en la columna de agua. En río Santa Cruz las concentraciones son muy bajas (del orden de una decena de mg/l), y las partículas presentan un diámetro medio de entre 4 y 40 μm . Río Chico presenta concentraciones más altas, del orden de 200 mg/l, y Punta Quilla valores intermedios, en los que se computan también las sales precipitadas. En ambos ríos se aprecia un incremento de los SST con el aumento del caudal. Atendiendo a que la turbidez es de medición expeditiva y permite un monitoreo continuo, se buscó una ley que permita obtener concentraciones en función de la misma: no se encontró una correlación en río Santa Cruz.

Transporte de fondo

El transporte de fondo involucra partículas más gruesas (como arenas y gravas) que se desplazan por rodamiento, deslizamiento o saltación a lo largo del lecho del cauce.

En las campañas de caracterización no se emplearon muestreadores específicos para determinación de transporte de fondo, pero sí se contó con la función *bottom track* del ADCP. Ésta permite medir la velocidad relativa del fondo respecto al instrumento, lo que puede utilizarse para estimar el transporte de sedimentos de fondo. Al emplearlo en Puente Viejo, no se detectó movimiento del material del lecho.

Turbidez

La turbidez da cuenta de cómo la cantidad de partículas en suspensión en el agua afecta su transparencia. Se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) y se ha monitoreado

de forma continua mediante sensores ópticos en tres sitios: Isla Pavón en río Santa Cruz, puente RN3 en río Chico y Punta Quilla próximo a la boca del estuario. Estos registros tienen el potencial de vincularse con la concentración de sedimentos en suspensión (según se discutió en la sección anterior), permitiendo estimar variaciones en el transporte sólido a lo largo del tiempo.

Evolución temporal de la turbidez en Isla Pavón. Las mediciones continuas en Isla Pavón comprenden 20 meses, y los registros de turbidez adquiridos con intervalos de 10 minutos se presentan en la parte inferior de la Figura 2.65. Abarcan un rango de valores de dos órdenes de magnitud¹⁸ y presentan un ruido considerable (picos abruptos en los valores), lo cual dificulta su interpretación. Al interpretar los datos, debe tenerse presente que se han encontrado cachiyuyos enganchados en el equipo de medición al momento de extraerlo del agua para mantenimiento y descarga de datos, lo cual ha sido responsable de altos valores de turbidez registrados en ciertas campañas¹⁹.

Las variables que podría esperarse que incidan en la evolución temporal de la turbidez incluyen caudal, resuspensión por mareas, viento, precipitaciones y floraciones algales (asociadas a la evolución estacional de la temperatura). Respecto a caudal y temperatura, su evolución a lo largo del año es suave (consultar hidrograma medio en Figura 2.57 y registro de temperatura del aire en Figura 2.23), y no se asemeja a la evolución del valor medio de turbidez. A fin de explorar la posibilidad de que el viento y las precipitaciones incorporen material al curso de agua, se incluyen los registros de la Estación Hidrometeorológica Automática (EHMA) Punta Quilla (ubicada unos 40 km al sudeste) en la Figura 2.65. Todos los registros tienen la misma escala temporal en el eje horizontal a fin de permitir su comparación. Para caracterizar el viento, la magnitud se indica en eje vertical mientras que su dirección se indica con código de colores; las precipitaciones están indicadas como milímetros caídos en intervalos de 7 horas.

Teniendo en cuenta el ruido de la serie de turbidez, y suponiendo que los valores más altos estarían producidos por algas y no por modificaciones en el transporte de sedimentos, se ha seleccionado para su análisis un intervalo de tiempo más corto, presentado en la Figura 2.66. En el mismo, la turbidez se mantiene en torno a un valor de unos 14 NTU y no presenta demasiadas variaciones bruscas, aunque sí una evolución más lenta del orden de unos dos días²⁰. Además de viento (con su magnitud y dirección) y precipitación, se presenta el nivel del río a fin de identificar la existencia de resuspensión. De la serie representada, no se extrae ninguna conclusión sobre la existencia de una relación con ninguna de estas variables.

¹⁸Nótese que el eje vertical se presenta en escala logarítmica.

¹⁹Por ejemplo, se encontraron algas enredadas en el equipo fondeado en Isla Pavón en las campañas de diciembre, enero, febrero y abril. En el equipo de Punta Quilla, se encontraron cachiyuyos al recuperar el equipo en noviembre. Los responsables de las campañas juzgaron que esto no invalida los registros de turbidez.

²⁰Esta apreciación es a simple vista, pues la misma es aperiódica, y no se aprecia una frecuencia preferente al realizar un análisis espectral.

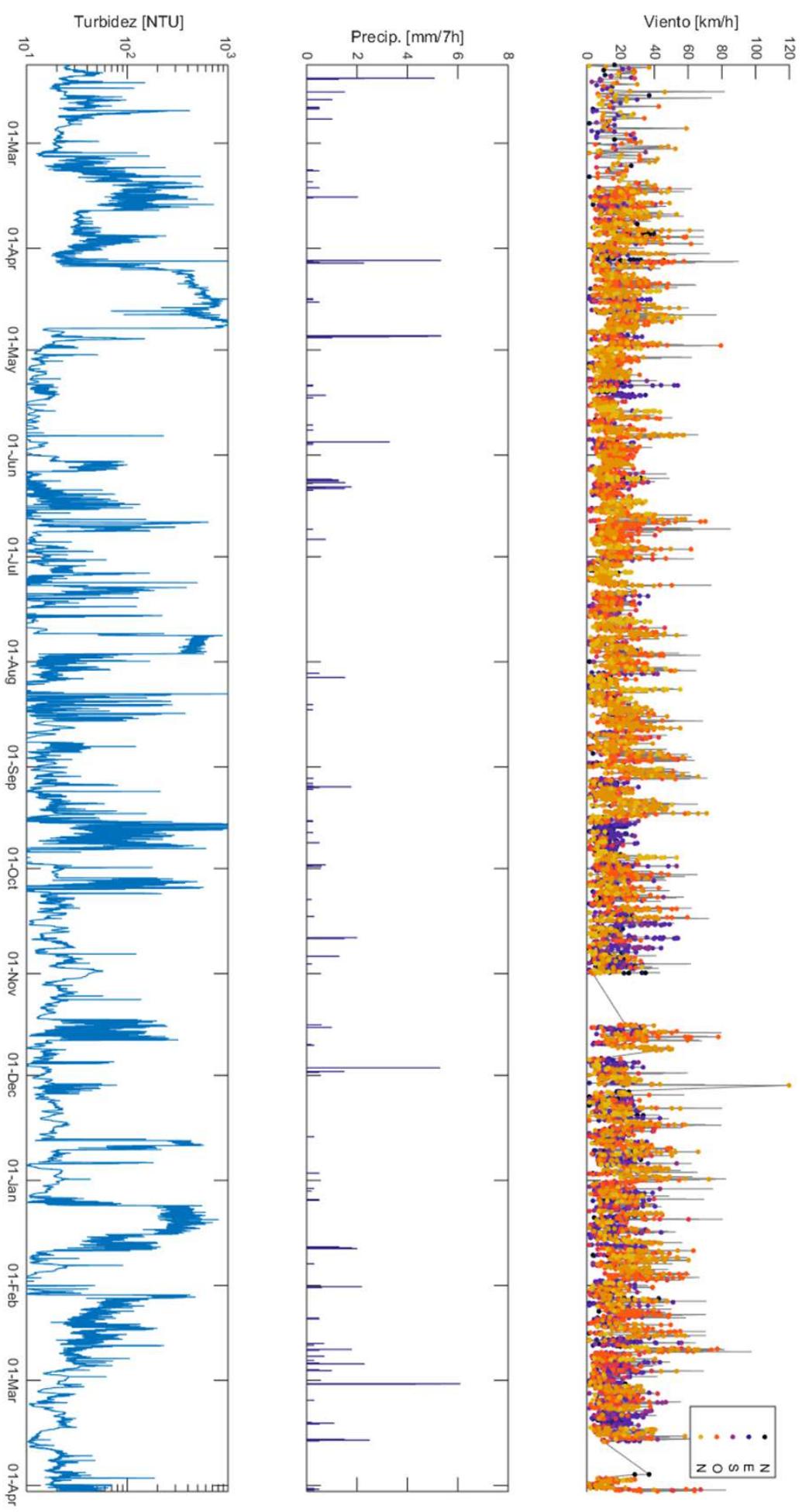


Figura 2.65: Registro del OBS de evolución temporal de la turbidez en Isla Pavón. Contraste con evolución de viento y precipitaciones medidas en Punta Quilla

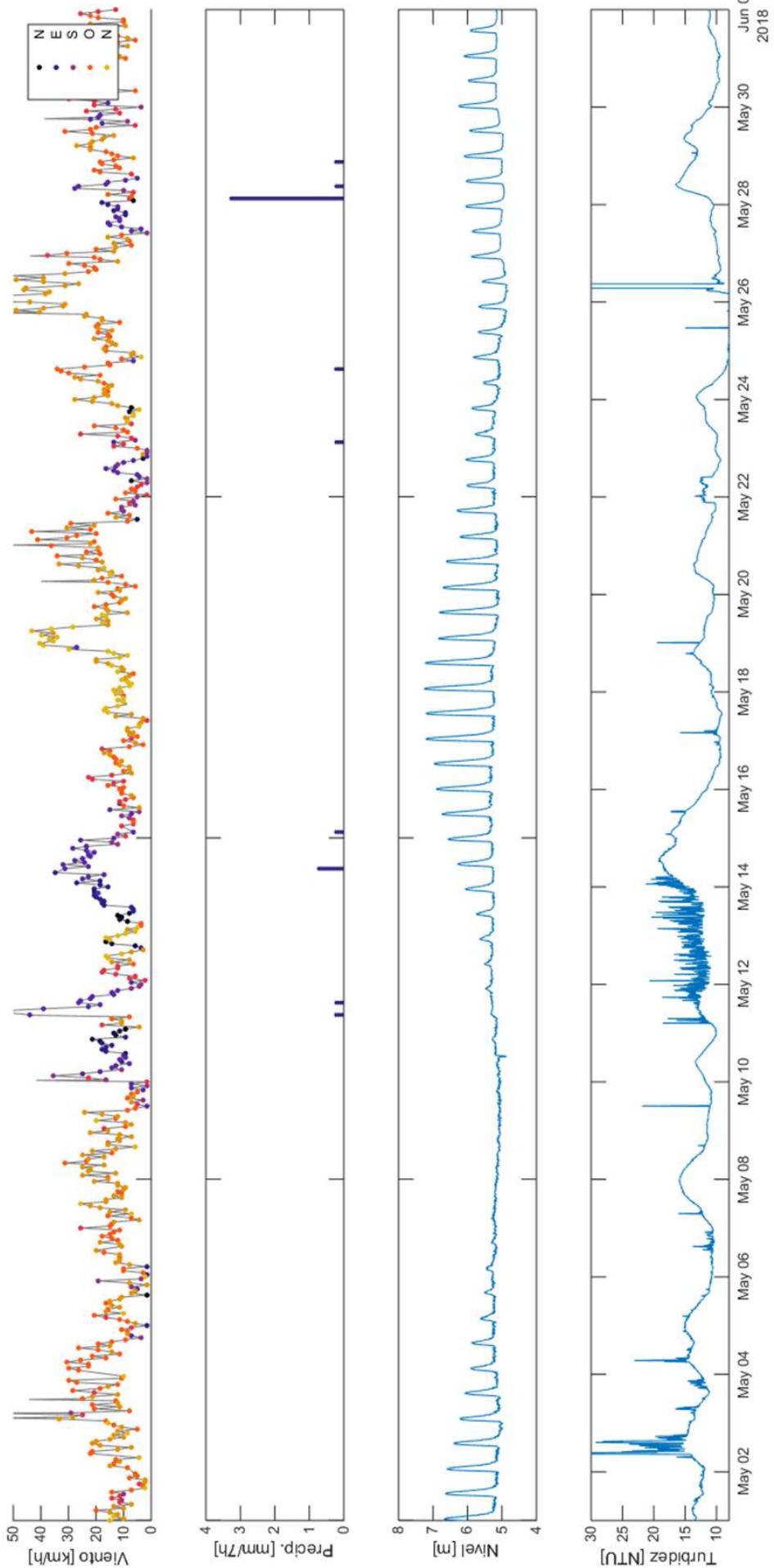


Figura 2.66: Detalle de registro del OBS de evolución temporal de la turbidez en Isla Pavón durante un mes en que su evolución presentó poco ruido. Contraste con evolución de viento y precipitaciones medidos en Punta Quilla, y niveles en Isla Pavón

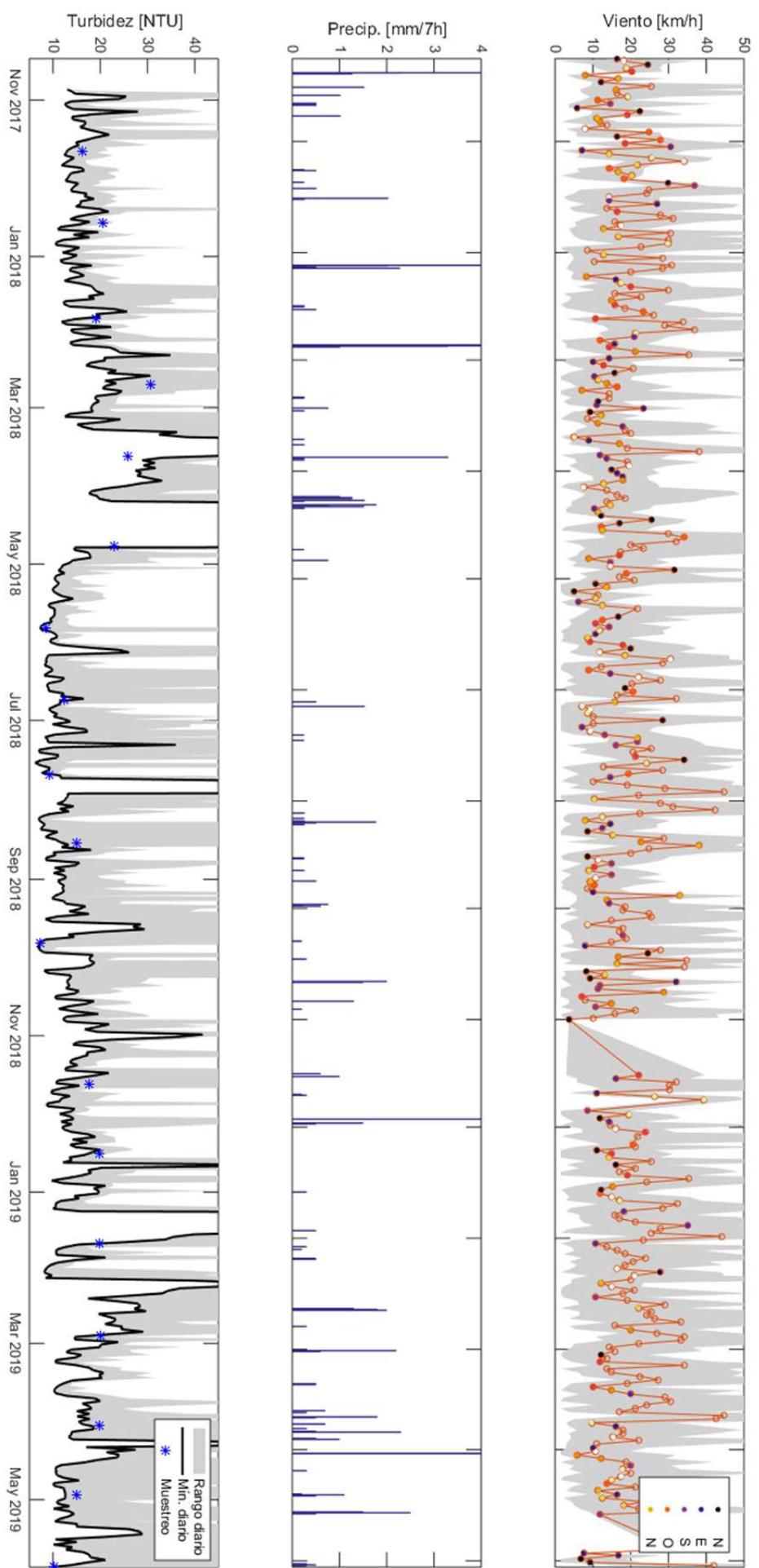


Figura 2.67: Valores diarios de turbidez en Isla Pavón (mínimo en negro, rango de valores en gris, muestreo mensual en marcador azul). Contraste con viento (valor mediano diario, rango de valores en gris) y precipitaciones medidas en Punta Quilla.

Dado que no resulta posible extraer conclusiones del análisis de los registros instantáneos, se decide considerar valores diarios representativos, presentados en la Figura 2.67²¹. Suponiendo que los picos de turbidez podrían no tener relación con las partículas en suspensión, se hace hincapié en el mínimo diario de turbidez (línea continua negra). De hecho, la turbidez de las muestras de agua recolectadas mensualmente (marcadores azules) presenta valores cercanos a los mínimos diarios ofrecidos por el OBS. Para el viento, se grafica la mediana, y se representa asimismo la precipitación. Este enfoque tampoco revela el origen de las variaciones de turbidez.

Los datos disponibles no permitieron determinar la causa de modificaciones en la turbidez, por lo que se recomienda extender los monitoreos en el futuro para disponer de un set de datos más amplio y robusto. A pesar de que los registros no revelan influencia de las precipitaciones, tras eventos de lluvia se han observado cambios en la coloración del río, tal como se ejemplifica en Figura 2.68. La fotografía hace suponer que el incremento de turbidez puede ser un fenómeno producido por incorporación de material sólido al curso de agua debido al lavado superficial.



Figura 2.68: Fotografía tomada hacia aguas arriba desde puente RN3 sobre río Santa Cruz (Isla Pavón) tras un evento de lluvia. Nótese el cambio de coloración del agua sobre la margen derecha del cauce.

Como fuente de datos adicional, se accedió a mediciones de turbidez realizadas en dos períodos por la planta potabilizadora de Piedrabuena: 1991 a 1994, y año 2017. Éstos se presentan en la Figura 2.69.

El registro de turbidez de 1991 a 1994 presenta una evolución periódica y libre de ruidos, con valores mínimos en invierno y alcanzando algo menos de 20 NTU en verano. Atendiendo a una posible correlación con la evolución anual de la temperatura ambiente y evolución de algas, ésta se grafica superpuesta (línea continua naranja cuyos valores se leen en el eje vertical secundario). No obstante, al consultar al Dr. Chapra²², él indicó que no era probable que la clorofila de una floración algal explicase esos valores.

El registro de turbidez de la planta correspondiente a 2017 presenta un comportamiento con mayor variabilidad y cambios bruscos, posiblemente por emplear otra metodología para su determinación²³. Este período se superpone en parte con algunos meses de funcionamiento del OBS

²¹Notar que el límite superior del eje y de la gráfica de turbidez ha sido truncado, a fin de visualizar mejor el rango de valores de mayor interés.

²²El Dr. Steven Chapra es un referente en modelado de calidad de agua y profesor emérito de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de Tufts (EE.UU.).

²³No se tiene detalle de la metodología con que se obtuvieron los registros de la planta.

(serie azul), evidenciando que ambos registros son consistentes entre sí.

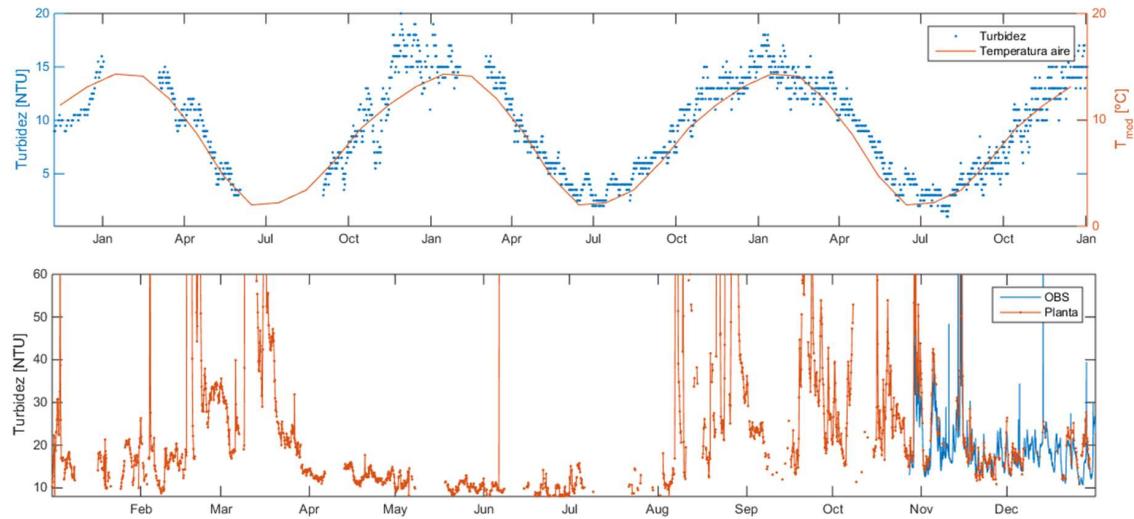


Figura 2.69: Evolución de turbidez registrada por la planta potabilizadora de Piedrabuena. Arriba, período 1991-1994: registros de la planta en eje principal (azul) y contraste con temperatura ambiente en eje secundario (naranja). Abajo, año 2017: registro de la planta (naranja) y medición con OBS (azul).

La última fuente de datos de turbidez que merece mención está dada por los registros de la estación 2839 – Comandante Luis Piedrabuena sobre el río Santa Cruz, perteneciente a la Red Hidrológica Nacional [20]. En la Figura 2.70 se representan las 12 determinaciones de sólidos suspendidos reportadas, acompañadas para su contraste con mediciones simultáneas de turbidez, niveles y precipitación. No se tiene conocimiento del protocolo de medición. Lo escaso de los datos impide extraer conclusiones sobre la interrelación entre variables, y por su parte la relación entre turbidez y SST no evidencia la posibilidad de establecer una correlación robusta entre ambas.

Si bien las figuras anteriores no revelaron vinculación entre las variables, se incluyen por su valor informativo, al permitir una evaluación visual integrada de las posibles relaciones entre la turbidez y los distintos forzantes considerados. Su incorporación apunta a facilitar al lector una interpretación propia sobre la potencial influencia de las condiciones meteorológicas y del forzante mareal. A modo de comentario final referente a la turbidez en Isla Pavón, se recuerda que dado que no ha sido posible correlacionar turbidez con concentraciones de sólidos suspendidos (ver 2.3.2 *Sólidos suspendidos totales*), no es posible establecer el transporte de sedimentos del río en base a los registros del OBS.

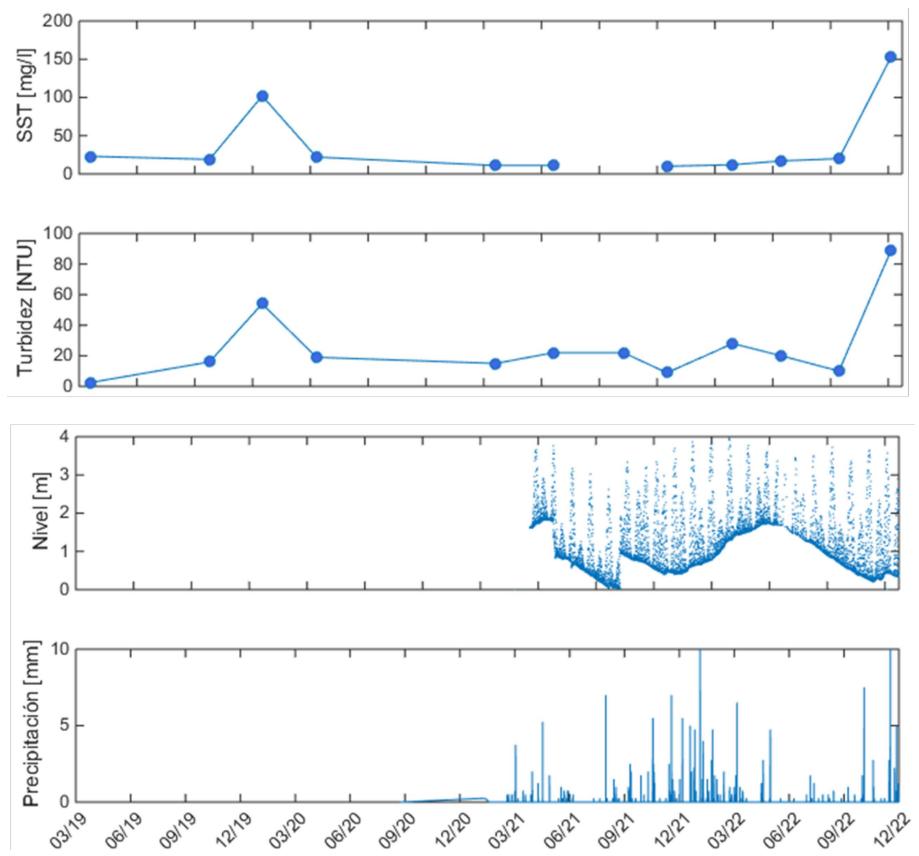


Figura 2.70: Datos de la estación 2839-Piedrabuena: sólidos suspendidos, turbidez, nivel y precipitación.

El registro temporal de turbidez en Isla Pavón presenta abruptos cambios que pueden alcanzar varios órdenes de magnitud. No fue posible relacionar su evolución con modificaciones en las variables meteorológicas, mareales ni hidrológicas.

Evolución temporal de la turbidez en río Chico. Los datos continuos de turbidez en río Chico comprenden 7 meses, según se muestra en la Figura 2.71. La toma de muestras se mantuvo por un período más largo, midiendo la turbidez con un equipo portátil. Si bien en general el valor de turbidez se mantiene del orden de 20 NTU, ocasionalmente ocurren picos de elevado valor (con un máximo absoluto de hasta 1080 NTU, donde parece que el equipo satura). Para encontrar la causa de los mismos, se ha representado en la misma figura la evolución de vientos (valor medio diario) y precipitaciones en Punta Quilla, así como los niveles registrados con el mismo OBS. La gráfica sugiere que los mayores valores de turbidez están modulados por el ingreso de la onda de marea hasta el sitio de monitoreo: se concluye que la marea es responsable de la resuspensión de sedimentos. Por otra parte, hay algunos incrementos de turbidez que difieren de los adyacentes y que parecen tener alguna relación con eventos de lluvia; aunque esto es difícil de determinar ya que la estación meteorológica se encuentra lejos y aguas abajo.

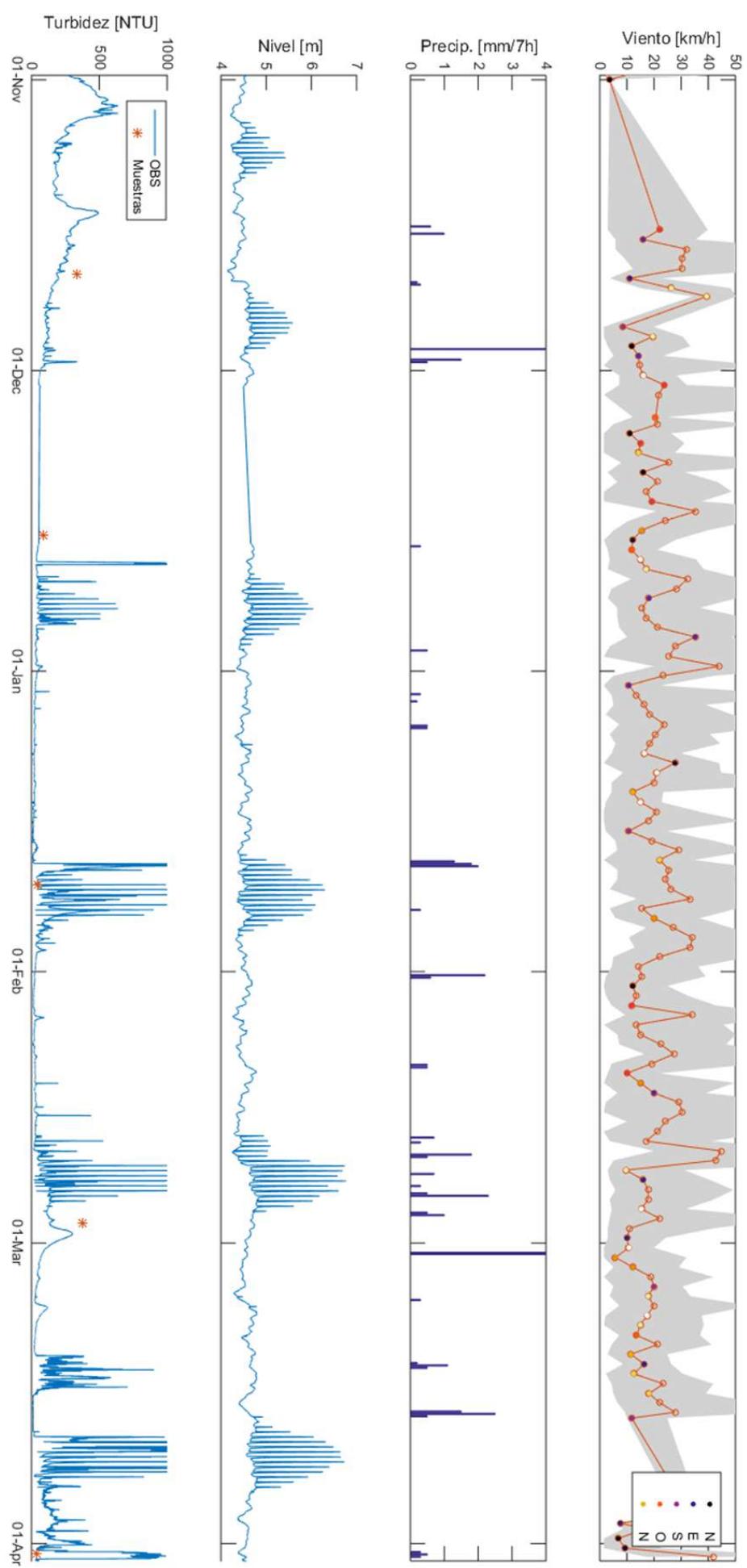


Figura 2.71: Evolución temporal de turbidez en Río Chico (OBS y toma de muestras). Contraste con niveles del río, y con variables meteorológicas medidas en Punta Quilla: viento (valor mediano diario, rango de valores en gris) y precipitación.

Para evaluar en profundidad la posible correlación entre niveles y turbidez (con posible incidencia de la lluvia, en menor magnitud), en la Figura 2.72 se presenta la evolución de valores diarios característicos: la mediana diaria de la turbidez (serie naranja, sobre eje secundario), el nivel máximo diario y la lluvia caída en las 48 hs previas (línea continua y barras sobre eje principal). Pese a que en la serie temporal el aumento de niveles coincide con el aumento de turbidez por resuspensión, al representar pares de valores nivel-turbidez (abajo) no ha sido posible encontrar una ley que vincule ambas variables.

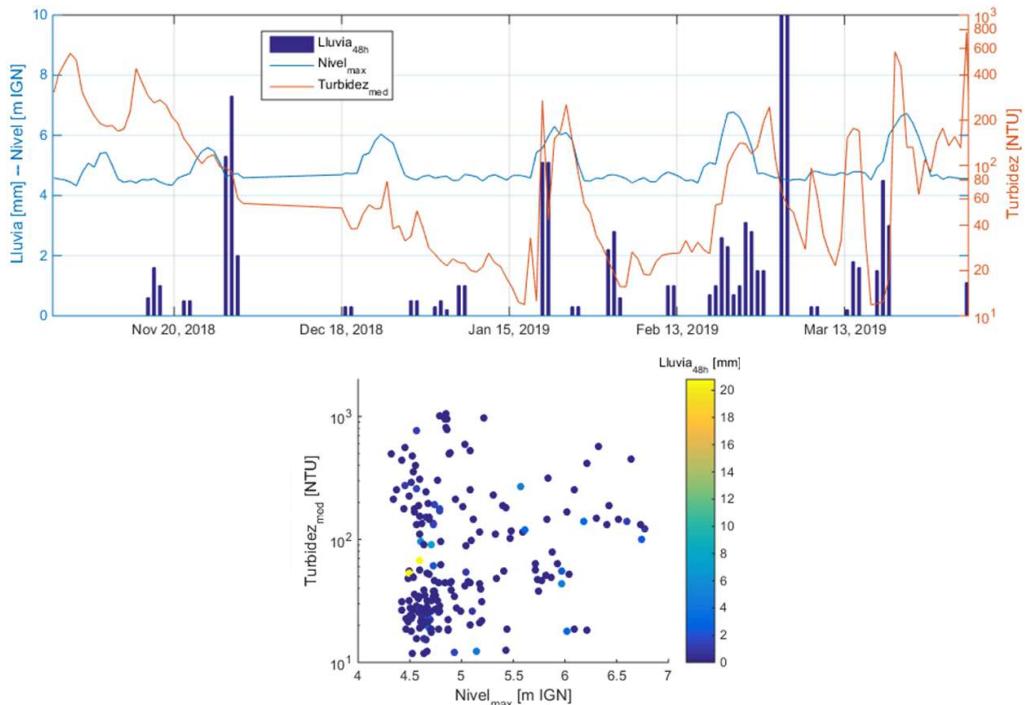


Figura 2.72: Estudio de causas de evolución de turbidez en río Chico: lluvia precipitada en las últimas 48 hs (en Punta Quilla), máximo nivel diario y turbidez mediana diaria. Arriba, evolución temporal; abajo, pares de valores, donde la escala de colores indica precipitación.

Adicionalmente, considerando que la salinidad podría influir en la floculación de sedimentos traídos por el río, se presenta en la Figura 2.73 un detalle comparativo de evolución de turbidez y conductividad, conjuntamente con niveles del río. Como se discute más adelante, la conductividad registrada se corresponde a bajos valores de salinidad, y tiene un valor no nulo sólo ocasionalmente. No parece que la salinidad sea responsable de la reducción de la turbidez tras la resuspensión.

Por último, se representan en la Figura 2.74 los registros de la estación 2836 – RN3 sobre río Chico, perteneciente a la Red Hidrológica Nacional [20]. Se observan las 13 determinaciones de sólidos suspendidos reportadas, acompañadas para su contraste con mediciones simultáneas de turbidez y caudales. No se tiene conocimiento del protocolo de medición. Lo escaso de los datos impide extraer conclusiones sobre la interrelación entre variables, y por su parte la relación entre turbidez y SST no evidencia la posibilidad de establecer una correlación robusta entre ambas.

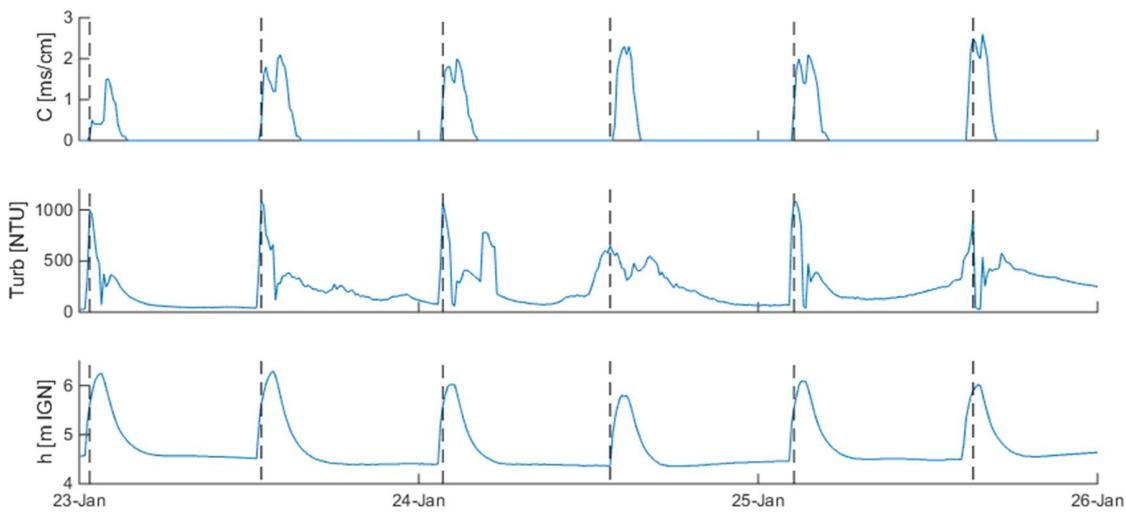


Figura 2.73: Conductividad, turbidez y niveles en río Chico. Las líneas discontinuas coinciden con los momentos de máxima turbidez.

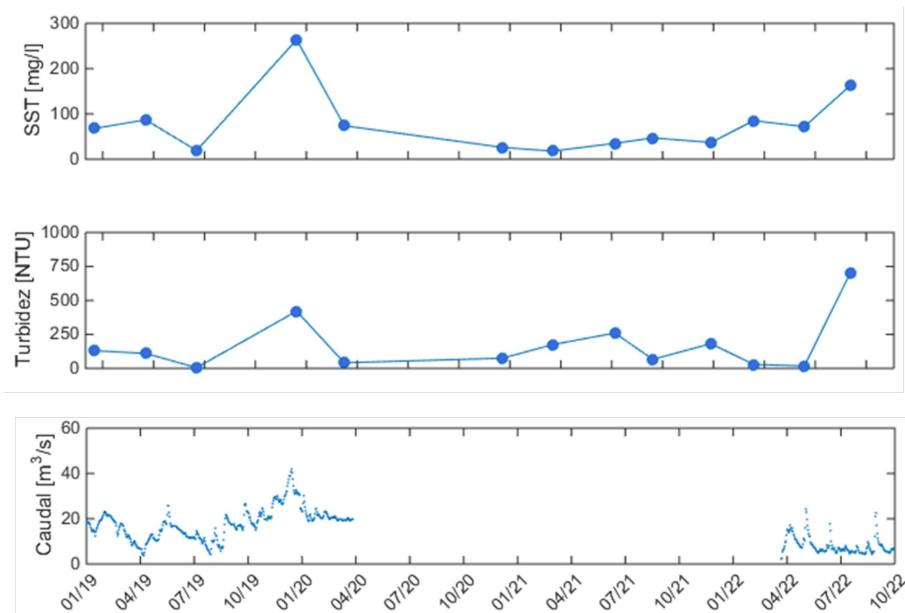


Figura 2.74: Datos de la estación de la BDHI 2836–RN3: sólidos suspendidos, turbidez y caudal.

En el puente RN3 sobre río Chico el registro de turbidez permite apreciar el efecto de la marea en la resuspensión de sedimentos.

Evolución temporal de la turbidez en Punta Quilla. El registro de turbidez en Punta Quilla obtenido con equipo OBS se presenta en la Figura 2.76²⁴. Al presentar una fuerte y rápida variabilidad, se ha destacado en el mismo gráfico el valor mínimo (línea continua gris) y mediano diario (línea continua negra) para ayudar a la comprensión de sus causas. En la misma figura se muestran los vientos (magnitud instantánea en gris, superponiendo en naranja su mediana diaria), precipitaciones y niveles, para contribuir a entender qué forzantes la gobiernan. Teniendo en cuenta la modulación astronómica de la marea, se observa que la evolución de los valores

²⁴Se han omitido valores mayores a 100 NTU para una mejor visualización. En la Figura 2.26, que presenta el registro completo, se observa que la turbidez varía en tres órdenes de magnitud.

medios de turbidez responde a la amplitud de la misma: en cuadratura, la turbidez media y su variación diaria se reducen, mientras que durante mareas de sicigia ambos parámetros aumentan. Por la muy marcada dependencia con las mareas, no se advierte si las variables meteorológicas pueden tener alguna influencia de carácter secundario.

Se analiza en detalle la influencia de las mareas en la Figura 2.75. Allí se representa la evolución de la turbidez medida por el OBS a lo largo de dos semanas (línea continua azul), habiendo calculado el valor medio diario (línea continua negra). Se acompaña con un gráfico de la evolución de niveles de la marea, en que se aprecia su modulación astronómica, y se han trazado algunas líneas discontinuas verticales a fin de asociar ambas variables en momentos de pleamar, bajamar y paso por el nivel medio. Se confirma que el valor medio de turbidez evoluciona según la amplitud de la marea. Por otra parte, también se advierte que cerca de pleamar la turbidez alcanza su mínimo: en efecto, durante la estoia la velocidad es mínima y se reduce la capacidad de transporte. El máximo de turbidez se alcanza en coincidencia con el nivel medio que se produce en bajante, que es el momento de máxima velocidad de la corriente saliendo del estuario.

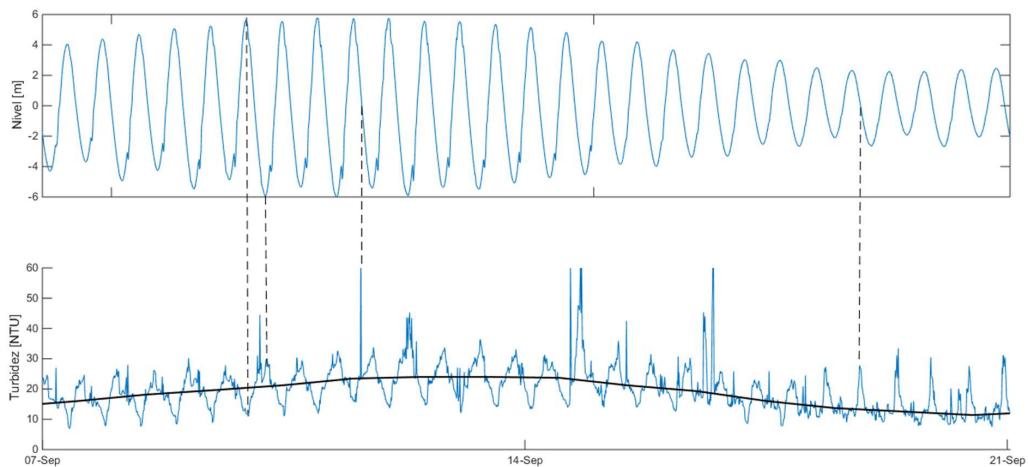


Figura 2.75: Detalle de la evolución temporal de turbidez en Punta Quilla, durante dos semanas que presentaron pocos picos ruidosos (registro del OBS en azul, valor medio diario en negro). Arriba, nivel provocado por la marea a modo de referencia.

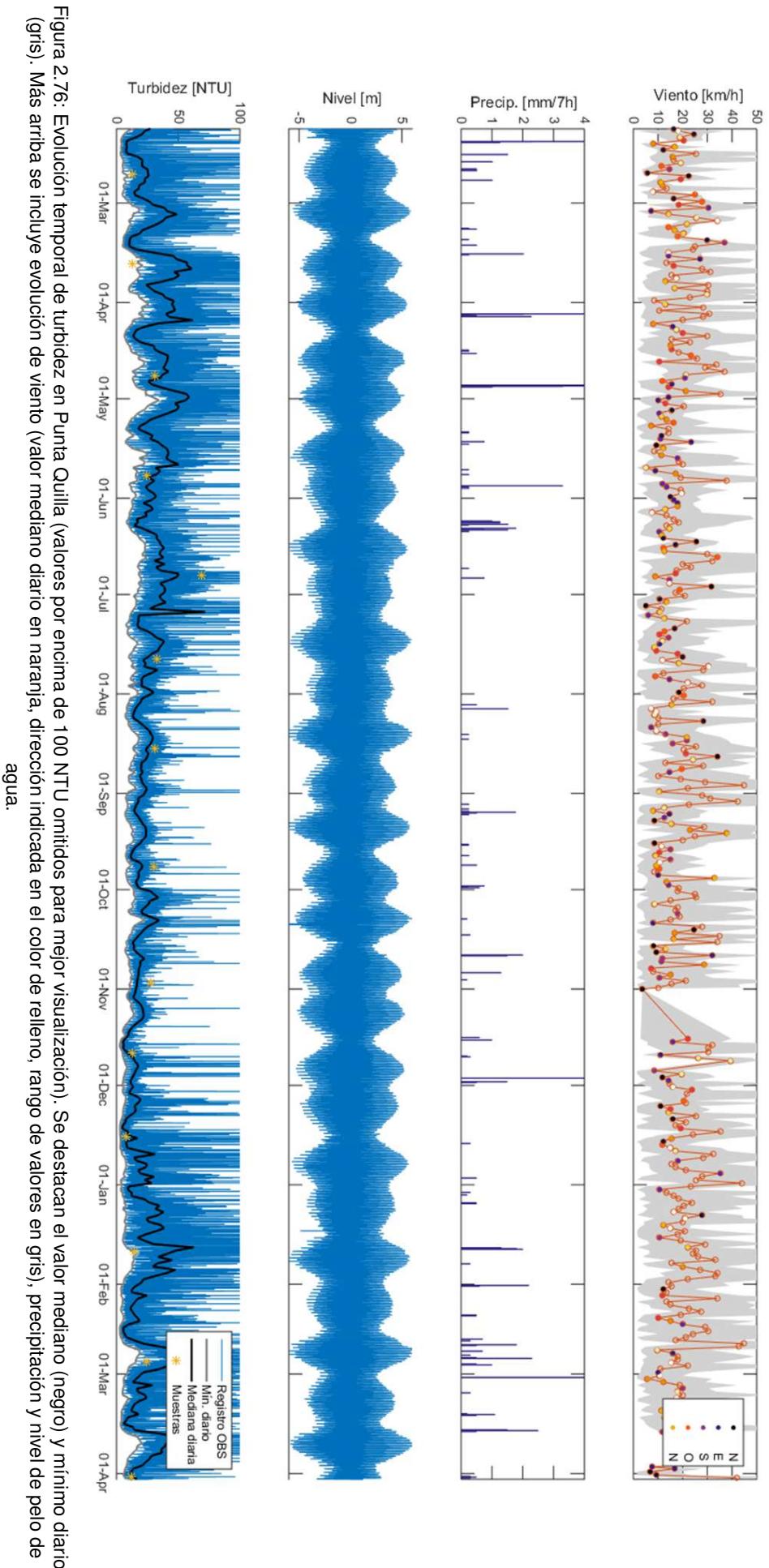


Figura 2.76: Evolución temporal de turbidez en Punta Quilla (valores por encima de 100 NTU omitidos para mejor visualización). Se destacan el valor mediano (negro) y mínimo diario (gris). Más arriba se incluye evolución de viento (valor mediano diario en naranja, dirección indicada en el color de relleno, rango de valores en gris), precipitación y nivel de pelo de agua.

El análisis espectral de frecuencias de la serie presentado en la Figura 2.77 confirma la dependencia con las mareas: se encuentra un pico de energía en la frecuencia de 0.0841 hs^{-1} , correspondiente a intervalos de tiempo de unas 12:30 hs. El máximo siguiente, de menor amplitud, corresponde a su armónico, siendo 6:15 hs un aproximado del tiempo desde pleamar hasta alcanzar el nivel medio del mar.

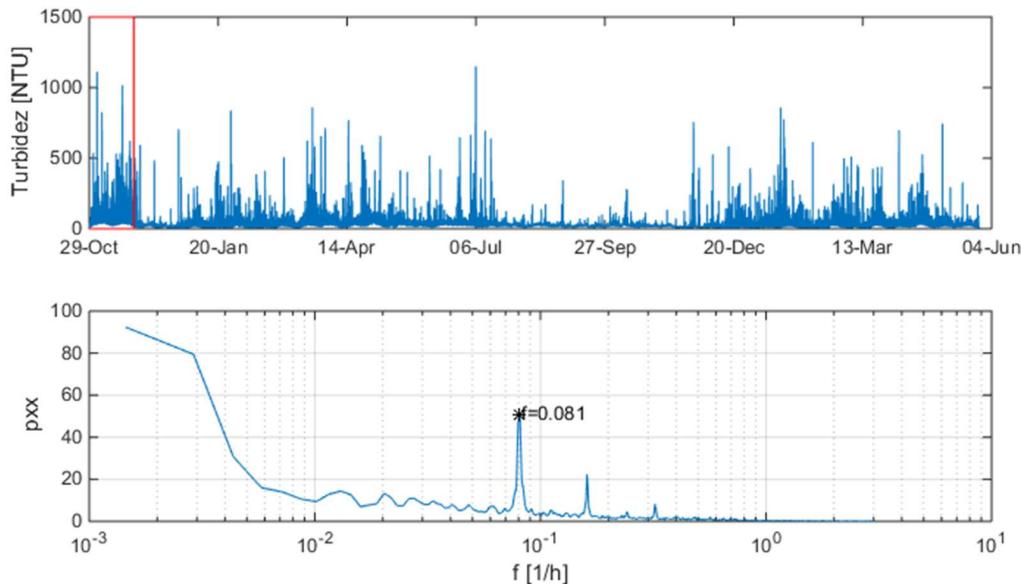


Figura 2.77: Análisis espectral para detectar frecuencias en la evolución de turbidez. Arriba, serie temporal del OBS, indicando en rojo el tamaño de ventana usado en el análisis de remoción de ruido. Abajo, espectro de energía, destacando el pico correspondiente a 12:30 hs.

Si bien resta comprender la causa y predecir la ocurrencia de picos de turbidez, de lo expuesto surge la posibilidad de predecir valores medios y mínimos diarios en función de las amplitudes de la marea. Esto tiene la gran ventaja de que al ser astronómicas, son predecibles. En la Figura 2.78 se proponen dos ajustes lineales que, si bien presentan dispersión, captan la tendencia descripta con expresiones simples y sirven a título orientativo. A la izquierda, en la nube de puntos los valores mínimos diarios de turbidez se relacionan con las alturas máximas observadas h_{\max} , y se incluye en línea discontinua el ajuste

$$\text{Turbidez}_{\min \text{ PQ}} [\text{NTU}] = 2,5 \cdot h_{\max} [\text{mIGN}]. \quad (2.7)$$

A la derecha, se hace lo propio para describir los valores medianos de turbidez, incluyendo la recta de ajuste

$$\text{Turbidez}_{\text{mediana PQ}} [\text{NTU}] = 6,5 \cdot h_{\max} [\text{mIGN}] - 2. \quad (2.8)$$

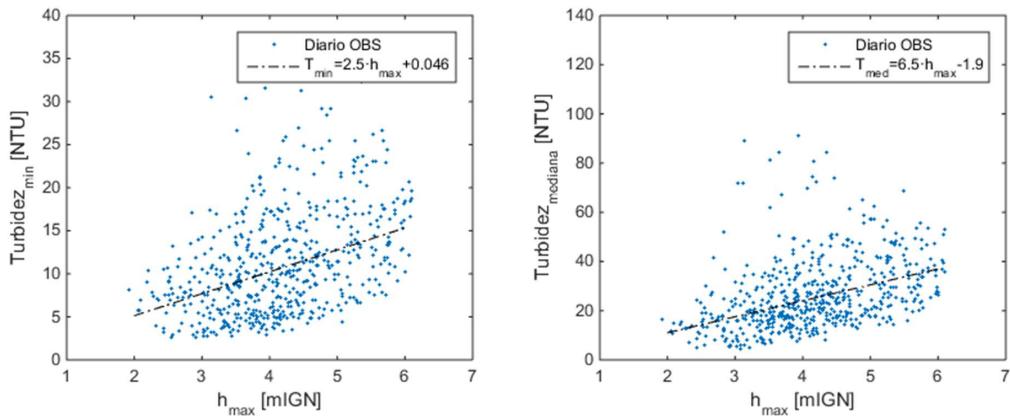


Figura 2.78: Propuesta de ajuste de turbidez Punta Quilla: turbidez media y mínima diaria frente a cota de pelo de agua máxima diaria.

En Punta Quilla la turbidez responde principalmente a las mareas astronómicas, que son predecibles. El máximo de turbidez se alcanza en coincidencia con el nivel medio que se produce en bajante, que es el momento de máxima velocidad de la corriente saliendo del estuario. Durante la estoa de pleamar la velocidad es mínima y se reduce la capacidad de transporte.

Variabilidad espacial de la turbidez. Para finalizar el análisis de los registros continuos de turbidez, en la Figura 2.79 se representan los valores de turbidez característicos de cada sitio. Cada histograma indica el porcentaje de permanencia de rangos de valores de turbidez. Si bien en los tres casos los valores más observados están alrededor de 15 o 20 NTU, se hace evidente que la afectación de la marea cumple un rol fundamental en la ocurrencia de aumentos de turbidez: la desviación respecto de la moda aumenta en Punta Quilla y particularmente en río Chico.

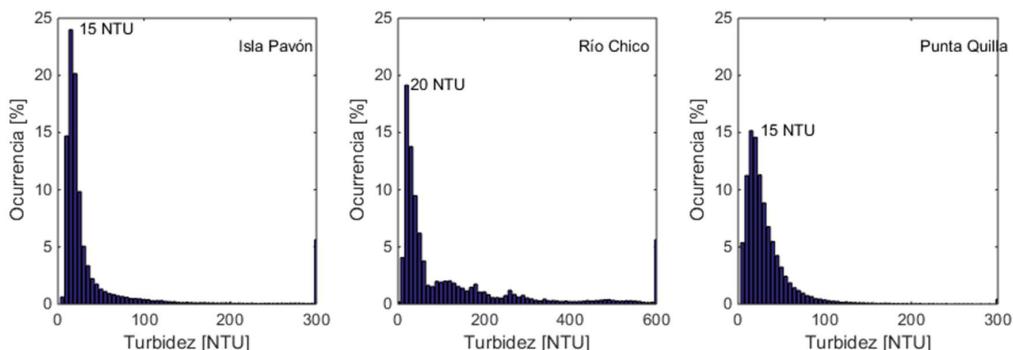


Figura 2.79: Histogramas con porcentaje del tiempo de permanencia de niveles de turbidez en cada sitio, destacando el valor más observado.

Por último, resta recordar que en una campaña se fondeó un equipo de medición continua en el mar durante 5 días (sitio rotulado como estación Mar en Figura 2.11). Los registros presentados en Figura 2.29 muestran que la turbidez presenta máximos en bajante, lo que sugiere que el transporte de sedimentos sería desde el estuario hacia el mar.

2.3.3. Nutrientes

Los datos disponibles de nutrientes provienen de la toma mensual de muestras de agua a media profundidad en el *thalweg* del río. Los sitios relevados fueron Charles Fuhr, Puente Viejo, Isla Pavón, río Chico y Punta Quilla, en un total de 20 meses, a excepción de los dos primeros en los cuales se interrumpió tras 12 campañas. Los nutrientes analizados son ortofosfatos (PO), fósforo total (P) y nitrógeno total (N), cuyas concentraciones C se grafican en la Figura 2.80.

Información adicional sobre calidad de agua ha sido proporcionada por las campañas de limnología, pero no se ahonda en su análisis en esta publicación.

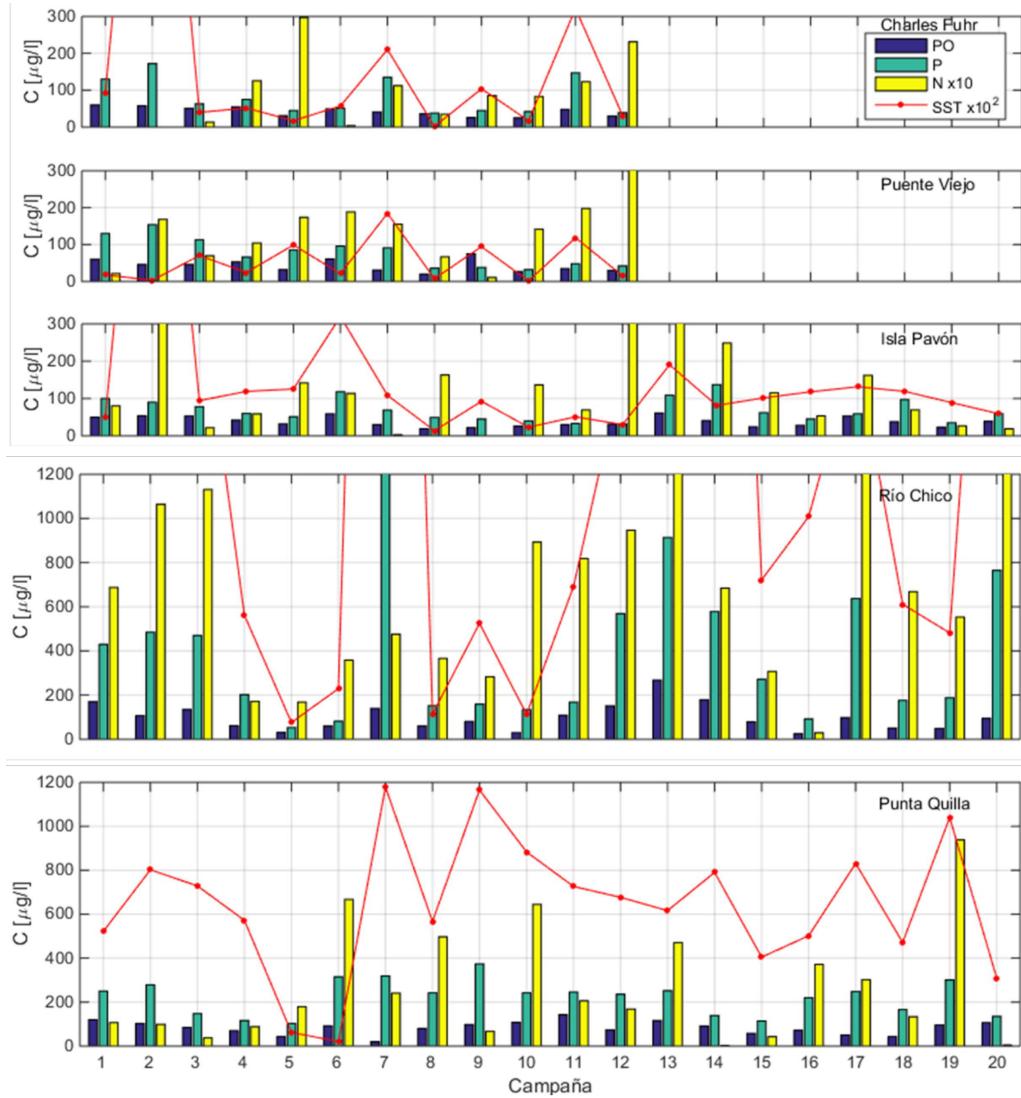


Figura 2.80: Evolución temporal de las concentraciones de nutrientes (ortofosfato, fósforo, nitrógeno) y sólidos suspendidos medidas en las muestras mensuales de agua en los distintos sitios. Notar que las concentraciones de nitrógeno y SST se han graficado en decenas y décimas de $\mu\text{g/l}$ para mejor visualización. Además, se han omitido unos pocos datos que salen de la escala vertical.

En principio, no se advierte una tendencia de evolución temporal de las variables estudiadas. En la misma figura se superponen los sólidos suspendidos, puesto que suelen estar ligados a los nutrientes: la literatura sugiere que una baja proporción del fósforo es llevada a los océanos en forma disuelta, mientras que el resto es llevado como fósforo particulado en los sedimentos en

suspensión. El mecanismo por el cual el fosfato reacciona rápidamente con una variedad de superficies (siendo tomado y liberado por la materia en suspensión) se conoce como *tamponización* y representa uno de los mecanismos más importantes en la geoquímica del fósforo en sistemas estuarinos. Se ha sugerido que es importante para mantener las concentraciones de fosfatos en ríos, arroyos y estuarios en valores casi constantes, proveyendo una gran y potencialmente disponible reserva de fosfato reactivo para el fitoplancton. A priori, la Figura 2.80 no revela una relación entre sólidos suspendidos y nutrientes.

Estos aspectos ameritan ser evaluados por un experto en la temática, ya que se trata de interacciones complejas.

Para cada uno de los sitios monitoreados, la Tabla 2.11 resume los valores medios y la desviación estándar de los nutrientes en cuestión.

Tabla 2.11: Resumen de la caracterización de nutrientes: ortofosfato, fósforo y nitrógeno, consignando su media μ y desviación estándar σ .

	PO [$\mu\text{g/l}$]		P [$\mu\text{g/l}$]		N [$\mu\text{g/l}$]	
	μ_{PO}	σ_{PO}	μ_P	σ_P	μ_N	σ_N
Charles Fuhr	43	13	82	49	1110	928
Puente Viejo	43	17	78	41	1456	1150
Isla Pavón	38	13	68	31	1478	1547
Punta Quilla	83	30	222	78	2634	2582
Río Chico	99	61	410	389	7211	4956

Río Chico, que tiene también los mayores valores de turbidez, es el que presenta las concentraciones más altas. En segundo lugar se encuentran las concentraciones en Punta Quilla. Recorriendo que el caudal de río Chico es de entre uno y dos órdenes de magnitud menor que el de Santa Cruz, el aporte de río Chico no explicaría de por sí los niveles observados en el estuario. Además, según la bibliografía la entrada de nutrientes desde el mar al estuario es generalmente muy baja y como mínimo de un orden de magnitud inferior a la del río. Entonces, podría ocurrir que el gradiente de salinidad ²⁵ y tamponización aumenten el fósforo respecto de la mezcla de aportes de ríos, por la desorción de las partículas suspendidas. Se hace hincapié en que esto requiere un análisis que excede a esta publicación ²⁶. En cuanto a los valores observados en río Santa Cruz, los niveles de nutrientes permanecen relativamente constantes desde la embocadura hasta el estuario. La evolución de estos nutrientes deberá evaluarse a futuro a la luz del conocimiento de la presencia de fitoplancton y de la tipología de algas presentes en el estuario.

Relaciones entre nutrientes y otras variables en río Santa Cruz. Respecto a la presencia de nutrientes en río Santa Cruz, se ha intentado encontrar su relación con el caudal del río y con los sólidos suspendidos. No obstante, ni la presencia de fósforo ni la de nitrógeno exhiben una relación biunívoca con estas variables al graficar pares de valores (se obtiene una nube difusa). Por ello, se pasa directamente en la Figura 2.81 a examinar la proporción entre nitrógeno y fósforo, y de ortofosfatos respecto del fósforo, indicando además la época del año. Es muy difícil extraer conclusiones dada la dispersión de los puntos. Respecto a las cantidades de nitrógeno,

²⁵No se ha hallado relación entre ortofosfatos y salinidad al graficar pares de valores en cada sitio.

²⁶En trabajos futuros podría evaluarse la relación entre tiempo de permanencia del agua dulce en el estuario y la eliminación de carga de nitrógeno

se ha graficado la recta que marca la proporción 16:1, relación estequiométrica de nitrógeno y fósforo en el fitoplancton según la relación de Redfield²⁷. Durante el período monitoreado, han existido sitios y campañas en las cuales los limitantes han sido uno y otro alternadamente. Por otra parte, los ortofosfatos constituyen entre el 30 % y 100 % del fósforo total presente en las muestras.

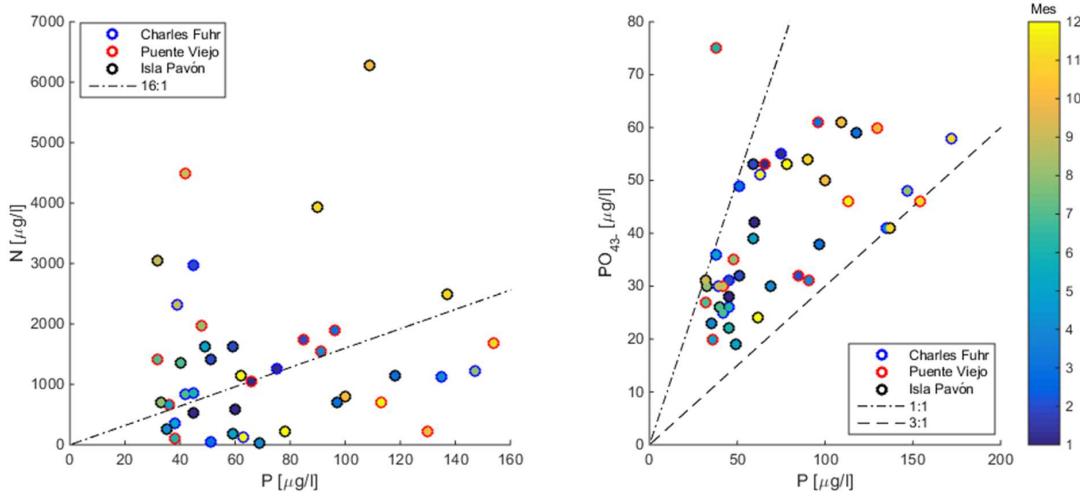


Figura 2.81: Relación de nitrógeno y ortofosfatos respecto de la concentración de fósforo en río Santa Cruz. Los contornos de marcador indican el sitio de muestreo, y el color del relleno el mes. Se incluyen, a modo orientativo y no de ajuste, la habitual relación 1:16 entre N y P, mientras que se acota la relación entre PO y P con las rectas 1:1 y 3:1.

Relaciones entre nutrientes y otras variables en río Chico. En río Chico la presencia de fósforo se relaciona con las concentraciones de sólidos suspendidos. En efecto, en la Figura 2.82 se observa que es posible vincular ambas variables mediante un ajuste lineal:

$$P_{RC} [\mu\text{g/l}] = 2 \cdot SST [\text{mg/l}] + 70. \quad (2.9)$$

Por otra parte, si bien no es posible asociar las concentraciones de fósforo al caudal que trae el río, en general un aumento de caudal conlleva un incremento de los nutrientes transportados. Esto podría explicarse porque el río Chico recibe aportes significativos de la lluvia, que lavaría nutrientes del suelo y los arrastraría hasta el curso de agua. Resta mencionar que para el nitrógeno se han ensayado las mismas gráficas, pero no se ha advertido una relación entre variables.

En referencia a las concentraciones relativas de nutrientes, en general los pares de valores nitrógeno-fósforo en la Figura 2.83 se encuentran por encima de la relación de Redfield (recta 16:1), indicando que el nutriente limitante para el crecimiento de fitoplancton es el fósforo. Además, la relación entre ortofosfatos y fósforo total de la gráfica a la derecha de la Figura 2.83 indica que orientativamente es de alrededor del 15 %.

²⁷Tener en cuenta, no obstante, que cuando existe más de un grupo de algas esta relación es insuficiente para determinar qué nutriente es el limitante. Aquí se consigna a título orientativo.

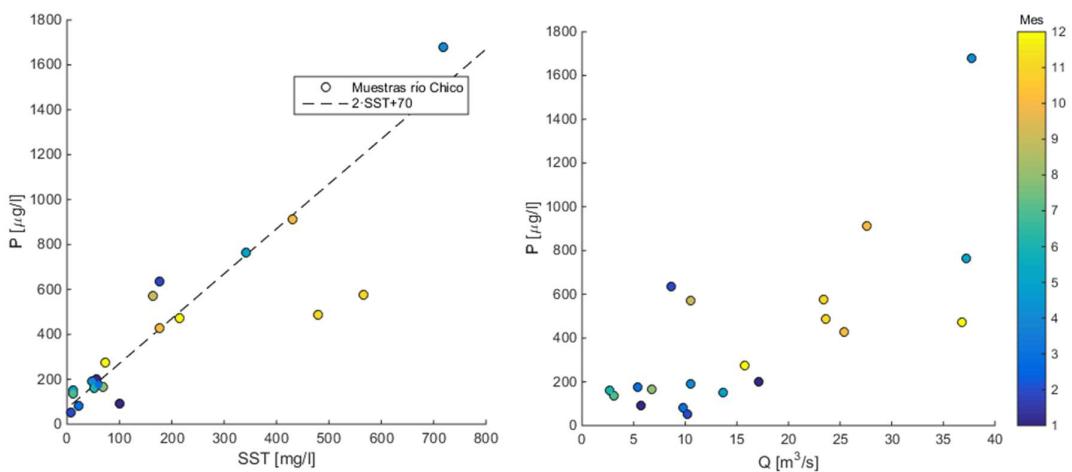


Figura 2.82: Concentraciones de fósforo P en río Chico. Relación con sólidos suspendidos (incluyendo una propuesta de ajuste) y variabilidad con el caudal Q .

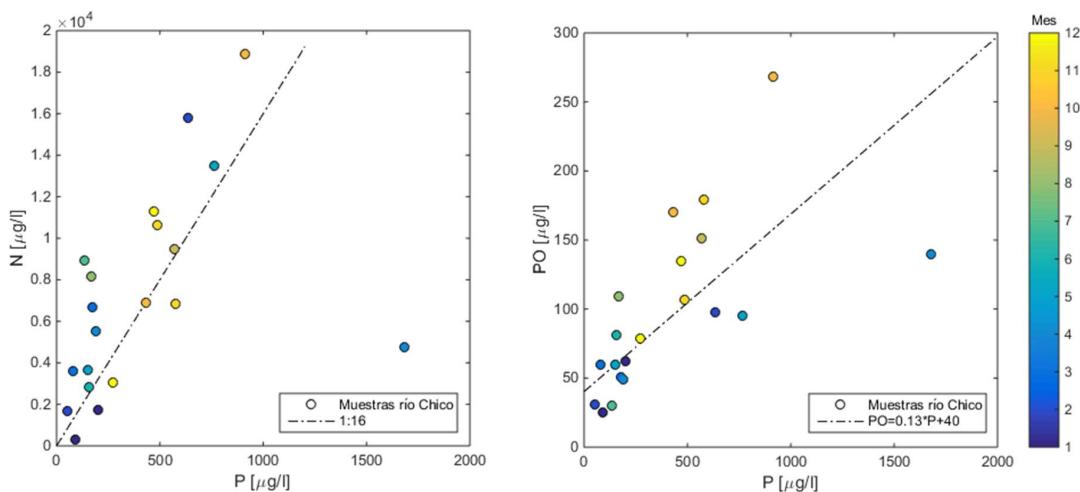


Figura 2.83: Concentraciones de nitrógeno N y ortofosfato PO frente a fósforo P en río Chico. Se indica la habitual relación 1:16 entre N y P, y se propone un ajuste entre PO y P.

Relaciones entre nutrientes y otras variables en Punta Quilla. En Punta Quilla es difícil definir una relación entre nutrientes y sólidos suspendidos ²⁸. Si bien la Figura 2.84 parece mostrar cierta tendencia de aumento de la concentración de fósforo con los SST, no se manifiesta con claridad. Por otra parte, debe tenerse en cuenta la gran fluctuación de turbidez que presenta este sitio. Respecto a la abundancia relativa de nitrógeno y fósforo, en contraposición a lo observado en río Chico, aquí se observa en numerosos casos que el principal limitante para el crecimiento de fitoplancton sería el nitrógeno (pares de valores por debajo de la relación de Redfield), lo cual es habitual en ambientes marinos.

²⁸Aquí la relación con caudal no aplicaría, por variar el mismo en forma permanente con la marea y no hacerse un aforo como parte de la campaña. Se asume que los muestreros son comparables por haberse hecho en momentos similares del ciclo de marea.

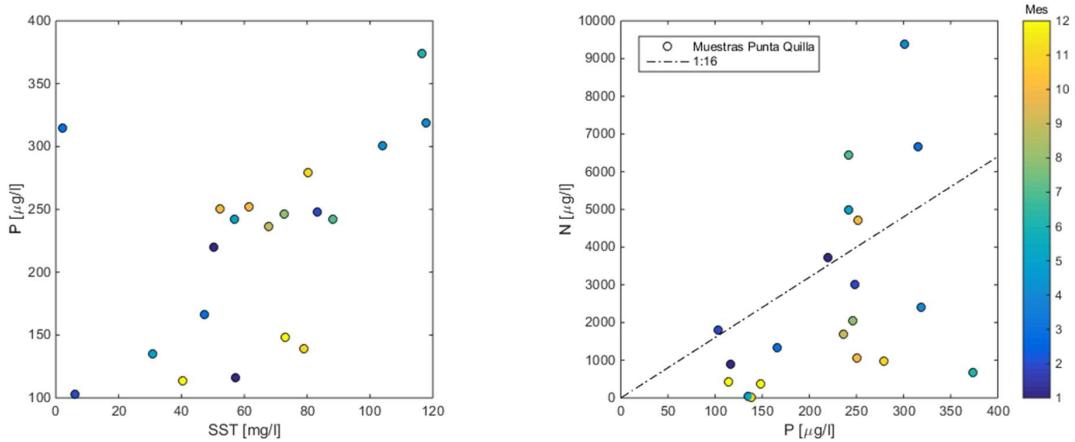


Figura 2.84: Nutrientes en Punta Quilla. Relación entre fósforo y sólidos suspendidos, y entre nitrógeno y fósforo teniendo como guía la proporción de Redfield 1:16.

2.3.4. Salinidad

La salinidad se ha registrado de manera indirecta a través de mediciones de conductividad en forma continua y puntual. Los OBS instalados en Isla Pavón, río Chico y Punta Quilla ofrecen registros continuos de la misma conjuntamente con otras variables, según se presentó en las Figuras 2.25 a 2.27. En los mismos lugares se tomaron mensualmente muestras de agua sobre las cuales se midió conductividad *in situ* con una sonda, y posteriormente en laboratorio.

Dado que el parámetro crudo medido por los equipos es conductividad, en las gráficas siguientes se presenta su valor. En un eje secundario se consigna la salinidad correspondiente²⁹ expresada en UPS (Unidades Prácticas de Salinidad), que es una escala adimensional. Una salinidad de 35 UPS indica que el agua tiene una conductividad 35 veces mayor que la del agua destilada a una temperatura estándar.

Evolución temporal de la salinidad en Isla Pavón. El registro de conductividad de Isla Pavón se presentó en la Figura 2.25. La variación en los valores registrados coincide con la resolución del instrumento y oscila alrededor del valor cero, con lo cual se concluye que se trata de una señal ruidosa y no de una variación física de conductividad. Entonces, en esta ubicación los efectos de la marea se manifiestan en variaciones de niveles cuando la amplitud de las mismas

²⁹Respecto a estas determinaciones, se indican una serie de observaciones:

- Contrariamente a lo esperado, las mediciones puntuales de conductividad *in situ* y en laboratorio difieren. Los valores de campo en Punta Quilla suelen ser del orden de un 82 % del de laboratorio, mientras que en río Chico la conductividad en laboratorio suele ser cercana al doble que la medida en campo.

- Los equipos OBS de medición continua estaban debidamente calibrados antes de iniciar la campaña. La planilla de datos OBS de Punta Quilla incorpora una columna adicional donde se indica salinidad: si bien los pares de valores Salinidad-Conductividad (S-C) presentan dispersión, los puntos están en torno a un ajuste S_{OBS} [UPS]

Ante estas discrepancias, en esta publicación se adopta para convertir conductividad en salinidad la expresión de la UNESCO [5]:

$$S[\text{UPS}] = -0,08996 + 28,8567 \cdot R + 12,18882 \cdot R^2 - 10,61869 \cdot R^3 + 5,98624 \cdot R^4 - 1,32311 \cdot R^5, \quad (2.10)$$

donde R es la relación de conductividad respecto del agua de mar a 15°C, cuya salinidad es de 35 ‰,

$$R = \frac{C}{C_{35\%}} = \frac{C}{42,906 \text{ mS/cm}}. \quad (2.11)$$

es suficientemente alta (y en mayor medida, cuando los caudales del río son más bajos), pero no conllevan el ingreso de agua salada hasta dicho punto. Allí, la conductividad y salinidad se mantienen siempre nulas.

Evolución temporal de la salinidad en río Chico. La Figura 2.86 presenta la evolución temporal de conductividad registrada con equipo OBS en río Chico. En el eje vertical secundario, se indica la salinidad equivalente de acuerdo con la Ecuación (2.10). Asimismo, se superpone la determinación de conductividad realizada mensualmente durante la toma de muestras: la medición *in situ* (marcadores amarillos), y la obtenida en laboratorio (marcadores naranjas), que como se mencionó no son iguales a pesar de que deberían serlo. La mayor parte del tiempo la conductividad es nula, indicando presencia de agua dulce. No obstante, se aprecia la aparición de salinidad en coincidencia con el ascenso de niveles de cierta amplitud producto de la marea astronómica.

A fin de evaluar la relación entre amplitud de marea e ingreso del frente salino, en la Figura 2.85 se evalúan pares de valores de conductividad en río Chico y nivel en Punta Quilla³⁰, donde además se indica con mapa de colores la dependencia con el caudal del río Chico³¹. A pesar de que no puede proponerse un ajuste a partir de la nube de puntos, la gráfica confirma que los mayores valores de conductividad ocurren en las pleamaras de mayor amplitud. Se observa que la salinidad es indetectable para caudales mayores a $16 \text{ m}^3/\text{s}$; hipótesis a confirmar con una serie de datos más larga. Algunos aspectos no explicados son el hecho de que para caudales bajos (color azul) existen casos de pleamaras de siccizia con salinidad nula, así como la ocurrencia de los mayores valores de conductividad durante caudales que no son los más bajos.

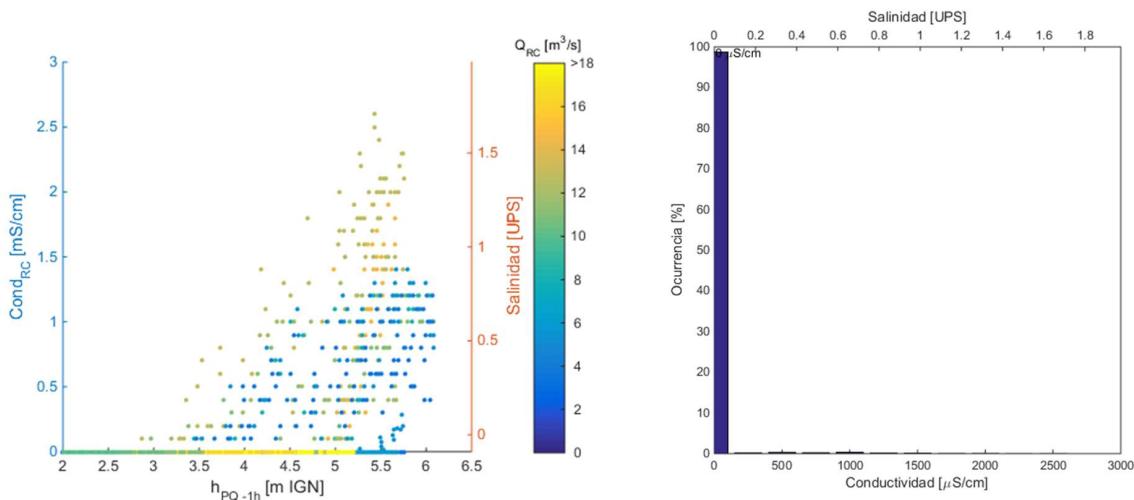


Figura 2.85: Conductividad en río Chico en función de la marea. Izq.: Conductividad frente a niveles en Punta Quilla h_{PQ} , distinguiendo el caudal del río Chico mediante el mapa de colores. Der.: Histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad.

³⁰Se seleccionó la serie de niveles en el puerto debido a que no es tan ruidosa como la de río Chico, y presenta la ventaja adicional de poder predecirse con tablas de marea. Se consigna el nivel una hora antes porque es el tiempo de traslado de la onda de marea.

³¹Calculado con la ley H-Q de Ec. (2.1) a partir de los registros de la BDHI [20]. El aumento de caudal, asociado a colores amarillos, incrementa la incidencia fluvial respecto de la mareal.

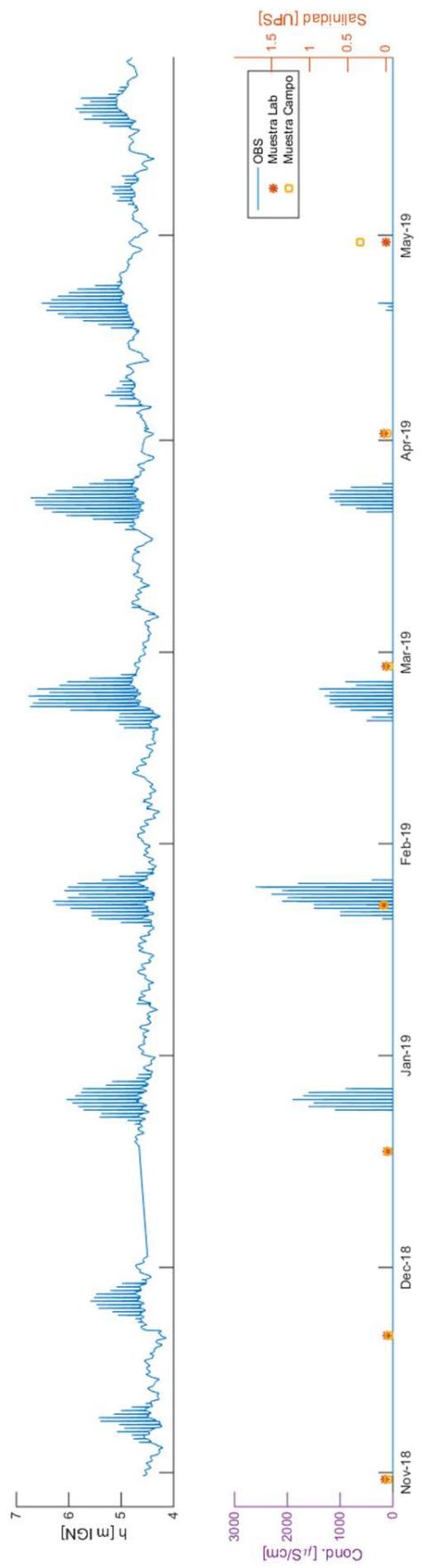


Figura 2.86: Evolución temporal de conductividad en río Chico: registro del OBS, medición puntual en campo y en muestras de laboratorio. Arriba, serie de niveles del río.

Por último, en la Figura 2.85 derecha se presenta la información del OBS en forma de histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad, evidenciando una vez más que prácticamente la totalidad del tiempo (más del 98 %) el frente salino no llega hasta allí.

Evolución temporal de la salinidad en Punta Quilla. La evolución temporal de conductividad registrada con equipo OBS se presenta en la Figura 2.87, donde también se incluye el registro de niveles a modo de referencia. Allí se evidencian tres tiempos característicos durante los cuales la conductividad cambia: un intervalo semidiurno que responde al ciclo de mareas, una modulación de la amplitud que coincide con la modulación de la marea astronómica³², y una fluctuación más lenta de los valores máximos a lo largo de todo el año.

Respecto a la escala temporal más corta, se aprecia que el ingreso y egreso de agua salobre al estuario ocurre en forma semidiurna por acción de las mareas. En efecto, en la Figura 2.88 se muestra un detalle de la misma serie temporal, donde se visualiza que la mínima salinidad coincide con la estoa de bajamar, mientras que lo opuesto ocurre en pleamar. Ambos momentos se indican con línea discontinua para facilitar la interpretación.

La escala temporal anual se examina en la Figura 2.89. Allí se han tomado los datos del OBS para determinar parámetros representativos de la conductividad a escala mensual: el rango de variación, la mediana y el mínimo. También se representa a modo de referencia un hidrograma con valores medios mensuales de caudales del río Santa Cruz, por depender de éste el tiempo de residencia y los procesos de transporte del estuario. Justamente se observa que el ingreso de agua dulce es responsable de que durante el estiaje del río los valores mínimos de salinidad disminuyan, mientras que lo opuesto ocurre durante los meses de aguas bajas. Es posible que la fluctuación del valor máximo se relacione con alguna ligera variación en la salinidad del mar.

En la Figura 2.90 se representa a través de pares de valores la misma información de la Figura 2.89: nube de pares de valores conductividad-caudal. Se observa claramente la dependencia de valores mínimos mensuales de la conductividad con el caudal del río Santa Cruz, aproximado con el ajuste $C_{\text{min}}[\mu\text{s/cm}] = -9,4 \cdot Q_{\text{sc}} + 23600$. Se verifica que los valores medios no responden a variaciones de caudal del río Santa Cruz.

³²A igualdad de caudal del río Santa Cruz, los valores diarios mínimos más bajos se alcanzan en mareas de sicigia.

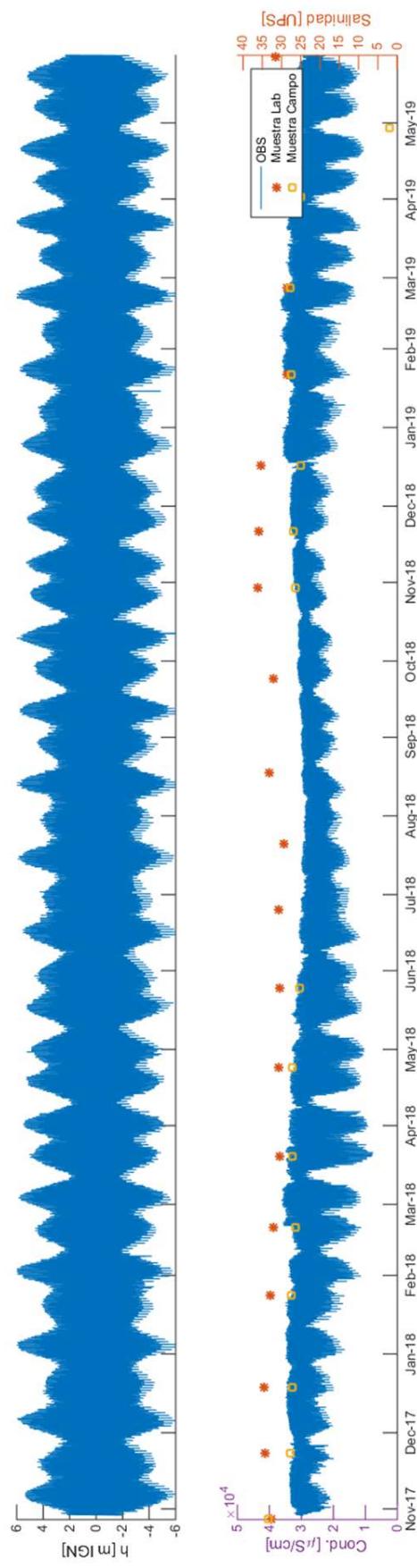


Figura 2.87: Evolución temporal de conductividad en Punta Quilla: registro del OBS, medición puntual en campo y en muestras de laboratorio. Arriba, serie de niveles.

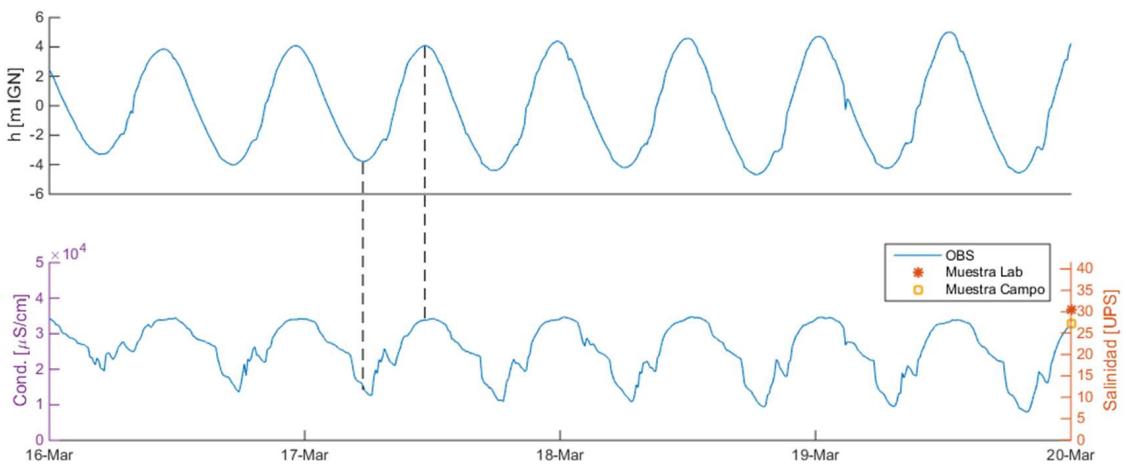


Figura 2.88: Detalle de la evolución temporal de conductividad en Punta Quilla. Las líneas discontinuas se ubican en una bajamar y una pleamar respectivamente. Arriba, registro de nivel h .

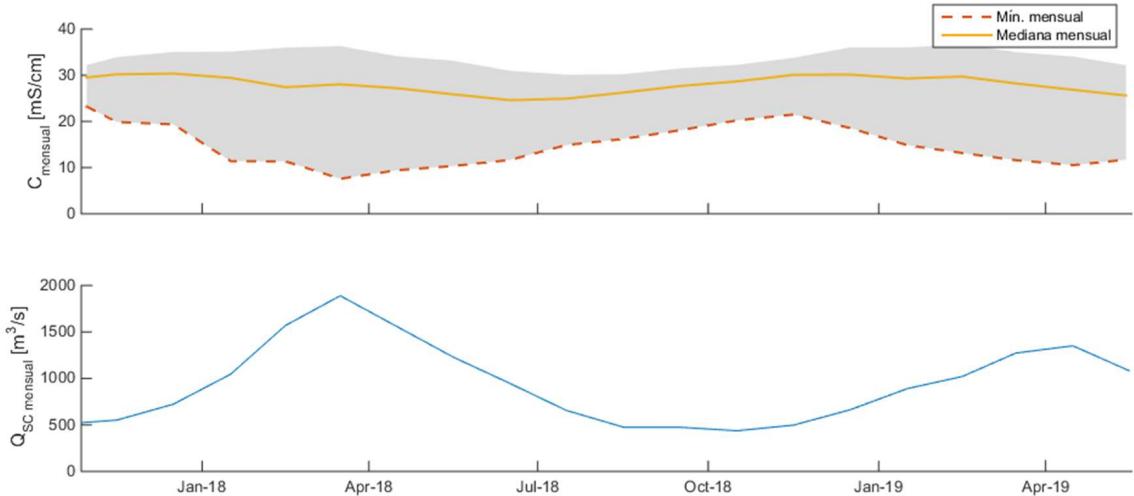


Figura 2.89: Evolución de valores mensuales de conductividad en Punta Quilla: gris indica rango de variación, y se destacan los valores medianos y mínimos mensuales. Abajo, caudal del río Santa Cruz.

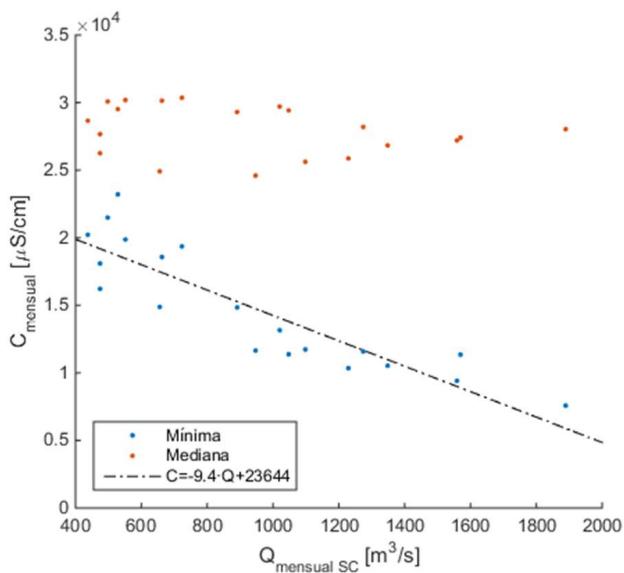


Figura 2.90: Dependencia de valores característicos mensuales de la conductividad en Punta Quilla con el caudal del río Santa Cruz.

A fin de visualizar el efecto de la marea y del caudal del río Santa Cruz conjuntamente, la Figura 2.91 izquierda presenta pares de valores de nivel y conductividad del OBS de Punta Quilla, distinguiendo con mapa de colores el aporte de caudal del río Santa Cruz. Se confirman las observaciones hechas previamente. Los más elevados mínimos y máximos de salinidad ocurren cuando la amplitud de marea es mayor. Los menores valores de conductividad de todo el gráfico ocurren en condición de bajamar y con el río Santa Cruz en estiaje, y bajo condición de máximo caudal también ocurre la variación semidiurna de mayor amplitud. Adicionalmente, en el gráfico se presenta superpuesta una línea negra que conecta los valores de salinidad ocurridos durante un ciclo de marea de sicigia, a fin de dar al lector una noción de la evolución que experimenta. El ciclo inicia en el asterisco inferior, correspondiente a una bajamar y continúa por la rama ascendente de la derecha; finalmente vuelve a un valor similar al inicial.

Por otra parte, la Figura 2.91 derecha presenta la información del OBS en forma de histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad. Se evidencia que la moda de la salinidad en Punta Quilla es de alrededor de 25 UPS, siendo el valor típico del mar allí de unas 32 UPS³³.

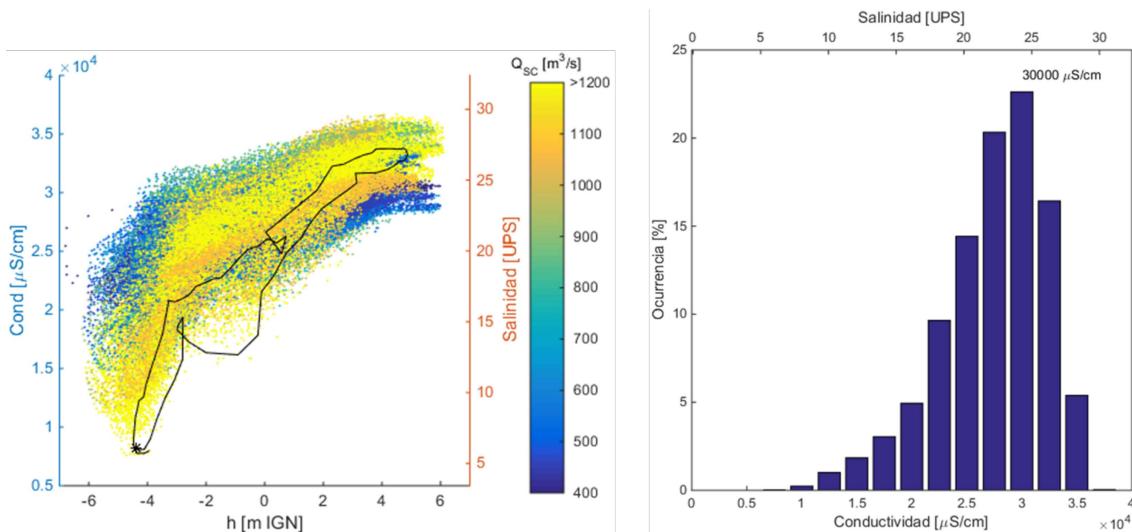


Figura 2.91: Conductividad en Punta Quilla en función de la marea. Izq.: Conductividad frente a niveles de la marea, distinguiendo caudal del río Santa Cruz en el mapa de colores; la línea negra ejemplifica un ciclo de marea de gran amplitud. Der.: Histograma de tiempo de permanencia de cada valor de conductividad.

Variabilidad espacial de la salinidad. Para finalizar la caracterización de la salinidad, la Tabla 2.12 resume los valores observados con OBS en los tres sitios, caracterizados a través de su media μ y desvío estándar σ .

³³Valor estimado a partir de datos de salinidad de la base de datos World Ocean Database 2013 (WOD13) [3].

Tabla 2.12: Caracterización de conductividad y salinidad en los sitios monitoreados con OBS, indicando media μ y desviación σ .

	Conductividad [mS/cm]		Salinidad [UPS]	
	μ_C	σ_C	μ_{sal}	σ_{sal}
I. Pavón	0.00	0.00	0	0
Punta Quilla	27.36	4.82	21.37	3.29
Río Chico	0.01	0.12	0	0

En Isla Pavón los efectos de la marea pueden ocasionar variaciones de niveles, pero nunca conllevan el ingreso de agua salada. En puente RN3 sobre río Chico en general no se detecta salinidad, excepto para unas pocas pleamaras si el caudal no supera 16 m³/s. En Punta Quilla el valor más habitual de la salinidad es de 25 UPS. Allí, el ingreso y egreso de agua salobre al estuario ocurre en forma semidiurna por acción de las mareas, y existe dependencia de valores mínimos mensuales de la conductividad con el caudal del río Santa Cruz.

2.3.5. Temperatura del agua

La caracterización de la temperatura del agua se aborda en base las mediciones continuas de los equipos OBS instalados en Isla Pavón, río Chico y Punta Quilla. Ésta se completa con mediciones puntuales tomadas durante los muestreos mensuales, y se contrasta con variables hidrológicas y meteorológicas para explicar las causas de su variabilidad temporal.

Evolución temporal de la temperatura en río Santa Cruz. Existen mediciones de temperatura del agua en el tramo inicial y final del río Santa Cruz a lo largo del ciclo hidrológico completo, cuya información proviene de campañas mensuales en Charles Fuhr, Puente Viejo e Isla Pavón. Además, en Isla Pavón se dispone de la medición continua del OBS a lo largo de 20 meses.

En la Figura 2.93 se observa que la temperatura evoluciona lentamente a lo largo del año situándose entre los 3°C y los 13°C, con mínimos en julio y máximos hacia enero. Esto ocurre en toda la longitud del río, sin que se advierta una tendencia clara de que en algún sitio la temperatura sea mayor que en los restantes. Los muestreos mensuales, conjuntamente con la mediana de los registros continuos de cada mes, se utilizaron para obtener las temperaturas medias mensuales graficadas en la misma Figura 2.93 (línea continua morada), y consignadas en la Tabla 2.13.

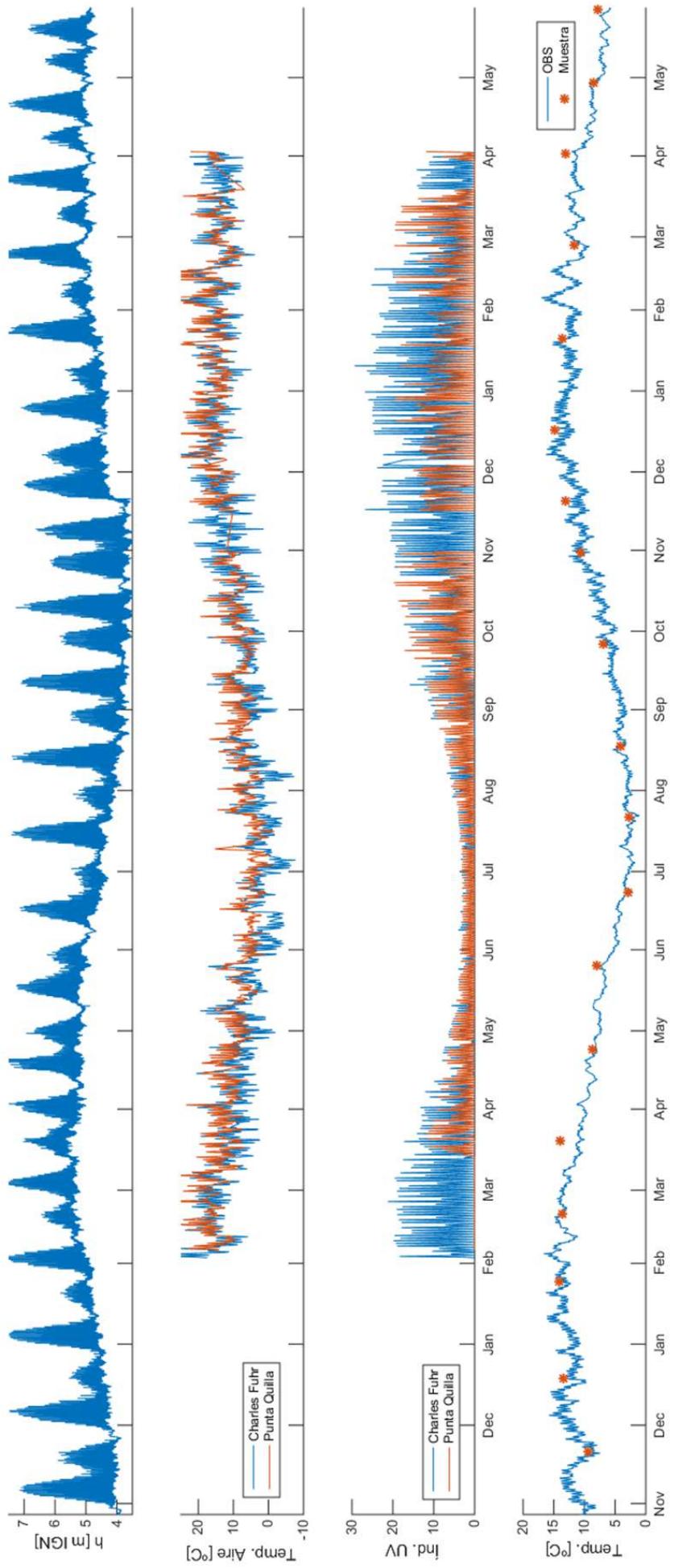


Figura 2.92: Evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón. Abajo, registro del OBS (línea continua) y muestreo mensual (asteriscos naranjas). Arriba, variación de niveles h en el sitio, registro de temperatura del aire en Charles Fuhr y Punta Quilla, y registros del índice UV en Charles Fuhr y Punta Quilla.

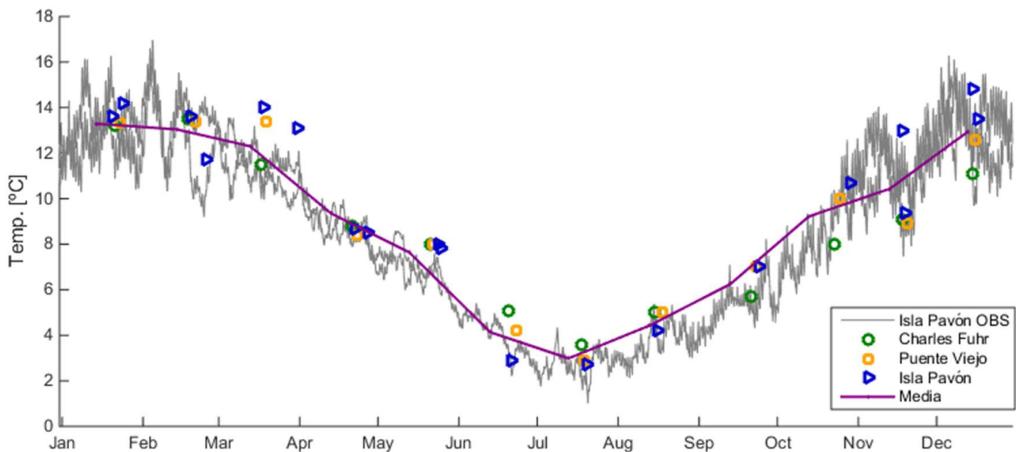


Figura 2.93: Evolución anual de la temperatura del agua del río Santa Cruz: registros del OBS de Isla Pavón, mediciones durante muestreos puntuales en Charles Fuhr, Puente Viejo e Isla Pavón, y propuesta de valores medios mensuales.

Respecto a la variación registrada por el OBS, que provee mayor resolución temporal, se estudia en la Figura 2.92. La serie continua de temperatura del agua presenta buena consistencia con los valores medidos puntualmente. En la figura se incluyen la evolución de niveles en el sitio y de temperatura de aire y radiación solar medidos en estaciones hidrometeorológicas. A escala estacional, se observa una tendencia similar en valores medios de temperatura del aire y del agua.

A su vez, el registro de temperatura de agua exhibe una variación a corto plazo, que se examina en detalle en la Figura 2.94: superpuesta a la variación lenta se aprecia la ocurrencia de máximos locales una vez al día. En dicha figura se incluyen también los registros de niveles del OBS, así como información meteorológica de EHMA Charles Fuhr y EHMA Punta Quilla consistente en temperatura del aire y radiación solar. Se observa que los máximos locales no se vinculan con el ciclo mareal, sino que ocurren en coincidencia con los picos diarios de índice UV y de temperatura del aire. Esto sugiere un calentamiento del agua fluvial inducido por la radiación solar.

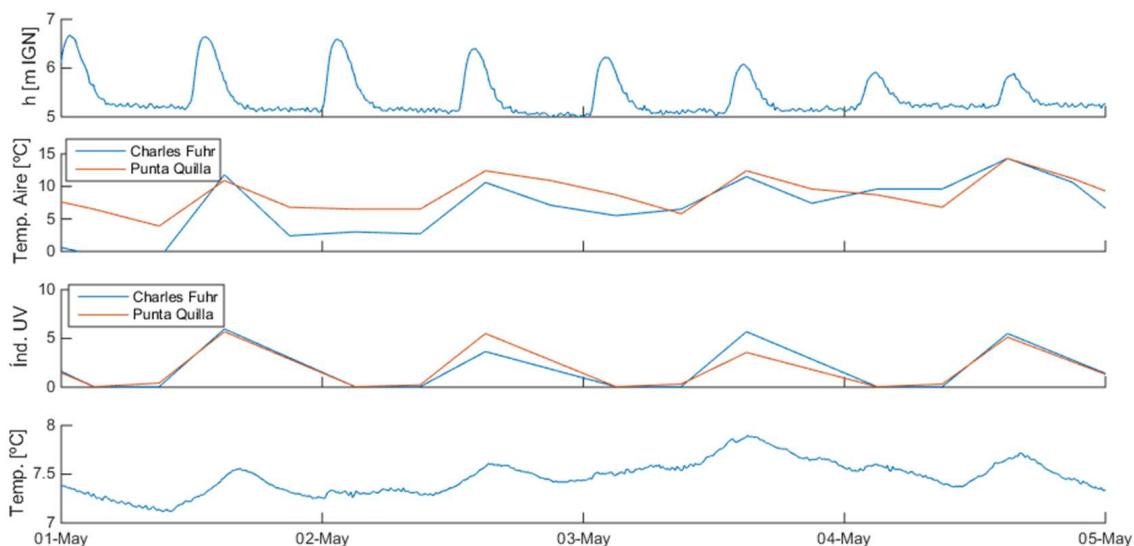


Figura 2.94: Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel h en el sitio, y temperatura del aire y radiación UV medidos en la EHMA Charles Fuhr y EHMA Punta Quilla.

Para confirmar la periodicidad con que ocurren los máximos a corto plazo se efectúa un análisis espectral. La parte superior de la Figura 2.95 muestra el registro completo del OBS (en horas), sobre el cual se aplicaron filtros en tramos de algo más de 4 meses para su análisis espectral. En la parte inferior de la figura, se presenta el espectro de energía resultante, en el cual el eje horizontal representa la frecuencia f y el eje vertical la densidad espectral de energía p_{xx} , que indica cuánta energía contiene la señal en cada componente de frecuencia. Más allá de energía asociada bajas frecuencias que provienen de la lenta variación estacional, se distingue claramente un pico de energía en una frecuencia de 0.042 h^{-1} , que corresponde a un intervalo de tiempo de alrededor de 24 hs, en concordancia con la afirmación de que existe una fluctuación diaria y no semidiurna.

Se concluye que las variaciones a corto plazo de la temperatura del agua en Isla Pavón no responden a la influencia de la marea. En cambio, estas fluctuaciones responden al aporte de calor durante las horas diurnas.

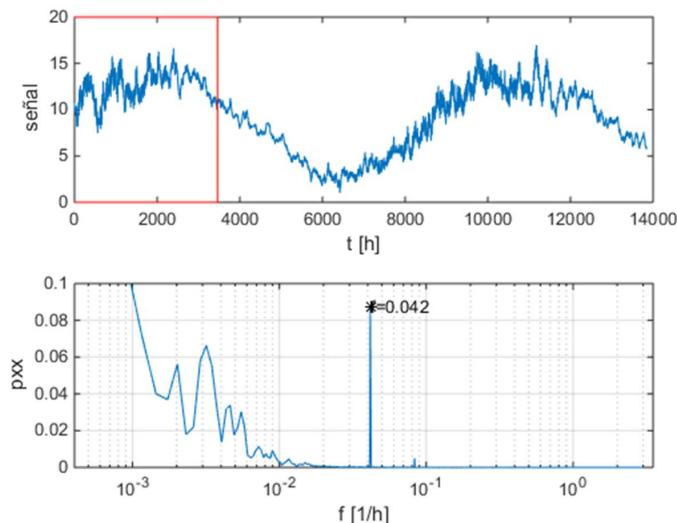


Figura 2.95: Análisis de señales de los registros del OBS de temperatura del agua en Isla Pavón. Arriba, señal y tamaño de ventana; abajo, espectro de energía destacando el pico en frecuencia 0.042 h^{-1} .

En función de lo expuesto, se ensayó la posibilidad de predecir temperatura del agua en río Santa Cruz en función de temperatura del aire en Punta Quilla con una ley de ajuste. Si bien se encontró una tendencia lineal de proporcionalidad entre ambas, la nube de puntos presenta gran dispersión, y además los mínimos y máximos diarios no pueden predecirse con la temperatura ambiente.

Por esta razón se recurre a una abordaje empírico para describir la evolución de la temperatura del agua: usar los registros del OBS para calcular la amplitud térmica de cada día, y a continuación promediar la semiamplitud de temperatura mediana mensual. Estos valores se consignan, junto con el valor medio, en la Tabla 2.13. En ella queda representada la evolución de la temperatura del río a lo largo del año.

Estos valores resultan de interés no sólo para disponer de guarismos que caractericen el sistema físico, sino también para imponer condiciones de contorno en caso de modelar numéricamente la distribución de temperatura del agua en condiciones de año medio, como se verá en la sección 4.4 *Temperatura del agua*.

Tabla 2.13: Temperatura media mensual del río Santa Cruz y variación diaria.

Mes	Temp. Med. [°C]	Var. diaria [°C]
Enero	13.3	± 0.8
Febrero	13.0	± 0.5
Marzo	12.3	± 0.4
Abril	9.4	± 0.3
Mayo	7.6	± 0.2
Junio	4.1	± 0.2
Julio	3.0	± 0.3
Agosto	4.4	± 0.4
Septiembre	6.3	± 0.5
Octubre	9.2	± 0.9
Noviembre	10.4	± 0.9
Diciembre	12.9	± 1.0

Considerando que la temperatura es una condición de borde a entregar al modelo numérico, se evalúa la bondad de ambas propuestas para generar series de temperatura del río Santa Cruz. En Figura 2.96 se superponen los registros del OBS (serie naranja) a las predicciones de ambas metodologías: según una regresión lineal aplicada a valores medios diarios de temperatura en la EHMA Punta Quilla, y los valores medios mensuales de Tabla 2.13. La predicción con un ajuste (serie negra) capta la tendencia anual pero se aparta del registro, y genera fluctuaciones mayores a las observadas a corto plazo. Se demuestra que resulta superador adoptar los valores de Tabla 2.13, con la ventaja adicional de no requerir datos meteorológicos para plantear escenarios futuros.



Figura 2.96: Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en Isla Pavón: según valores medios mensuales de Tabla 2.13, predicción en base a valores medios de temperatura en la EHMA Punta Quilla, y contraste con mediciones del OBS.

La temperatura del agua en Isla Pavón varía de forma gradual a lo largo del año, con valores que oscilan entre los 3°C y los 13°C. A escala estacional, sigue un patrón similar al de la temperatura del aire. Las variaciones de corto plazo no están asociadas a la influencia de la marea, sino que responden al aporte de calor durante las horas diurnas.

Evolución temporal de la temperatura en río Chico. El monitoreo de temperaturas en río Chico se ha efectuado sobre el puente de RN3, mediante la toma mensual de 20 muestras de agua y con implantación del OBS durante 7 meses, de manera que puede reconstruirse la evolución anual y a corto plazo. En la Figura 2.97 se presenta dicha información distribuida a lo largo de un año, utilizándola para obtener valores medios mensuales. Para ello, del registro del OBS se obtiene una mediana para cada mes que se pondera con las muestras, y se ha omitido el valor de dos muestras que se alejaban del resto, destacadas en gris en la figura. Los valores medios así obtenidos se presentan en la Tabla 2.14. Los valores medios mínimos rondan los 0°C (de hecho, en algunas campañas se reportó hielo en el río dificultando las mediciones), y los máximos superan los 14°C.

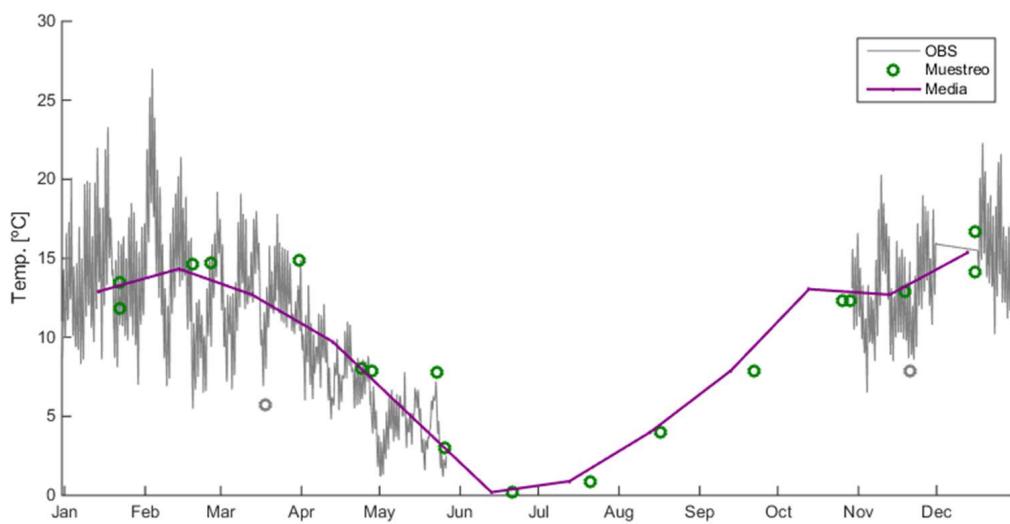


Figura 2.97: Evolución anual de la temperatura del agua del río Chico: registros del OBS, mediciones durante muestreos puntuales (en gris, los dos excluidos del cálculo), y propuesta de valores medios mensuales.

Respecto a las causas de esta variabilidad, en la Figura 2.98 se presenta en detalle el registro del OBS y muestreo dentro del mismo intervalo temporal, y se lo contrasta con otras variables, a fin de comprender qué forzantes intervienen en la evolución de la temperatura. Ni la evolución fluvial de niveles ni el ingreso de la onda de marea parecen influir en la temperatura. Tampoco es fácil advertir la relación con el índice UV, que presenta un registro un tanto discontinuo. Sí comparte con la temperatura del aire la misma frecuencia de variación rápida y la modulación de valores a plazo algo más largo (notar por ejemplo los mayores valores hacia la primera y segunda semana de febrero).

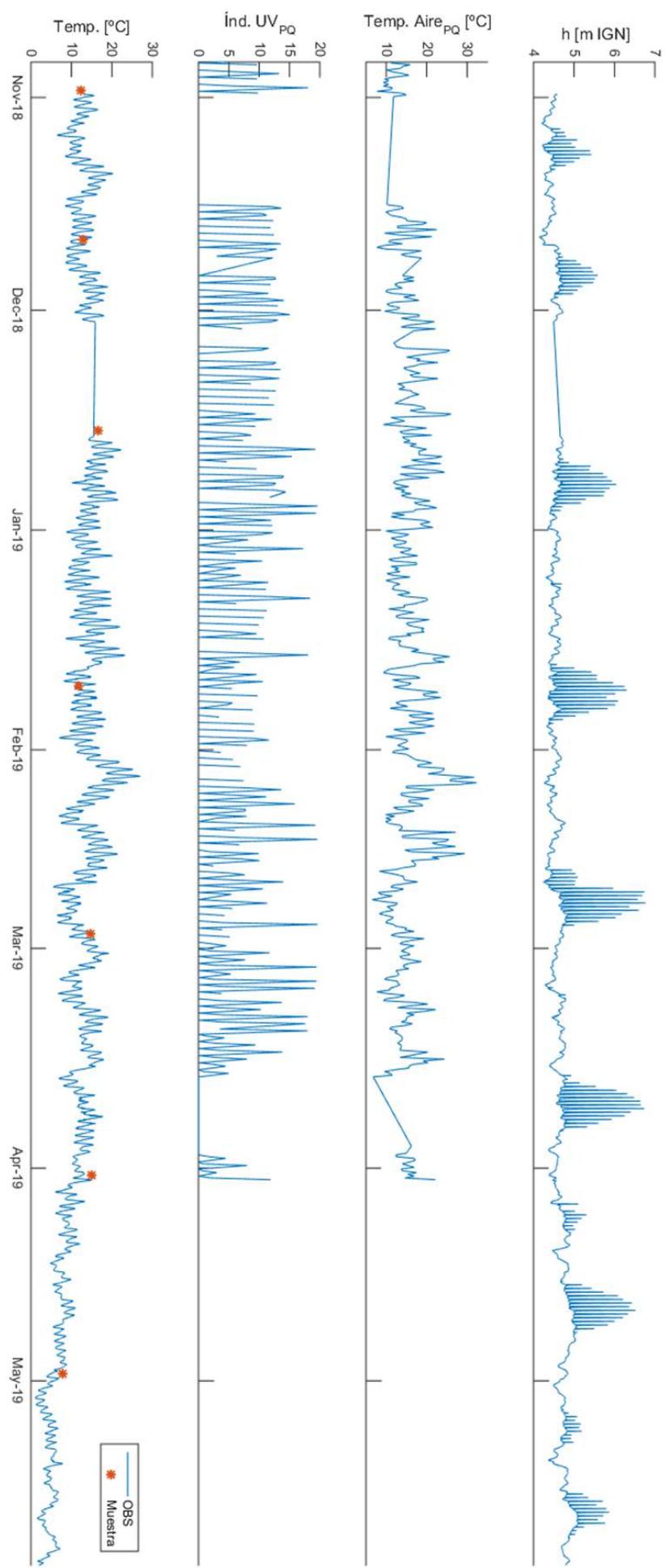


Figura 2.98: Evolución de la temperatura del agua en río Chico, según registro del OBS y muestreo mensual (abajo). Arriba, variación de niveles en el sitio, registro de temperatura del aire en Punta Quilla, y registros del índice UV en Punta Quilla.

Se estudia en detalle la misma información en la Figura 2.99, correspondiente a días en que la amplitud de la marea no habría alcanzado al sitio de medición. Al igual que en Isla Pavón, aquí al contrastar temperatura del aire en Punta Quilla y temperatura del agua del río Chico, se aprecia que la ocurrencia de máximos y mínimos diarios es coincidente, a la par que la temperatura del aire modula la del agua (nótese la existencia de una media diaria máxima hacia el 5 de febrero).

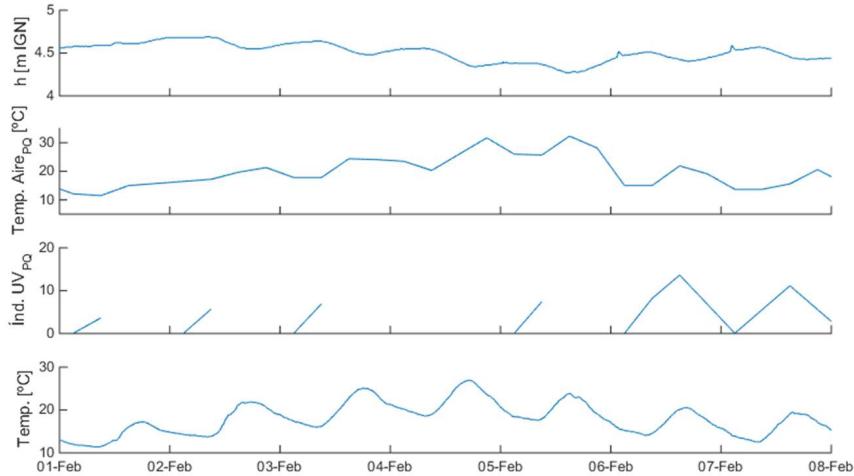


Figura 2.99: Detalle de la evolución de la temperatura del agua en río Chico. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel, temperatura del aire y radiación.

Atendiendo a esta dependencia, se evaluó la posibilidad de relacionar pares de valores temperatura del aire y del agua, en base a registros interpolados de la EHMA y continuos del OBS. Es posible proponer un ajuste, pero los valores presentan una dispersión significativa. Se juzgó superador describir la evolución de la temperatura en forma empírica. En función de los registros del OBS, se calculan para cada mes las medianas de la diferencia diaria entre mínimo y máximo de temperatura del agua medidas, y se consignan en la Tabla 2.14, junto con las medias mensuales.

Tabla 2.14: Temperatura media mensual del río Chico y variación diaria.

Mes	Temp. Med. [°C]	Var. diaria [°C]
Enero	12.9	± 3.4
Febrero	14.3	± 3.0
Marzo	12.7	± 2.3
Abril	9.7	± 1.4
Mayo	5.0	± 1.0
Junio	0.2	-
Julio	0.9	-
Agosto	4.0	-
Septiembre	7.9	-
Octubre	13.1	± 1.4
Noviembre	12.7	± 2.3
Diciembre	15.4	± 2.9

La bondad de ambas predicciones para generar condiciones de contorno se presenta en la Figura 2.100, contrastándolas con el registro del OBS. La serie generada en base a temperaturas en Punta Quilla capta adecuadamente la tendencia media de la temperatura del agua, y la predicción con la Tabla 2.14 también arroja buenos resultados. Por simplicidad, se adopta esta última

descripción para caracterizar la evolución anual.

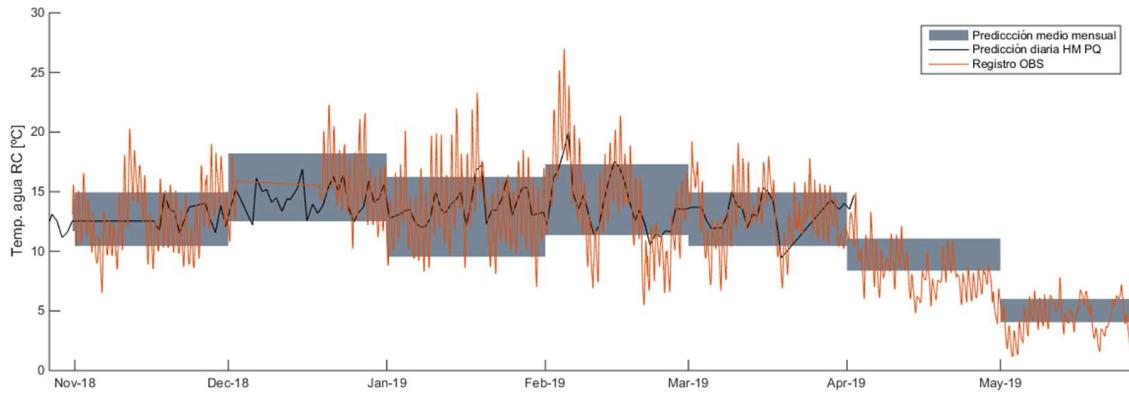


Figura 2.100: Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en río Chico: predicción en base a valores medios mensuales de Tabla 2.14, predicción en base a valores medios de temperatura en la EHMA Punta Quilla, y contraste con mediciones del OBS.

En el río Chico, a lo largo del año la temperatura del agua presenta valores entre 0°C (se ha observado formación de hielo) y 14°C. A corto plazo, los picos diarios de temperatura coinciden con los momentos de mayor radiación solar, y la temperatura del aire actúa como modulador de la del agua.

Evolución temporal de la temperatura en Punta Quilla. En Punta Quilla el monitoreo de temperaturas abarca 20 meses, incluyendo instalación de un equipo OBS y la medición mensual puntual sobre muestras de agua. Dicha información se presenta en la Figura 2.101, donde se aprecia una variación anual de temperaturas de entre 4 y 12 °C, sobre la que se superpone una fluctuación de mayor frecuencia. Estos valores se consideraron para obtener valores medios mensuales presentados en la misma Figura 2.101 (serie morada), que también se plasman en Tabla 2.15.

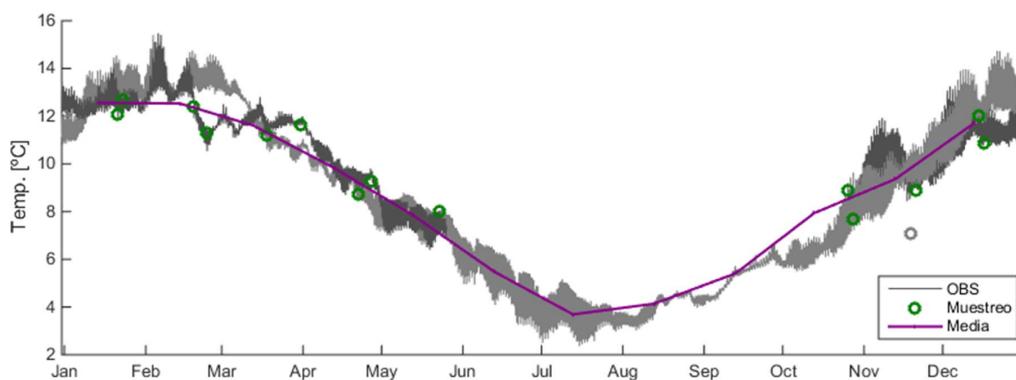


Figura 2.101: Evolución anual de la temperatura del agua en Punta Quilla: registros del OBS, mediciones durante muestreos puntuales (en gris, valor omitido), y propuesta de valores medios mensuales.

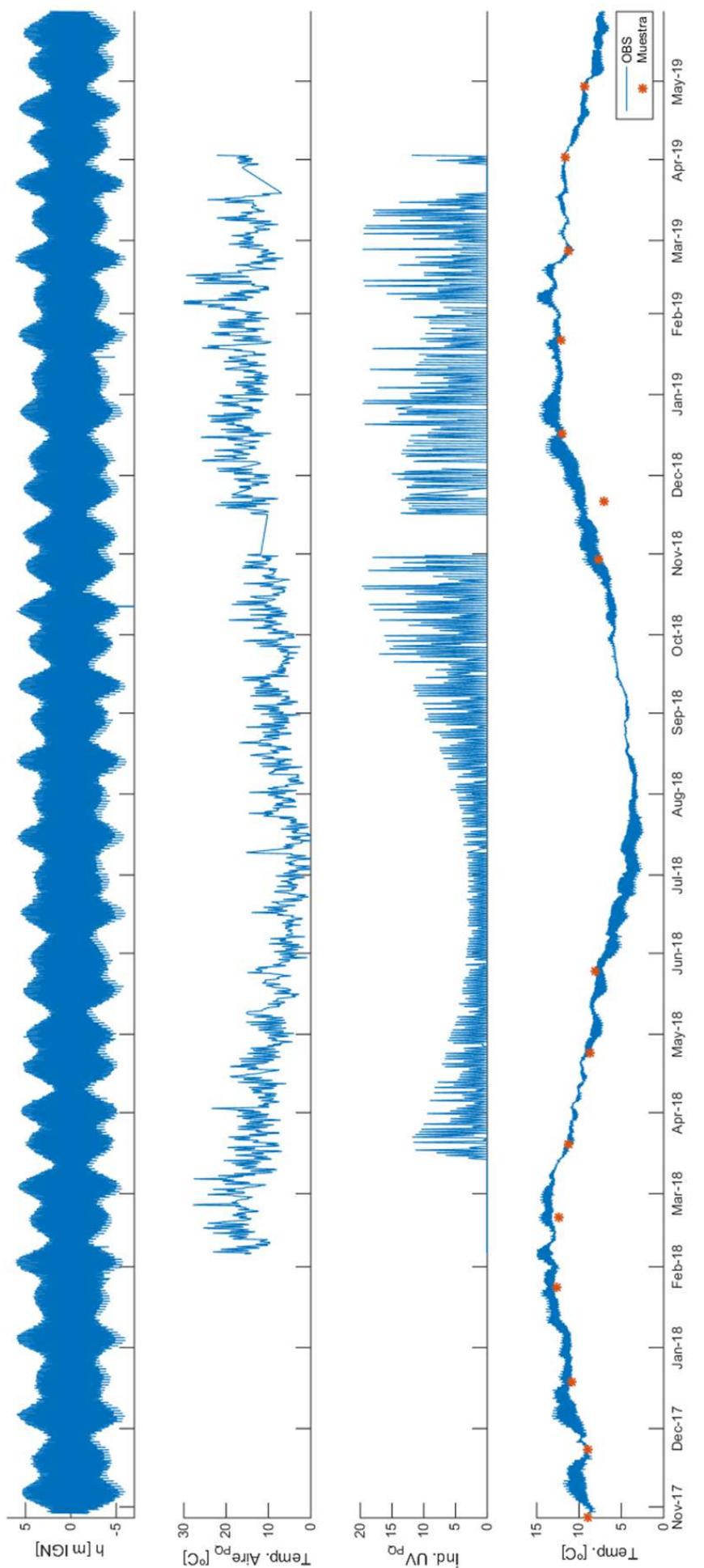


Figura 2.102: Evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla, según registro del OBS y muestreo mensual (abajo). Arriba, variación de niveles, registro de temperatura del aire y del índice UV.

La evolución continua registrada por el OBS se presenta en Figura 2.102, acompañada de los registros de nivel de agua, temperatura del aire y radiación solar. Además de la fluctuación a largo plazo, se superponen variaciones semidiurnas de menor magnitud, con diferente modulación. En contraste con lo que ocurría en los ríos, a largo plazo la temperatura del agua evoluciona con un cierto retraso respecto de la del aire, siendo el desfasaje mayor aún con la radiación. No se advierte que exista dependencia de modulación a mediano plazo con las mareas.

El detalle de Figura 2.103 permite examinar la dependencia a corto plazo de la temperatura con mareas, temperatura del aire y radiación. A diferencia de los ríos, aquí se observa que los máximos y mínimos de temperatura del agua no coinciden con la variación diaria de temperatura y radiación, sino que presentan un ciclo semidiurno, en fase con las mareas. En este período invernal, se observa que en pleamar ha ingresado agua del mar y genera el máximo de temperatura, mientras que el mínimo es tras el egreso de agua del estuario.

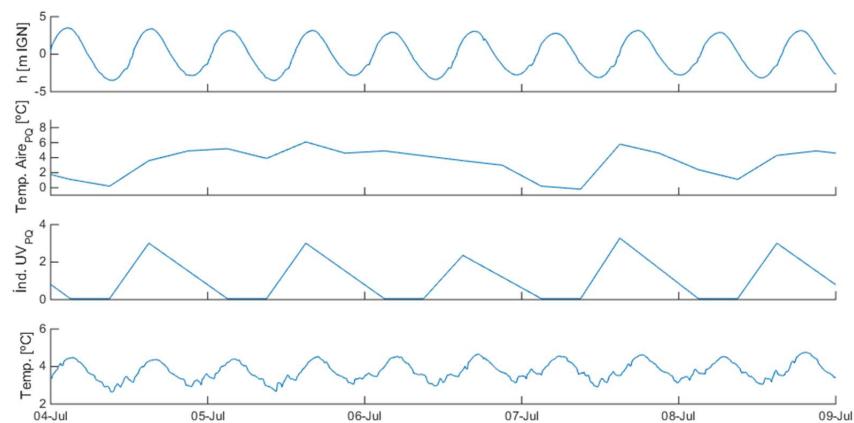


Figura 2.103: Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla. El registro del OBS (abajo) se contrasta con nivel h , temperatura del aire y radiación.

No obstante, al comparar con lo que ocurre en verano en Figura 2.104, se observa que en esos meses el comportamiento se invierte: temperatura máxima en bajamar, y mínima en pleamar. Es decir, que en invierno el mar está más caliente que los ríos, y en verano lo opuesto. Las mareas, al regular el ingreso y egreso de agua de mar, gobiernan la variación semidiurna de temperatura. La menor amplitud semidiurna de la variación observada en Figura 2.102 hacia marzo y septiembre quedaría explicada por existir una menor diferencia de temperatura entre río y mar.

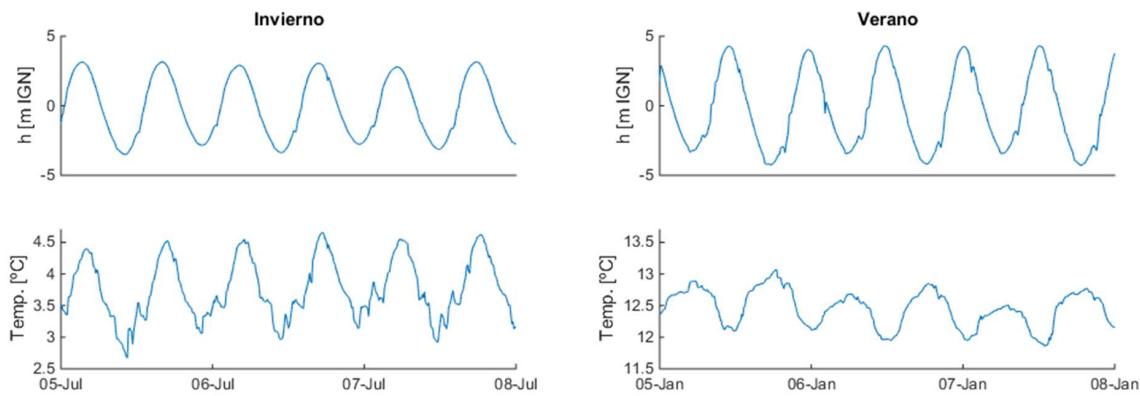


Figura 2.104: Detalle de la evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla con las mareas en invierno y verano.

A partir de las observaciones del OBS, se han calculado los valores medios mensuales de la semiamplitud de variación de temperatura observada a diario. Ellos se presentan en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Temperatura media mensual de Punta Quilla y variación diaria

Mes	Temp. Med. [°C]	Var. diaria [°C]
Enero	12.6	±0.6
Febrero	12.5	±0.6
Marzo	11.6	±0.3
Abril	9.8	±0.3
Mayo	7.9	±0.6
Junio	5.5	±0.9
Julio	3.7	±0.9
Agosto	4.1	±0.2
Septiembre	5.4	±0.2
Octubre	7.9	±0.5
Noviembre	9.4	±0.9
Diciembre	11.7	±0.9

Al generar un modelo del estuario la condición de borde se encontrará en mar abierto (donde la temperatura del mar podrá proponerse a partir de observaciones de la NOAA [3]), con lo cual no es necesario imponer una serie temporal de temperaturas en Punta Quilla, sino sólo verificarla. No obstante, es interesante evaluar la bondad de utilizar los datos de la Tabla 2.15 para describir la variación de temperatura del agua en Punta Quilla. Esto se presenta en la Figura 2.105.

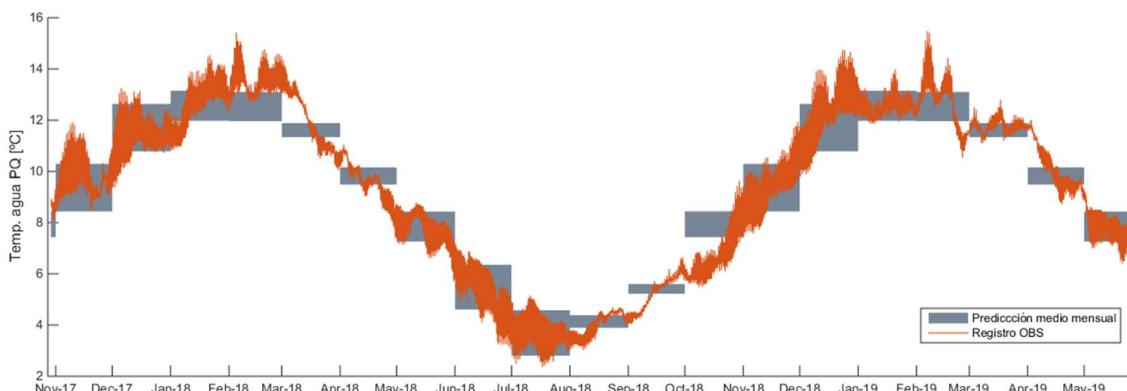


Figura 2.105: Calidad de predicción de series de evolución de la temperatura del agua en Punta Quilla: predicción en base a valores medios mensuales de Tabla 2.15 y contraste con mediciones del OBS.

En Punta Quilla, la temperatura del agua varía entre 4°C y 12°C a lo largo del año. La variación diaria responde a un ciclo semidiurno en fase con las mareas, que refleja el ingreso y egreso de agua de mar: en invierno, el mar está más cálido que los ríos, y en verano, más frío. La amplitud semidiurna reducida en meses como marzo y septiembre se explica porque la diferencia de temperatura entre ambas masas de agua es menor.

Variabilidad espacial de la temperatura. Habiendo analizado por separado el comportamiento de la temperatura del agua en Isla Pavón, río Chico y Punta Quilla, se propone comparar las tres estaciones.

En la Figura 2.106 se ha empleado un diagrama de cajas para representar mes a mes la evolución de la temperatura en cada uno de los tres sitios. En cada caso, la marca central es la mediana, los bordes del cuadro son los percentiles 25 y 75, los bigotes se extienden hasta los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos. En coincidencia con lo analizado en los apartados anteriores, se observa que el estuario presenta menor temperatura que los ríos en verano, y que esto se invierte en invierno. Por otra parte, también destaca la gran variabilidad relativa que exhibe río Chico, tanto anualmente como en cada mes. Esto se explica por su menor caudal y profundidad, que favorece el intercambio de calor con la atmósfera.

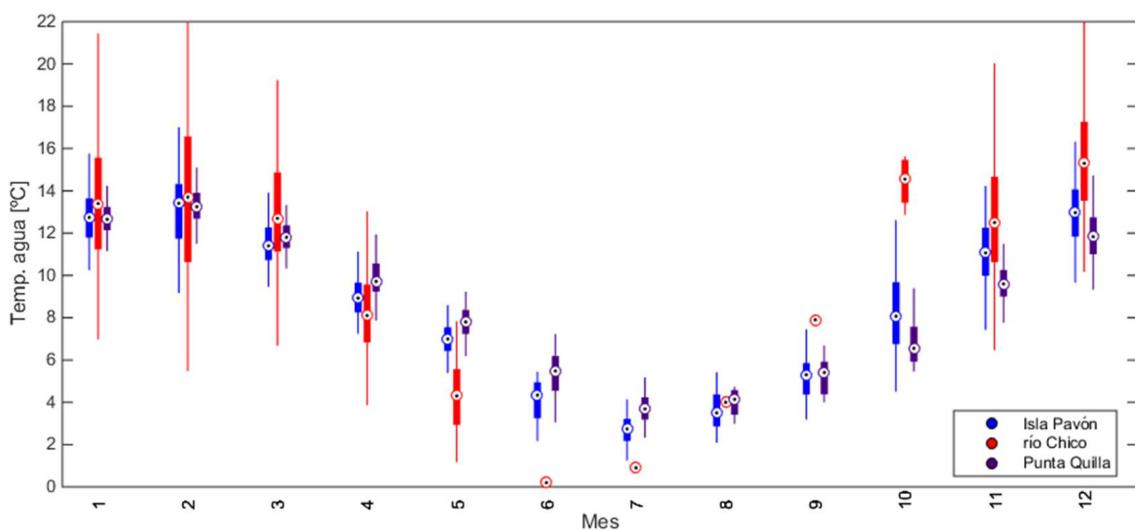


Figura 2.106: Gráfico de cajas con temperatura del agua y dispersión mes a mes en los tres sitios monitoreados con OBS.

Por otra parte, al contemplar valores medios semanales en los tres sitios y compararlos con la temperatura de la estación hidrometeorológica Punta Quilla, se obtiene la Figura 2.107. Se aprecia a largo plazo el retraso que experimenta la temperatura del agua en el puerto respecto del ciclo de temperatura del aire y de los ríos. Éste es del orden de unos 15 días, justamente el tiempo de residencia del agua en el estuario. También se evidencia una vez más la sensibilidad

del río Chico a cambios en la temperatura ambiente.

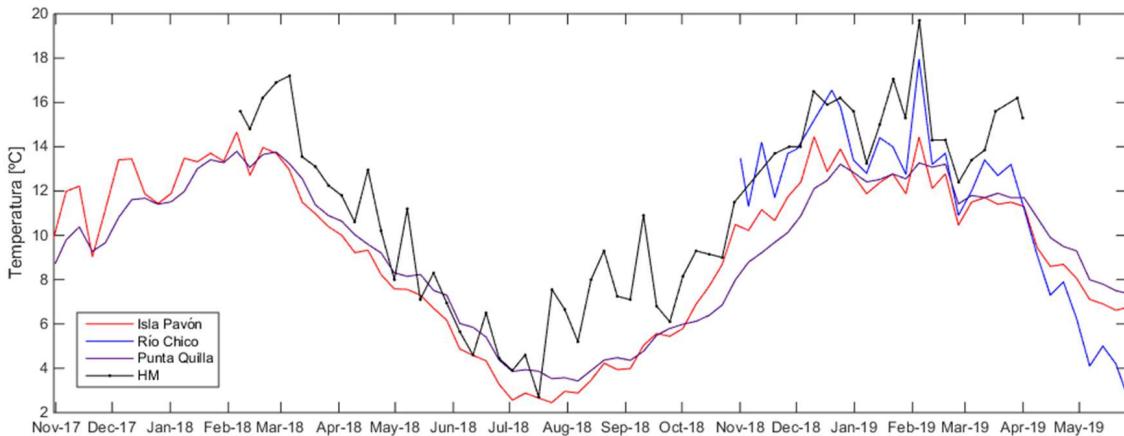


Figura 2.107: Temperaturas medias semanales del agua en los tres sitios de monitoreo con OBS, y temperatura media semanal del aire en Punta Quilla.

2.4. Conclusiones

El monitoreo de los ríos Santa Cruz, Chico y su estuario ha comprendido mediciones continuas y mensuales a lo largo de hasta 20 meses, en hasta cinco sitios: Charles Fuhr, Puente Viejo, Isla Pavón, río Chico y Punta Quilla. Las campañas aportaron mediciones continuas de niveles, temperatura, conductividad y turbidez, y puntuales de nutrientes y sólidos suspendidos. Se han analizado dichos datos, para profundizar el conocimiento sobre el funcionamiento del estuario y establecer leyes que vinculen a las variables físicas entre sí.

Como parte de la descripción hidrodinámica, se detallaron secciones características con sus velocidades en base a datos de aforos. Se examinó el pasaje de la onda de marea por Isla Pavón y río Chico, y se propusieron leyes altura-caudal en condiciones de régimen puramente fluvial. También se incorporó una breve reseña de la evolución temporal de caudales de ambos ríos.

El transporte de sedimentos se abordó a partir de los sólidos suspendidos totales presentes en muestras de agua y registros continuos de turbidez. Lamentablemente, la información disponible para el río Santa Cruz no ha permitido vincular ambas variables ni comprender las causantes de variaciones de turbidez.

Con respecto a los nutrientes, los muestreos puntuales dan una noción de los valores típicos de fósforo, nitrógeno y ortofosfatos en cada sitio, identificando los que limitarían el crecimiento de fitoplancton. La dispersión de datos no ha permitido establecer una caracterización más profunda.

Se analizó la variación de la salinidad a partir de registros de conductividad. La posición del frente salino no llega a Isla Pavón, y para que ingrese ocasionalmente a río Chico es preciso que la amplitud de la pleamar sea significativa y que el caudal del río sea bajo. En Punta Quilla, además de responder a las mareas, se ha constatado que los mínimos de salinidad responden al caudal del río Santa Cruz.

En cuanto a la temperatura del agua de los ríos, se la ha relacionado con mediciones de la estación hidrometeorológica de Punta Quilla, y se han identificado fluctuaciones ocasionadas por el aporte de calor durante el día. En el estuario se ha notado que durante el invierno el ingreso de agua de mar aumenta la temperatura, ocurriendo lo opuesto en verano. Se han confeccionado tablas indicando para cada sitio el valor medio mensual de temperatura del agua y la amplitud de su variación diaria.

Considerando que uno de los principales objetivos del monitoreo es disponer de información para generar y calibrar un modelo numérico del estuario, en la Tabla 2.16 se repasa lo discutido a lo largo del capítulo y se resumen los valores y leyes que resultarán útiles para tener una noción de los órdenes de magnitud esperables.

Se hace hincapié en las limitaciones que presentan las aproximaciones propuestas, que son más bien expeditivas. Lo ideal será extender el monitoreo en campo para profundizar en este conocimiento.

Los relevamientos en campo han permitido comprender y caracterizar el funcionamiento hidrodinámico y los mecanismos de transporte del estuario. Se logró conceptualizar las relaciones entre variables, un paso clave para la formulación de un modelo del sistema. Además, se cuenta con parámetros cuantificados en el espacio y en el tiempo, fundamentales para la calibración y validación del modelo.

Tabla 2.16: Resumen de la interpretación de datos, por sitio.

Río Santa Cruz	Río Chico	Punta Quilla
Hidrología e hidrodinámica		
Isla Pavón <ul style="list-style-type: none"> Los niveles responden al caudal del río y a mareas Sin afectación de mareas, la ley H-Q es (2.2) $Q_{IP} = 17,5 (h_{IGN} - 0,751)^{2,9}$ La cota de pelo de agua para caudal módulo es 4.3 m IGN Si la pleamar presenta $h_{PQ} > 2,5$ m IGN, pasa una onda con aproximadamente 1 h de retraso. Puede alcanzar una CPA máxima de 8 m en pleamar de sicilia; en tal caso el tirante pasa de 7 m a 11 m 	<ul style="list-style-type: none"> Los niveles responden al caudal, y fuertemente a las mareas Sin afectación de mareas, la ley H-Q es (2.1) $Q_{RC} = 136 (h_{IGN} - 4,21)^{2,9}$ La CPA para caudal módulo es 4.7 m IGN Si la pleamar es > 4,5 m IGN, la onda de marea llega en 2 h. Puede aumentar el tirante hasta 2 m Caudal medio de 20 m³/s, y valores extremos observados de 67 m³/s y 1 m³/s La profundidad es del orden de 0.5 m y la velocidad unos 0.46 m/s (ver detalle en Tabla 2.7) 	<ul style="list-style-type: none"> Niveles gobernados por mareas astronómicas, con hasta 12 m de variación semidiurna
Puente Viejo <ul style="list-style-type: none"> Régimen puramente fluvial, sin influencia de onda de marea La ley H-Q es (2.3) $Q_{PV} = 12,3 (h_{IGN} - 4,5)^{2,9}$ La cota de pelo de agua para caudal módulo es 8.5 m IGN La pendiente media del último tramo del río es 0.38%. La profundidad media es del orden de 3.8 m y la velocidad de unos 1.4 m/s (ver detalle en Tabla 2.8) 		

Resumen de la interpretación de datos, por sitio (cont.).

Río Santa Cruz	Río Chico	Punta Quilla
Sedimentos		
<ul style="list-style-type: none"> Los sólidos suspendidos tienen una media de unos 13 mg/l (Tabla 2.10). La concentración de finos es relativamente constante, y los gruesos aumentan ligeramente con el caudal. No fue posible proponer un ajuste para relacionar SST y turbidez. La moda de los valores de turbidez está en torno a 15 NTU. Los registros de turbidez del OBS presentan variaciones bruscas y de varios órdenes de magnitud. No se identificaron las causas de este comportamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Los SST presentan una media de 189 mg/l, y una desviación similar (Tabla 2.10). Los SST aumentan con el caudal. La relación entre turbidez y SST es 1:1, (2.5) $SST_{RC}[\text{mg/l}] = \text{Turb}[\text{NTU}]$ <ul style="list-style-type: none"> La moda de la turbidez es 20 NTU. Ocurren aumentos de turbidez por resuspensión de marea; puede llegar hasta 1000 NTU. La moda de la turbidez es 20 NTU. La turbidez experimenta un ciclo semidiurno, ya que la capacidad de transporte responde a las corrientes generadas por la marea. El valor medio y mínimo de turbidez responde a la amplitud de mareas Los mínimos de turbidez ocurren en pleamar, y los máximos durante el nivel medio de bajante. Las causas de los picos máximos no son comprendidas. 	<ul style="list-style-type: none"> Los SST presentan una media de 64 mg/l, y una desviación de la mitad (Tabla 2.10). En este ambiente marino la concentración determinada incluye, además de sedimentos, las sales precipitadas. La relación de SST con turbidez es (2.6) $SST_{PQ}[\text{mg/l}] = 1,5 \cdot \text{Turb}[\text{NTU}] + 30$ <ul style="list-style-type: none"> La turbidez presenta una moda de 20 NTU. La turbidez experimenta un ciclo semidiurno, ya que la capacidad de transporte responde a las corrientes generadas por la marea. El valor medio y mínimo de turbidez responde a la amplitud de mareas Los mínimos de turbidez ocurren en pleamar, y los máximos durante el nivel medio de bajante. Las causas de los picos máximos no son comprendidas.
Nutrientes		
<ul style="list-style-type: none"> Los nutrientes están presentes en forma relativamente constante a lo largo del río: de media, 41 $\mu\text{g/l}$ PO, 76 $\mu\text{g/l}$ P, 1350 $\mu\text{g/l}$ N (Tabla 2.11). La relación de Redfield, P:N, es variable, indicando que cambia el limitante. No se advierte relación de nutrientes con caudal o SST. Los ortofosfatos representan un 30 % a 100 % del fósforo total. 	<ul style="list-style-type: none"> Concentraciones medias de 99 $\mu\text{g/l}$ PO, 410 $\mu\text{g/l}$ Py 7211 $\mu\text{g/l}$ N (ver Tabla 2.11). La relación de Redfield es P:N < 1:16; indica que el limitante es el fósforo. El fósforo aumenta con el caudal, y con los SST se puede establecer la relación (2.9) $P_{RC}[\mu\text{g/l}] = 2 \cdot SST[\text{mg/l}] + 70.$	<ul style="list-style-type: none"> Concentraciones medias de 83 $\mu\text{g/l}$ PO, 222 $\mu\text{g/l}$ Py 2634 $\mu\text{g/l}$ N (ver Tabla 2.11). La relación de Redfield suele ser P:N > 1:16; lo que implica que es limitante el nitrógeno.

Resumen de la interpretación de datos, por sitio (cont.).

Río Santa Cruz	Río Chico	Punta Quilla
Salinidad		
<ul style="list-style-type: none"> Conductividad nula en Isla Pavón 	<ul style="list-style-type: none"> Conductividad nula el 98 % del tiempo en RN3 Ingreso del frente salino sólo en pleamar de gran amplitud y con bajos valores de caudal 	<ul style="list-style-type: none"> Variación semidiurna, con mínimo en bajamar y máximo en pleamar. Amplitud de variación modulada por mareas: a igualdad de caudal del río Santa Cruz, los valores diarios mínimos más bajos se alcanzan en mareas de sicigia. Los mínimos responden al caudal del río Santa Cruz Los valores máximos varían lentamente a lo largo del año. El valor moda es 32 mS/cm, correspondiente a 25 UPS (Tabla 2.12).
	Temperatura	
	<ul style="list-style-type: none"> Constante en la longitud del río. Responde a la temperatura ambiente, a largo plazo y diariamente. Varía entre 3 y 13 °C, con fluctuación diaria de ±0.5 °C. La Tabla 2.13 provee valores mensuales y variación diaria. 	<ul style="list-style-type: none"> Responde a la temperatura ambiente, a largo plazo y diariamente. Varía entre 0 y 14 °C, con fluctuación diaria media de ±2 °C. Es el sitio con mayor variación y sensibilidad a temperatura ambiente La Tabla 2.14 indica valores mensuales característicos. <ul style="list-style-type: none"> Presenta un ciclo semidiurno, en fase con las mareas. A lo largo del año, la media varía entre 4 y 12 °C. Valores medios mensuales pueden consultarse en la Tabla 2.15. En verano, ocurre temperatura máxima en bajamar y mínima en pleamar (porque el río está más caliente que el mar). En invierno, máxima temperatura en pleamar y mínima en bajamar (mar más caliente que el río).

CAPÍTULO 3

Implementación del modelo numérico

Se aborda a continuación el desarrollo, la calibración y la validación de un modelo numérico capaz de representar la dinámica del estuario del río Santa Cruz. El mismo se ha implementado usando el software Delft3D, empleando información de campo relevada específicamente para este fin. Dicho modelo tiene la capacidad de predecir la evolución temporal de niveles, corrientes, velocidades, salinidad y temperatura del agua.

Concretamente, en las próximas secciones se expone la implementación del modelo y su calibración contrastando observaciones de campo con predicciones numéricas correspondientes a un mismo escenario.

3.1. Generalidades de la metodología

Debido a la gran extensión de la zona de trabajo, y la cantidad de variables y escenarios a estudiar, la modelación matemática se presenta como la única herramienta con la capacidad de estudiar el funcionamiento del estuario en tiempos y con costos razonables.

Para este tipo de simulaciones el modelo más indicado es uno que resuelva las ecuaciones de Saint-Venant para un flujo no estacionario de forma quasi-tridimensional. En este caso se utiliza el modelo Delft3D, desarrollado por Delft University of Technology de Holanda. Con el modelo funcionando y calibrado se podrá estudiar el comportamiento hidrodinámico del estuario, así como las características de temperatura y salinidad del agua, para distintos escenarios.

3.1.1. Alcances del modelo

El modelo debe ser capaz de representar el comportamiento hidrodinámico de estuario, específicamente del tramo comprendido entre el Puente Viejo sobre río Santa Cruz, y la boca del estuario. Además de la capacidad de predecir niveles y velocidades, el modelo ha de representar la distribución de las variables transportadas de salinidad (parámetro que se propuso como condicionante del hábitat en este estudio) y temperatura del agua. Se decidió omitir la modelación del transporte de sedimentos en virtud de que la información de campo aún no es suficiente para interpretar el fenómeno: en río Santa Cruz no se ha podido identificar la forzante a la que responde la turbidez, ni ha sido posible correlacionarla con la concentración de sólidos suspendidos.

En virtud de que los perfiles verticales de velocidad, temperatura y salinidad son relativamente uniformes de acuerdo con las observaciones de campo (producto de la significativa mezcla ocasionada por la gran amplitud de marea), se acepta que una cuantificación promediada en la vertical es representativa de la dinámica del sistema. Es decir, se propone una caracterización bidimensional, en que las variables evolucionan espacialmente en el plano horizontal y adoptan un único valor en la vertical.

En cuanto a la extensión del dominio espacial, se recuerda que los contornos abiertos o aguas-agua del modelo numérico deben situarse alejados de la zona bajo estudio a fin de garantizar que las condiciones de contorno no afecten a los resultados. Por ello, la zona modelada se extiende 3 km hacia aguas arriba del puente en el río Santa Cruz, mientras que aguas abajo se modela un sector de mar de unos 80 km de diámetro, tal como se observa en la Figura 3.1. Se especifican caudales ingresantes desde los ríos y niveles en el mar, así como los valores de salinidad y temperatura en los tres contornos abiertos.

Los contornos de tierra son tratados como contornos cerrados, en los cuales la velocidad normal a los mismos se prescribe nula y adoptando en la dirección tangencial una condición de libre deslizamiento (*free-slip*) dada la gran escala de las superficies simuladas.

Respecto al contorno constituido por el lecho, la pérdidas introducidas por el mismo se caracterizan a través del coeficiente de rugosidad de Manning, cuyo valor se calibra haciendo uso de los niveles observados como $n = 0.02$ para el estuario, valor recomendado por el Manual de Usuario [10], y $n = 0.025$ para el río. Cabe mencionar que el modelo permite que se sequen las celdas computacionales en las cuales el tirante se reduce por debajo de un valor que ha sido fijado en 0.1 m.

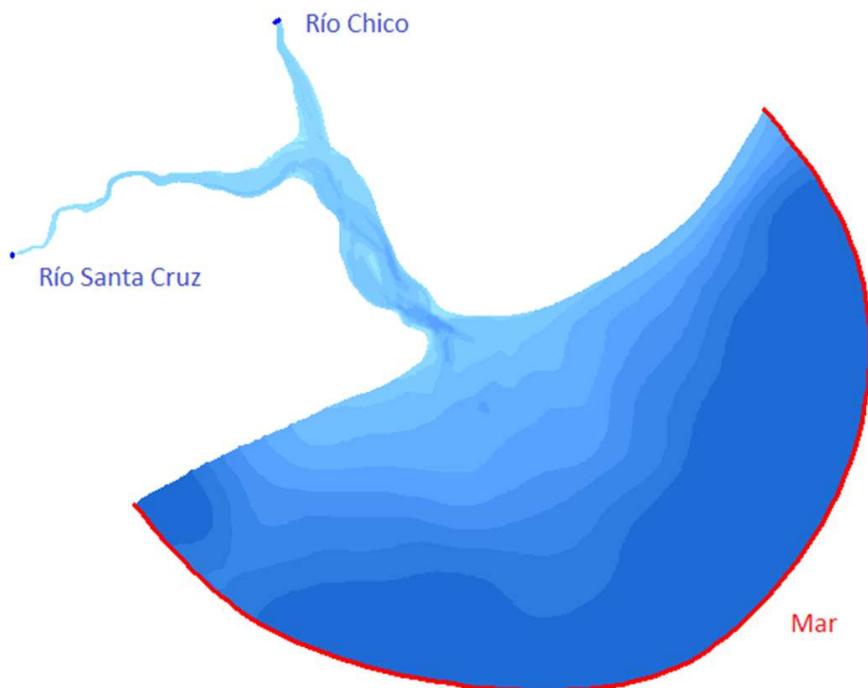


Figura 3.1: Dominio del modelo, donde se han indicado los contornos abiertos del mismo.

3.1.2. Software empleado

El software utilizado es el Delft3D, desarrollado por Delft University of Technology de Holanda. Delft3D está compuesto por una serie de módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, de transporte de sólidos, de calidad de agua y de transporte de sustancias en general, entre otros. Para este estudio se aplicó el módulo D-Flow que permite calcular las variables hidrodinámicas (velocidad, presión, turbulencia), además de calcular el intercambio de temperatura y salinidad. El módulo hidrodinámico está basado en la simplificación de aguas poco profundas para las ecuaciones de Navier-Stokes, y permite incorporar los efectos de mareas, vientos, gradientes de salinidad y temperatura, olas, turbulencia y secado y mojado.

3.1.3. Ecuaciones gobernantes

El módulo hidrodinámico del modelo (Delft3D-Flow) resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible, bajo las hipótesis de aguas poco profundas y Boussinesq. En la ecuación de conservación de cantidad de movimiento las aceleraciones verticales son despreciadas, lo que equivale a considerar una distribución de presiones hidrostáticas. Las velocidades verticales en el modelo 3D son obtenidas a partir de la ecuación de continuidad.

Las ecuaciones gobernantes son resueltas en una malla de diferencias finitas. En la dirección horizontal, Delft3D-Flow utiliza una grilla ortogonal curvilínea, mientras que en la vertical admite dos tipos distintos de discretización: discretización σ (σ -model) y discretización Z (Z-model). La discretización σ mantiene fijo el número de capas, y varía la altura de las mismas en función del tirante, mientras que el sistema Z mantiene fija la altura de las capas, y varía el número de capas activas en función del tirante. En este trabajo se utilizó la discretización σ , dado que permite una representación más precisa del fondo y de las variaciones de la superficie libre. A su vez, este tipo de discretización es más eficiente en dominios con variaciones de profundidad tan grandes.

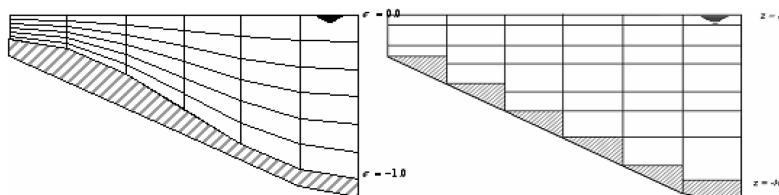


Figura 3.2: Ejemplo de discretización σ (izq.) y Z (der.). Reproducido de [10].

Las ecuaciones de Navier-Stokes están compuestas por las ecuaciones de conservación de masa (continuidad) y conservación de cantidad de movimiento (*momentum*) en tres direcciones. En este caso las direcciones están representadas por las coordenadas ξ y η (dirección horizontal en grilla curvilínea), y σ (dirección vertical).

La ecuación de continuidad en la horizontal surge del promedio en la vertical de la ecuación de

continuidad para en flujo incompresible ($\nabla \cdot \vec{u} = 0$) a lo largo de la profundidad total, teniendo en cuenta las condiciones de borde cinemáticas en el fondo y en la superficie libre. Resulta:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = (d + \zeta) Q \quad (3.1)$$

donde ζ es el nivel de la superficie libre respecto a un plano de referencia, d es la profundidad medida respecto a un plano de referencia, $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ son coeficientes para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares, U y V son componentes de la velocidad promediada en la vertical, y Q son contribuciones por área unitaria.

Las ecuaciones de momento en las direcciones ξ y η son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{u}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + f_u \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3.3)$$

donde ω es la velocidad en la dirección σ , f_v y f_u son coeficientes de Coriolis, ρ_0 es la densidad de referencia del agua, P_ξ y P_η son el gradiente de presión en las direcciones ξ y η , F_ξ y F_η son el flujo de momento turbulento en las direcciones ξ y η , ν_V es la viscosidad turbulenta vertical, y M_ξ y M_η son fuentes o sumideros de momento en las direcciones ξ y η .

En la hipótesis de aguas poco profundas, la ecuación vertical de momento queda reducida a la ecuación de presión hidrostática. Las aceleraciones verticales debidas a diferencias de densidad o a cambios bruscos en la batimetría no son tenidas en cuenta.

Para el transporte de sustancias disueltas, salinidad y/o temperatura, Delft3D-Flow utiliza una ecuación de advección-difusión. A esta se le pueden incorporar términos fuente y sumidero, así como también una ley de decaimiento de primer orden. La ecuación es

$$\begin{aligned} \frac{\partial (d + \zeta) c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\eta\eta}} (d + \zeta) uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}} (d + \zeta) vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial w c}{\partial \sigma} = \\ \frac{d + \zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi} G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_D (d + \zeta) c + S_i, \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde c representa la concentración; D_H , el coeficiente de difusión horizontal; D_V , el coeficiente de difusión vertical; λ_D , el coeficiente de decaimiento; y S_i , el término de fuente o sumidero.

3.1.4. Caracterización del medio físico

La información requerida para preparar y calibrar el modelo comprende batimetría, componentes de mareas, niveles de la superficie libre, caudales de los ríos, velocidades de la corriente, temperatura y salinidad. Dicha información proviene de mediciones de campo presentadas y discutidas en el capítulo anterior. En forma accesoria se han consultado fuentes preexistentes tales como cartas náuticas y modelos globales.

De manera sintética, se expone al lector a modo introductorio la relevancia de contar con dicha información para implementar el modelo y la manera en que se ha suplido:

- La batimetría proporciona el contorno del fondo acuático, dato indispensable para simular el flujo del agua. La presencia de islas y amplias zonas de mojado y secado resultó en la necesidad de una cuidadosa e iterativa definición de la batimetría del modelo. Se consideró a los levantamientos batimétricos como fuentes más actuales y fiables, complementando esta información con datos de cartas náuticas.
- Los caudales líquidos ingresantes al estuario se imponen en los contornos abiertos aguas arriba, es decir río Chico y río Santa Cruz. Los registros de las estaciones hidrométricas son útiles para definir las series temporales; la aplicación de diferentes hidrogramas permite evaluar diversidad de escenarios hidrológicos.
- La marea astronómica se impone aguas abajo en el contorno abierto del mar. Las componentes armónicas permiten prescribir la evolución temporal de niveles, la cual es determinante del comportamiento hidrodinámico. El modelo del cual se extrajeron es el OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO¹.
- Los fenómenos atmosféricos tienen menor incidencia que otras forzantes en la dinámica del estuario. Su consideración implica incorporar nuevos parámetros, lo cual requiere disponer de más información de campo y además complejiza la implementación del modelo. Se optó por desestimarlos.
- Mediciones de evolución temporal de niveles y velocidades obtenidas durante las campañas de caracterización del estuario son imprescindible para la calibración del modelo numérico. El relevamiento del pasaje de la onda de marea por distintos sitios del estuario resultó indispensable para seleccionar la rugosidad del fondo. Asimismo, los perfiles verticales de velocidades en las estaciones Mar y Estuario medidos durante diciembre de 2016 fueron fundamentales durante la primera validación del modelo.
- La temperatura del agua y salinidad constituyen tanto condiciones de contorno como de calibración, dependiendo del lugar en que se consideren. Mediciones con equipos OBS en el dominio bajo estudio se han tomado como referencia para la calibración, permitiendo ajustar el coeficiente de difusividad turbulenta, parámetro que simula cómo las propiedades físicas se mezclan en el agua debido a la turbulencia.

¹El modelo TPXO es una solución global de marea barotrópica, desarrollado por Egbert y Erofeeva [12]. Los datos y herramientas de este modelo pueden descargarse desde el sitio del Oregon State University Tidal Inversion Software [27].

Estos aspectos se exponen en mayor detalle en las secciones subsiguientes.

3.2. Configuración del modelo

Delft3D utiliza métodos de elementos finitos para discretizar el espacio y diferencias finitas para discretizar el tiempo. Es decir que el dominio espacial se divide en pequeños elementos geométricos (rectángulos, por tratarse de una malla estructurada) para abordar las ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento del agua, aproximando las funciones dentro de cada elemento utilizando funciones de forma. El tiempo avanza en intervalos discretos, actualizando los valores de la función según las derivadas temporales discretizadas para calcular la evolución de las variables a lo largo del tiempo. Con esto en mente, a continuación se ahondará en los siguientes aspectos de la implementación del modelo del estuario:

- **Mallado espacial:** Su elección depende de la complejidad del sistema y la resolución requerida. Un mallado más fino captura detalles precisos pero aumenta el coste computacional, mientras que un mallado más grueso sacrifica detalles pero mejora la eficiencia computacional. La elección equilibrada busca un compromiso entre precisión y eficiencia.
- **Discretización temporal:** Se elige considerando la estabilidad numérica del método utilizado y la velocidad de cambio de las variables del sistema, buscando un equilibrio para obtener resultados precisos sin incurrir en una carga computacional excesiva.
- **Condiciones de contorno:** Especificaciones que se imponen en los límites del dominio. Definen el comportamiento del sistema en sus fronteras y son esenciales para resolver ecuaciones diferenciales parciales.
Un caso especial son los contornos abiertos, que constituyen los límites del dominio del modelo que están conectados con cuerpos de agua externos, interfaces a través de las cuales el agua fluye dentro y fuera del dominio. Es necesario especificar el ingreso de agua y cantidades transportadas desde los ríos Santa Cruz y Chico, y hacia el mar.
- **Condiciones iniciales:** Valores asignados a las variables del sistema en el momento inicial de una simulación.
- **Calibración:** proceso de ajustar parámetros en un modelo para que sus resultados simulados sean representativos del mundo real. Se efectúa mediante la comparación entre las predicciones del modelo y observaciones reales, ajustando los parámetros para minimizar las discrepancias.

3.2.1. Discretización espacio-temporal

La implementación del modelo requiere previamente de la construcción de una o más grillas de cálculo diseñadas convenientemente de manera tal de poder representar con un adecuado nivel de detalle el desarrollo de los procesos físicos de interés para el estudio, al mismo tiempo de

mantener acotado el costo computacional demandado por las simulaciones numéricas. Es decir, la extensión del dominio debe ser suficientemente grande como para eliminar los efectos de borde o fronteras exteriores en los modelos. De esta manera, se busca que los modelos tengan espacio suficiente para ajustarse a las fuerzas dinámicas actuantes en sus fronteras abiertas y llegar a una solución que represente con un grado de aproximación aceptable la situación real en la zona de interés.

Luego de numerosas pruebas y ajustes se optó por dos grillas estructuradas ensambladas mostradas en la Figura 3.4. La primera representa al tramo final del río Santa Cruz hasta antes de la confluencia con el Río Chico, mientras que la segunda abarca toda la zona del estuario y el mar abierto.

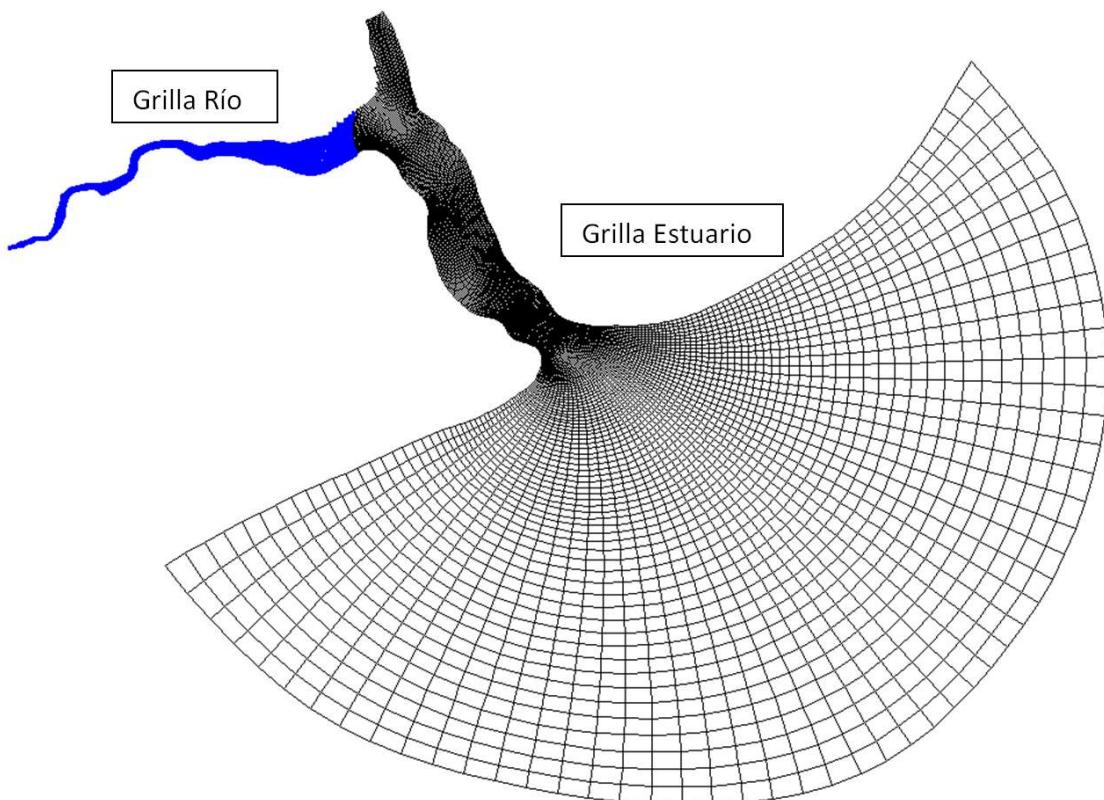


Figura 3.3: Mallas utilizadas para la simulación

La comparación de predicciones para variables como niveles, velocidades y salinidad obtenidas con distintos refinamientos de grilla indica que la malla adoptada garantiza resultados independientes de su tamaño de celda, a la par que optimiza el costo computacional. La grilla del mar admite elementos de mayor tamaño que el río. Por este motivo se prefirió ensamblar dos grillas en lugar de conservar sólo una en la cual se refinase infundadamente también el mar a causa de los requerimientos del río, incrementando innecesariamente el coste computacional.

La malla del tramo final del río Santa Cruz posee 52 128 elementos, resultando en una discretización transversal del río en unas 37 celdas, con elementos que presentarían alrededor de 5 m de lado en campo. La grilla del tramo medio del estuario, río Chico y mar presenta 20 608 elementos, resultando en celdas del orden de 50 m de lado en la zona de la boca del estuario,

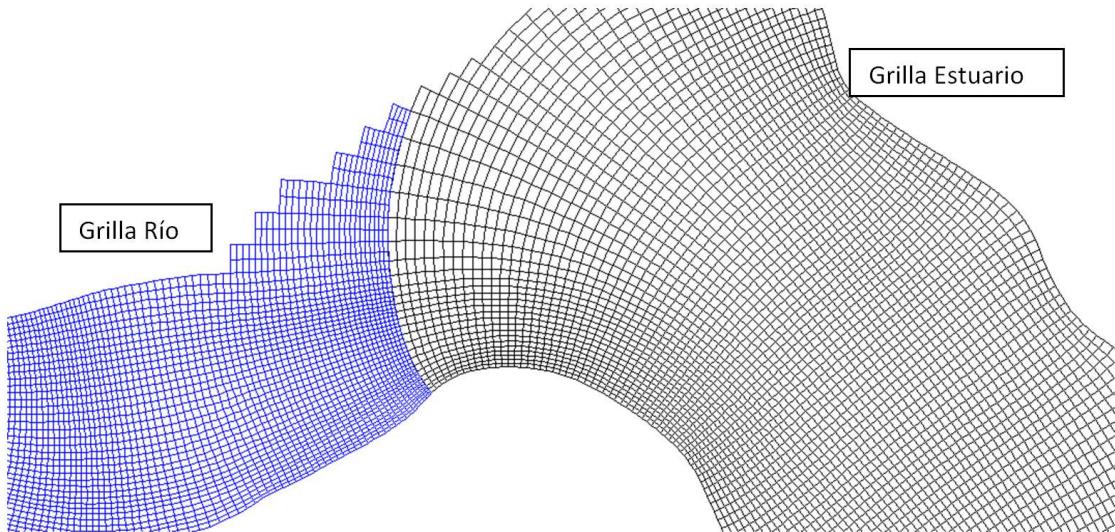


Figura 3.4: Detalle de las mallas utilizadas para la simulación

sitio en que el dominio se discretiza transversalmente con 58 elementos. Resta mencionar que el mallado espacial propuesto cumple con criterios de calidad vinculados a ortogonalidad, suavidad y relación de aspecto de los elementos sugeridos por el manual de usuario del software [10].

Respecto a la discretización vertical, en una instancia inicial de seteo del modelo se experimentó con la posibilidad de efectuar modelaciones quasi-tridimensionales. Es decir, emplear la grilla bidimensional recién expuesta pero superponiendo varias capas, de manera de proporcionar una descripción de las variables a diferentes profundidades. No obstante, contemplando el incremento en el coste computacional que esto representa, y recordando que las mediciones de campo presentadas en la sección 2.2.5 *Determinación de perfiles verticales* revelan perfiles verticales uniformes, se toma la decisión de modelar empleando una sola capa. Esto resulta en un modelo con la capacidad de proporcionar una caracterización de variables bidimensional en planta y promediada en la vertical.

En cuanto al paso de cálculo Δt , el mismo se propuso atendiendo a las recomendaciones del manual de usuario. La reproducción de las escalas espaciales depende del número de Courant-Friedrichs-Lowy definido por

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\min(\Delta x, \Delta y)} \quad (3.5)$$

donde g es la aceleración de la gravedad; H , la profundidad total y $\min(\Delta x, \Delta y)$ el mínimo tamaño de grilla. La adopción de $\Delta t = 12$ s cumple ampliamente la condición de resultar en valores de $CFL < 10$. Atendiendo al hecho de que la dinámica del estuario está fuertemente ligada a ondas de marea de período $T = 12:20$ hs, se satisfizo también la condición $\Delta t \leq T/40$.

Se verificó la independencia de los resultados respecto de esta discretización temporal mediante la comparación con simulaciones realizadas con un paso temporal menor.

El modelo consta de dos grillas estructuradas ensambladas, con un total de 72 736 elementos distribuidos en una sola capa. Los resultados de las modelaciones son independientes de la discretización seleccionada.

3.2.2. Condiciones de contorno

A fin de establecer el comportamiento del sistema modelado en sus fronteras, deben caracterizarse el lecho, así como la interacción con cuerpos de agua adyacentes y con la atmósfera. También se explora el lapso de tiempo necesario para independizar la modelación de las condiciones iniciales (valores asignados a las variables de cálculo en el momento de dar inicio a la modelación, que evolucionan en el tiempo de acuerdo con las ecuaciones gobernantes).

Modelo de terreno

Para generar el modelo digital del terreno a partir de la información disponible, se utiliza el módulo Quickin del software Delft3D. El mismo incorpora herramientas que permiten, a partir de datos relevados, efectuar promedios ponderados y triangular para asignar una profundidad constante a cada celda del mallado. La información disponible se incorpora en coordenadas planas Posgar 2007 Argentina Zona 2 y se procede a su triangulación.

El modelo del río requiere un tratamiento detallado por ser el tramo de mayor interés y el que presenta resultados más sensibles a las variables de calibración. En sectores de río ubicados en medio de dos secciones relevadas la aplicación de triangulación arroja resultados poco realistas originados por la utilización de información proveniente de todas las direcciones con igual peso. Para solventar este problema, se generan secciones transversales interpoladas a partir de los datos correspondientes a dos secciones relevadas adyacentes, de acuerdo con una ponderación que depende de la distancia de la sección interpolada en cuestión a cada una de las relevadas. Posteriormente, estas secciones se incorporan a la información existente, y se procede a su triangulación para generar un modelo del terreno de calidad.

En particular, se diseñó e implementó un algoritmo para la interpolación de secciones del río. Como primer paso, se identifican los datos relevados correspondientes a cada sección, se proyectan sobre el plano de la misma y se utilizan para generar secciones simplificadas cuya geometría queda definida por una decena de puntos equiespaciados entre márgenes. En cada tramo del río acotado por dos de estas secciones, se generan dieciocho secciones simplificadas de ancho normalizado, caracterizadas por puntos equiespaciados transversalmente y cuya profundidad se determina interpolando según la distancia hasta ambas secciones relevadas simplificadas. Luego, con los relevamientos correspondientes a las márgenes, se procede a ubicar geográficamente estas secciones, definiendo una distribución equidistante de las mismas en el sentido longitudinal del río. El resultado de este procedimiento se observa en la Figura 3.5.

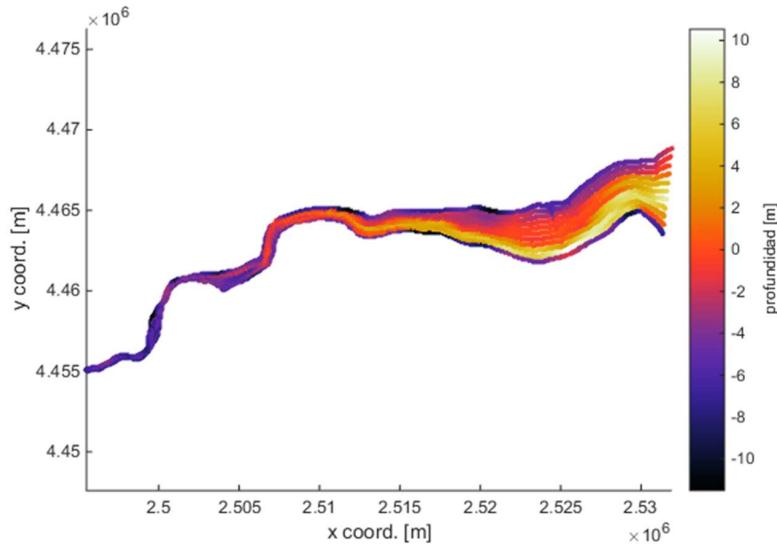


Figura 3.5: Secciones interpoladas sobre el río Santa Cruz. El mapa de colores indica profundidades.

Para generar el modelo del terreno se utiliza el módulo Quickin incorporado en el Delft3D. En sectores del río ubicados a menos de dos celdas del mallado de distancia de puntos relevados se adopta una profundidad que resulta del promedio ponderado de la información relevada. Para las celdas restantes, se incorporan a la información previa las secciones interpoladas y se procede a la triangulación de los datos. Tal como se ha mencionado previamente, la calidad del modelo del terreno se ha valorado cualitativa y cuantitativamente a partir de la comparación con las fotografías aéreas en marea baja, con los niveles observados y con datos batimétricos relevados. En la Figura 3.6 se puede ver modelo digital del terreno que posee incorporadas las cuatro bases de datos.

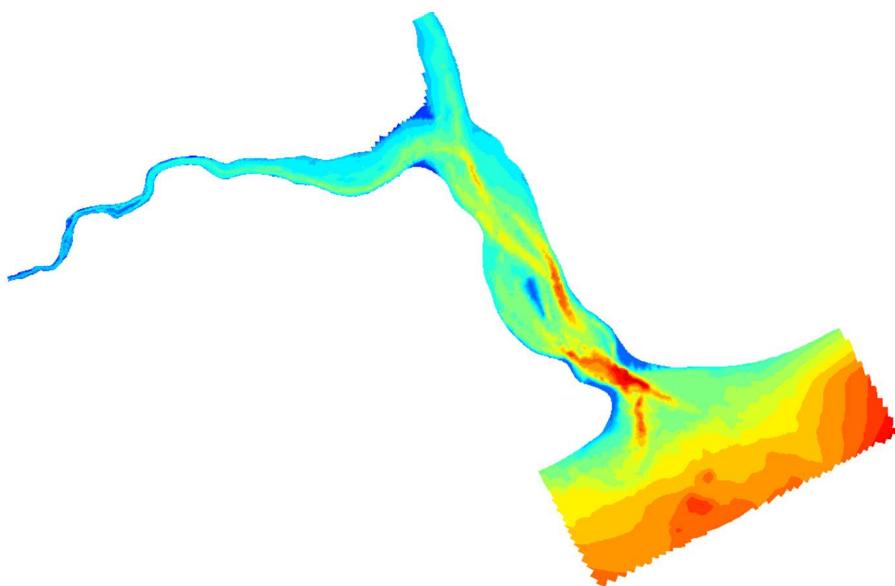


Figura 3.6: Modelo digital del terreno.

Contornos abiertos

En ellos el agua fluye desde y hacia el dominio. Es necesario especificar el ingreso de agua y cantidades transportadas desde los ríos Santa Cruz y Chico, y el intercambio con el mar.

- En el contorno del río Santa Cruz, se impone el hidrograma ingresante, estableciendo una serie temporal de caudales de paso diario basada en las observaciones de campo. En los escenarios de calibración, se asignan caudales diarios registrados en Charles Fuhr para las fechas consideradas. En los escenarios para diagnóstico de la situación natural, se impone el hidrograma Q_{50} para representar el año medio. En escenarios que contemplan llenado, se establecieron una variedad de hidrogramas a fin de evaluar de entre ellos cuáles minimizan los impactos en la salinidad.

En lo referente a transporte, la salinidad se impone nula siempre. Se recuerda que en Isla Pavón el sensor de conductividad del equipo OBS no revela presencia de salinidad, estando el contorno en cuestión aún más aguas arriba. En cuanto a temperatura del agua, dependiendo del mes considerado se adoptó el valor medio mensual. En estos escenarios, los valores extremos de la temperatura están en 13.3 °C en enero y 3 °C en julio. Por simplicidad, las variaciones diarias de temperatura han sido omitidas.

- En el contorno correspondiente a río Chico, se impone de manera constante el caudal módulo del río, correspondiente a 20 m³/s. En este cuerpo de agua las mediciones no revelan un hidrograma anual distintivo, por lo cual no pudo hacerse una propuesta superadora.

Se asume que la salinidad del agua ingresante es nula. Para la temperatura del agua se impone el valor medio mensual.

- En el mar se impone como condición de contorno la evolución de niveles en función del tiempo. Concretamente, se configura el modelo para que utilice los datos de las componentes astronómicas para calcularlos, a partir de la especificación de las amplitudes y fases de las componentes relevantes. Se empleó el modelo OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO [12] para consultar el valor de estos parámetros en la zona del estuario de río Santa Cruz. Éstas se indican para los extremos Norte y Sur de la costa, entre los que la diferencia de niveles puede llegar a 0.2 m, interpolando linealmente el resto del contorno. En los escenarios de calibración, se alimenta al modelo con todas las componentes disponibles. Por otra parte, en los escenarios de caracterización natural y en los de llenado se opta por representar la marea media contemplando únicamente la componente lunar (componente M_2 de unos 3.3 m de amplitud), puesto que las modulaciones que consideran influencia solar resultan en mareas de cuadratura y sicigia que varían año a año, lo cual restaría generalidad al modelo. Resta mencionar que a fin de reducir la reflectividad de perturbaciones de corta longitud de onda hacia el interior del dominio desde el mar, se adopta un valor $\alpha = 1000 \text{ s}^2$ para el parámetro de reflexión.

Respecto a la temperatura del agua y salinidad, sus valores se obtienen de la World Ocean Database 2013² [3], reproducidos en la Figura 3.7. Se adopta un valor medio de salinidad

²La base de datos WOD 13 de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) recoge datos de temperatura de las estaciones argentinas de Centro Argentino de Datos Oceanográficos (CEADO), que es una institución

de 32.5 UPS todo el año, mientras que las temperaturas del agua se imponen según el valor medio del mes considerado, en un rango de entre 5 °C y 10 °C, según se especifica en la Tabla 3.1.

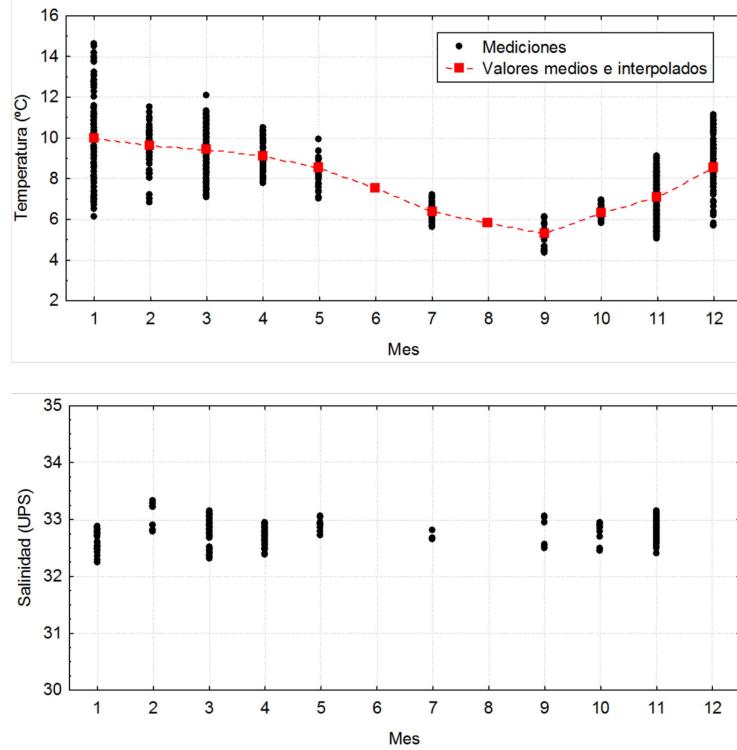


Figura 3.7: Valores medios mensuales de temperatura del agua y salinidad en el mar según la base de datos WOD13. Reproducido de [25].

Tabla 3.1: Temperatura media mensual del mar

Mes	Temp. media [°C]	Rango de variación [°C]
Enero	10.0	6.0-14.8
Febrero	9.6	6.7-11.6
Marzo	9.4	6.9-11.4
Abril	9.1	7.7-10.5
Mayo	8.6	6.8-10.0
Junio	7.4	-
Julio	6.4	5.4-7.3
Agosto	5.8	-
Septiembre	5.3	4.2-6.2
Octubre	6.4	5.7-7.0
Noviembre	7.0	4.8-9.2
Diciembre	8.6	5.6-11.2

Al proponer los escenarios concretos en los próximos capítulos se especifican los valores impuestos a las variables mencionadas.

Por otra parte, se hace notar que no se modelaron simultáneamente salinidad y temperatura del agua, sino que se evaluaron en simulaciones independientes.

dependiente del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Es posible acceder a los datos desde el sitio de National Centers for Environmental Information [21].

Intercambio con la atmósfera

Las condiciones atmosféricas también constituyen condiciones de contorno susceptibles de ser incorporadas al análisis. A fin de representar los procesos de intercambio de calor con la atmósfera, el software Delft3D provee cinco modelos diferentes, que requieren una cantidad de información creciente para su aplicación y utilizan distintos algoritmos de cálculo. El intercambio de calor con la atmósfera puede cuantificarse teniendo en cuenta el área de la superficie del estuario, la radiación solar, la nubosidad, la humedad relativa y temperatura del aire, especificando series temporales. La acción de los vientos puede considerarse si su relevancia en la dispersión de sustancias es significativa, según series de tiempo que especifiquen su dirección y velocidad y caracterizando su interacción con la superficie del agua mediante coeficientes de arrastre. Alimentar a un modelo de esta complejidad requiere un gran volumen de información de campo y su análisis, así como una mayor capacidad computacional. Por este motivo, se evaluó la relevancia de incluir estos fenómenos en la modelación mediante simulaciones accesorias:

- Para el escenario de diciembre de 2016, período en que se cuenta con mediciones de campo, se simularon niveles, velocidades del agua y salinidad con tres variantes del modelo: sin forzantes atmosféricas, incorporando un coeficiente de arrastre del viento, e incluyendo un modelo de radiación solar total. Las diferencias en los resultados fueron despreciables; leves variaciones en la distribución de salinidad indican que las corrientes generadas por el viento inciden mucho menos que caudales y mareas en la dispersión de sustancias.
- Para un escenario de año medio con predicciones de temperatura del agua, calibrar adecuadamente la difusividad turbulenta tiene una incidencia mucho más significativa que incorporar un modelo de intercambio de calor con la atmósfera. Nótese que en este caso es de interés obtener una caracterización media mensual, omitiendo variaciones diurnas.

Se concluyó que, a los fines de este trabajo, el esfuerzo adicional de incorporar viento e intercambio de calor al modelo no reporta mejoras significativas en las predicciones, por lo cual puede obviarse.

Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales se refieren al estado inicial de un sistema en un momento específico antes de que comience una simulación, siendo esencial prescribirlas para predecir la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

En modelación hidrodinámica, las condiciones iniciales incluyen la altura inicial del agua y la distribución inicial de la velocidad del flujo. En el modelo del estuario, basta con proponer una cota de agua interpolada groseramente en el dominio desde aguas arriba hacia aguas abajo en función de los niveles de agua observados durante el pasaje de la onda de marea. Por cuestiones propias del software, el único cuidado que se requiere es garantizar que los contornos abiertos no se sequen. Por simplicidad, las componentes horizontales de velocidades iniciales del flujo se prescriben nulas. Al iniciar una simulación con estas condiciones, en menos de 24 horas de

tiempo modelo se alcanza la estabilización del flujo.

En los fenómenos de transporte, la bondad de la condición inicial incide en el período hasta que se alcanza la estabilización de salinidad y temperaturas. Se requiere iniciar la simulación con antelación antes de poder obtener resultados representativos. Iniciando la modelación con valores de temperatura o salinidad interpolados linealmente, la estabilización de los valores medios en puntos de interés toma al menos un mes de tiempo modelo. Por este motivo, es conveniente dar al modelo un arranque caliente (*hot start*, en inglés) para reducir el coste computacional, es decir iniciar una simulación utilizando como condiciones iniciales resultados de una simulación previa de un escenario acorde, en lugar de comenzar desde cero.

3.2.3. Monitoreo de resultados

El software ofrece la posibilidad de presentar resultados en mapas y puntos de observación para visualizar las variables modeladas. Combinar ambos enfoques brinda una perspectiva para evaluar patrones y comprender la dinámica en un contexto espacial, facilitando la interpretación de los resultados.

Los puntos de observación son ubicaciones específicas dentro del dominio de modelación donde se colocan puntos para registrar la evolución temporal de parámetros. Constituyen herramientas útiles para comprender la variabilidad del flujo, posibilitan la comparación entre resultados modelados y datos observados durante la calibración, y resultan valiosos para efectuar comparaciones en estudios de impacto. Concretamente, en la Figura 3.8 se presentan estaciones de monitoreo seleccionadas para presentar los resultados de las modelaciones de los capítulos siguientes³. Las mismas se ubican sobre el canal de máxima profundidad: las 10 primeras coinciden con puntos de relevamientos de perfiles verticales ubicados entre la localidad de Comandante Luis Piedrabuena e isla Leones, a las cuales se añadieron 6 sitios adicionales hasta llegar al mar. Así se abarca la totalidad de la zona de interés, desde aguas arriba hacia aguas abajo.

La representación gráfica en mapas ofrece una visión holística de la distribución espacial de las variables a lo largo del dominio modelado. Cada mapa permite visualizar mediante vectores o una escala de colores el valor medio vertical de una variable de interés durante un instante dado, pudiendo extraerse mapas con el intervalo de tiempo que especifique el usuario para visualizar variaciones temporales.

En los capítulos siguientes ambas herramientas se emplearán para presentar los resultados del modelo.

³En la figura se han omitido los puntos de observación empleados durante las instancias de calibración, ubicados en coincidencia con sitios tales como los de fondeo de los equipos OBS.

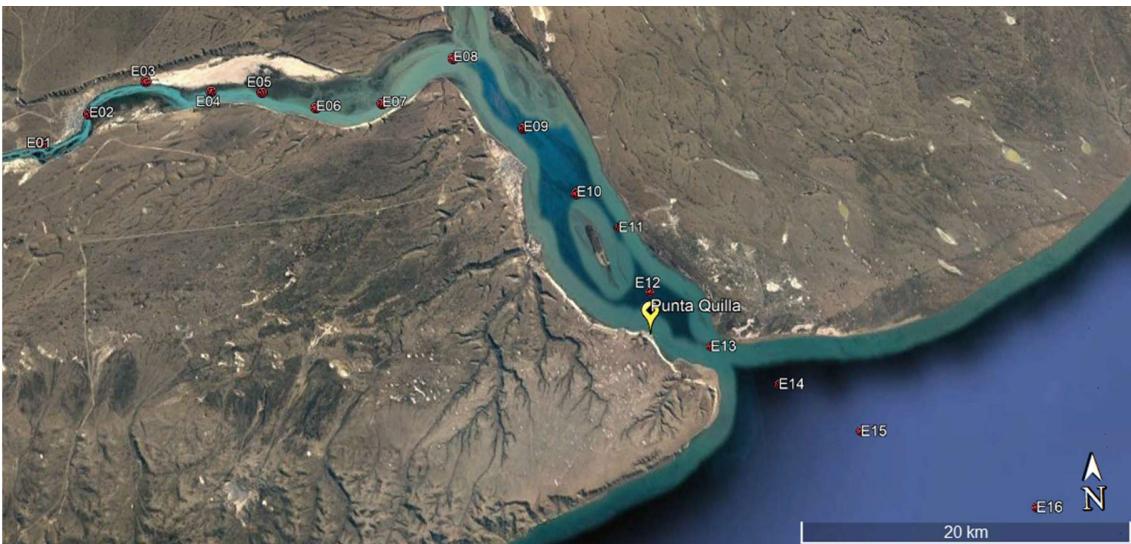


Figura 3.8: Ubicación de estaciones de monitoreo en modelo numérico E01 a E16.

3.2.4. Calibración y validación del modelo

Para calibrar un modelo hidrodinámico, es necesario contar con datos de campo medidos bajo un escenario conocido. La calibración consiste en reproducir numéricamente ese escenario, imponiendo condiciones de contorno coherentes con las que estuvieron presentes durante el relevamiento. A partir de ello, se realizan múltiples simulaciones del mismo escenario variando los parámetros ajustables del modelo (por ejemplo, coeficientes de rugosidad o difusión), con el objetivo de identificar los valores que proporcionen el mejor acuerdo entre los resultados simulados y las observaciones. Una vez alcanzada una buena correspondencia entre simulación y medición, se considera que el modelo está calibrado para ese escenario.

En una etapa posterior, puede evaluarse la capacidad del modelo para representar otros escenarios distintos, también documentados con observaciones. Si el modelo logra reproducir adecuadamente esos nuevos casos sin modificar los parámetros ajustados durante la calibración, se considera que ha sido validado.

En la primera etapa de calibración del modelo hidrodinámico se contó con información de la evolución temporal de niveles de cota de pelo de agua en varios puntos del dominio simultáneamente. Se utilizaron las mediciones de la campaña de relevamiento de pasaje de una onda de marea [7]⁴. Se calibraron las componentes de marea⁵ y los coeficientes de rugosidad de fondo.

La rugosidad del fondo controla la disipación de energía por fricción y afecta tanto los niveles de agua como la propagación de la onda de marea. Para caracterizar la resistencia al flujo se seleccionó emplear el coeficiente de Manning (n de Manning) de entre las opciones que ofrece el software. El dominio de la modelación tiene sectores de características diferentes, a saber, tramo final del río Santa Cruz, zona central del estuario y mar. Para adoptar su valor se ensayó imponer

⁴Las predicciones de marea del Servicio de Hidrografía Naval [26] para Punta Quilla también resultaron útiles como referencia. Sin embargo, debido a ciertas discrepancias con los datos observados, se optó por dar mayor peso a las mediciones realizadas en campo.

⁵Los niveles generados por las componentes de marea extraídas de un modelo global suelen presentar diferencias con las mediciones. Para corregir estas diferencias es necesario ajustar las fases y amplitudes de dichas componentes.

diferentes distribuciones espaciales de dicho coeficiente, evaluando los respectivos resultados de las modelaciones. Se concluyó que asignar $n = 0.025$ en la grilla del río y $n = 0.020$ en la malla del estuario y mar resultaba en un mejor acuerdo entre observaciones y modelaciones. Estos valores son consistentes con los empleados en otros modelos reportados por la literatura, tal como el caso de estudio reproducido en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Valores de rugosidad de un modelo Delft3D-Flexible Mesh (Delft3D-FM) y Adaptive Hydraulics (AdH). Reproducido de [29].

Dominio del modelo	Coeficiente de fricción	
	Delft3D-FM Chézy	AdH n de Manning
Océano	86	0.015
Estuario		
Canal principal	54-86	0.015
Planicie inundable por marea	5-56	0.025
Arriba del estuario		
Canal principal	37-56	0.0265
Canal secundario	25	0.0275
Planicie de inundación	5-25	0.05
Isla del canal	5	0.08

Una vez calibrado el modelo, los niveles simulados reprodujeron con precisión los registrados en campo durante el escenario pasaje de la onda de marea.

A continuación se procedió a simular otros escenarios manteniendo los mismos valores de los parámetros ya calibrados. Concretamente, se aprovecharon las mediciones continuas de nivel, velocidad y salinidad disponibles gracias a los registros de los equipos OBS fondeados en distintos puntos del dominio. Si bien no se incluyen en esta publicación, el contraste entre valores medidos y simulados reveló un muy buen acuerdo.

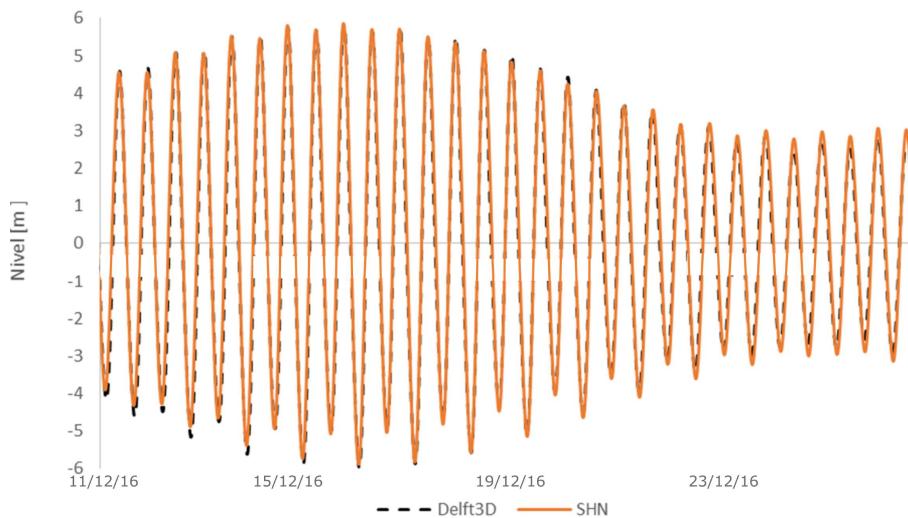


Figura 3.9: Ajuste de niveles en Punta Quilla. Tablas de marea del SHN (línea continua naranja) y resultados del modelo (discontinuo negro).

Según se mencionó, la calibración de la rugosidad resultó no sólo en la adecuada reproducción de la hidrodinámica, sino también de la dinámica de la salinidad. Las corrientes son responsables de los fenómenos de transporte, advectando este tipo de propiedades. No obstante, la calibración

de la temperatura requirió un estudio más extenso.

Se recuerda que el objetivo del modelo de temperatura no es reproducir en detalle la variabilidad climática diaria, sino facilitar comparaciones simples para realizar un análisis de sensibilidad frente a distintos escenarios. Con este propósito, se buscó representar la variabilidad térmica inducida por las mareas en distintos momentos del año (ver ingreso y egreso de agua marina en la Figura 2.104), dejando de lado la variación asociada al ciclo día-noche (ver variaciones de temperatura en el río en la Figura 2.94). Para calibrar el modelo se utilizaron parámetros mensuales medios de las temperaturas registradas con OBS en Punta Quilla, en verano e invierno (valor medio y amplitud de variación). A partir de este análisis, se optó por adoptar un valor de difusividad turbulenta horizontal $D_H^{back} = 60 \text{ m}^2/\text{s}$, observando que el intercambio con la atmósfera podía ser despreciado sin introducir desvíos significativos respecto de las observaciones medias.

El modelo calibrado y validado provee resultados de nivel, velocidad, salinidad y temperatura que presentan muy buen acuerdo con las mediciones de campo. Se lo considera capaz de representar el comportamiento en el resto del dominio y en otros escenarios.

3.3. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo numérico capaz de representar la dinámica del estuario del río Santa Cruz. El dominio comprende la zona de comportamiento puramente fluvial aguas arriba del Puente Viejo sobre el río Santa Cruz, incluye el estuario y se extiende hasta unos 40 km mar adentro donde se tienen condiciones de comportamiento puramente marino. Contemplando que las principales variables forzantes del sistema físico son las mareas y los aportes fluviales, se ha seleccionado como software de implementación el ampliamente difundido modelo morfohidrodinámico Delft3D de la Universidad de Delft. El sistema del estuario ha sido discretizado usando dicho programa, verificando la independencia de resultados con respecto al mallado. La representatividad del modelo ha quedado garantizada tras la calibración y verificación en base a mediciones de campo que abarcan niveles, velocidades, salinidad y temperatura.

El presente modelo puede aplicarse bajo distintos escenarios para realizar un diagnóstico de la dinámica actual y valorar alteraciones que pudieran ocurrir durante el llenado y operación de los embalses.

En la Tabla 3.3 se muestra un resumen del amplio número de parámetros de ingreso que fueron ajustados para implementarlo y calibrarlo.

Tabla 3.3: Parámetros de configuración del modelo

Malla	Tipo de grilla		Estructurada, 2 mallas ensambladas
	Número de elementos	72736	
	Tipo de capas verticales	Sigma	
Variables tratadas	Número de capas verticales	1	
	Niveles de agua	Cartas náuticas, relevamientos	
	Corrientes	Variable 2D en tiempo y espacio	
	Temperatura	Variable 2D en tiempo y espacio	
Módulo hidrodinámico	Salinidad	Variable 2D en tiempo y espacio	
	Celdas secas y húmedas	Sí	
	Modelo turbulento horizontal		Constante
	Viscosidad turbulenta horizontal		1 m ² /s
	Modelo turbulento vertical		$k-\epsilon$
Condiciones de contorno	Rugosidad de fondo	$n = 0.02$ mar – $n = 0.025$ río	
	Densidad del agua		1024 kg/m ³
	Océano		Niveles determinados por componentes de marea
Temperatura y salinidad	Ríos	Serie temporal de caudales	
	Celdas secas y húmedas	Sí	
	Altura de secado		0.1 m
	Diffusividad turbulenta horizontal		10 m ² /s o 60 m ² /s
Intercambio de calor con la atmósfera		No	
Condiciones de contorno			
Océano	Ríos	Salinidad y temperatura variable en función del mes	
		Salinidad nula y temperatura variable en función del mes	

* En escenarios distintos a los de calibración y validación, se representa sólo la componente M_2 de la marea (marea media) y el río Chico presenta caudal módulo.

CAPÍTULO 4

Modelación del estuario en estado natural

El modelo numérico se emplea para caracterizar distintos escenarios de funcionamiento del estuario durante la situación natural, sin represas. Este diagnóstico tiene por finalidad comprender el funcionamiento del sistema y cuantificar las variaciones que ocurren de manera natural en este hábitat, a fin de establecer una línea de base con la cual comparar los cambios que pueden ocurrir durante la construcción, llenado de embalse y operación de las obras.

Comprender en detalle el funcionamiento de un medio natural caracterizado por su impermanencia en variadas escalas de tiempo es fundamental para poder valorar el potencial impacto que generarán las represas.

Se procede a dar cuenta del funcionamiento del sistema evaluando parámetros medios e instantáneos de niveles, velocidad, salinidad y temperatura, así como su variación estacional e interanual. Concretamente, se presentan resultados en forma de mapas espaciales y series temporales correspondientes a estaciones de ubicadas sobre el canal de máxima profundidad.

4.1. Hidrodinámica del estuario

El comportamiento hidrodinámico del estuario es el resultado de tres forzantes principales. La primera de ellas, y la de mayor influencia, son las mareas. Las dos restantes son los caudales de los ríos Chico y Santa Cruz, siendo este último susceptible de modificaciones durante el llenado de las represas.

4.1.1. Generalidades

El efecto que producen las mareas en el estuario es el siguiente: al elevarse el nivel medio del mar, se produce un gradiente hidráulico que origina un flujo de ingreso del agua oceánica hacia dentro del estuario, elevando a su vez el nivel del mismo. Cuando el nivel del mar alcanza su valor máximo se logra un equilibrio entre el nivel del océano y el estuario, deteniendo así ingreso de agua hacia el estuario. Luego, cuando el nivel del mar comienza a descender, el gradiente hidráulico se invierte, lo que ocasiona que el agua del estuario fluya nuevamente hacia el océano. Este fenómeno se detiene cuando se alcanza la bajamar y los niveles del océano y estuario se

vuelven a equilibrar. Cuando el nivel vuelve a subir, este ciclo se repite, con un período igual al de las mareas.

Los caudales de ingreso y egreso al estuario son del orden de 100 000 m³/s en la boca del estuario (aunque este valor varía en función de la amplitud de marea), y disminuyen hacia aguas arriba. En la Figura 4.2 se puede ver para distintas transectas (definidas en Figura 4.1) la evolución temporal del caudal durante una serie de ciclos de marea.

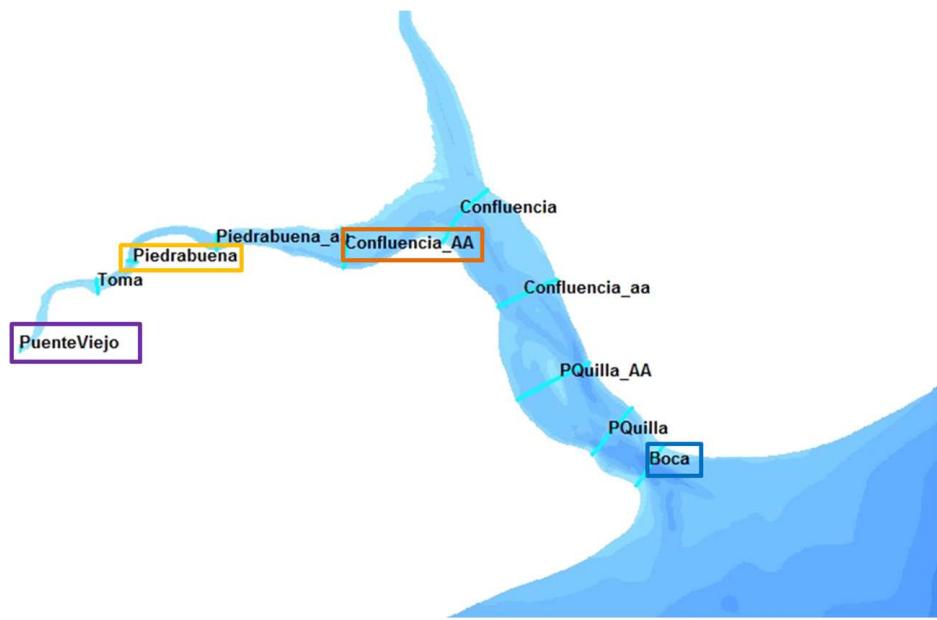


Figura 4.1: Secciones transversales para estudio de caudales, resaltando en colores las analizadas en la Figura 4.2

Es de interés notar que los caudales medios del río Santa Cruz y Chico son del orden de 700 m³/s y 20 m³/s, respectivamente, entre 2 y 4 órdenes de magnitud por debajo de lo que ingresa del océano a través de la boca del estuario. Hacia aguas arriba de la boca estos caudales disminuyen y luego de algunos kilómetros empiezan a tener valores similares a los que traen los ríos. De esta manera se comprende que velocidades y niveles quedan determinados en el estuario casi en su totalidad por las mareas y no por el agua que traen los ríos.

Las amplitudes de marea, que tienen valores medios de 8.11 metros y máximos de 12.69 m, se encuentran entre los mayores a nivel mundial. Esta variación rápida de niveles (teniendo en cuenta que en un lapso de 6 horas se pasa de bajamar a pleamar), configura un espacio único, con extensas playas que dos veces por día se sumergen y se exponen al aire libre. La extensión de estas zonas de secado y mojado se ven en las modelaciones de la Figura 4.3, que presentan excelente acuerdo con las observaciones satelitales de la Figura 4.4. Durante la bajamar el agua queda restringida a los canales de profundidad máxima, que a su vez coinciden con los corredores de máxima velocidad. En la Figura 4.4 se pueden ver las zonas que quedan expuestas durante la bajamar. Se aprecia que una gran proporción del estuario está sometido a un régimen de mojado y secado. Este fenómeno se extiende aproximadamente 15 km aguas arriba de la confluencia de los ríos Chico y Santa Cruz.

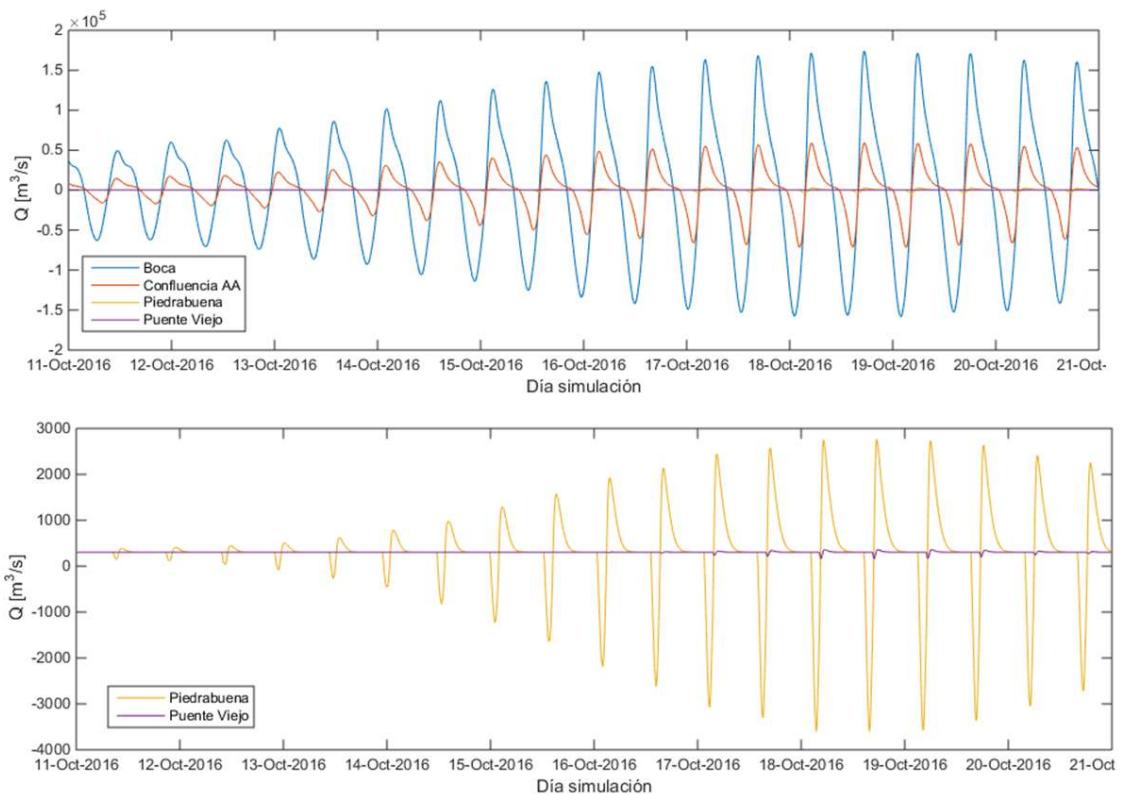


Figura 4.2: Evolución temporal de caudales instantáneos en distintas transectas: Puente Viejo, Piedrabuena, Aguas arriba de la confluencia y Boca del estuario, identificadas en la Figura 4.1. El rango de valores del eje vertical en la figura inferior es más acotado, a fin de mostrar en detalle los caudales más bajos del río Santa Cruz.

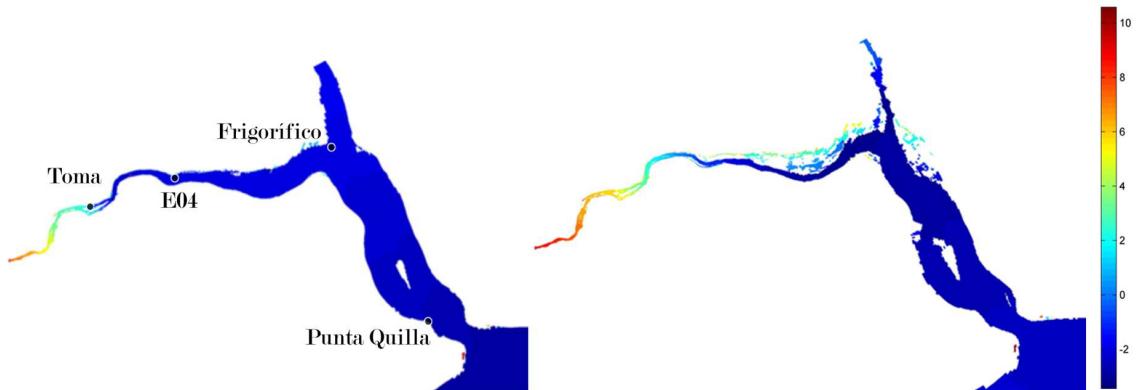


Figura 4.3: Nivel del agua reproducida por el modelo durante pleamar (der.) y bajamar (izq.). El mapa de colores indica cota de pelo de agua, y las zonas sin agua se representan con blanco

Otra manera de visualizar la variación de niveles producto de la marea se presenta en la Figura 4.5, donde para distintos sitios fijos se observa la evolución temporal de la cota de pelo de agua. El comportamiento en Punta Quilla es puramente armónico y modulado, y da cuenta de que la amplitud de marea no es la misma en diferentes ciclos, producto de la interacción de diferentes componentes astronómicas. En contraste, aguas arriba en la toma de agua de Piedrabuena el nivel mínimo está condicionado por el régimen fluvial y experimenta incrementos cerca de pleamar, siendo la magnitud de los mismos dependiente de la amplitud de marea. En estaciones intermedias se observa un comportamiento híbrido, con cierta asimetría en el pasaje de la onda (en el caso del frigorífico, el punto de monitoreo está ubicado en la costa y el valor mínimo tiene



Figura 4.4: Imagen satelital del estuario durante pleamar (der.) y durante bajamar (izq.)

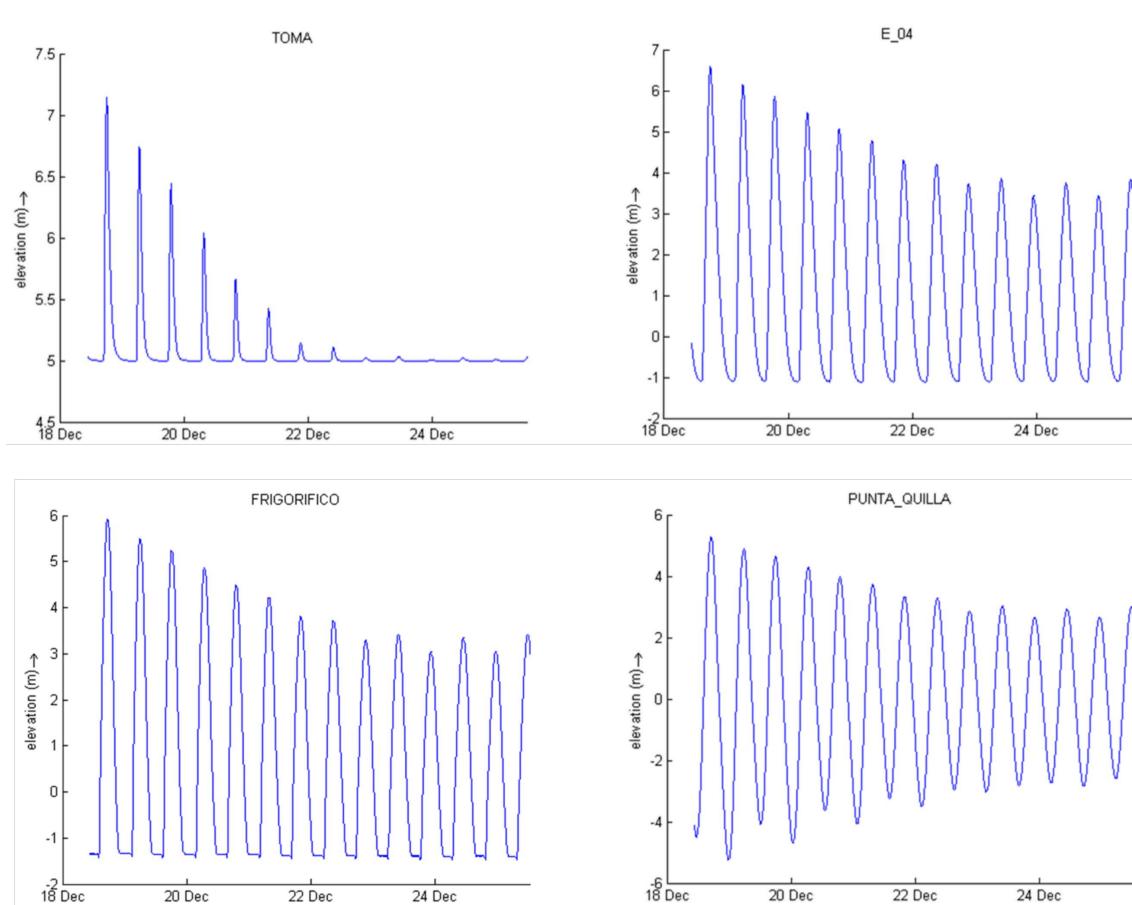


Figura 4.5: Evolución temporal del nivel del agua durante varios ciclos de marea en las estaciones ubicadas en diferentes progresivas longitudinales: Toma de agua de Piedrabuena, Estación 04, Frigorífico y Punta Quilla, identificadas en la Figura 4.3

su origen en el estancamiento de agua debido a la batimetría, tal como se observó en campo).

Durante el flujo y reflujo de la marea se generan grandes corrientes, que alcanzan valores significativos a lo largo de todo el estuario. En la Figura 4.6 se aprecia la evolución temporal en la distribución de velocidades, con los mayores valores ocurriendo apartados de pleamar y bajamar. Durante los momentos de mayor intensidad de corriente, en la boca se alcanzan valores de 2.5 m/s, y en los canales de mayor profundidad, valores de 1.5 m/s o 2.0 m/s.

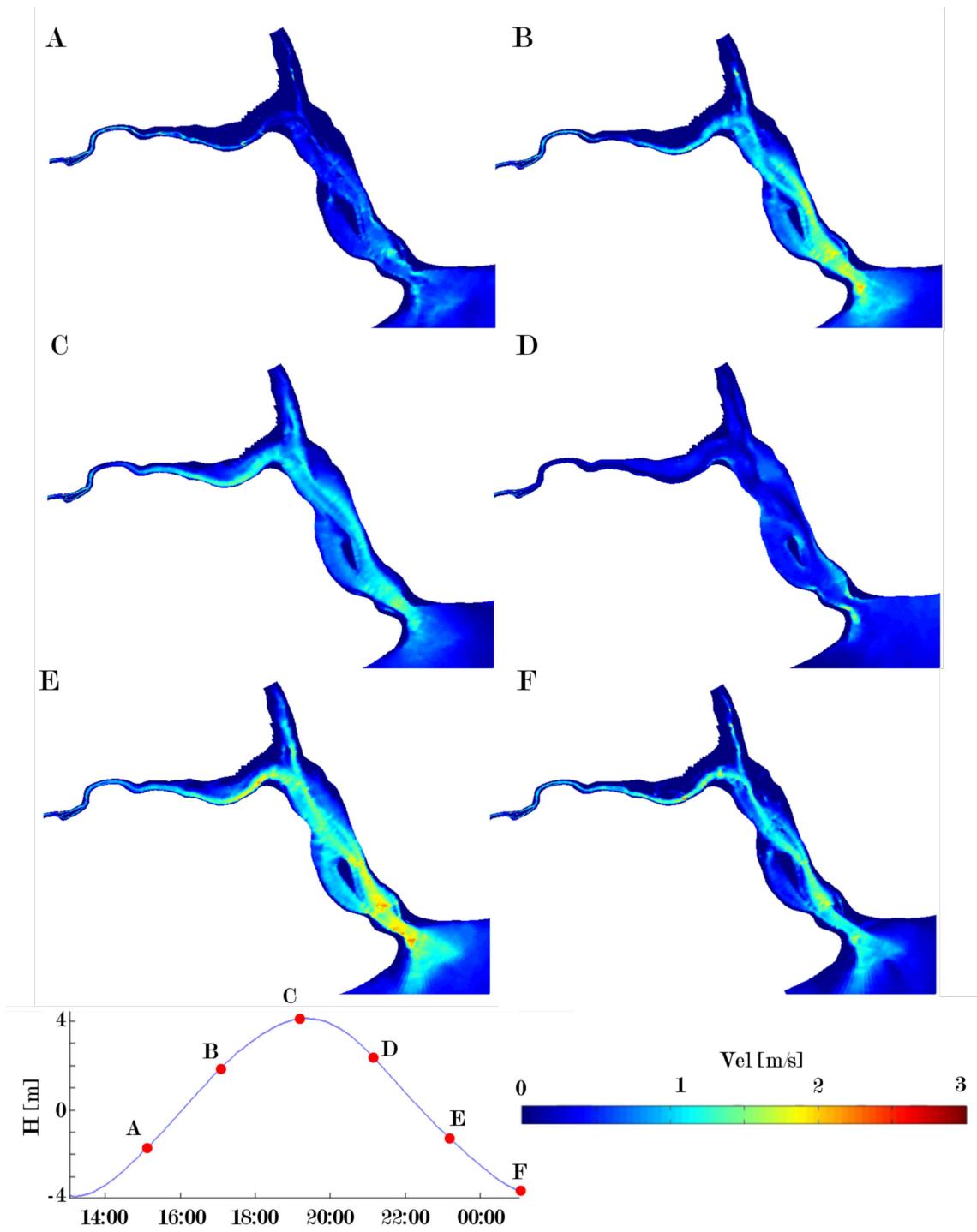


Figura 4.6: Mapas de magnitudes de velocidades en distintos momentos de un ciclo de marea. El gráfico de la esquina inferior muestra la altura de marea en función del tiempo, indicando con un punto rojo cada momento representado en el respectivo mapa

Para complementar la Figura 4.6, el código QR de la Figura 4.7 permite acceder a una animación de la magnitud de velocidades en distintos momentos de un ciclo de la marea.



Figura 4.7: Código QR que enlaza a un video con la animación de la magnitud de velocidad del flujo.

En la Figura 4.8 se pueden ver la magnitud y dirección de la velocidad en el estuario en dos momentos distintivos.

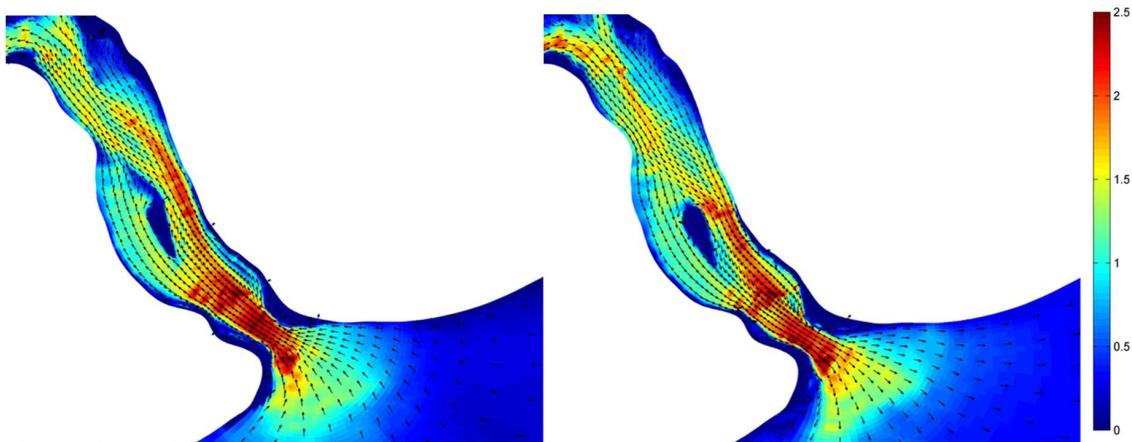


Figura 4.8: Velocidades instantáneas durante corrientes de flujo (izq.) y reflujo (der.). Las flechas indican sentido de la corriente, ingresante en la primera figura y saliente en la segunda; la escala de colores indica magnitud en [m/s]

Con amplitudes promedio de 8.11 m, la marea produce extensas zonas de mojado y secado, y genera caudales en la boca del estuario del orden de 100 000 m³/s. En Punta Quilla, el comportamiento es armónico y modulado por componentes astronómicas, con corrientes que alcanzan hasta 2.5 m/s. Aguas arriba, se incrementa la influencia del régimen fluvial, aunque experimenta modificaciones durante la pleamar.

4.1.2. Alcance de la onda de marea

Se ha mencionado que la evolución temporal de las variables hidrodinámicas del estuario, así como el transporte que ejercen las mismas en cantidades tales como la salinidad, depende entre otros factores de las variaciones de nivel originadas por las mareas. En lo concerniente a los niveles del mar, la principal componente es la variación semidiurna, con amplitud media de 4.05 m, que determina concentraciones máximas y mínimas diarias de salinidad en pleamar y bajamar respectivamente. Esta oscilación está a su vez modulada por otras componentes que resultan en variaciones interdiarias, como se observa en la Figura 4.10, y que incluso determinan que a igual

fecha en distintos años las mareas sean diferentes. El estuario del río Santa Cruz puede ser clasificado como un estuario muy poco estratificado, ya que la amplitud de las mareas posee orden de magnitud similar al de la profundidad [22]. Las condiciones macromareales entregan suficiente energía turbulenta para realizar una mezcla completa en la columna de agua, logrando así condiciones verticales homogéneas.

En la Figura 4.9 se representa un perfil transversal del área bajo estudio, que da cuenta de cómo los niveles hacia aguas arriba responden a las oscilaciones que experimenta el mar. El alcance de la zona de afectación de las mareas queda definida en base a lo reportado en la sección 2.2.1 *Caracterización de ondas de marea*, en que se midió una variación de nivel de 16 cm en Puente Viejo, durante una onda de marea de 11.52 m de amplitud y un caudal del río Santa Cruz del orden de 500 m³/s. Esta medición se condice con los resultados del modelo. Para condiciones de mareas medias, los niveles en Puente Viejo no son afectados. En cambio, para mareas de gran amplitud, se registran elevaciones de nivel del orden de los centímetros.

En la zona de Piedrabuena, la afectación de niveles es más notoria. Los niveles aumentan hasta 3.00 m con las ondas de mareas más amplias, y únicamente no hay afectación en los niveles cuando las ondas de marea tienen una amplitud menores a 5.00 m. Al igual que en Puente Viejo, los niveles máximos alcanzados están determinados por la amplitud de la onda de marea, pero los mínimos por el caudal del río.

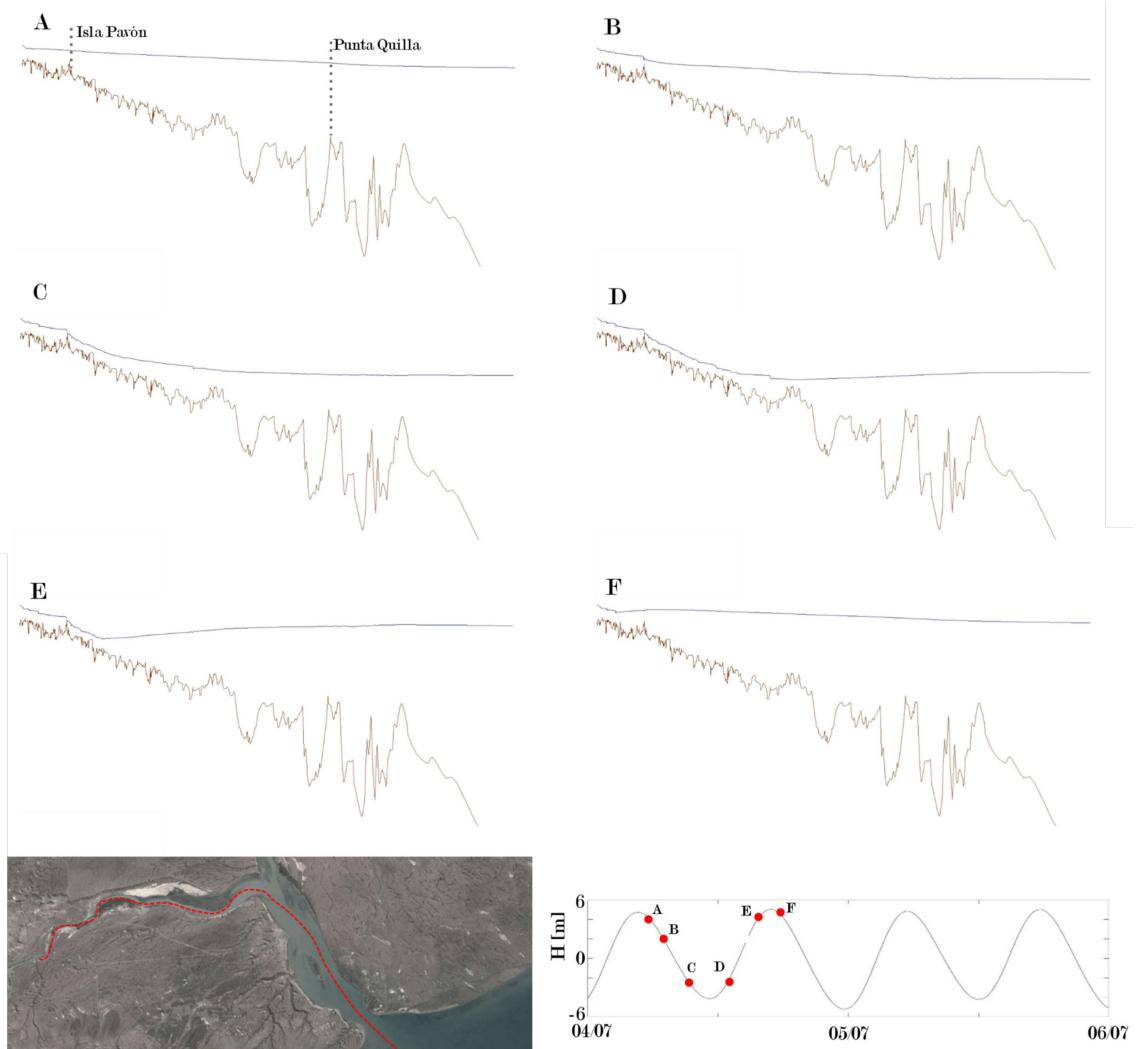


Figura 4.9: Niveles a lo largo de un corte transversal de la línea de mayor profundidad, en el tramo Puente Viejo a mar, para distintos momentos del ciclo de marea. En la parte inferior se muestra en planta el sitio de corte, así como evolución temporal de niveles indicando en forma aproximada con puntos rojos los momentos representados

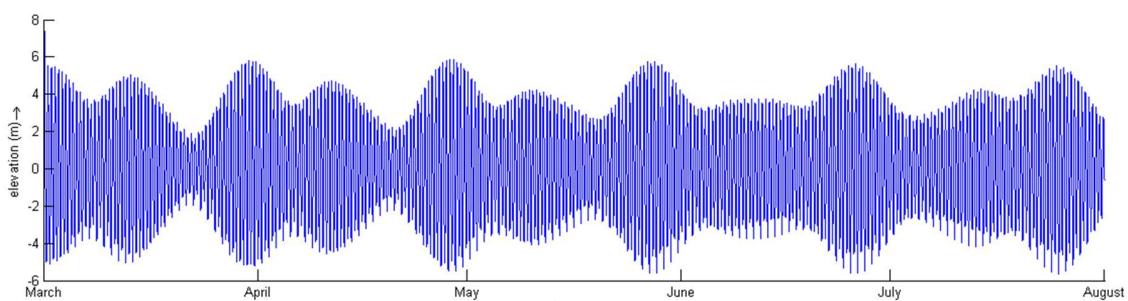


Figura 4.10: Niveles del mar modelados en el período marzo-agosto de 2017

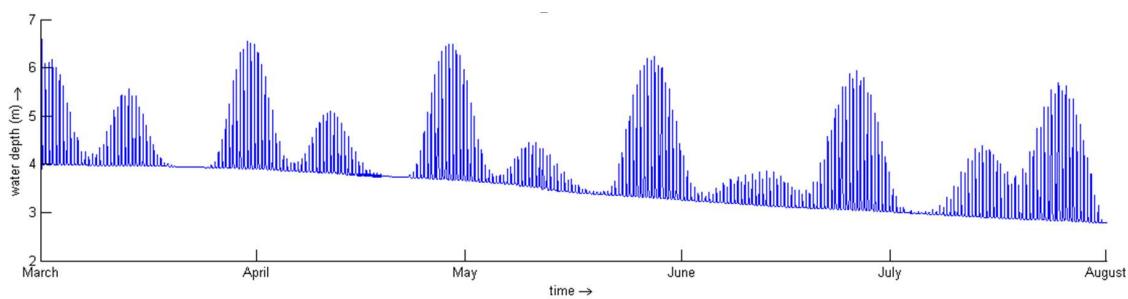


Figura 4.11: Niveles de la superficie libre en Piedrabuena modelados en el período marzo-agosto de 2017

En cuanto a la dirección y velocidades del flujo, la marea ejerce menos influencia aguas arriba que la que ejerce con los niveles. En la Figura 4.12 se ven las velocidades de la corriente en la dirección del río, en Piedrabuena. Valores negativos de velocidad (por debajo de la línea negra) implican que el sentido de escurrimiento se invierte. Esto ocurre cuando coinciden caudales bajos del río con amplitudes de marea superiores a la media.

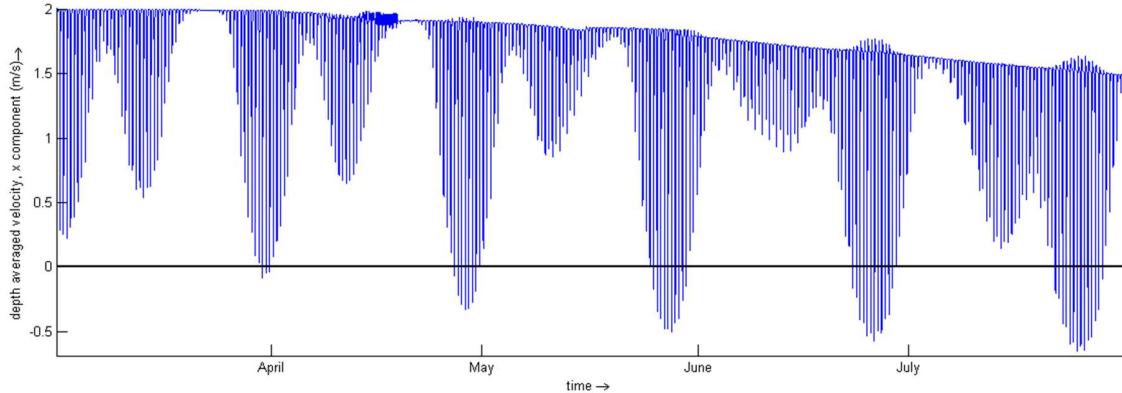


Figura 4.12: Velocidad de la corriente en dirección del río en Piedrabuena

4.1.3. Efecto de los aportes del río Santa Cruz sobre la hidrodinámica estuarial

La segunda forzante cuyo efecto se valora es el caudal del río Santa Cruz, presentando incluso mayor interés debido a que es la variable capaz de dar una idea de potenciales condiciones futuras en el estuario en escenarios de diferente manejo de caudales. Estos aportes de agua dulce presentan variabilidad estacional e interanual, que se presentan en las Figuras 4.13 y 4.14, respectivamente. Los mismos se basan en observaciones históricas diarias en la estación Charles Fuhr. Las cajas delimitan los cuartiles superior e inferior (percentiles 25 % a 75 %) y las medianas se indican con las líneas rojas horizontales dentro de cada caja. Las barras negras que se extienden desde las cajas indican 1.5 veces el rango intercuartil, mientras que los valores observados fuera de este rango se indican con cruces rojas. En la Figura 4.13 se observa la existencia anual de un período húmedo que se extiende de enero a junio, con caudales máximos en marzo cuya mediana es de $1266 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el período seco se extiende entre julio y diciembre y presenta valores mínimos de mediana $288 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre.

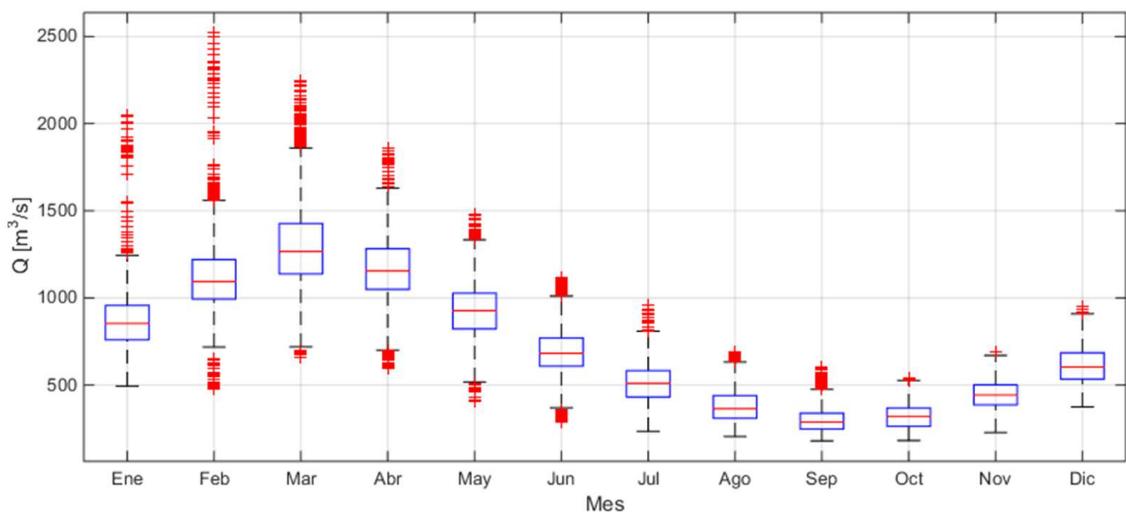


Figura 4.13: Distribución mensual de los caudales aportados por el río Santa Cruz

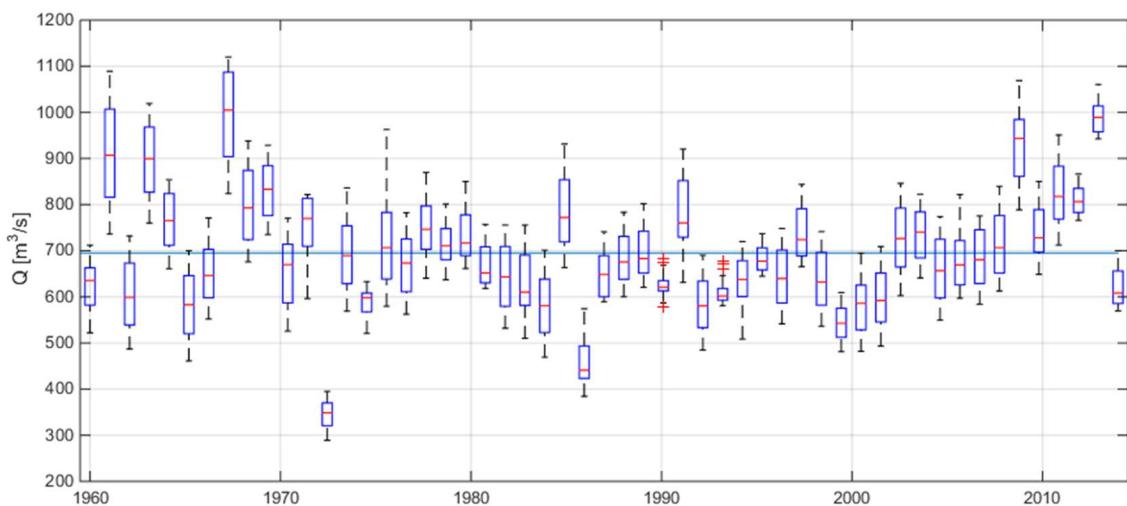


Figura 4.14: Distribución interanual de los caudales del río Santa Cruz en el mes de junio. La línea horizontal indica el caudal medio para ese mes

Considerando la variabilidad de los caudales aportados por el río, es apropiado examinar la variación de niveles y velocidades que los mismos originan. Caudales máximos y mínimos que han ocurrido en días puntuales, son de escaso interés biológico ya que por su corta duración tienen una significación ecológica limitada. Admitiendo que la biota está adaptada a caudales que se mantienen el 90 % del tiempo en condiciones naturales, y que también son de interés condiciones de año medio y aguas altas, se seleccionan escenarios con caudales que tienen probabilidades de superación de 10 %, 50 % y 90 %. A partir de los registros históricos de caudales, se generan las curvas de frecuencia acumulada representadas en la Figura 4.15: restando a 1 la probabilidad graficada se obtiene la probabilidad de excedencia.

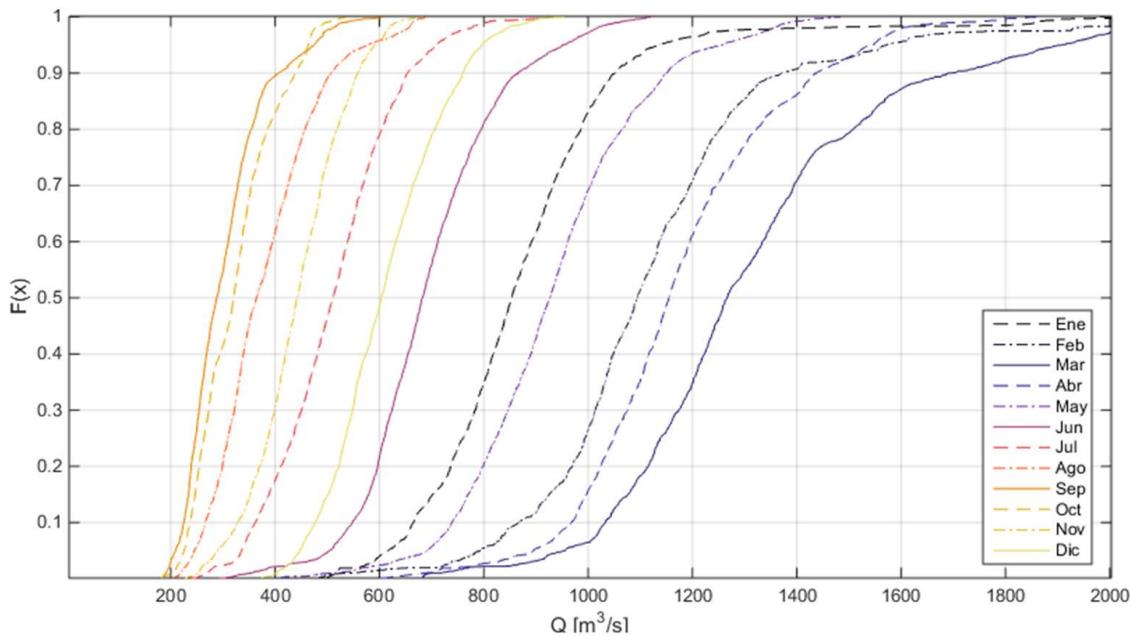


Figura 4.15: Curvas de frecuencia acumulada de caudales del río Santa Cruz para cada mes.

Se modela el funcionamiento del estuario bajo estas condiciones de borde, y se examinan niveles y velocidades en las estaciones cuya ubicación se definió en Figura 3.8.

Para el mes de diciembre, por ejemplo, se consideran caudales de excedencia $Q_{90}=470$, $Q_{50}=600$ y $Q_{10}=750 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados de las simulaciones se presentan en las Figuras 4.16 y 4.17, para ese mes y en tres estaciones ubicadas desde el río hasta el estuario. En lo que respecta a los niveles, la afectación de variaciones en el caudal queda acotada al tramo superior del río, que en particular para el mes de diciembre incluye hasta la Estación 04. De los niveles en Piedrabuena (Figura 4.16 superior), puede concluirse también que las variaciones relativas inducidas por cambios en el caudal del río son menores durante pleamar. Tal como se había anticipado, las fluctuaciones en los aportes del caudal presentan efectos imperceptibles en el tramo inferior del río Santa Cruz y en el estuario, debido a que en este sector son las mareas la forzante principal. Un comportamiento similar se observa para las velocidades de la corriente, presentadas en Figura 4.17.

A fin de valorar los efectos de cambios en los caudales de cada mes a lo largo del río, se evalúan los valores medios de niveles y magnitud de velocidades para los caudales con probabilidad de superación de 10 %, 50 % y 90 %. En las Figuras 4.18 y 4.19 se grafican los resultados para meses de aguas bajas y altas. Para el mes de marzo, estos caudales considerados son $Q_{90}=1030$, $Q_{50}=1260$ y $Q_{10}=1700 \text{ m}^3/\text{s}$, y para septiembre $Q_{90}=220$, $Q_{50}=280$ y $Q_{10}=400 \text{ m}^3/\text{s}$.

El análisis de los doce meses del año confirma que la afectación es muy pequeña en los niveles del río, disminuyendo hacia aguas abajo. En las velocidades, la variabilidad con el caudal es más notoria, pudiendo llegar a 18 % entre Q_{10} y Q_{90} en la Estación 02. La tendencia de reducción de las variaciones hacia aguas abajo se mantiene, si bien la Estación 01 constituye una excepción a la que atribuimos a alguna condición batimétrica particular de la celda en que se han monitoreado las velocidades. En general, los cambios hidrodinámicos se manifiestan hasta la confluencia con el Río Chico (Estación 07), si bien las variaciones más apreciables se dan hasta la Estación 04.

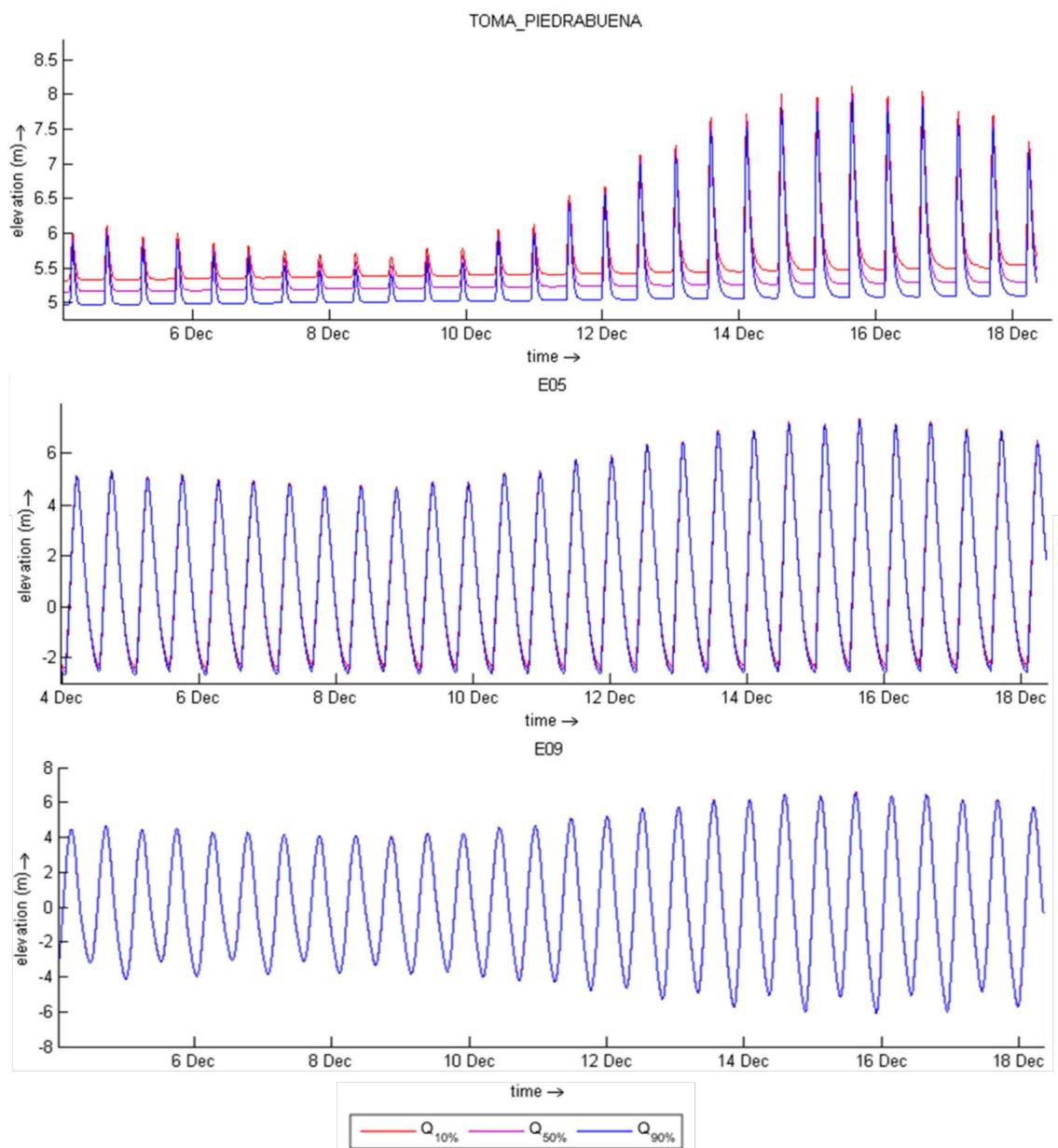


Figura 4.16: Niveles simulados para caudales del río superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo durante diciembre, en 3 progresivas: Toma de agua Estación 01 (arriba), Estación 05 (central) y Estación 09 (abajo)

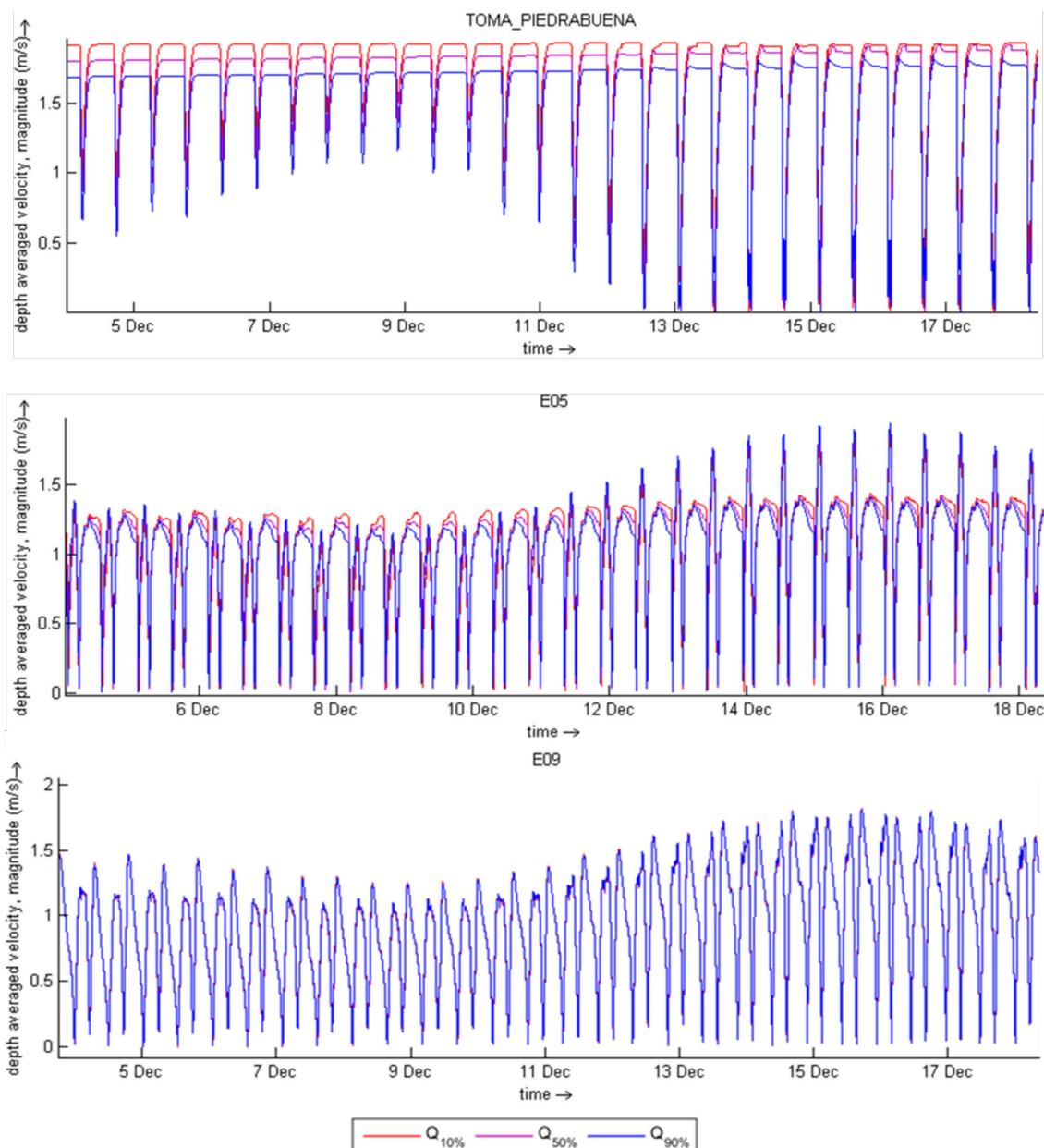


Figura 4.17: Magnitud de velocidades simuladas para caudales del río superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo durante diciembre, en 3 progresivas: Toma de agua Estación 01 (arriba), Estación 05 (central) y Estación 09 (abajo)

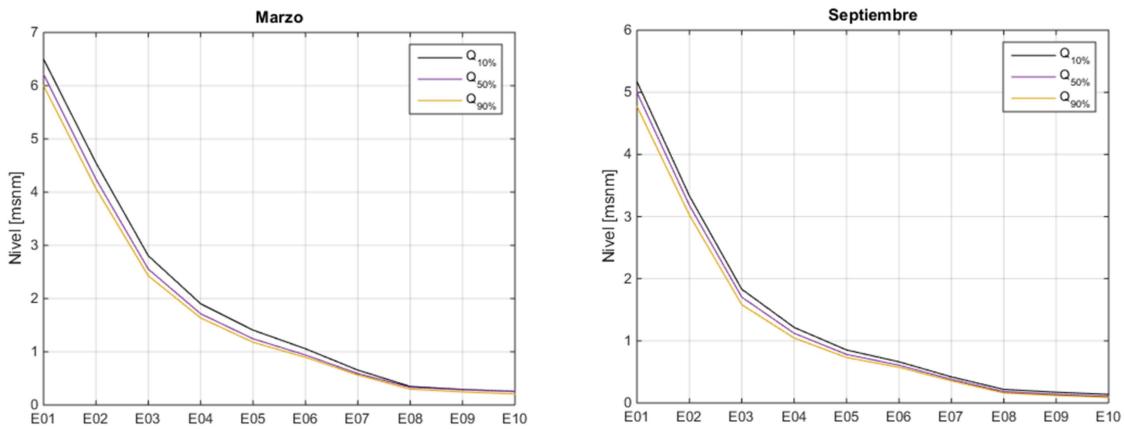


Figura 4.18: Niveles medios observados en las estaciones 01 a 10 para marzo y septiembre, considerando caudales correspondientes a valores superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo.

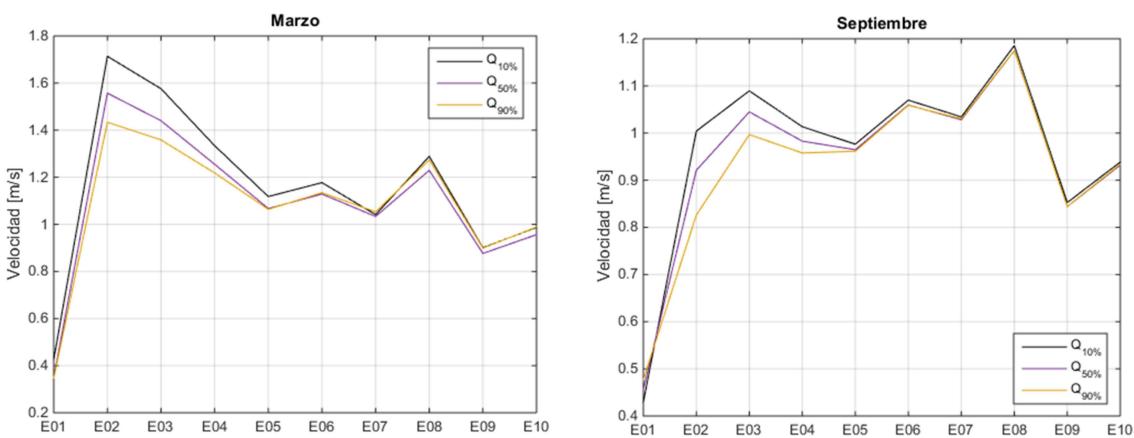


Figura 4.19: Velocidades medios observadas en las estaciones 01 a 10 para marzo y septiembre, considerando caudales correspondientes a valores superados el 10 %, 50 % y 90 % del tiempo.

Respecto a las zonas expuestas a mojado y secado, se encuentran principalmente en el sector comprendido aguas debajo de la Estación 03, por lo que los resultados anteriores sugieren que variaciones en el caudal no introducirían afectaciones de importancia. En efecto, si se consideran valores extremos observados históricamente, de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, no se observa una diferencia apreciable en las áreas mojadas en pleamar y bajamar graficadas en Figura 4.20.

Se concluye entonces que la hidrodinámica de la mayor parte del estuario, en lo que respecta a velocidades, niveles y áreas de mojado y secado, está determinada principalmente por la gran amplitud de las mareas. Por su parte, el tramo final del río Santa Cruz presenta sensibilidad a las variaciones estacionales e interanuales de los caudales, en especial durante bajamar.

Los cambios en el caudal ingresante desde río Santa Cruz afectan las velocidades y niveles del tramo final del río, pero no de la zona central del estuario.

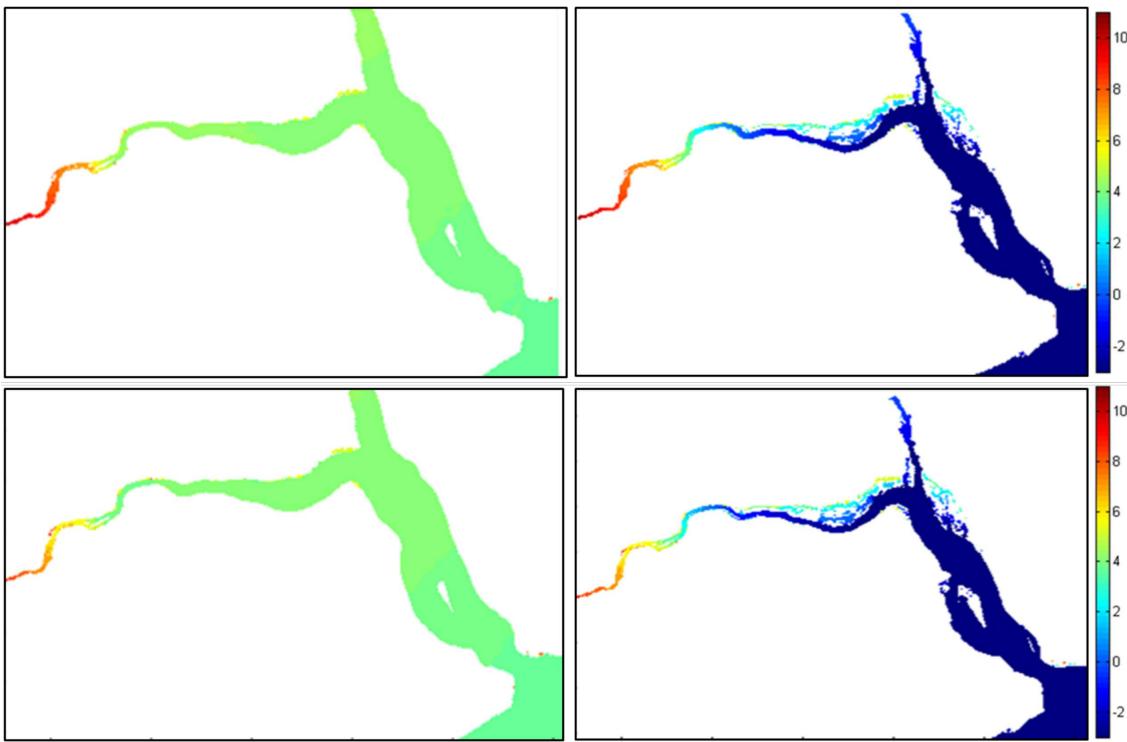


Figura 4.20: Niveles en el estuario para caudales del río Santa Cruz de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba) y $300 \text{ m}^3/\text{s}$ (abajo) considerando amplitud media de mareas. Las zonas de mojado y secado se han graficado para pleamar (izquierda) y bajamar (derecha).

4.2. Tiempo de residencia

Caracterizada la hidrodinámica del estuario en su situación actual, resta describir el transporte y permanencia de sustancias tales como contaminantes o agua dulce. Como parámetro representativo de los procesos de transporte en el estuario se determina el tiempo de residencia, entendiendo como el tiempo que requiere una masa de un trazador conservativo dentro de un estuario (en su totalidad o una parte) para reducirse en un factor de e^{-1} .

Para su determinación se utilizan diferentes procedimientos de cálculo, atendiendo a las metodologías propuestas por diversos autores, y se valora la sensibilidad que presenta el mismo al caudal aportado por el río Santa Cruz. El dominio considerado para los cálculos es el comprendido entre las secciones Piedrabuena y Boca del estuario, definidas en Figura 4.1.

4.2.1. Método del prisma de marea

Un método sencillo de aplicar es el del prisma de marea, en el cual el tiempo de vaciado (*flushing time*) se calcula dividiendo el volumen en marea alta por el prisma de marea (volumen del estuario entre la marea alta y baja). Para evitar subestimar el tiempo de vaciado, la expresión de Sanford *et al.* [24] incorpora asimismo los efectos de limpieza incompleta y el aporte adicional del río, calculando el tiempo de residencia T_r como:

$$T_r = \frac{T(V + P/2)}{(1 - b)P + R T} \quad (4.1)$$

donde V es el volumen del estuario en bajamar, P es el prisma de marea, T es el período de la marea, b es el factor de flujo de retorno y R , la descarga del río.

Para aplicar el método se requiere el cálculo de volúmenes de agua en función del nivel de marea. En la Figura 4.21 se identifica el sector de interés y la curva de volumen de agua para distintos niveles, obtenida empleando la información batimétrica disponible. Considerando una marea media de 8.11 m, en bajamar el nivel es -4 msnm y el correspondiente volumen es $V = 8.83 \times 10^8 \text{ m}^3$. El volumen de agua del estuario comprendido entre la marea alta media y la media de la marea baja es $P = 1.34 \times 10^9 \text{ m}^3$. Respecto al factor de flujo de retorno b , el mismo está dado por la relación entre la velocidad del flujo de inundación y la velocidad de flujo de salida. Si bien la sencillez del modelo promueve la estimación de las velocidades medias, se aprovecha el modelo en Delft3D para simular escenarios con diferentes caudales del río y con una marea de componente M_2 únicamente. Calculando los valores medios, resulta $b = v_{\text{entrada}}/v_{\text{salida}}$.

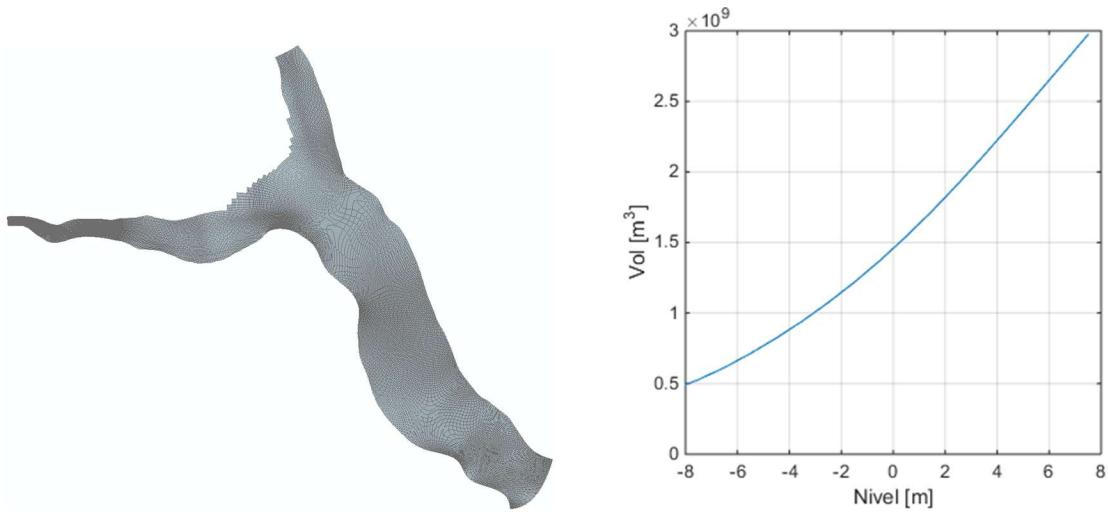


Figura 4.21: Cálculo el tiempo de residencia. Dominio para el cual se calculan los volúmenes en función de la cota (izq.). Curva nivel-volumen del estuario (der.)

El tiempo de residencia calculado según el criterio de Sanford es presentado en la Tabla 4.1. Disminuye conforme aumenta el caudal del río Santa Cruz, y se halla entre 8 y 25 días.

Tabla 4.1: Tiempo de residencia del estuario según el criterio de Sanford, para distintos valores de caudal del río Santa Cruz.

Q _{sc} [m ³ /s]	b [-]	T _{r prisma} [días]
300	0.98	25.6
500	0.96	11.8
700	0.95	9.8
900	0.95	9.5
1100	0.95	8.2

4.2.2. Experimento del trazador

Las modelaciones proporcionan información valiosa para el cálculo del tiempo de residencia. La metodología que se aplica a continuación es similar a la propuesta en trabajos como el de Edinger *et al.* [11] o Wang *et al.* [28], y consiste en liberar de un trazador no reactivo y monitorear la evolución de su concentración dentro del estuario.

Se proponen distintos escenarios caracterizados por un caudal constante del río Santa Cruz, y se fija como condición de borde en el océano una marea media (únicamente componente M_2). Se deja un período inicial de cuatro días para asegurar la estabilización de las variables hidrodinámicas, y se libera en la Estación 03 (identificada en Figura 4.1) un total de 30 000 kg de un trazador pasivo a lo largo de 5 minutos. Posteriormente se suspende el vertido y se monitorea la distribución del mismo en el estuario a lo largo de 80 días, con particular interés en el transporte advectivo acumulado en la sección transversal correspondiente a la boca del estuario. Con esta información se preparan curvas de masa de trazador que permanece dentro del estuario en función del tiempo.

El método aplicado por Edinger *et al.* permite el cálculo del tiempo de vaciado, el cual coincide con el tiempo de residencia en caso de que la mezcla del agua que ingresa y de la que está dentro del estuario sea completa en cada ciclo de marea. Se asume que el decaimiento en la masa de trazador dentro del estuario sigue la ley

$$M(t) = M_0 \exp(-\gamma t), \quad (4.2)$$

donde $M(t)$ es la masa de trazador, M_0 es la masa inicial, t es el tiempo (siendo $t_0 = 0$ el momento de volcado) y γ es el coeficiente de decaimiento, que se determina ajustando una función de este tipo a los datos observados. Este procedimiento se muestra en la Figura 4.22, aunque se aprecia que quizá el modelo exponencial no sea el más adecuado por ser un ajuste mejorable.

La tasa de vaciado es $T_f = \gamma^{-1}$, y la vida media del trazador dentro del estuario está dada por:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\gamma}. \quad (4.3)$$

Nótese que para hacer el ajuste de γ no se ha tenido en cuenta un período de tiempo inicial Δt en el cual la concentración permanece constante, debido a que, habiéndose liberado la totalidad del trazador, las primeras partículas del mismo no han llegado aún a la boca. Se adiciona entonces este retraso, calculando en para el estuario del río Santa Cruz $T_f = t_{1/2} + \Delta t$. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.2, y resultan en un rango de valores de entre 5 y 12 días.

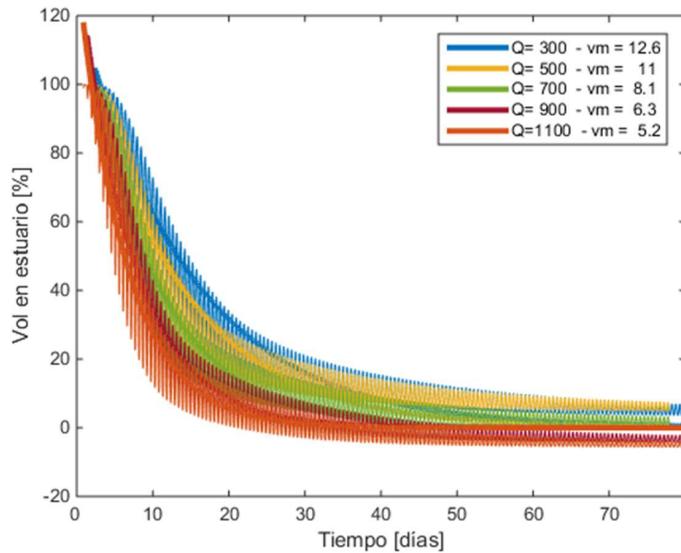


Figura 4.22: Volumen del trazador remanente en el estuario en función del tiempo para diferentes caudales del río Santa Cruz, con sus respectivos ajustes de la forma $M(t) = M_0 \exp(-\gamma t)$

Tabla 4.2: Tiempo de vaciado según el método de Edinger, para distintos caudales del río Santa Cruz.

$Q_{sc} [\text{m}^3/\text{s}]$	$\gamma [\text{s}^{-1}]$	$T_f [\text{días}]$
300	0.07	12.6
500	0.08	11.0
700	0.10	8.1
900	0.14	6.3
1100	0.16	5.2

Por otra parte, la evolución temporal de masa de trazador que permanece dentro del estuario también es útil para aplicar el procedimiento implementado por Wang *et al.*, que abandona la hipótesis de que el agua para vaciar el estuario se mezcla completamente con el agua del estuario en cada ciclo de marea. La información puede usarse para calcular la concentración del trazador en la misma fase del ciclo y así evalúa

$$t_r = \frac{1}{M_0} \int_0^\infty -\frac{dM(t)}{dt} t dt \quad (4.4)$$

donde T_r es el tiempo de residencia. En los casos evaluados, el límite superior de integración para el cálculo de T_r es $t = 80$ días, para el cual se observa que la concentración se vuelve asintótica, y se calcula el área bajo la curva $t (-dM/dt)$. Los resultados obtenidos se plasman en la Tabla 4.3. Resultan en valores algo mayores, de entre 13 y 18 días.

Tabla 4.3: Tiempo de residencia calculado siguiendo el procedimiento de Wang, para distintos caudales del río Santa Cruz.

$Q_{sc} [\text{m}^3/\text{s}]$	$T_r [\text{días}]$
300	18.8
500	14.6
700	14.3
900	13.9
1100	13.3

4.2.3. Discusión

Los distintos métodos aplicados sugieren tiempos de residencia de magnitudes similares. Posiblemente los resultados más fiables son los calculados siguiendo el procedimiento de Wang *et al.*, que reduce el número de hipótesis. En todos los casos se observa una reducción en los tiempos de residencia con el aumento del caudal del río Santa Cruz.

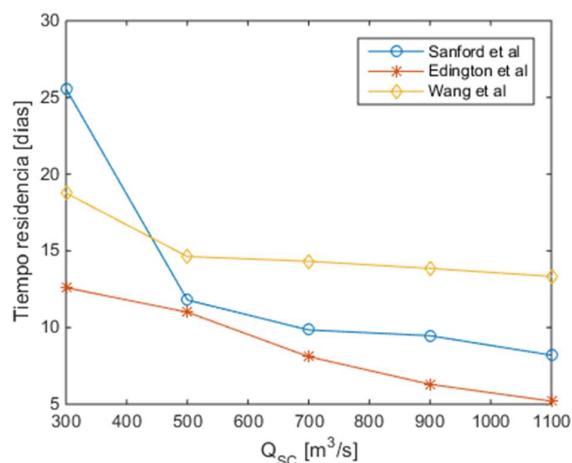


Figura 4.23: Tiempo de residencia en función del caudal del río Santa Cruz, estimado con distintos métodos.

El tiempo de residencia es una medida del tiempo que una masa de agua permanece dentro del estuario antes de ser reemplazada por el intercambio con aguas exteriores. En el estuario del río Santa Cruz, se ha estimado mediante distintos métodos, obteniéndose valores del orden de dos semanas, que disminuyen a medida que aumenta el caudal del río.

A fin de ofrecer una valoración cualitativa del transporte dentro del estuario, también se han hecho simulaciones liberando por separado partículas inertes puntuales (ya no sustancias). En la Figura 4.24 puede observarse el camino seguido por una partícula hasta dejar el estuario. A medida que la misma se desplaza hacia aguas abajo, el efecto oscilatorio de la marea se vuelve más marcado, destacando que la hidrodinámica del estuario, si bien afectada por el río Santa Cruz, está principalmente dominada por la marea. Es de interés recalcar que aun para idénticos escenarios las trayectorias pueden cambiar, siendo el caso presentado un ejemplo aleatorio.

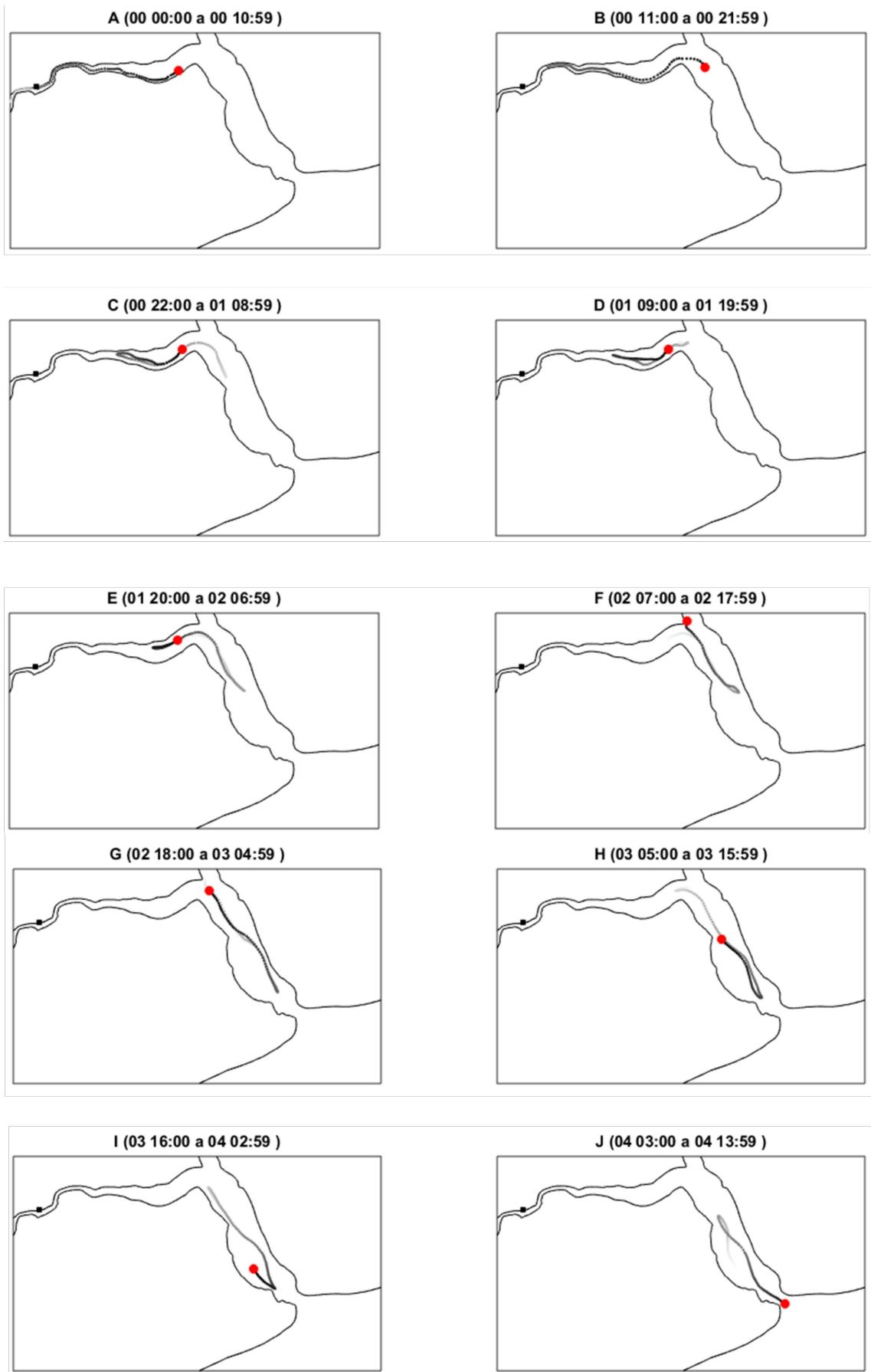


Figura 4.24: Secuencia de la trayectoria de una partícula liberada en el Puente Viejo hasta que sale del estuario. Se indica el intervalo de tiempo en días, horas y minutos desde la liberación.

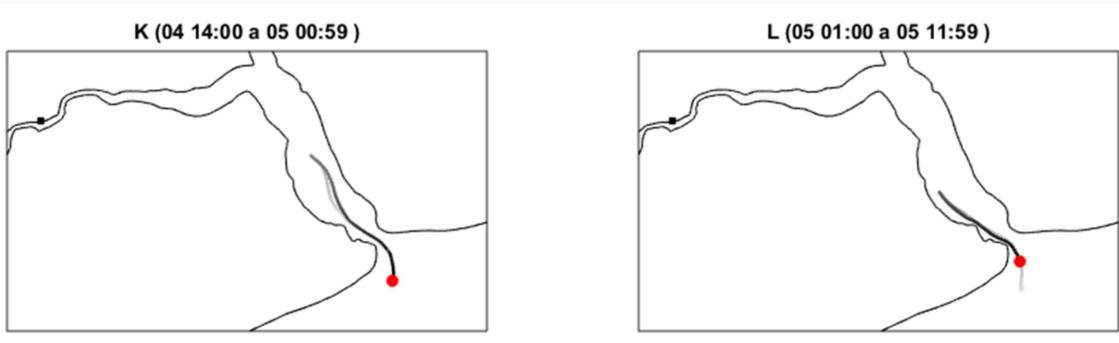


Figura 4.24 (continuación): Secuencia de la trayectoria de una partícula liberada en el Puente Viejo hasta que sale del estuario. Se indica el intervalo de tiempo representado en días, horas y minutos desde la liberación.

Para complementar la Figura 4.24, se invita al lector a escanear el código QR de la Figura 4.25, que enlaza a una animación del recorrido de la partícula en el estuario. Esta visualización permite apreciar de forma dinámica la influencia de la marea sobre su trayectoria.



Figura 4.25: Código QR que enlaza a un video con la animación de la trayectoria de la partícula mostrada en la Figura 4.24.

4.3. Salinidad

La variación temporal y espacial de la salinidad es de gran importancia para determinar la distribución de la biota y del hábitat. Por ello se dedica esta sección a caracterizar la variabilidad de la misma dentro del estuario frente a diferentes regímenes de flujo. Para ello, se presenta un estudio estadístico de las variaciones temporales que experimenta a fin de determinar su respuesta ante variaciones de los forzantes externos. Para los forzantes contemplados se considerarán distintas escalas de tiempo, abarcando fluctuaciones diarias, estacionales e interanuales.

Parte de las herramientas usadas para cuantificar esta variabilidad está tomada del trabajo de Morey y Dukhovskoy [19], en el cual se describen métodos de análisis estadísticos aplicados a series temporales de datos de salinidad de un estuario gobernado por múltiples variables de control. En particular, en el mismo se hace uso de funciones de probabilidad acumulada (FPA), que permiten calcular en una ubicación fija la probabilidad de que la salinidad sea menor o igual que cierto valor restando a 1 el valor FPA.

Comprender la dependencia de la salinidad con los caudales de los ríos y con las mareas es fun-

damental para entender la física y el comportamiento del estuario. Conceptualmente, la descarga de agua dulce del río tiende a empujar al agua salada hacia afuera del estuario, reduciendo su salinidad, mientras que las corrientes y la dispersión asociadas a las mareas, tienden a transportar la salinidad hacia aguas arriba. Estudios de la importancia de estos factores han sido llevados a cabo en numerosos estuarios, obteniendo resultados distintos en función de las características del mismo (véanse Morey y Dukhovskoy, Burau *et al.* [4], Garvine *et al.* [15]).

Los valores de salinidad y su distribución a lo largo del estuario son también dependientes de las condiciones previas en el mismo. El tiempo de residencia del orden de 10 días hace que las características medias del estuario¹ posean una resiliencia de magnitud relevante. Las propiedades de las masas de agua que son movidas durante los ciclos de marea permanecen poco alteradas durante dichos ciclos, por lo cual el cambio de los parámetros medios de salinidad son poco alterados entre ciclo y ciclo de marea. Esta cualidad hace que cambios inmediatos en los caudales del río o en las amplitudes no generen alteraciones inmediatas en la salinidad. Así también, modificaciones de caudales o mareas durante períodos largos generan mayor impacto que modificaciones durante períodos cortos.

4.3.1. Influencia del caudal del río Santa Cruz

Considerando las características macromareales del estuario, y los caudales del río Santa Cruz (con valores medios del orden de 700 m³/s), se podría esperar que los mismos no tengan una influencia significativa en los valores y distribución de salinidad. Sin embargo, el efecto de caudales bajos durante un período prolongado (del orden de 20 días), puede ejercer un efecto importante en la salinidad media del estuario. Caudales bajos implicarán que menos agua dulce entrará al estuario, lo cual a lo largo del tiempo causará un aumento de la salinidad media. De igual manera ocurre para caudales altos. Si los mismos se mantienen durante un tiempo prolongado, disminuirá la salinidad media del estuario. Este fenómeno se puede apreciar a lo largo del año hidrológico. Durante los meses de crecida (febrero – abril) la salinidad media en cualquier estación del estuario disminuye, mientras que para los meses de estiaje (agosto–octubre), la salinidad media aumenta según se observa en la Figura 4.26. Esto mismo también se puede verificar para la salinidad máxima registrada durante cada mes en las estaciones de control. Se aprecia que durante los meses de estiaje, los picos de salinidad son mayores en cualquiera de las estaciones que durante los meses de crecida.

En las curvas de salinidad máxima es también posible analizar el alcance del frente salino en los distintos meses del año. Durante los meses de agosto, septiembre y octubre la Estación 03 registró picos de salinidad del orden de 3 ppt, mientras que durante febrero y marzo recién la Estación 05 registró valores máximos de salinidad de esa magnitud. Esto estaría indicando que durante los meses de estiaje, el frente salino avanzó hasta la Estación 03, mientras que en las épocas de crecida el frente salino solo avanzó hasta algún punto entre las Estaciones 04 y 05.

¹Si bien existe una oscilación diaria producto de las mareas, es posible promediar las diferentes variables a lo largo de un ciclo de marea para obtener características medias.

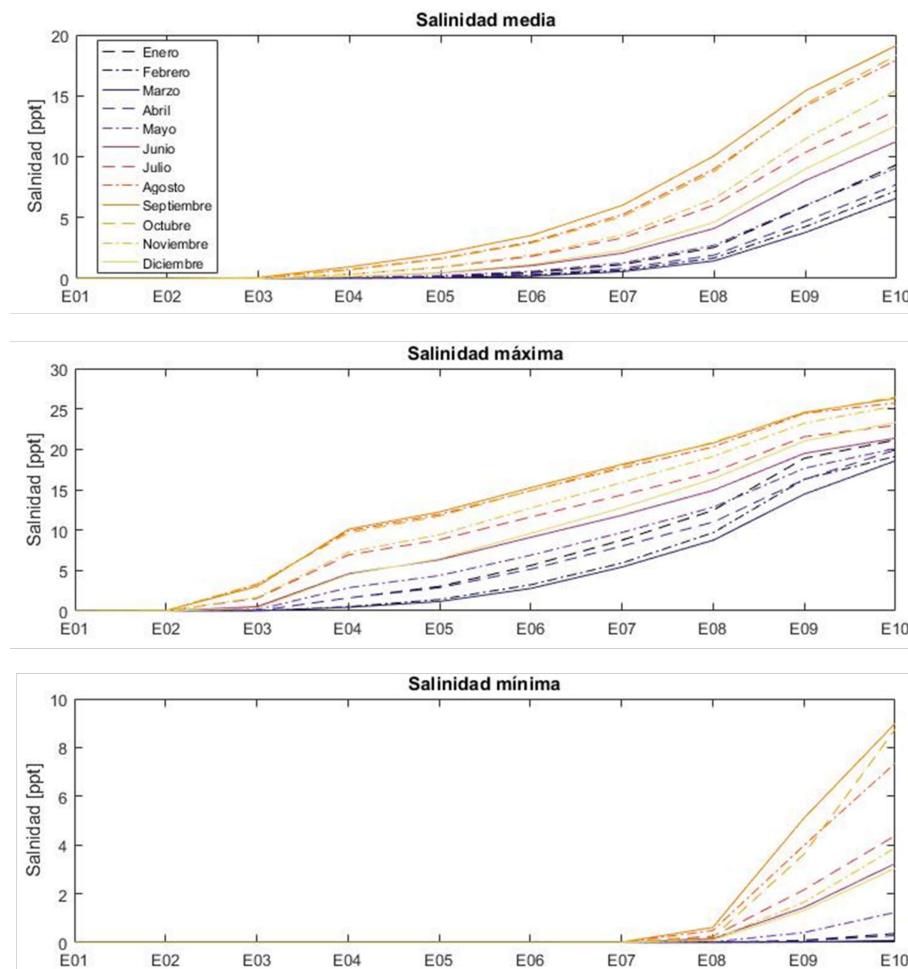


Figura 4.26: Valores medios (arriba), máximos (medio) y mínimos (abajo) de la salinidad a lo largo del año, en las distintas estaciones de medición

Estos resultados nos estarían indicando que el alcance del frente salino estaría influenciado por el caudal del río Santa Cruz. Por otro lado, las curvas de salinidad mínima nos estarían indicando el alcance del agua dulce. Se puede ver que durante los meses de estiaje el agua dulce alcanza la Estación 08 mientras que en los de crecida la Estación 10.

Los resultados de este análisis están indicando una gran variación de la salinidad en el estuario a lo largo del año. Si comparamos la variación entre la curva superior y la inferior de los gráficos de la Figura 4.26 se ve que la salinidad en cualquier punto del estuario no varía únicamente con las ondas de marea, sino que mes a mes los valores medios cambian, en función del caudal del río Santa Cruz. En la Tabla 4.4 se indica la variación de los distintos parámetros en las estaciones de control. Por ejemplo, en la Estación 08, la salinidad media varía desde 3.78 ppt en marzo hasta 15.40 ppt en septiembre, la salinidad máxima desde 8.75 ppt en marzo hasta 20.86 ppt en octubre, y la salinidad mínima desde 0 ppt durante enero-marzo hasta 5.09 en septiembre.

Tabla 4.4: Variación de los parámetros de salinidad (salinidad media, mínima y máxima, en ppt) en las 10 estaciones de control a lo largo de un año

Estación	Sal _{med}	Sal _{máx}	Sal _{mín}
E01	0.00	0.00	0.00
E02	0.00	0.04	0.00
E03	0.07	3.33	0.00
E04	0.95	9.68	0.00
E05	1.97	11.91	0.00
E06	3.35	12.47	0.00
E07	5.45	12.71	0.00
E08	8.64	12.12	0.61
E09	11.63	10.12	5.85
E10	12.56	7.89	8.91

Los caudales del río Santa Cruz no varían únicamente mes a mes, sino que también lo hacen interanualmente. El efecto de esta variación interanual afectará también la salinidad en el estuario. Para cuantificar esta variación se hicieron modelaciones con los caudales de 10 % y 90 % de probabilidad de superación (Tabla 4.5). Dichos valores fueron elegidos porque tienen un período de retorno relativamente bajo, y por ende es esperable que ocurran cada un tiempo del orden de la década.

Tabla 4.5: Caudales medios mensuales y, con 10 % y 90 % de probabilidad de superación medidos en Charles Fuhr

Mes	Q _{medio} [m ³ /s]	Q _{10 %} [m ³ /s]	Q _{90 %} [m ³ /s]
Enero	849.6	1018.1	687.2
Febrero	1105.8	1382.4	882.5
Marzo	1305.7	1713.5	1031.5
Abril	1171.3	1453.3	985.1
Mayo	934.8	1135.5	773.8
Junio	699.4	856.4	565.8
Julio	518.0	660.4	384.4
Agosto	390.5	498.2	276.8
Septiembre	312.4	401.7	225.6
Octubre	336.8	428.7	241.5
Noviembre	453.5	548.0	343.0
Diciembre	615.9	730.3	486.8

Como es de esperar, durante los años hidrológicamente pobres, la salinidad media del estuario aumentará, mientras que para los años hidrológicamente ricos, la salinidad media disminuirá. Los resultados de las simulaciones (Figura 4.27) indican que la variación de salinidad media es del orden de ± 1 ppt en la Estación 06 y de ± 4 ppt en la Estación 10. En las estaciones anteriores, la baja salinidad hace que las variaciones sean despreciables.

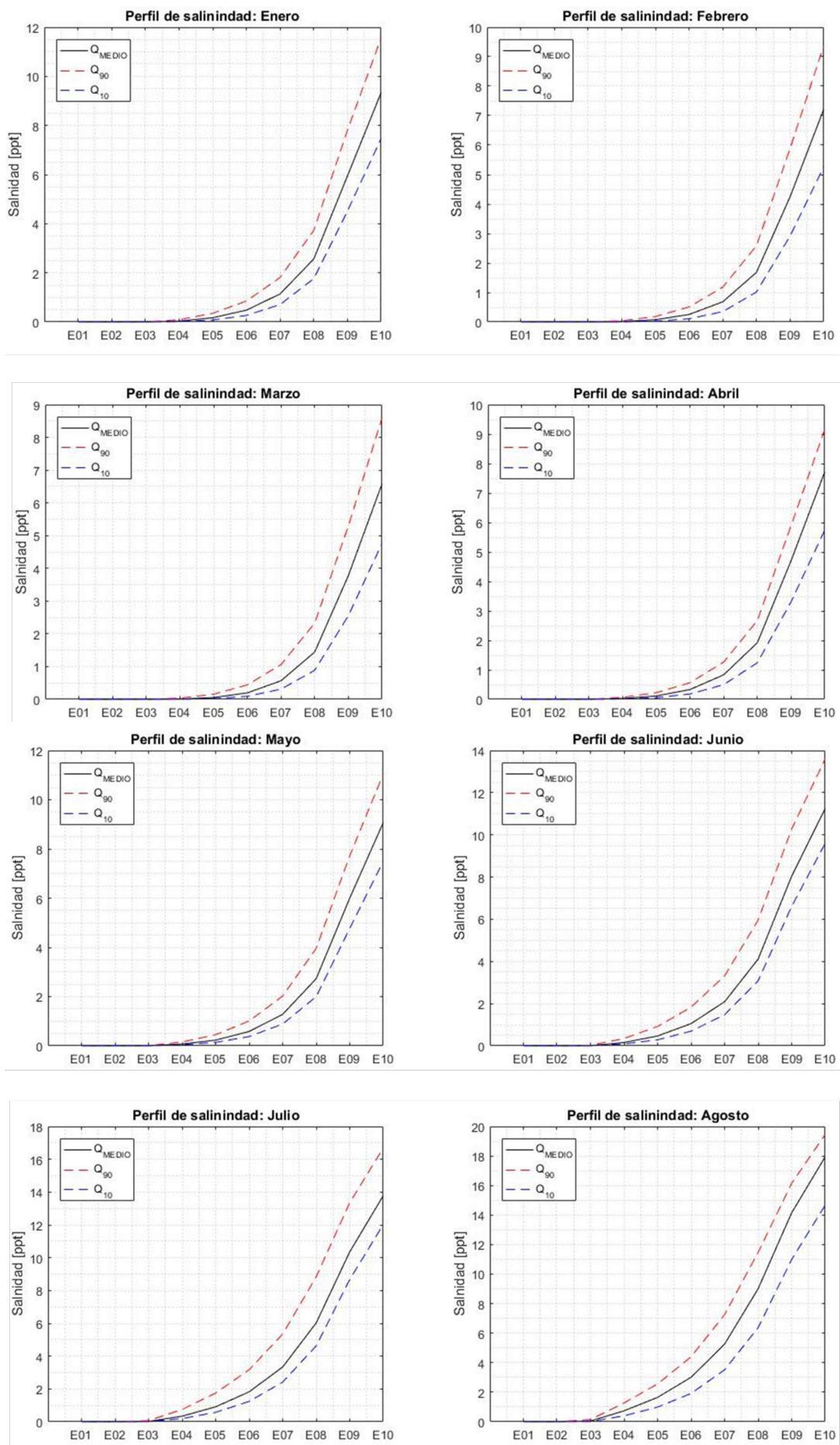


Figura 4.27: Perfiles de salinidad para los meses desde enero hasta agosto, para Q_{90} , Q_{medio} y Q_{10}

La variación de salinidad producto de la variación interanual de caudales es de una magnitud relevante, pero inferior a la variación natural entre los períodos de crecida y de estiaje. Dada la regularidad de los caudales de cada mes, y la regularidad que tienen estos mismos año a año, los resultados de esta simulación indicarían la variación “natural” que podría tener la salinidad dentro de un mismo mes del año.

4.3.2. Influencia de las mareas

Las mareas generan una gran influencia en la salinidad. La variación de niveles genera una importante fluctuación en los valores de la salinidad durante el ciclo de marea. Durante las corrientes de flujo, el agua salada se desplaza hacia aguas arriba, alcanzando su punto más alto en la pleamar. En este momento todos los puntos del estuario alcanzan un máximo de salinidad. Cuando el agua se comienza a retirar, la salinidad disminuye, hasta alcanzar su valor mínimo durante la bajamar. Los valores máximos y mínimos de salinidad en un punto no permanecen constantes a lo largo de una serie de ciclos de marea, sino que son modulados de la misma manera que es modulada la amplitud de marea. Niveles mayores alcanzados por la manera generan picos más altos de salinidad mientras que niveles menores tienden a generar valores menores de salinidad (Figura 4.28).

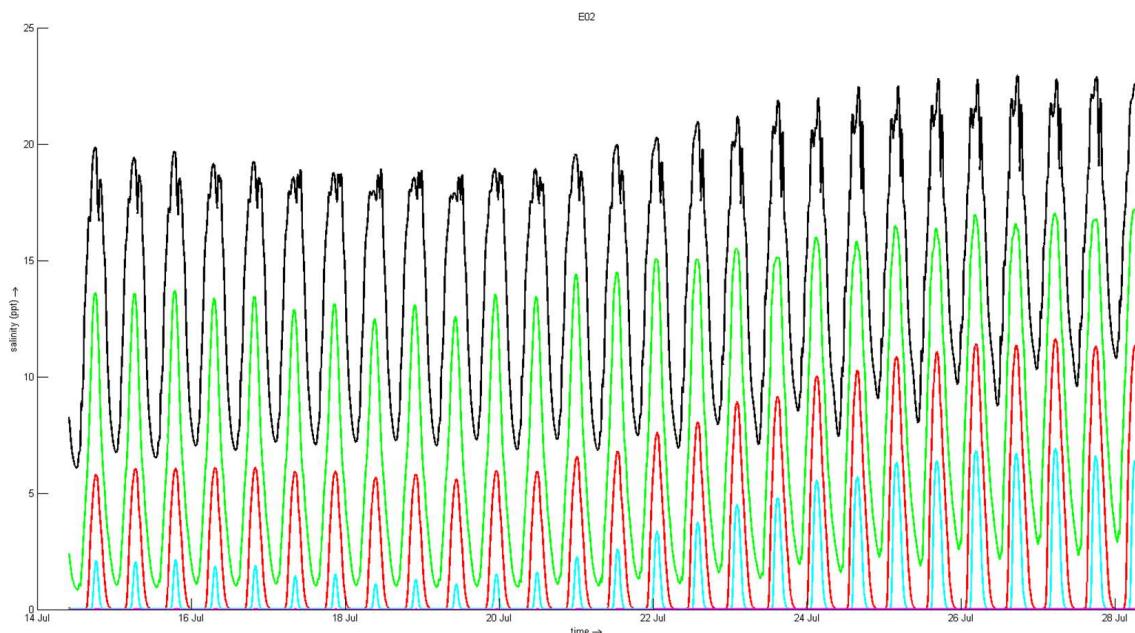


Figura 4.28: Evolución temporal de la salinidad a lo largo de dos semanas, para distintas estaciones de monitoreo

En la Figura 4.29 puede verse la distribución de salinidad durante una pleamar y una bajamar. Se aprecia cómo durante la pleamar el agua salada avanza hacia aguas arriba del río Santa Cruz (especialmente sobre el *thalweg*) y cómo durante la bajamar el agua salada se desplaza hacia aguas abajo.

Una animación en video disponible al escanear el código QR de la Figura 4.30 permite visualizar en forma dinámica la evolución temporal de la distribución de la salinidad.

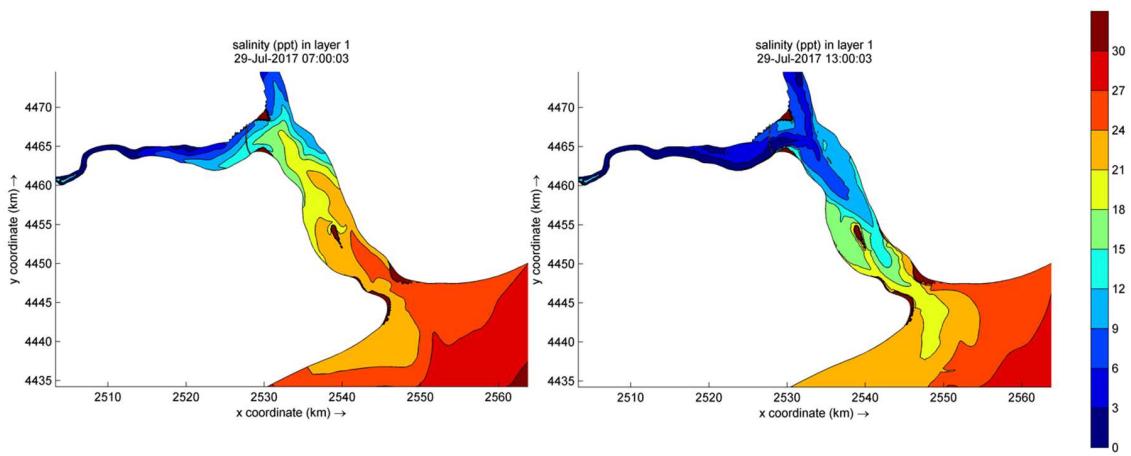


Figura 4.29: Distribución de salinidad durante pleamar (izq.) y bajamar (der.)



Figura 4.30: Código QR que enlaza a un video con la animación de la distribución de la salinidad durante una marea de gran amplitud.

El alcance del agua salobre sobre el río Santa Cruz es muy dependiente de la amplitud de mareas. El frente salino avanza más sobre el río cuando la marea alcanza valores altos que cuando alcanza valores bajos. Este fenómeno se puede apreciar con mucha claridad comparando las distribuciones de salinidad en pleamar durante las mareas de sicigia y cuadratura (Figura 4.31). Durante las mareas de sicigia el frente salino avanza alrededor de 20 km aguas arriba de la confluencia, mientras que durante mareas de cuadratura apenas alcanza a la misma.

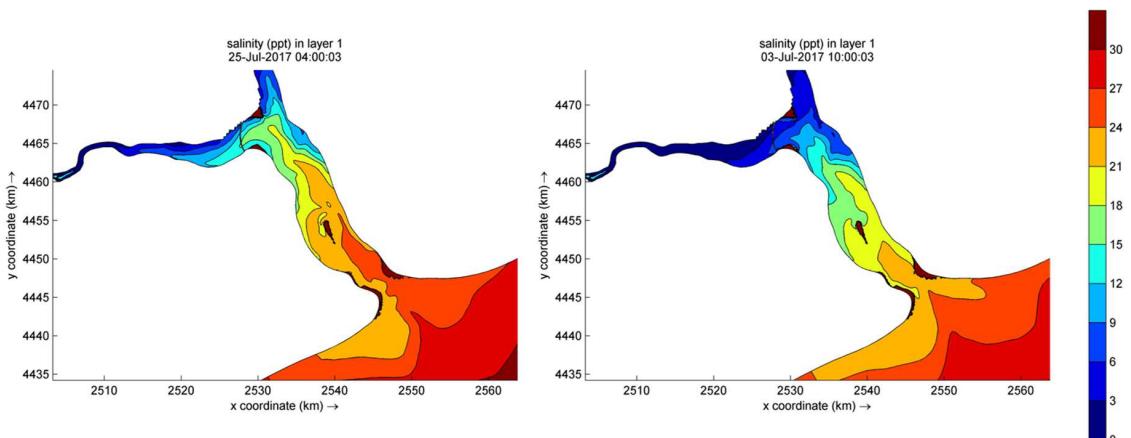


Figura 4.31: Distribución de salinidad durante pleamar para una amplitud de marea de 12 m (izq.) y de 6 m (der.)

Al caracterizar la salinidad en los distintos meses del año, es importante tener en cuenta la variación interanual de mareas. Por ejemplo, durante el mes de julio del 2016 la amplitud de

marea varió entre 12 m y 4 m, mientras que en julio del 2017, la variación será mucho menor (Figura 4.32). Esta variación en la modulación hará que los valores de salinidad para un mismo mes cambien año a año². Para cuantificar esta diferencia se modelaron cuatro meses (abril-julio) de cinco años consecutivos (2015-2019), manteniendo el valor medio mensual de caudal.

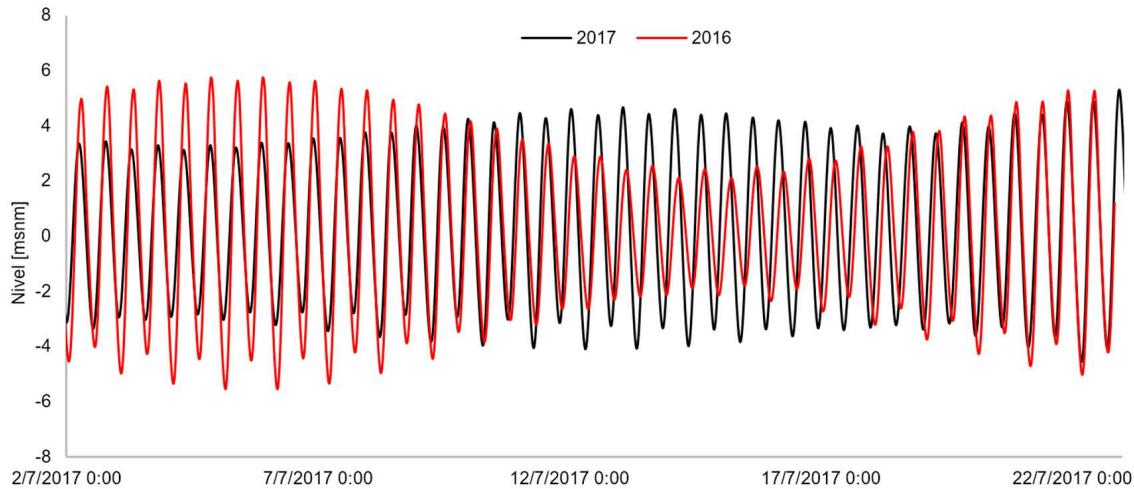


Figura 4.32: Nivel de la superficie libre en Punta Quilla durante el mes de julio del 2016 y 2017

Los resultados de dichas simulaciones indican que las diferentes modulaciones de la marea no se traducen en cambios significativos en los parámetros medios de la salinidad (Tabla 4.6). Los cambios en la salinidad media para todos los casos son menores a 0.2 ppt. En el caso de la salinidad máxima y mínima, se aprecian variaciones más significativas. La salinidad máxima tiene variaciones de hasta 3.0 ppt y la mínima de 1.1 ppt. Esta diferencia se puede entender a partir del hecho de que los valores máximos y mínimos están muy influenciados por los valores máximos y mínimos de mareas presentes en cada año.

²Las variaciones de los caudales de los ríos Chico y Santa Cruz a lo largo de los años son factores que también generarán variaciones interanuales de salinidad.

Tabla 4.6: Valores de salinidad media, máxima y mínima para los períodos de abril-julio durante los años 2015-2019 en las Estaciones 05, 07 y 09

Mes	Año	E05			E07			E09		
		S _{med}	S _{máx}	S _{mín}	S _{med}	S _{máx}	S _{mín}	S _{med}	S _{máx}	S _{mín}
Abril	2015	0.1	2.8	0.0	0.7	7.9	0.0	16.7	4.6	0.1
	2016	0.1	2.7	0.0	0.7	7.8	0.0	16.5	4.6	0.1
	2017	0.1	2.9	0.0	0.7	8.0	0.0	16.3	4.7	0.1
	2018	0.1	1.8	0.0	0.7	6.5	0.0	17.0	4.6	0.0
	2019	0.1	2.5	0.0	0.7	7.6	0.0	16.7	4.4	0.0
Mayo	2015	0.2	3.5	0.0	1.1	8.8	0.0	17.4	5.9	0.3
	2016	0.2	3.5	0.0	1.2	8.8	0.0	16.9	6.0	0.5
	2017	0.2	4.4	0.0	1.3	9.7	0.0	17.7	6.2	0.7
	2018	0.2	3.1	0.0	1.3	8.3	0.0	16.6	6.0	0.2
	2019	0.2	3.1	0.0	1.1	8.3	0.0	17.3	5.7	0.2
Junio	2015	0.4	4.6	0.0	1.9	10.0	0.0	18.2	7.7	0.4
	2016	0.4	4.9	0.0	2.0	10.4	0.0	18.4	7.8	1.1
	2017	0.5	6.3	0.0	2.1	11.8	0.0	19.5	8.0	1.4
	2018	0.4	5.2	0.0	1.9	10.6	0.0	18.5	7.7	0.7
	2019	0.4	3.9	0.0	1.8	8.8	0.0	18.1	7.5	0.3
Julio	2015	0.8	5.9	0.0	3.2	11.7	0.0	20.0	10.4	2.7
	2016	1.0	7.0	0.0	3.4	12.7	0.0	20.2	10.6	2.9
	2017	0.9	8.8	0.0	3.5	14.3	0.0	21.6	10.6	2.9
	2018	0.8	7.9	0.0	3.2	13.4	0.0	20.7	10.4	2.9
	2019	0.7	5.8	0.0	3.0	11.4	0.0	19.6	10.1	2.6

4.3.3. Alcance del frente salino

La sensibilidad ante los niveles de marea puede cuantificarse comparando la variación de la posición de la interfase entre agua dulce y salada durante un ciclo de marea. Dada la modulación de las amplitudes de marea astronómica, es pertinente contemplar escenarios correspondientes mareas de mayor y menor amplitud. La Figura 4.33 constituye un ejemplo, e ilustra los efectos de las mareas extremas observadas en el transcurso del mes de julio de 2016, de interés por tratarse de la época de invernada del Macá Tobiano. En el primer caso, cuando la amplitud de mareas es máxima y alcanza 11.20 m, el frente salino se ubica en la posición *a* en pleamar y se desplaza 20 km aguas abajo hasta *b* en bajamar. En el segundo caso, cuando la amplitud de mareas es de 4.00 m, la forzante de las mareas ve reducido su efecto y el río es capaz de advectar el frente hacia aguas abajo. En tal caso, la interfase se desplaza 9 km en un ciclo de marea, entre las posiciones *c* y *d*. Según se desprende de la Figura 4.33, en el mes de Julio de 2016 se posicionó entre el punto *a* en el Río Santa Cruz y el punto *d* aguas abajo de la confluencia de los ríos Santa Cruz y Chico, abarcando un desplazamiento total de unos 25 km.



Figura 4.33: Desplazamiento en un ciclo de marea del frente salino durante las mareas extremas del mes de julio de 2016.

4.3.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el modelo permiten caracterizar la salinidad a lo largo del estuario. Se puede apreciar un gradiente salino que disminuye desde la boca del estuario hacia aguas arriba del río Santa Cruz, y que alcanza un sector variable que abarca desde algunos kilómetros aguas abajo del pueblo Comandante Luis Piedrabuena, hasta la zona de confluencia de los ríos Santa Cruz y Chico. Los niveles de salinidad en los distintos puntos del estuario poseen una significativa variación en diferentes escalas de tiempo:

- Variación de salinidad con la onda de marea: Con un período de 12.42hs, la oscilación de nivel producto del paso de una onda de marea genera también importantes variaciones de salinidad. En la pleamar, la salinidad alcanza un valor máximo, y durante bajamar, un mínimo. Esta oscilación tiene una magnitud muy importante, y es quizás la más importante de todas desde el aspecto de la magnitud de la oscilación y de la brusquedad con la que ocurre.
- Variación de salinidad con la amplitud de marea: Los niveles de salinidad varían con la amplitud de marea. Las mareas de sicigia generan valores mayores de salinidad en el estuario, particularmente en la zona del río Santa Cruz. Las mareas de cuadratura generan valores menores de salinidad, y además hacen que el frente salino no alcance zonas que normalmente suele alcanzar, ocasionando el aumento de la zona con agua dulce.
- Variación de salinidad durante un año hidrológico: Las importantes variaciones de caudal entre los meses de crecida (enero–marzo) y de estiaje (agosto–octubre) hacen que la salinidad media experimente un gran cambio dentro del estuario. Durante los meses de estiaje todos los puntos de análisis presentan valores significativamente mayores de salinidad que los que existen durante los meses de crecida.
- Variación de salinidad durante los años: Además de considerar la variación de los caudales

mes a mes, es necesario contemplar el efecto de los años hidrológicamente ricos e hidrológicamente pobres. La variación de salinidad por este motivo es de magnitud relevante, pero menor a la variación que naturalmente se da durante un año hidrológico. La magnitud de esta variación da un parámetro de cuál sería la variación de salinidad que naturalmente se da durante un mes determinado a lo largo de los años. La variación interanual producto de la variación de la modulación de la marea no tiene una magnitud relevante.

El alcance del frente salino depende del caudal del río Santa Cruz y de la amplitud de las mareas, existiendo una relación inversa con el primero y directa con el segundo. Estas variaciones se manifiestan en dos escalas temporales: mientras que el ciclo mareal semidiurno varía cada aproximadamente 15 días (entre cuadraturas y siccias), las variaciones del caudal ocurren en escalas estacionales, con unos seis meses entre crecidas y estiajes.

4.4. Temperatura del agua

Las observaciones en campo revelan que la variabilidad anual de temperaturas del río Santa Cruz sitúa la temperatura del agua entre unos 3 °C y 13.3 °C. Los monitoreos continuos revelan además una variabilidad diurna de amplitud no superior a 1 °C, explicada por la incidencia de la radiación solar en el río. En el río Chico la variabilidad a largo y corto plazo es más marcada, mientras que la diferencia de temperatura del mar entre verano e invierno es de sólo unos 5 °C. De la interacción de estos tres cuerpos de agua, se observa en Punta Quilla que por efecto de la marea ingresa agua desde el mar durante pleamar: trae agua más fresca que la del estuario en verano, mientras que en invierno el agua del mar está a una temperatura relativamente mayor.

El modelo numérico permite evaluar en mayor detalle el comportamiento extremo de las temperaturas medias en las dos estaciones del año de mayor y menor temperatura del río Santa Cruz.

4.4.1. Temperatura del agua en verano

En un mes de enero medio el río Santa Cruz aporta al estuario un caudal de 932 m³/s a una temperatura de 13.3 °C. Puede asumirse temperatura media del mar 10 °C y un aporte del río Chico de 20 m³/s a 12.9 °C.

En estas condiciones, los mayores gradientes de temperatura tienen lugar en inmediaciones de la boca del estuario, aguas abajo de Isla Leones (Figura 4.34). En ese sector, el agua más fría del mar ingresa en pleamar y se retira en bajamar. Así, se observa en la Figura 4.35 que en Punta Quilla la temperatura del agua oscila entre 12.5 y 13 °C. Por otra parte, en el tramo final de río Santa Cruz la temperatura no se ve afectada por la marea: la Estación 07 definida en la Figura

3.8 presenta un valor constante de 13.3 °C.

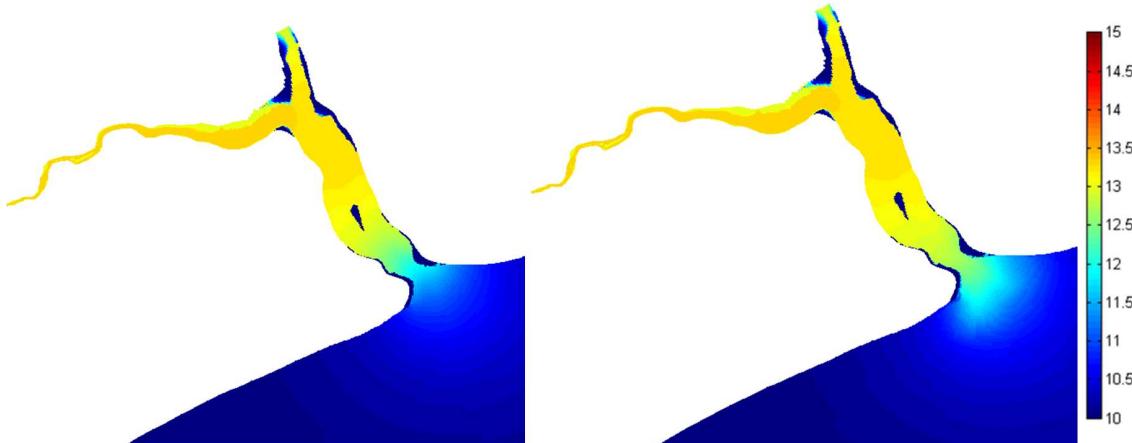


Figura 4.34: Distribución de temperatura media del agua en verano, en pleamar (izq.) y bajamar (der.).

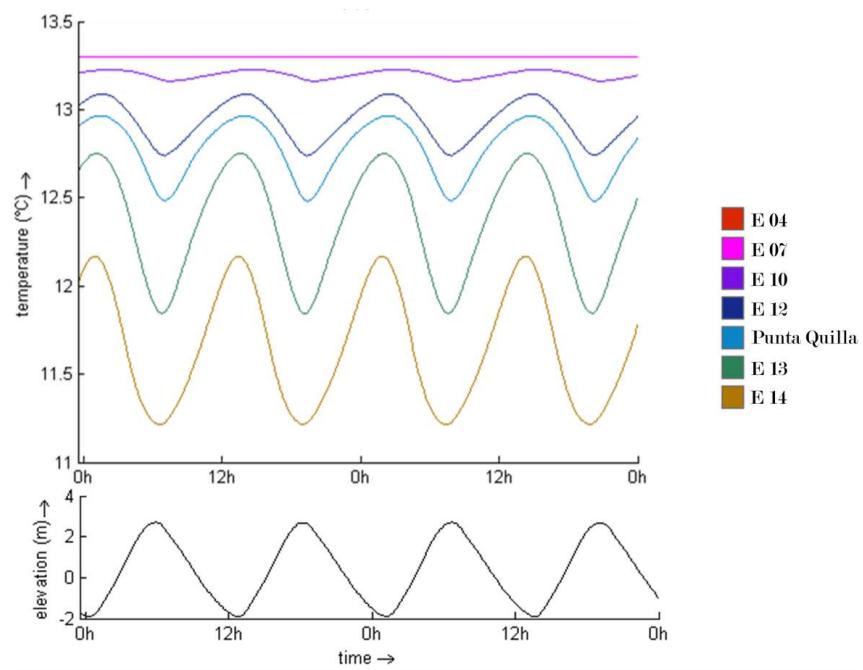


Figura 4.35: Evolución temporal de temperatura media del agua en verano, por efecto de la marea, en estaciones seleccionadas

4.4.2. Temperatura del agua en invierno

En un mes de julio medio el río Santa Cruz presenta un caudal de 461 m³/s y una temperatura del agua de 3 °C. Mientras tanto, la temperatura del mar se presenta en torno a 6.4 °C, y el río Chico podría aportar 20 m³/s a 0.9 °C.

Al igual que en verano, los mayores gradientes de temperatura tienen lugar en inmediaciones de la boca del estuario, aguas abajo de Isla Leones (Figura 4.36). En ese sector, el agua menos fría del mar ingresa en pleamar y se retira en bajamar. Así, se observa en la Figura 4.37 que en Punta Quilla la temperatura del agua oscila entre 4.1 y 4.8 °C. En el tramo final de río Santa Cruz la temperatura no se ve afectada por la marea: la Estación 07 presenta un valor constante de 3

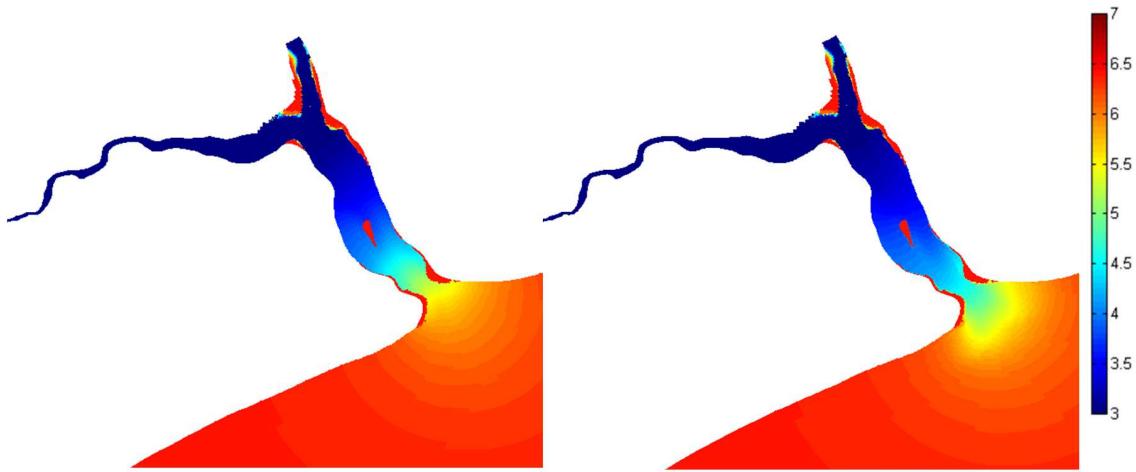


Figura 4.36: Distribución de temperatura media del agua en invierno, en pleamar (izq.) y bajamar (der.).

°C.

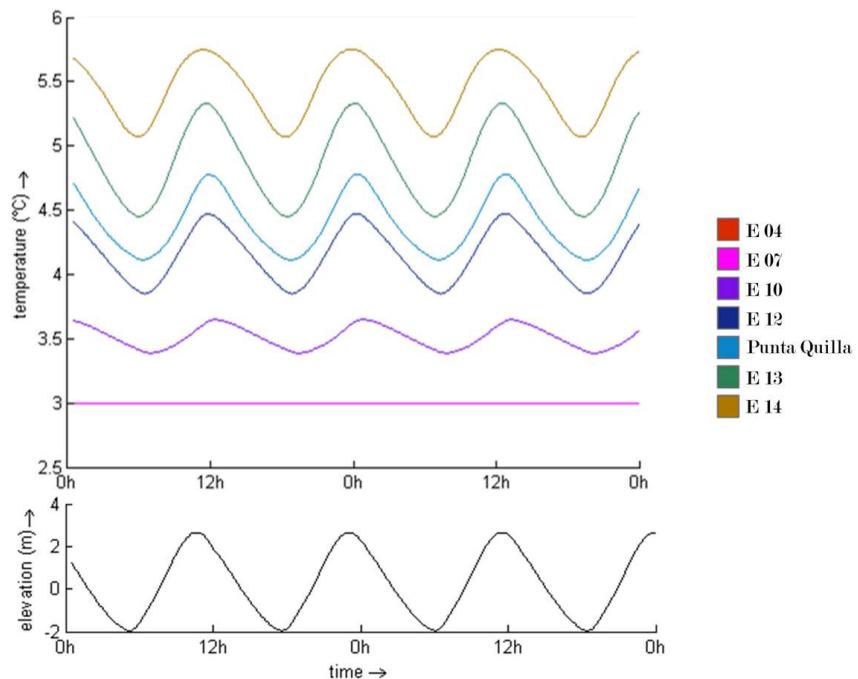


Figura 4.37: Evolución temporal de temperatura media del agua en invierno, por efecto de la marea, en estaciones seleccionadas

4.4.3. Conclusiones

Se evidencia que el mayor gradiente espacial de temperaturas se presenta en proximidades de la boca del estuario. Además, en ese sitio también son más pronunciadas las fluctuaciones semidiurnas por efecto de la marea (del orden de 0.5 °C en Punta Quilla). Al contrastar distintos escenarios, la mayor modificación de temperaturas tiene lugar en el río Santa Cruz y se reduce hasta ser despreciable hacia Isla Leones, tanto entre verano e invierno.

Resta recordar que esta descripción omite el intercambio con la atmósfera, por lo cual no recoge las variaciones diurnas que introduce la radiación solar (± 0.8 °C y ± 0.3 °C en río Santa Cruz en

los meses estudiados).

4.5. Salinidad en escenarios de referencia

Contemplando que la distribución espacio-temporal de la salinidad se adopta como parámetro condicionante del hábitat de la biota susceptible de experimentar modificaciones durante el llenado de los embalses que se discute en el próximo capítulo, a continuación se expone la evolución de la misma a lo largo de un año en condiciones naturales.

Se presenta en primer lugar el análisis para un año medio, que constituye el escenario de referencia para posteriormente evaluar la magnitud de las modificaciones durante el llenado. A continuación, se describe la respuesta del estuario ante otros escenarios de relevancia ambiental: la asociada al año del registro histórico con menor derrame observado (período 1955/1956), así como un hidrograma correspondiente a un año hídricamente pobre, adoptado como aquel cuyos caudales presentan una excedencia del 95 %. Estos dos últimos casos constituyen una referencia de las condiciones más extremas respecto a caudales bajos aportado por el río Santa Cruz que el estuario puede experimentar en condiciones naturales, y por ende los aumentos de salinidad que generen constituyen una referencia de valores que sería conveniente no superar al plantear escenarios de llenado. Resta mencionar que un aliciente adicional para contemplar estos dos casos lo constituye el hecho de que es habitual que en estudios de caudal ecológico se evalúen los efectos de los hidrogramas Q_{100} y Q_{95} . En el caso particular del río Santa Cruz, la Universidad de Valladolid ha sugerido que erogar un hidrograma denominado H1, que combina caudales de excedencia 95 % y 100 %, permite mantener el hábitat del tramo de río ubicado aguas abajo de JC.

4.5.1. Año medio

A fin de diagnosticar la evolución espacio-temporal de la salinidad esperable en situación natural en el estuario, se analiza un escenario en el cual el hidrograma del río Santa Cruz es el correspondiente a un año medio, es decir, que está constituido por caudales superados el 50 % del tiempo.

Hidrograma del río Santa Cruz

En este hidrograma se ha asignado un valor de caudal a cada día del año atendiendo a las observaciones históricas realizadas en Charles Fuhr. Para un día concreto del año, se ordenan los caudales observados ese mismo día durante todos los años de registro según su magnitud y se considera el valor que se ve superado el 50 % del tiempo. Repitiendo esta operación para cada uno de los 365 días del año, se obtiene el hidrograma medio anual, representado gráficamente en la parte inferior de la Figura 4.41. Si bien el hidrograma se calcula con paso diario, en la Tabla

4.7 se presentan al lector los caudales promedios de cada mes a modo de referencia. El interés de plantear este escenario radica en que permite evaluar el comportamiento del estuario en un escenario medio sin intervención antrópica, herramienta que además de ofrecer un diagnóstico del comportamiento natural sirve como línea de base en estudios de impacto de las obras.

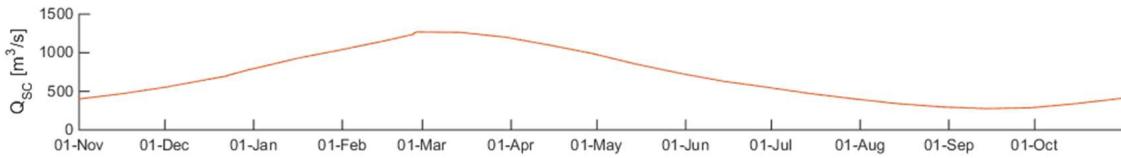


Figura 4.38: Hidrograma medio anual del río Santa Cruz

Tabla 4.7: Caudales medios mensuales ingresantes al estuario desde el río Santa Cruz para un año medio

Mes	Q_{medio} [m³/s]
Noviembre	473
Diciembre	663
Enero	924
Febrero	1152
Marzo	1245
Abril	1086
Mayo	843
Junio	627
Julio	466
Agosto	338
Septiembre	284
Octubre	348

Respecto al escenario que se analiza, resta mencionar que se ha optado por considerar únicamente nivel medio del mar y la fluctuación armónica semidiurna de 3.5 m de amplitud asociada a la componente M2. Esto tiene la ventaja de que los resultados son válidos para cualquier año, y adicionalmente reduce el número de variables de control, con lo cual conceptualmente la interpretación de resultados es más sencilla y se aprecia con más claridad la dependencia de la salinidad con las variaciones de caudal del río Santa Cruz.

Evolución de la salinidad

Para iniciar la discusión, es muy probable que al lector le resulte más sencillo interpretar la distribución espacial de la salinidad mediante mapas. En la Figura 4.39 y la Figura 4.40 se ha representado la distribución de salinidad media mensual en el estuario con una escala de colores, destacando con una línea roja la posición del frente salino, es decir, la locación a partir de la cual la salinidad deja de ser nula hacia aguas abajo. Cada mapa resulta de considerar un promedio de la salinidad observada durante ese mes: comprende el promedio observado entre pleamares y bajamares así como la variabilidad resultante de los cambios en el caudal aportado por el río. Recordando que entre noviembre y marzo el caudal aportado por río Santa Cruz va en aumento, es sencillo interpretar en la Figura 4.39 por qué el frente salino se desplaza progresivamente hacia aguas abajo en este período. La grilla de referencia permite estimar que este traslado es de casi 10 km. Esto va acompañado de una reducción de la salinidad en todo el dominio bajo estudio;

basta comprobar que incluso en la boca del estuario la escala de colores revela modificaciones significativas entre noviembre y abril. Durante los siguientes meses del año, representados en la Figura 4.40, el caudal del río comienza a decrecer, con lo cual la salinidad se incrementa progresivamente.

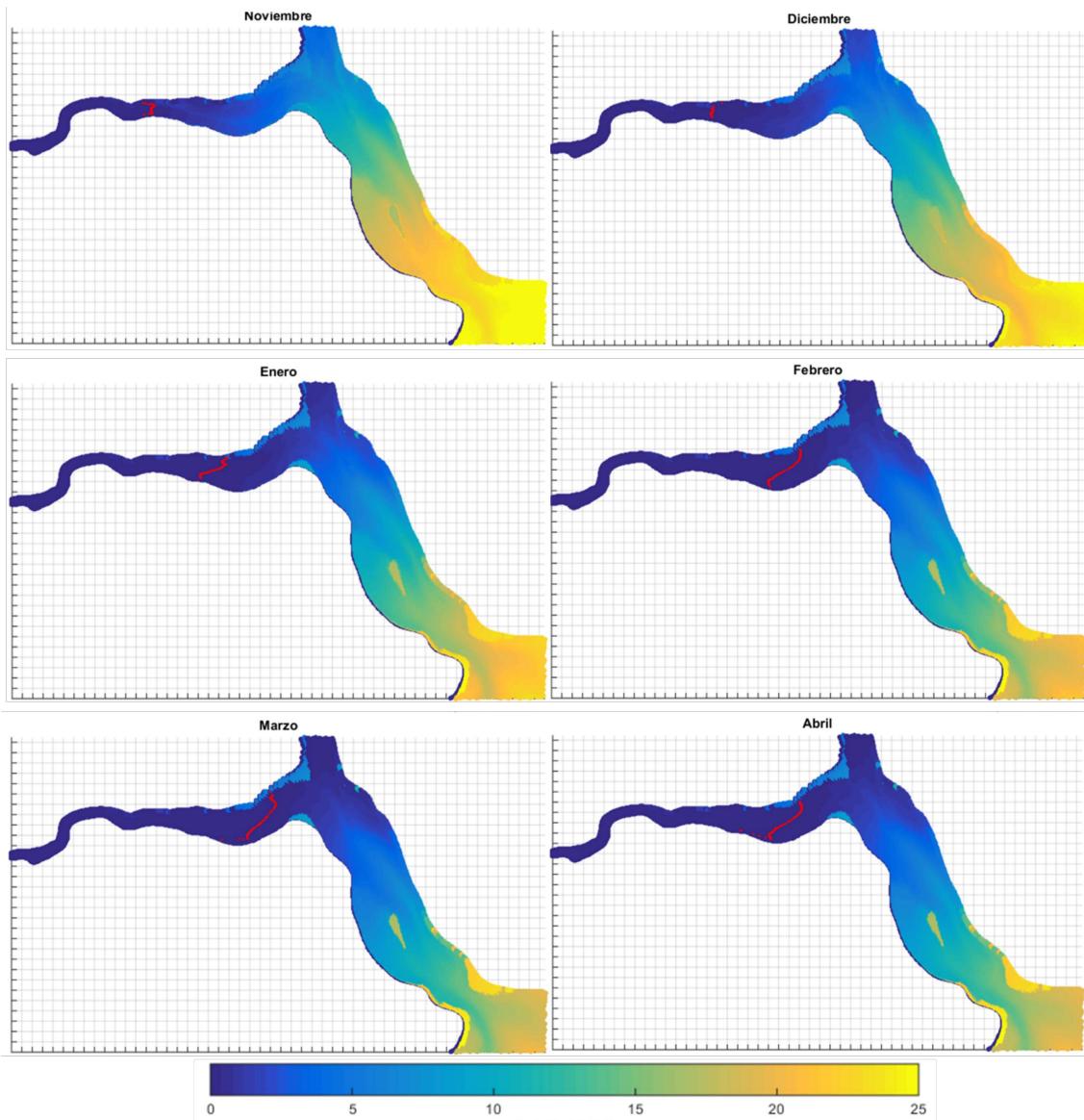


Figura 4.39: Valores medios mensuales de salinidad en el estuario durante un año medio (noviembre a abril). La escala de colores representa la salinidad y en rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km

Para continuar el análisis, es conveniente ahondar en la evolución temporal de la salinidad con mayor detalle; para ello se discutirán las observaciones correspondientes a las estaciones de monitoreo definidas en la Figura 3.8. La Figura 4.41 constituye un ejemplo de la evolución temporal de la salinidad para la Estación 07, ubicada justo antes de la confluencia de los ríos Santa Cruz y Chico. Se observan dos tiempos característicos en los cuales ocurren estos cambios. En primer lugar, exhibe una fluctuación armónica semidiurna, asociada al ingreso y egreso de agua del mar debido a la acción de las mareas, con picos de salinidad durante pleamar. Recuérdese que no se ha simulado la modulación de amplitud asociada a la totalidad de las forzantes, sino sólo a M2; motivo por el cual la amplitud en el mar no varía. En segundo lugar, se observa que el

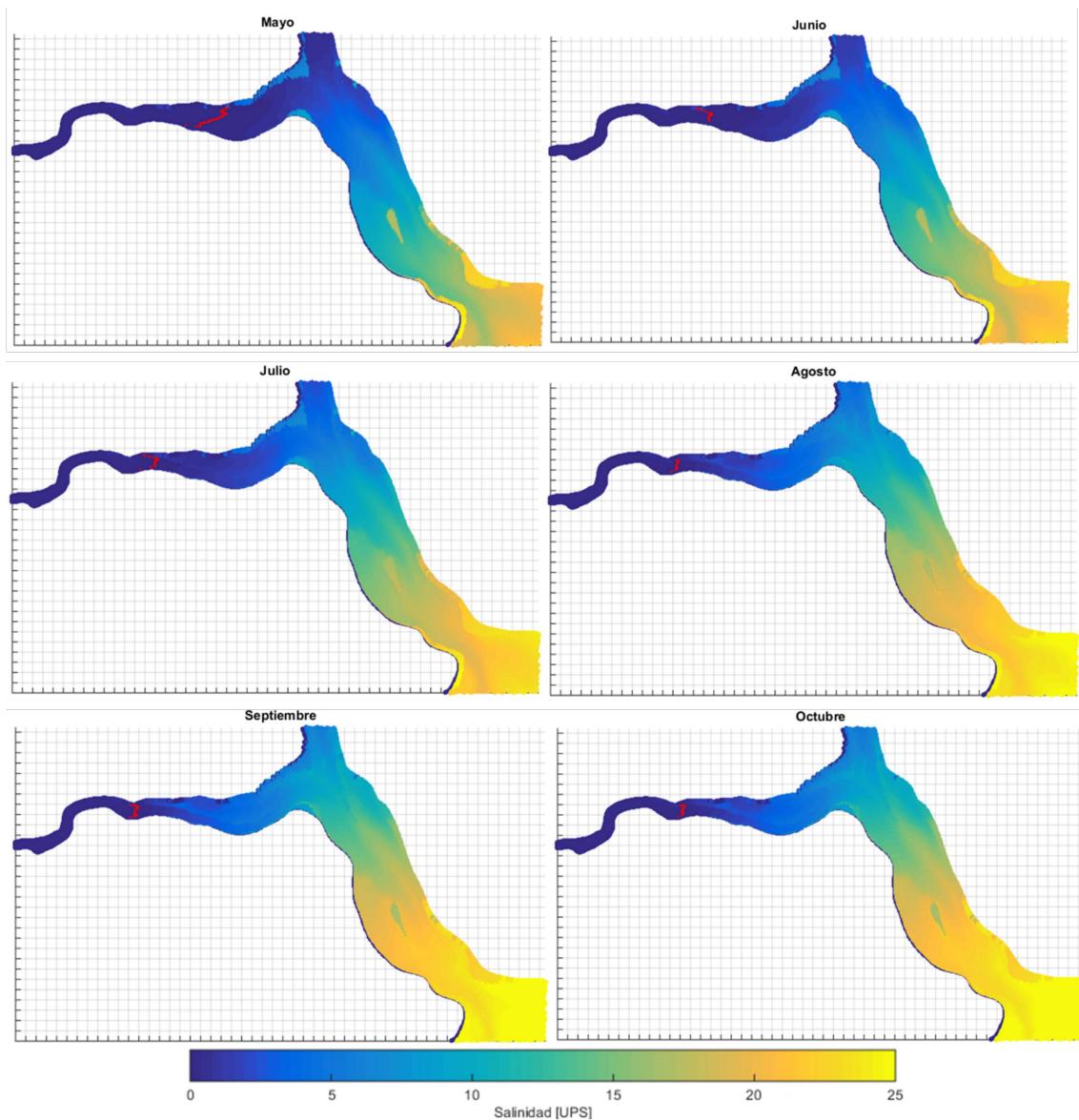
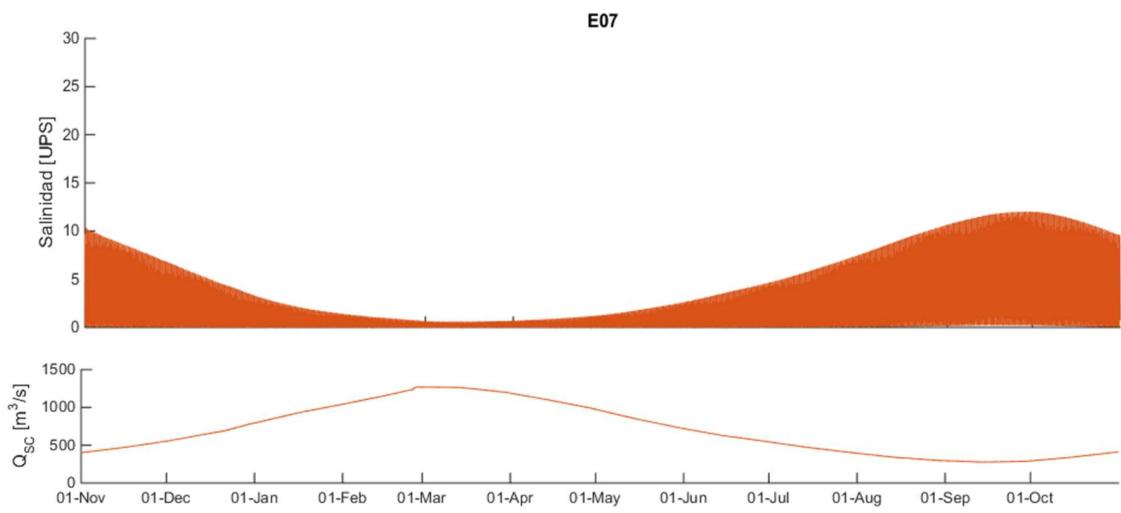


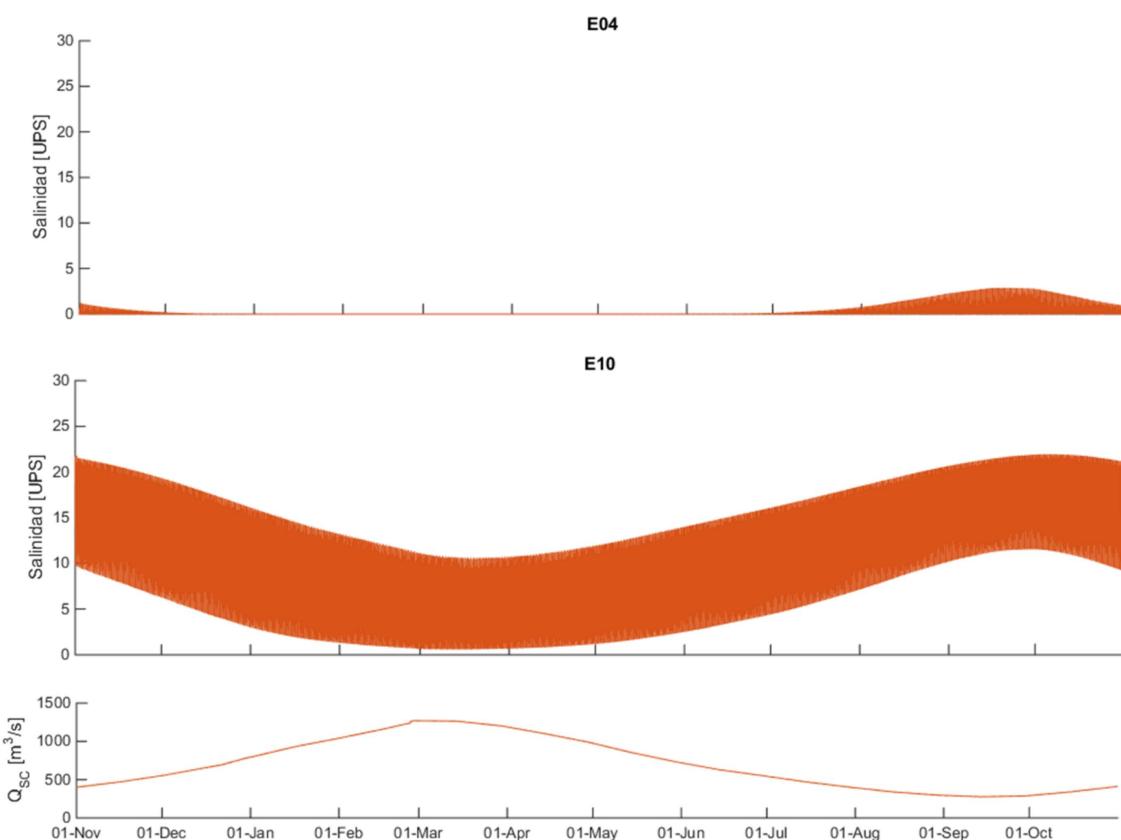
Figura 4.40: Valores medios mensuales de salinidad en el estuario durante un año medio (mayo a octubre). La escala de colores representa la salinidad y en rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km

valor medio fluctúa lentamente a lo largo del año y depende del caudal del río Santa Cruz, siendo despreciable la contribución del Río Chico debido a que su caudal líquido es casi dos órdenes de magnitud menor. Se desprende de la Figura 4.41 que en los meses de mayor aporte de agua dulce, la salinidad se reduce así como su variabilidad diaria ocasionada por los niveles de marea.

Por otra parte, la variabilidad espacial se aprecia siguiendo la evolución temporal en otras estaciones. En condiciones de caudales medios y amplitudes medias de marea, las Estaciones 01 a 03 (también definidas en la Figura 3.8) exhiben salinidad nula en todo momento. Hay que recordar que si bien en este trabajo se ha adoptado esta simplificación, el contemplar mareas de gran amplitud o caudales menores al medio podrían cambiar esta observación. La Figura 4.42 muestra que en la Estación 04 durante gran parte del año la salinidad es nula, detectándose salinidad que no excede los 3 UPS sólo en los meses de estiaje. Hacia aguas abajo, en la Estación 10, la salinidad se detecta siempre, con valores que oscilan entre 11.5 a 22.5 UPS hacia octubre, o de



0.5 a 10.5 UPS en marzo. Por otra parte, en esta estación el caudal del río condiciona el volumen de agua dulce presente en el estuario y por ende valor medio de la salinidad, pero no modifica la amplitud de variación diaria de la misma.



Para describir adecuadamente las variaciones de salinidad en el estuario, los valores medios deben ponerse en contexto de las fluctuaciones. En la Figura 4.43, los datos medidos en cada

estación a lo largo del tiempo se representan entonces mediante un diagrama de caja. En cada caja, la marca central es la mediana, los bordes de la caja son los percentiles 25 y 75, las barras se extienden a los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos, y los valores atípicos (excediendo aproximadamente $\pm 2.7 \sigma$ para una distribución normal) se trazan de forma individual. Por ejemplo, en septiembre para la Estación 07 el 25 % del tiempo se observa una salinidad inferior a 0.9 UPS y el 75 % del tiempo la misma no supera 9.6 UPS, con una probabilidad de ocurrencia de 50 % el no exceder 5.1 UPS. Esto se desprende de la misma información presentada en la Figura 4.41. En la Figura 4.43 se observa además el efecto que tiene el caudal aportado por el río, comparando los meses de septiembre (el menor caudal medio mensual, de 287 m³/s) y marzo (con el mayor caudal medio mensual, de 1266 m³/s). Así, para la Estación 07 en el mes de marzo se advierte una importante reducción de la salinidad (esta vez la mediana es 0.01 UPS), reducción en su variabilidad y aumento en la asimetría de su distribución. En general, las Estaciones 04 a 07 pueden exhibir salinidad casi nula en septiembre y variable en marzo.

La Figura 4.43 constituye un resumen del comportamiento esperable en el estuario en condiciones medias de caudal y mareas. Mientras que la extensión de las cajas refleja las variaciones semidiurnas asociadas a pleamar y bajamar, las medianas vienen condicionadas principalmente por el caudal aportado por el río Santa Cruz. Es esperable un comportamiento intermedio entre ambos el resto de los meses del año.

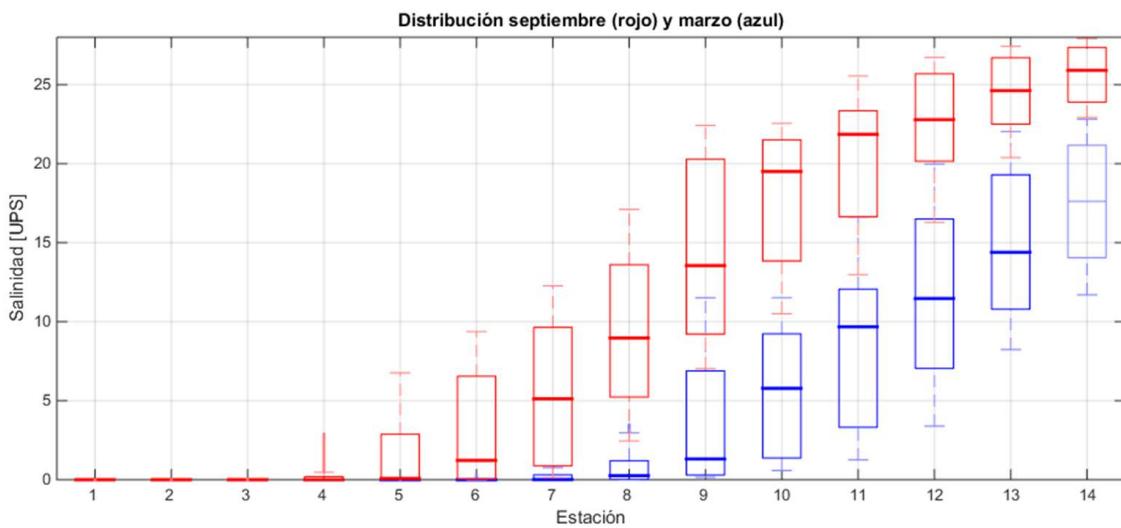


Figura 4.43: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada una de las 14 estaciones definidas en la Figura 3.8 para los meses de septiembre (rojo) y marzo (azul)

4.5.2. Hidrograma de excedencia temporal 100 %

El hidrograma Q_{100} es aquel que presenta los valores mínimos observados. El mismo consiste en generar un hidrograma en que para cada día del año se considere el menor valor registrado ese mismo día. En el estudio de caudal ecológico del río Santa Cruz [9] se evalúa como alternativa de llenado quasi-equivalente y menos exigente al hidrograma registrado con el menor derrame

anual, específicamente el correspondiente al período 1955-1956³.

El hidrograma en cuestión se presenta en la parte inferior de la Figura 4.44. Se aprecia que, respecto a un año medio, se preserva la forma del hidrograma (los meses de aguas altas y bajas coinciden), si bien las reducciones absolutas más significativas de caudal tienen lugar en los meses que suelen traer mayores caudales. En la Tabla 4.8 pueden consultarse los valores medios mensuales de caudales: si bien la mayor diferencia de caudales ocurre en marzo con una reducción cercana a 700 m³/s, es entre mayo y junio cuando los caudales han presentado reducciones de casi el 30 % del valor medio mensual correspondiente a esas fechas.

Las repercusiones de estas modificaciones sobre la salinidad se presentan para la Estación 07 en la misma Tabla y Figura. Se aprecia que los valores de salinidad durante pleamar son mayores a lo largo de todo el año. La mayor salinidad continúa observándose en septiembre, mes en que el valor medio mensual pasa de 5.4 UPS correspondientes al escenario de referencia hasta 10.1 UPS⁴. Pero es el mes de julio aquel en que el incremento de salinidad en términos absolutos es más significativo, aumentando en 6.8 UPS respecto a un año medio. Por el contrario, marzo es el mes en que el apartamiento es mínimo, con un aumento de 1.6 UPS. Resta mencionar un detalle que no se aprecia en el gráfico: a diferencia de lo que ocurre en un año medio, en los meses de julio y octubre durante la bajamar el valor de salinidad no cae a cero, sino que se reduce a valores por debajo de 2 UPS.

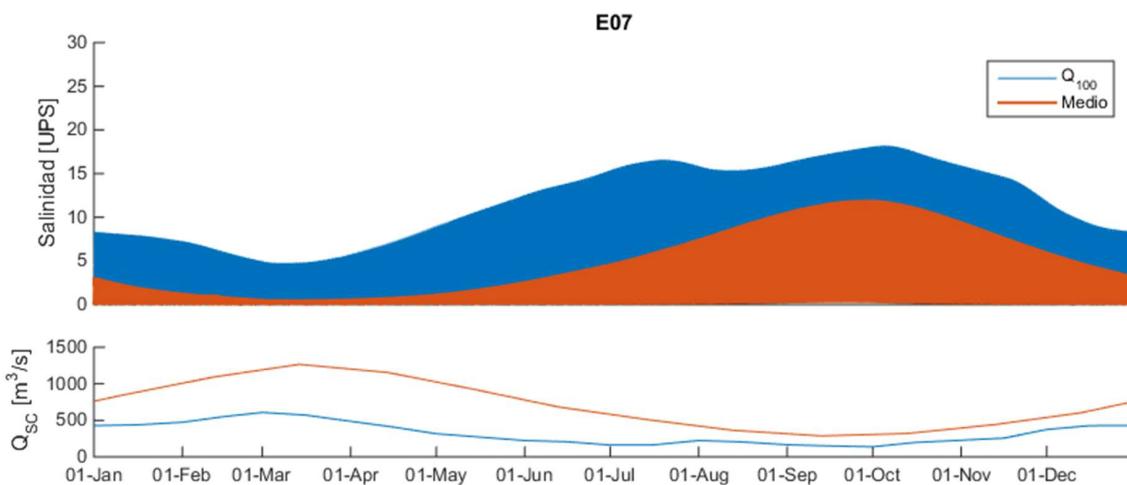


Figura 4.44: Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 100 % (azul) y comparativa con un año medio (naranja). En la parte inferior se incluye el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados

Respecto a la dependencia espacial, la Figura 4.45 presenta la misma información para otras dos estaciones de monitoreo definidas en la Figura 3.8.

Para la Estación 04, ubicada aguas arriba, sólo entre los meses de abril y noviembre se manifiesta una modificación de la salinidad respecto de la situación natural; el resto del tiempo el frente

³La estación Charles Fuhr inició el registro en diciembre de 1955.

⁴Obsérvese que en el texto se discuten valores medios mensuales, obtenidos mediante un promedio temporal de valores extraídos cada 10 minutos. La figura da cuenta de la variabilidad semidiurna, por lo cual permite identificar los valores máximos que ocurren durante pleamar. El valor medio no es el mero promedio del valor máximo y mínimo (nulo), puesto que durante buena parte del ciclo de marea los valores están más próximos al mínimo, especialmente cuando los caudales son altos.

salino se mantiene siempre aguas abajo de dicho punto. Mientras que en un año medio la salinidad llega hasta allí en el período agosto a octubre con valores máximos en pleamar por debajo de 3 UPS, en este exigente escenario los valores máximos pueden alcanzar hasta 9 UPS a fines de septiembre. Se hace notar que en los momentos próximos a bajamar la salinidad presenta en ambos casos un valor nulo: es así que en septiembre el valor medio de salinidad es de sólo 1.6 UPS, mientras que en un año medio sería de 0.4 UPS.

Para la Estación 10, ubicada aguas abajo, se observa un aumento sostenido del valor medio de la salinidad durante todo el año, acompañando el patrón de variación de un año medio con mayor variabilidad local. Los menores valores medios de salinidad ocurren en marzo, en que adoptan un valor de 12.4 UPS (frente a 5.4 UPS en un año medio), mientras que en octubre se da el máximo valor medio mensual, de 22.2 UPS (en contraste con las 17.2 UPS correspondientes a un año medio). Por otra parte, la mayor diferencia entre ambos escenarios se aprecia en junio, en que el valor medio mensual sufre un incremento de 9.2 UPS.

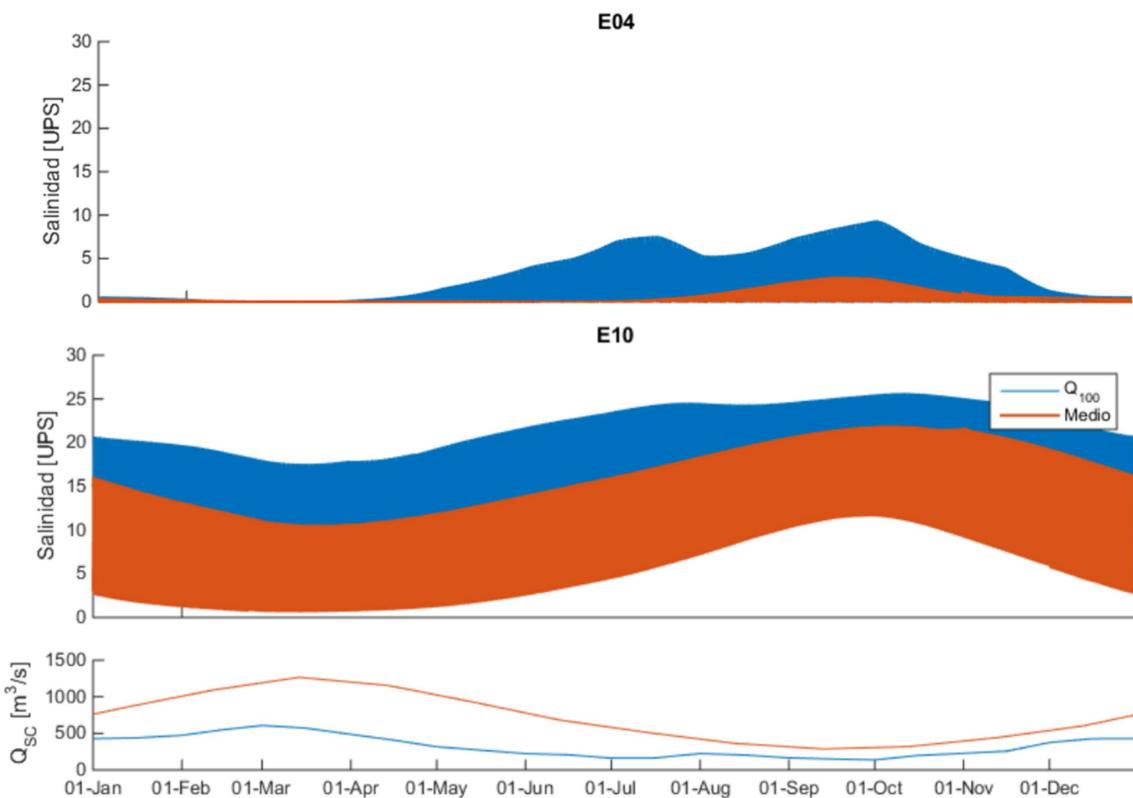


Figura 4.45: Evolución temporal de la salinidad en Estación 04 (arriba) y Estación 10 (abajo) a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 100 % (azul) y comparativa con un año medio (naranja)

La compresión de la dependencia espacial puede completarse examinando la Figura 4.46 y la Figura 4.47, que presentan los valores medios de salinidad y percentiles 25 a 75 % para las 14 estaciones definidas en la Figura 3.8. En la Figura 4.46 se representa lo que ocurre en un período a fin de septiembre y principios de octubre, momento del año durante el cual los valores de salinidad observados resultan máximos. De allí se aprecia el avance de la posición media del frente salino: para Q_{100} se ubica próximo a la Estación 04, y siendo que en un año medio

estaba cerca de la Estación 05, supone un desplazamiento de 3 km⁵. El caso de frente salino con menor intrusión en el río corresponde al mes de marzo (Figura 4.47): se ubica en la Estación 06 durante el escenario de caudales mínimos, y entre las Estaciones 07 y 08 en un año medio, lo cual supone un desplazamiento del frente de unos 8 km⁶.

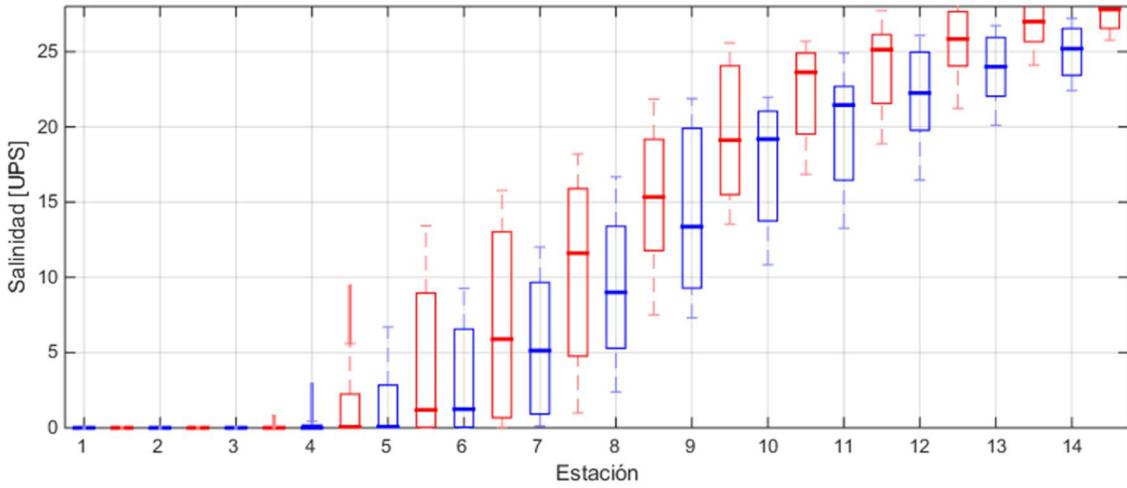


Figura 4.46: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para fin de septiembre/principios de octubre, durante el caudal de excedencia 100 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)

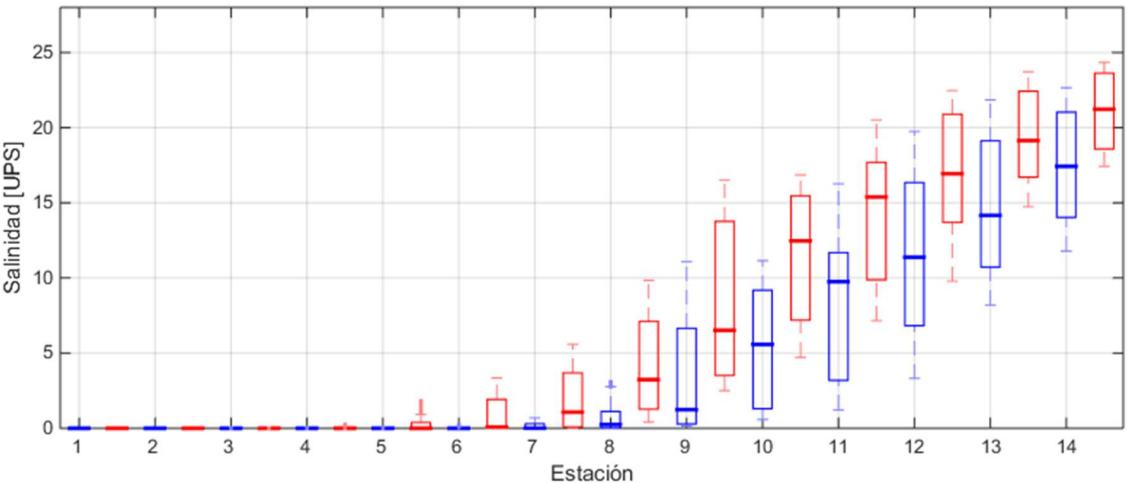


Figura 4.47: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para marzo, durante el caudal de excedencia 100 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)

4.5.3. Hidrograma de excedencia temporal 95 %

El hidrograma Q_{95} es aquel que presenta los valores de caudal superados el 95 % del tiempo para cada día del año. A fin de obtenerlo, para un día del año dado se ordenan los valores observados a lo largo de todos los años de registro y se determina el valor de caudal que se excede el 95 % del tiempo para esa fecha, procediendo de la misma manera para cada uno de los 365 días del

⁵Obsérvese que para el escenario Q_{100} , el valor medio de salinidad en la Estación 05 es 1.18 UPS, en la Estación 04 es de 0.06 UPS y cero aguas arriba. Para un año medio, en la Estación 05 presenta un valor medio de 0.08 UPS.

⁶Para Q_{100} , en la Estación 06 el valor medio es de 0.07 UPS. En un año medio, es de 0.24 UPS en la Estación 08 y nula en las estaciones aguas arriba.

año. Se trata de un hidrograma sintético: cada valor diario presenta una excedencia de 95 %, pero el hidrograma anual en sí no ha sido observado en un año concreto.

En la parte inferior de la Figura 4.48 puede observarse el hidrograma en cuestión, contrastado con el de un año medio. El mismo respeta las mismas épocas de aguas altas y bajas que se dan en un año medio, y la reducción de caudales que supone es menor que en el caso del hidrograma Q_{100} . En términos de valores absolutos, en el mes de febrero el caudal medio presenta la máxima disminución respecto de un año medio (reducción de unos $370 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que el extremo opuesto lo constituye septiembre, en que la diferencia es de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. En términos relativos, los meses menos afectados son noviembre y diciembre, en los cuales el caudal alcanza el 75 % de los valores de un año medio, mientras que en el extremo opuesto julio sólo presenta el 67 % del caudal mensual de un año medio. En la Tabla 4.8 pueden consultarse valores detallados mes a mes.

En la parte superior de Figura 4.48 pueden estudiarse las modificaciones resultantes en la salinidad de la Estación 07. La variabilidad es semejante a la observada en situación de año medio, pero con valores acrecentados durante la pleamar a lo largo de todo el año. En bajamar los valores son nulos en ambos escenarios, exceptuando el mes de septiembre del escenario Q_{95} , en el cual adopta valores por debajo de 0.5 UPS. Los mayores valores medios de salinidad continúan observándose en septiembre, en torno a 7.7 UPS (en contraposición a los 5.4 UPS de un año medio). En términos de variación, octubre evidencia la mayor afectación, presentando un incremento de 2.5 UPS, mientras que el que exhibe el menor aumento es marzo, con una variación media de sólo 0.2 UPS.

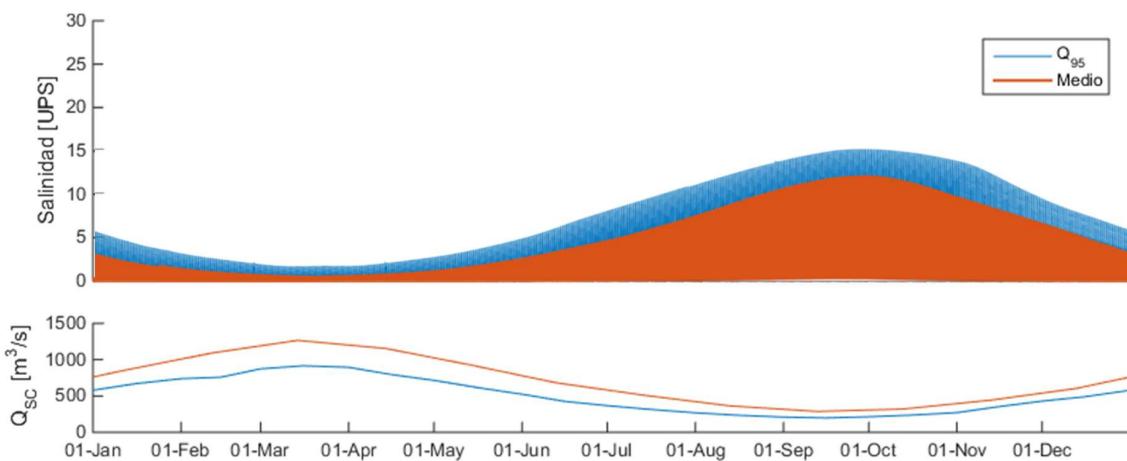


Figura 4.48: Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 95 % (azul) y comparativa con un año medio (naranja). En la parte inferior se incluye el caudal medio aportado por el río Santa Cruz para una mejor interpretación de resultados

Para incorporar la variabilidad espacial al análisis, la Figura 4.49 presenta la evolución temporal en dos estaciones diferentes. En la Estación 04 se observa la presencia de salinidad entre junio y noviembre para Q_{95} , un período del orden de dos meses mayor que en un año medio. Los valores máximos de pleamar en septiembre pasan de algo menos de 3 UPS en un año medio a 5.6 UPS en este escenario, con valores medios mensuales que ascienden de 0.4 UPS para Q_{50} a 0.9 UPS con Q_{95} . En E10 se observa que la curva de evolución temporal es casi la misma

que en un año medio, pero desplazada hacia valores superiores. Considerando todo el año, es incremento promedio es de unos 2.9 UPS.

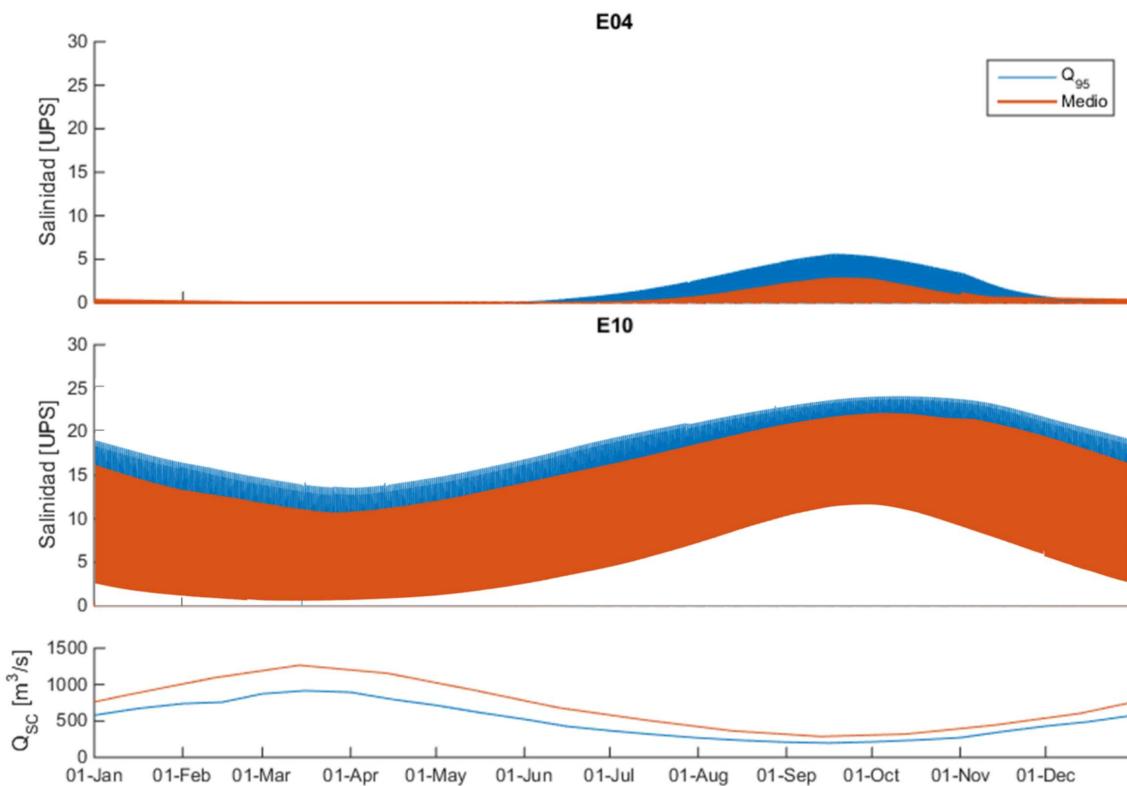


Figura 4.49: Evolución temporal de la salinidad en Estación 04 (arriba) y Estación 10 (abajo) a lo largo de un año con un hidrograma de excedencia temporal 95% (azul) y comparativa con un año medio (naranja)

En la Figura 4.50 y la Figura 4.51 se representan los valores medios y percentiles 25 y 75 de la salinidad observada en 14 estaciones. En la Figura 4.50 se estudia en detalle el período de mayor salinidad, entre septiembre y octubre. Si bien hay un desplazamiento hacia aguas arriba, el frente salino se ubica en ambos casos entre las Estaciones 04 y 05. La Figura 4.51 muestra las predicciones para el mes hídricamente más rico, marzo: para este escenario el frente salino alcanza la Estación 07, representando un avance del orden de unos 2.5 km respecto al año medio.

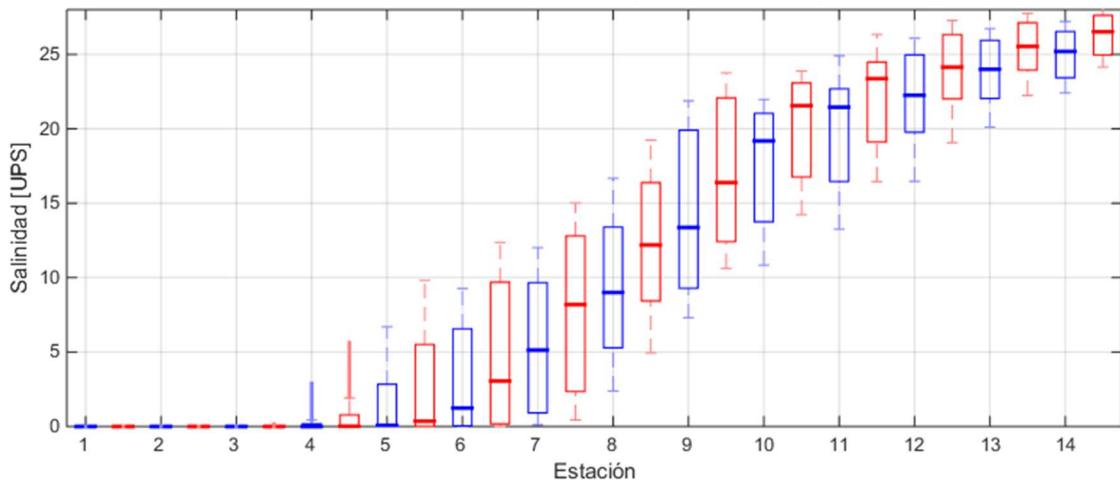


Figura 4.50: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para fin de septiembre/inicio octubre, durante el caudal de excedencia 95 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)

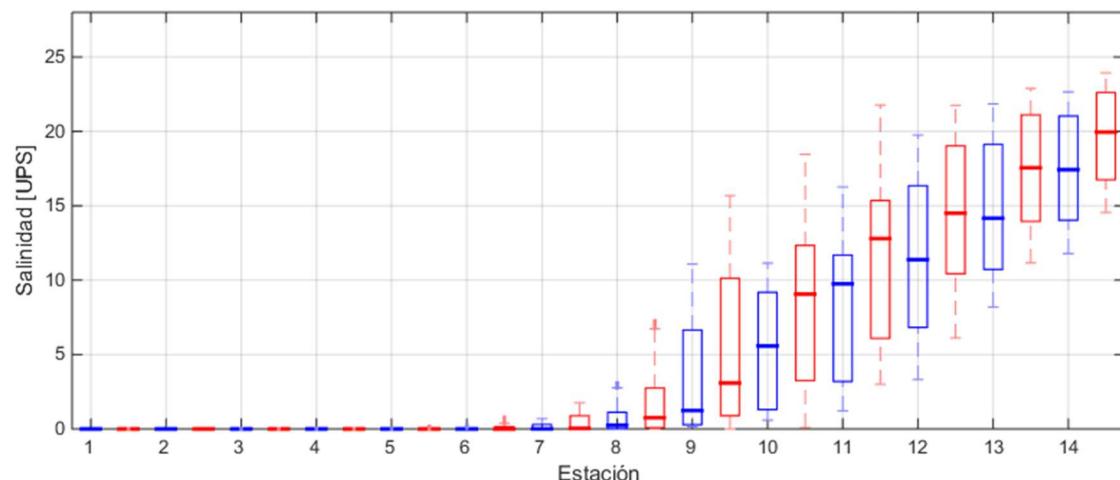


Figura 4.51: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para marzo, durante el caudal de excedencia 95 % (rojo) y su contraste con la situación de año medio (azul)

4.5.4. Comentarios finales sobre los hidrogramas de referencia

El análisis de comportamiento de la salinidad ante el hidrograma medio constituye la línea de base contra la cual se contrastarán los efectos del llenado en el próximo capítulo. Proporciona no sólo valores medios de referencia, sino que también da cuenta de las significativas fluctuaciones que se experimentan diariamente por efecto de la marea. Estas últimas también han de tenerse como referencia al evaluar la admisibilidad de los apartamientos durante llenado respecto de los valores de año medio.

Los hidrogramas Q_{100} y Q_{95} considerados en este análisis representan escenarios naturales altamente exigentes. Actúan como un marco de referencia, en el sentido de que dan cuenta de los límites superiores de los incrementos de salinidad que pueden llegar a ocurrir naturalmente en el estuario. Por otra parte, la exposición de estos incrementos de los valores medios mensuales está incompleta si no se contextualiza recordando las variaciones de salinidad que ocurren en forma natural en el año medio. Obsérvese que en este último escenario la marea semidiurna

lleva la salinidad desde valores nulos en proximidad con la bajamar hasta valores máximos unas 6 horas después, alcanzando en pleamares del mes de octubre hasta 12 UPS. Por otra parte, en ese mismo escenario pero en una escala de tiempo anual, los valores medios observados entre marzo y septiembre difieren en 5.4 UPS.

Tabla 4.8: Comparativa entre escenario de referencia (año medio) y los correspondientes a excedencia 100% y 95 %, indicando valores medios mensuales de caudal de río Santa Cruz y salinidad en Estación 07

Mes	Esc. referencia		Q_{100}		Q_{95}	
	Q [m ³ /s]	Sal. [UPS]	Q [m ³ /s]	Sal. [UPS]	Q [m ³ /s]	Sal. [UPS]
Enero	924	0.6	446	3	668	1.4
Febrero	1152	0.2	548	2.2	786	0.9
Marzo	1245	0.2	555	1.8	901	0.4
Abril	1086	0.2	399	2.8	794	0.6
Mayo	843	0.5	268	5.1	611	1.2
Junio	627	1.2	198	7.4	430	2.5
Julio	466	2.3	181	9.1	312	4.2
Agosto	338	3.9	198	8.3	235	6.2
Septiembre	284	5.4	150	10.1	204	7.7
Octubre	348	4.8	194	9.6	240	7.3
Noviembre	473	3.1	284	6.9	355	5.1
Diciembre	663	1.5	416	3.8	500	2.8

4.6. Conclusiones

La aplicación del modelo numérico al estudio del comportamiento del estuario en situación natural ha permitido profundizar en la descripción de su comportamiento hidrodinámico y de los fenómenos de transporte asociados. Algunas características de la dinámica del sistema que merecen ser destacadas incluyen:

- El comportamiento hidrodinámico del estuario es el resultado de tres forzantes principales. La primera de ellas, y la de mayor influencia, son las mareas. Las dos restantes son los caudales de los ríos Santa Cruz y Chico.
- Las amplitudes de marea tienen variaciones de entre 4 y 12 m, con una media de 8.1 m, y se encuentran entre las mayores a nivel mundial. Esta variación rápida de niveles configura un espacio único, con extensas playas que dos veces por día se sumergen y se exponen al aire libre y una significativa variación de distintos parámetros.
- Los caudales de ingreso y egreso al estuario son del orden de 100 000 m³/s en la boca del estuario, y van disminuyendo a medida que ingresamos en el mismo. Los caudales medios del río Santa Cruz y Chico son del orden de 700 m³/s y 15 m³/s, respectivamente.
- En la mayor parte del estuario velocidades y niveles quedan determinados casi en su totalidad por las mareas y no por los caudales de los ríos. El efecto de los caudales se los ríos se empiezan a notar a partir de la Estación 05, durante la bajamar.
- Durante el flujo y reflujo de la marea se generan grandes corrientes, que alcanzan valores significativos a lo largo de todo el estuario. Durante los momentos de mayor intensidad de corriente, en la boca se alcanzan valores de velocidad de 2.5 m/s, y en los canales de mayor profundidad, valores de 1.5 m/s o 2.0 m/s.

- El tiempo de residencia en el estuario es función del caudal del río Santa Cruz. El mismo varía entre 18.8 días para un caudal del 300 m³/s hasta 13.3 días para un caudal de 1100 m³/s.
- Los valores de salinidad y su distribución a lo largo del estuario son muy dependientes de las mareas, pero los caudales del río Santa Cruz ejercen un efecto muy importante en sus valores medios.
- El efecto de caudales bajos durante un período prolongado implica un aumento en la salinidad media del estuario, mientras que caudales altos durante un período prolongado conllevan una disminución de la salinidad media.
- La no uniformidad de caudales a lo largo del año implica una variación muy importante de los valores de salinidad media en todo el estuario.
- La variación de salinidad producto de la variación interanual de caudales es de una magnitud relevante. Esta variación es inferior a la variación natural entre los períodos de crecida y de estiaje en un mismo año.
- La variación de niveles genera una importante fluctuación en los valores de la salinidad durante el ciclo de marea. Los valores de salinidad en un punto determinado tienen un patrón de variación similar al de los niveles.
- Los valores máximos y mínimos de salinidad en un punto no permanecen constantes a lo largo de una serie de ciclos de marea, sino que son modulados de la misma manera que es modulada la amplitud de marea.
- El alcance del agua salobre sobre el río Santa Cruz es muy dependiente de la amplitud de mareas. El frente salino avanza más sobre el río cuando la marea alcanza valores altos que cuando alcanza valores bajos.
- El alcance del frente salino varía inversamente con el caudal del río Santa Cruz, y directamente con la amplitud de las mareas.
- El efecto de las mareas tiene una influencia mucho mayor que el caudal del río en el alcance del frente salino y su variación se da en mucho menor tiempo que la de los caudales.

Las simulaciones numéricas presentadas en este capítulo permiten valorar niveles, áreas de mojado y secado, corrientes, velocidades, tiempo de residencia y distribución de salinidad y temperaturas en el estuario a lo largo del tiempo, para una situación sin represas.

En el próximo capítulo se aplica el mismo modelo bajo distintos escenarios para valorar alteraciones que pudieran ocurrir durante el llenado de los embalses Néstor Kirchner (ex Cóndor Cliff) y Jorge Cépernic (ex La Barrancosa).

La hidrodinámica del estuario en estado natural responde principalmente a la forzante de las mareas, mientras que los fenómenos de transporte y tiempo de residencia del estuario son sensibles a la variación de caudal del río Santa Cruz.

CAPÍTULO 5

Modelación del estuario durante el llenado de embalses

El objetivo del presente capítulo es analizar posibles escenarios de llenado de los embalses NK y JC, con hincapié en las modificaciones en el comportamiento del estuario del río Santa Cruz. La predicción de estos cambios permitirá a los especialistas estimar sus potenciales impactos en el ambiente y, en caso que deban ser atenuados, realizar las modificaciones pertinentes al proyecto.

En primera instancia se exponen al lector los criterios generales con que se definen los escenarios de llenado de una presa cualquiera, para a continuación explicitar los hidrogramas de llenado específicos para las represas sobre el río Santa Cruz.

En segundo lugar se exponen en detalle los cambios que una selección de dichos escenarios podrían generar en la dinámica del estuario. Si bien la modificación de caudales del río Santa Cruz introduciría modificaciones hidrodinámicas en el estuario, del análisis de la variabilidad natural efectuado en el capítulo anterior se evidenció que niveles, patrones de corrientes y zonas de mojado y secado responden mayormente a las mareas. Por este motivo, no se hace hincapié en las relativamente despreciables modificaciones de estos parámetros que pudieran tener lugar ante cambios en el hidrograma del río. En cambio, se evidenció que los procesos de transporte sí responden a modificaciones en el caudal de río Santa Cruz. Por ende, se analizan exhaustivamente modificaciones en la distribución de salinidad, entendida como el condicionante de la biota que puede experimentar cambios, dando cuenta de la posición de la interfase agua dulce-salada, disponibilidad de agua dulce en tomas de agua, entre otros aspectos.

5.1. Identificación de potenciales modificaciones introducidas por las presas en distintas etapas de su vida útil

Para poder evaluar y cuantificar las afectaciones que las represas pueden generar en el estuario es necesario comprender los procesos que se desarrollarán durante las tres etapas principales de su vida útil: construcción, puesta en funcionamiento y operación. Durante dichas etapas ocurrirán en espacios de tiempo diferentes, y generarán cambios de variada naturaleza al escurrimiento natural del río. Por este motivo es necesario analizar cada etapa por separado e identificar en cada una de ellas cuáles cambios podrían resultar en una modificación en el funcionamiento

normal del estuario.

5.1.1. Construcción de las presas

Durante la construcción de las represas el río es desviado a través de diversas obras que modifican la posición del curso natural en las zonas donde van a ser construidas las represas, con el fin de permitir realizar las tareas necesarias durante la construcción. Dichas obras comienzan aguas arriba de la zona de emplazamiento de las represas, donde se desvía el río para poder conducirlo por una zona predeterminada. Dichas obras transportan la totalidad del agua y sedimentos acarreada por el río. Luego, aguas abajo de la zona de emplazamiento de las obras, agua y sedimentos son devueltos al curso natural. Durante el desvío no es retenido ni agua ni sedimentos en las obras, ni se altera la forma de los hidrogramas traídos naturalmente por el río. Por este motivo aguas abajo de las obras el río vuelve a su estado natural sin sufrir afectación alguna por las obras de desvío. En particular, el estuario no estará afectado durante este proceso porque el río no cambiará sus condiciones naturales más allá de las zonas de desvío.

5.1.2. Llenado de los embalses

Durante el llenado de los embalses, parte de agua del río es retenida por las represas con el fin de incrementar el volumen de agua acumulado. Este proceso continúa hasta que se alcanza el nivel de embalse de proyecto, a partir del cual la obra comienza a operar con normalidad. Durante el proceso de llenado parte del agua es retenida en los embalses y otra parte es erogada aguas abajo por estructuras especialmente diseñadas para tal fin. Esto redundará en una reducción del caudal natural del río y, por ende, una modificación del estado natural aguas abajo de las presas. Esta reducción de caudal implicará, a su vez, una disminución del agua dulce ingresante al estuario y una potencial afectación.

Dado que dos represas forman parte de este proyecto, es importante definir el orden, velocidad, tiempo y modo de llenado de cada una de ellas para evaluar los potenciales impactos en el estuario. Se considera como escenario que el embalse de la presa JC es llenado antes del de la presa NK. De esta manera, cuando se comience a llenar al segundo (NK), el primero (JC) puede actuar de reserva si existen caudales erogados por NK que no sean compatibles ambientalmente.

Para la permitir la construcción de la presa JC, el desvío del río se realizará mediante una estructura de control que contempla 5 vanos de 12 m de ancho cada uno. Los vanos impares se emplearán durante el desvío y serán posteriormente obturados, mientras que cada uno de los vanos pares cuenta con 2 orificios de 5.0 m de ancho y 9.0 m de alto cada uno. Éstos últimos constituyen los descargadores de fondo provistos de compuertas que permitirán una erogación controlada, y que serán usados para evacuar caudales durante la etapa de llenado.

La Figura 1.4 muestra las obras de descarga de la presa NK. El desvío del río se efectuará a tra-

vés de conductos que posteriormente serán obturados. Durante el llenado, cuando se alcance su cota se emplearán los 4 conductos descargadores de fondo, de 4 m x 3 m de sección transversal cada uno, y también podrán usarse 4 conductos descargadores de medio fondo de 4 m x 5 m. Estas estructuras están provistas de sendas compuertas que permiten una erogación controlada durante el llenado.

5.1.3. Operación de las presas

Durante la operación de las represas, la central de la presa NK podrá operar empuntada, mientras que la de JC como base. Esto implica que el caudal que descarga el Lago Argentino en el río Santa Cruz será acumulado en el embalse de la presa de aguas arriba (NK), y erogado en su totalidad durante un lapso menor de tiempo¹. El caudal turbinado por la presa de aguas arriba (NK) en las horas de máxima generación, será acumulado en el embalse de aguas abajo (JC) y erogado de manera uniforme a lo largo del día, evitando picos de caudal aguas abajo de la misma (Figura 5.1).

Las características hidrológicas del río Santa Cruz y la presencia del Lago Argentino, hacen que los caudales a lo largo del día sean uniformes, con variaciones muy bajas. Por este motivo, la erogación de caudales de JC hará que se mantenga el régimen hidrológico natural aguas abajo de las presas. Los caudales que naturalmente ingresan desde el río Santa Cruz al estuario no serán modificados, por lo que, desde este punto de vista, la operación de las represas, aguas abajo de JC es igual al natural lo cual no implicarán una afectación al estuario.

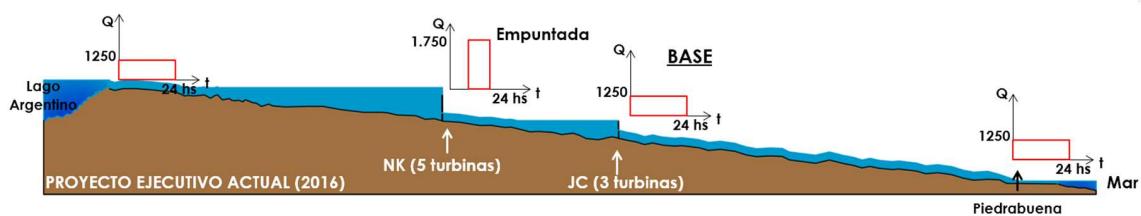


Figura 5.1: Esquema de operación de las centrales en el proyecto ejecutivo actual

En este análisis hay que tener presente que los embalses tienden a retener una parte de los sedimentos en suspensión, por lo que el caudal sólido aguas abajo de las represas no sería el mismo que originalmente traía el río. Este cambio implicaría un menor ingreso de sólidos suspendidos al estuario por parte del río Santa Cruz. Este cambio podría tener algún impacto sobre las concentraciones de sólidos suspendidos totales y material de fondo del estuario, por lo que debería ser analizado. Este aspecto excede a los alcances de la presente publicación.

5.1.4. Conclusiones

En vista de lo expuesto, en el presente capítulo se estudian detalladamente las pautas para definir el hidrograma de salida del llenado y el impacto que el llenado de los embalses podría tener en

¹ Esto se realiza para generar una mayor potencia durante las horas de mayor demanda de energía.

el estuario del río Santa Cruz.

5.2. Consideraciones generales sobre el llenado de embalses

El llenado de un embalse es uno de los hitos de la construcción de una presa, ya que representa un evento único y con particularidades propias.

La construcción de las presas tiene cuatro hitos fuertemente marcados: el inicio de la construcción, el desvío del río, el comienzo del llenado del embalse y el inicio de la generación de las turbinas. Cada uno de ellos presenta particularidades y riesgos, y origina cambios sustanciales en los sistemas hídricos y ambientales. En esta publicación se trata en detalle el llenado del embalse describiendo las características generales y, en el caso del embalse de JC, también sus particularidades.

Previo al llenado del embalse tiene lugar el desvío del río, instancia consistente en el trasvase desde su curso natural hacia una estructura de control que contiene elementos tales como compuertas y/o válvulas que permiten controlar el caudal que pasa por la obra de desvío. Posteriormente se inicia una maniobra coordinada de cierre de los mismos, generando una diferencia entre el caudal natural que ingresa al área del embalse y el que sale de la estructura. De esta manera se comienza a almacenar un volumen de agua necesario para concretar el llenado del embalse. Durante esta etapa circula un caudal menor al natural en el tramo del río ubicado aguas abajo de la presa, generando un impacto que forma parte de las variables que definirán el cronograma de llenado del embalse. Cabe mencionar que una consideración adicional la constituye la necesidad de la existencia de cierta carga hidráulica aguas arriba de la estructura de control para que la misma deje salir caudal, ya que se precisa disponer de suficiente energía potencial para posibilitar la descarga de un caudal definido.

El llenado del embalse debe evaluarse atendiendo a estas consideraciones. Adicionalmente, debe proyectarse bajo diversos escenarios hidrológicos, previendo que el hidrograma definitivo se conocerá en el momento del llenado, si bien previsiones de alerta podrán colaborar en una mejor estimación del llenado.

La principal disyuntiva del llenado se establece en dos aspectos que suelen ser antagónicos:

- En lo que respecta a los aspectos ecológico-ambientales (y en ciertos casos, sociales) es deseable que el mismo sea lo más lento posible. Para minimizar las afectaciones en el sistema aguas abajo del embalse, se requiere erogar caudales próximos al natural, lo que resulta en un tiempo extenso de llenado.
- En cuanto a los beneficios que proporciona la obra, los interesados desean que la misma ingrese lo más pronto posible en operación. De esta manera pueden disfrutar de los beneficios energéticos, de provisión de agua y económicos, permitiendo el inicio de las recaudaciones en el corto plazo.

Además de la modificación temporal en la hidrología del sistema, aparecen cuestiones de seguridad de presas que imponen límites a la velocidad de aumento de nivel del agua en el lago. El denominado “primer llenado del embalse” constituye la primera vez que la presa y eventualmente las laderas reciben la carga de la presión hidrostática de agua, requiriendo un monitoreo por medio de los instrumentos que se colocan para tal fin. Los valores de deformaciones, filtraciones u otros parámetros evolucionan permanentemente mientras se llena el embalse; por lo cual en un momento dado es necesario detenerlo a fin de verificar que las variables se encuentren dentro del rango admisible. Según el caso, estas detenciones pueden ser de una a varias semanas, en el transcurso de las cuales los caudales ingresantes y salientes deben ser iguales a fin de mantener un nivel constante en el lago. Si bien cada presa es única, hay ciertos conceptos generales que suelen mantenerse, lo cual también aplica a las premisas del llenado.

Los plazos de ejecución de las grandes obras hídricas son multi-anuales y resultan de la interacción de factores programáticos, financieros, hidrológicos y climáticos, entre otros. En ocasiones, estas cuestiones pueden dificultar la definición de los plazos de los hitos con exactitud y se deben ir readaptando acorde con las mejores previsiones del proyecto.

5.3. Hidrogramas de llenado de las presas sobre río Santa Cruz

A fin de comprender las propuestas para llenado de los embalses que se analizan a continuación, se expone brevemente la conceptualización del río Santa Cruz que lleva al planteo de los escenarios de caudales ingresantes al estuario que se estudiarán en detalle:

5.3.1. Escenarios de llenado de los embalses

Para poner en contexto la magnitud de la maniobra de llenado, debe mencionarse que el derrame anual medio del río Santa Cruz es del orden de 22700 Hm³. Contemplando que el embalse de JC tendrá un volumen de 3000 Hm³, debe retener el 13 % del derrame anual. Por su parte NK presentará un volumen de 5800 Hm³, que representa el 25 % del volumen que lleva el río en un año. A esto debe sumarse que, siendo deseable que las obras entren en operación lo antes posible, es preferente concentrar este volumen en el lapso de unos pocos meses, siempre que esta premisa no vaya en detrimento de la preservación del hábitat y otros usos del río aguas abajo.

- La conceptualización del funcionamiento del río Santa Cruz durante el llenado del embalse JC se presenta en la Figura 5.2. Ingresa al embalse un hidrograma de llenado QE (parte izquierda de la Figura 5.2), que en las modelaciones expuestas más adelante corresponde

al hidrograma medio anual. Para definir el hidrograma a erogar aguas abajo de la presa, han de contemplarse requerimientos ambientales y otras condiciones propias de la metodología del llenado, resultando en la configuración de un hidrograma salida del llenado QSLL. Éste integra todos los requisitos planteados, como fecha de inicio del llenado, caudales ecológicos ambientales, paradas programadas, inicio de la generación, velocidad de aumento de nivel de agua. Cabe mencionar que la evolución de niveles en el embalse se evalúa mediante un Modelo de Operación de Embalse, que conceptualmente predice que el volumen retenido está dado por la diferencia entre el caudal ingresante y el saliente a lo largo de cierto período de tiempo. Dicho hidrograma salida del llenado experimenta un traslado hacia aguas abajo por el río e ingresa al estuario. En este trabajo se acepta que las modificaciones que experimenta durante el traslado son despreciables. Finalmente, este hidrograma ingresante al estuario es el que será motivo del estudio de impacto del llenado sobre el estuario, y constituye la condición de ingreso en dichas modelaciones.

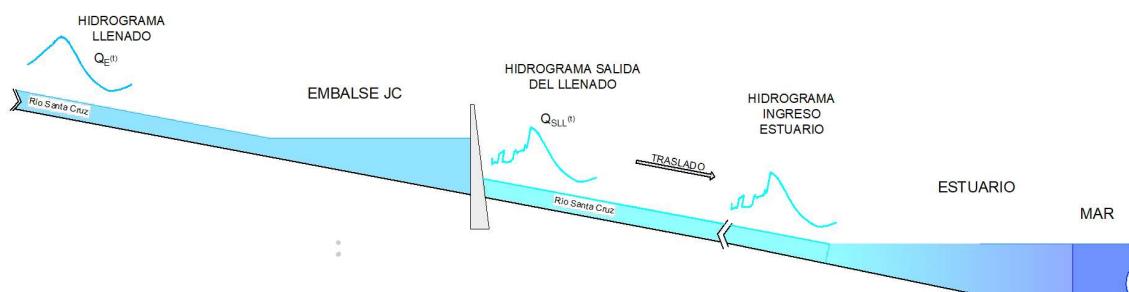


Figura 5.2: Representación esquemática de los hidrogramas en distintos tramos del río Santa Cruz durante el llenado de JC

- La conceptualización del funcionamiento del río Santa Cruz durante el llenado del embalse NK se presenta en la Figura 5.3. Obsérvese que JC ya está construido, y puede aprovecharse su volumen para optimizar el llenado de NK a la par que garantizar la erogación de caudales ambientales aguas abajo de JC durante el proceso. El llenado se evalúa con un hidrograma anual de ingreso QE al embalse de NK y un hidrograma de salida del llenado QSLL en JC. Este último cumple con el valor mínimo acorde al requerimiento ecológico ambiental, permitiendo que la mayor cantidad de agua pueda ser retenida en NK, y se materializa combinando la erogación del embalse NK con parte de la reserva del propio embalse JC. El hidrograma de salida del llenado en JC, una vez trasladado, es el hidrograma ingresante al estuario, motivo de los análisis efectuados.

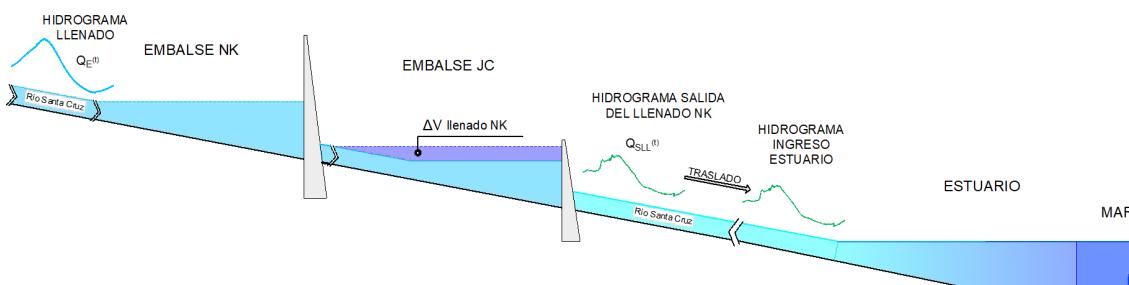


Figura 5.3: Representación esquemática de los hidrogramas en distintos tramos del río Santa Cruz durante el llenado de NK

Eventos tales como la aparición de nuevas condiciones o modificaciones en el contrato hacen que los cronogramas de las obras tengan ciertos márgenes que se van ajustando durante su ejecución. Adicionalmente, el ciclo hidrológico, cuestiones ambientales y otros condicionantes convierten en una decisión con cierto grado de incertidumbre la fecha del inicio del primer llenado. En algunos casos se trata de un esquema más rígido y el inicio del primer llenado es una fecha inamovible, mientras que en otras ocasiones es admisible cierta flexibilidad para equilibrar intereses contrapuestos en el manejo de los recursos hídricos, tales como el beneficio de que la entrada en operación del proyecto sea lo más pronto posible y la necesidad de retrasar este hito por cuestiones hidrológicas o ecológicas.

Con esto en mente, en las próximas páginas se analizará en detalle el efecto de posibles escenarios de llenado de las presas. Para proponer el hidrograma de salida que llega al estuario, se adoptó como referencia para caudales mínimos el hidrograma H1 propuesto por la Universidad de Valladolid para mantenimiento del hábitat del tramo de río aguas abajo de JC. Adicionalmente, para proteger el estuario durante la invernada del Macá Tobiano, se adoptó el principio precautorio evitando modificar los caudales durante junio y julio respecto de los observados en la cabecera del río. Por último, también se consideraron las restricciones de velocidad de llenado y detenciones impuestas por cuestiones técnicas y de seguridad de las obras. La fecha de inicio de llenado ha sido adoptada, pero no por ello se considera definitiva sino que se trata de una mera propuesta.

No es posible en esta publicación plasmar el espectro de modelaciones que abarquen todas las alternativas, entendiendo que existe una gran familia de posibles hidrogramas de llenado resultantes de modificaciones en el cronograma de las obras o por la incidencia de otros aspectos.

Para abordar esta limitación se hace notar que, con el conocimiento actual, el hidrograma más exigente que podría llegar al estuario es el hidrograma de llenado H1 propuesto por Valladolid, que involucra los caudales de excedencia 100 % y 95 % según el mes. Menores caudales no son recomendables para el sistema hídrico agua abajo de la presa, por su impacto en la ecología y en los usos de agua. Se entiende que escenarios más benévolos podrían tener lugar, por ejemplo con mejores condiciones hidrológicas, pero que al no ser restrictivos no ameritan mayor análisis en esta instancia.

Los impactos de los hidrogramas Q_{95} y Q_{100} en el estuario fueron descriptos en el capítulo correspondiente a funcionamiento del estuario en condiciones naturales. El lector podrá comprobar que los escenarios de llenado supondrán caudales iguales o mayores que éstos, con lo cual los valores de salinidad oportunamente cuantificados no serán superados en ninguna variante del hidrograma de llenado que pueda plantearse atendiendo a estos criterios. En definitiva, las modelaciones Q_{95} y Q_{100} sirven de referencia y son indicativas de los mayores efectos que podrían ocurrir en el estuario. Durante un escenario de llenado cualquiera, esos valores de salinidad no serán superados.

5.3.2. Escenarios de hidrogramas ambientales de referencia

Atendiendo a la relevancia de mantener la dinámica natural del río durante períodos tales como la invernada del Macá Tobiano, así como teniendo en cuenta la reflexión del párrafo anterior acerca de que Q_{95} y Q_{100} constituyen caudales de referencia por debajo de los cuales no se mantendría el ecosistema del río y que por ende son directrices a respetar en la salida del llenado, a continuación se explican otros hidrogramas considerados en las modelaciones del estuario, que presentan interés para analizar los impactos del llenado de los embalses.

Se considera que estos hidrogramas actúan en el último tramo del río, que seguirá en estado natural aguas abajo de la última presa. Consecuentemente, serán ingresantes al estuario de los ríos Santa Cruz y Chico.

Considerando las premisas ambientales y técnicas especificadas, cualquier hidrograma resultante del proceso de llenado de ambos embalses resultará en caudales ingresantes al estuario iguales o mayores que los de los escenarios aquí expuestos.

Los hidrogramas seleccionados para describir el comportamiento del estuario incluyen:

- Hidrograma anual medio (definido con excedencia 50 %), correspondiente a los caudales diarios que son superados el 50 % del tiempo de toda la serie de datos medidos en el río Santa Cruz, cuyos registros están disponibles desde 1955.

El hidrograma Q_{50} se presenta en la Figura 5.4, y constituye el comportamiento medio del río Santa Cruz en estado natural, sin obras.

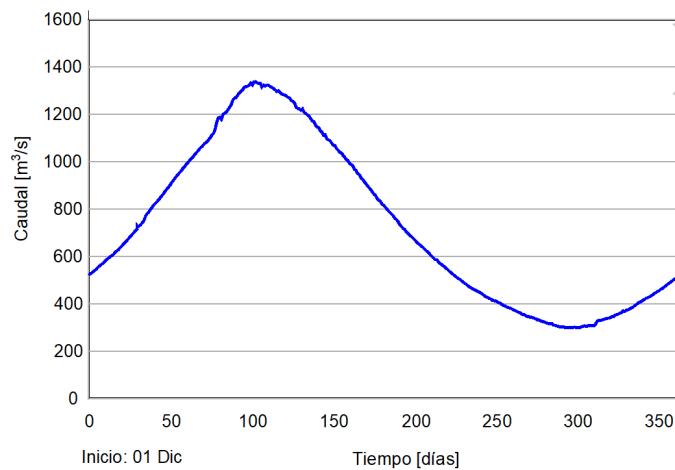


Figura 5.4: Hidrograma de año medio, Q_{50}

Las modelaciones que dan cuenta del comportamiento de la salinidad en el estuario ante este hidrograma se han conceptualizado de acuerdo al esquema de la Figura 5.5, considerando que ingresa al estuario Q_{50} y que aguas abajo la marea es media. Se recuerda que esto último implica contemplar únicamente la componente lunar de la marea, omitien-

do otras componentes que puedan modularla. De esta manera, se da generalidad a las modelaciones, permitiendo la comparación directa entre escenarios e independizando los resultados del año bajo estudio (puesto que sin simplificar, las fluctuaciones de marea difieren año a año).

El detalle de estas modelaciones y respuesta de la salinidad ante Q_{50} ha sido presentado en la sección 4.5.1 *Año medio*.

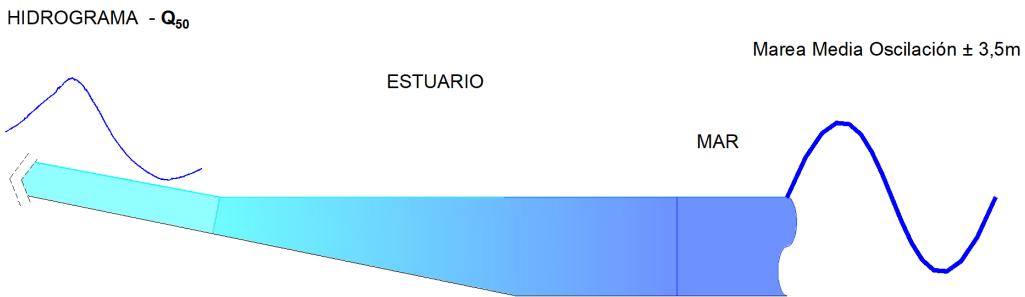


Figura 5.5: Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario de modelación de año medio: hidrograma Q_{50} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo

- Hidrograma anual de excedencia 100 %, correspondiente a los mínimos caudales observados. En este caso, se ha equiparado al hidrograma anual registrado en el período 1955-1956, y se lo ha representado gráficamente en la Figura 5.6. Se trata de una situación extrema natural ocurrida el ciclo hidrológico con menor derrame anual registrado. Constituye el mínimo caudal que podría erogarse en JC durante el llenado de cualquiera de los dos embalses y acotaría la máxima afectación posible.

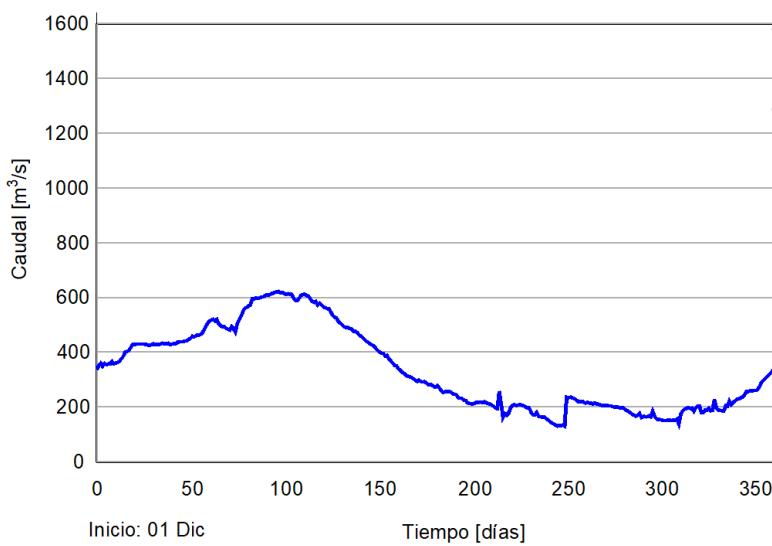


Figura 5.6: Hidrograma de mínimos caudales observados, Q_{100}

En la Figura 5.7 se representa el esquema conceptual bajo el cual se ha planteado la modelación de este escenario, con un hidrograma Q_{100} ingresante al estuario y marea media aguas abajo. El período modelado abarca un año completo, tal como se trató el año medio. El comportamiento de la salinidad bajo estas condiciones se ha presentado en la Sección

4.5.2.



Figura 5.7: Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario extremo: hidrograma Q_{100} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo

- Hidrograma anual de excedencia 95 %, formulado con los caudales que fueron superados el 95 % del registro histórico. Se representa gráficamente en la Figura 5.8. Constituye una serie de caudales de relevancia ecológica ambiental que se ha recomendado en estudios previos como valor mínimo a erogar en ciertos meses, con lo cual también constituye un escenario de interés para las evaluaciones del estuario en los períodos de llenado de los embalses.

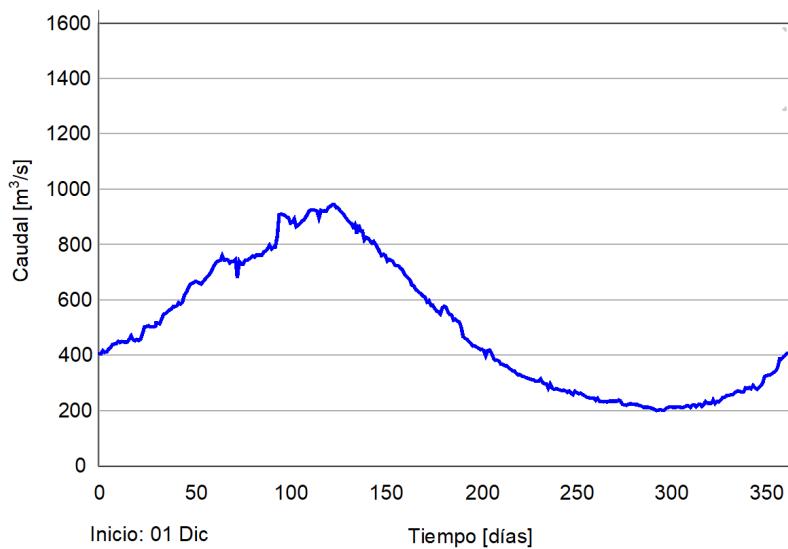


Figura 5.8: Hidrograma de excedencia 95 %, Q_{95}

El esquema de modelado del hidrograma mencionado se presenta en la Figura 5.9, ingresando Q_{95} al estuario de los ríos Santa Cruz y Chico y con la oscilación de la marea media aguas abajo. La respuesta resultante de la salinidad se detalla en la Sección 4.5.3.

Se hace hincapié en que estos tres hidrogramas de por sí no constituyen escenarios de llenado, sino que se han estudiado en virtud de su relevancia ambiental. Su valor radica en que permiten ganar sensibilidad en lo que respecta a respuesta de la salinidad ante modificaciones en el caudal del río Santa Cruz, y que contribuyen a tomar decisiones respecto al llenado con una perspectiva conservadora.

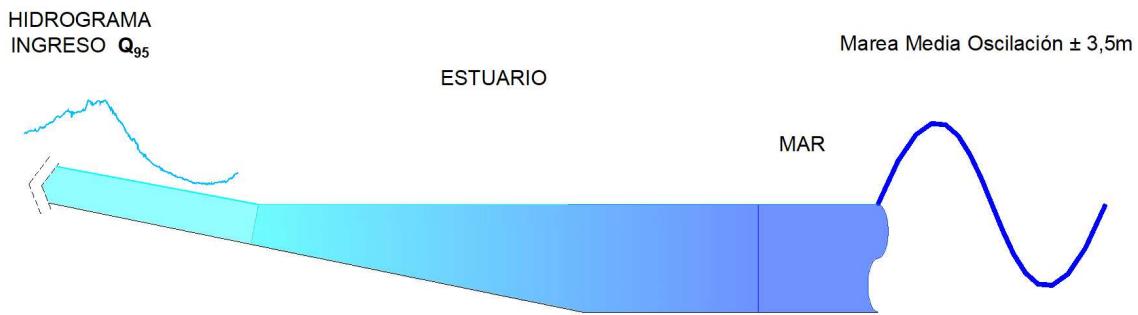


Figura 5.9: Representación esquemática de las condiciones de contorno para el escenario de caudales pobres: hidrograma Q_{95} ingresante al estuario desde el río Santa Cruz y variación de niveles producto de la marea media aguas abajo

Las premisas ambientales que guían la propuesta de escenarios de llenado incluyen:

- **Preservar el hábitat del tramo del río aguas abajo de JC, implementando caudales mayores o iguales a Q_{95} o Q_{100} según el mes, acorde a la propuesta de Universidad de Valladolid.**
- **Aplicación del principio precautorio en los meses de invernada del Macá Tobiano, garantizando el ingreso de Q_{50} al estuario durante junio-julio.**

5.3.3. Formulación general de hidrogramas de llenado con base ambiental

Si bien se ha expuesto que la magnitud y complejidad de estas obras conlleva que sea difícil establecer con exactitud la fecha de inicio de llenado y plantear los hidrogramas de llenado definitivos de ambas obras, cualquier escenario propuesto debería respetar ciertas pautas ambientales y técnicas.

Los estudios orientados a la preservación del hábitat de las especies del tramo del río aguas abajo de la presa JC resultaron en la propuesta de un hidrograma de salida de llenado denominado H1 [9]. El mismo está compuesto a partir de eventos históricos, que comprenden los caudales mínimos observados y otros de baja probabilidad de ocurrencia, tal como lo son Q_{100} y Q_{95} .

El otro aspecto ambiental a considerar es la preservación del hábitat del Macá Tobiano durante su invernada. Durante la evaluación de alternativas se contempló la aplicación del principio precautorio durante los meses de junio y julio, resultando en la consigna de erogar los caudales de año medio durante dicho período².

De la conjunción de estos los criterios que permiten preservar el río y el estuario³, resulta el hidrograma que se compone mensualmente según se indica en Tabla 5.1 y que se grafica en la

²Atendiendo al hecho de que los tiempos de residencia del estuario son del orden de 20 días, también podría ser una decisión fundamentada extender la erogación de Q_{50} adicionalmente al mes de mayo. De esta manera, durante mayo la salinidad recuperaría su patrón de distribución de año medio y para el mes de junio ya no habría ningún apartamiento apreciable respecto de la situación natural. Esta variante no se trata en la presente publicación.

³Podría ocurrir que estudios ecológicos futuros revelen nuevos requerimientos de la biota del estuario. En tal caso, quizá sería necesario que el hidrograma de salida esté integrado por caudales mayores a los adoptados en este estudio.

Figura 5.10. Este hidrograma se ha considerado en el proyecto como el mínimo a mantener en el tramo natural del río y como ingreso al estuario, contemplando aspectos ecológicos, ambientales y sociales, y equilibrando estos aspectos con los intereses de la obra. Constituye la demanda mínima de caudales que se le solicitará erogar a JC.

Tabla 5.1: Caudales mínimos ambientales mensuales

Mes	Caudal mín. ambiental
Enero	Q_{100}
Febrero	Q_{95}
Marzo	Q_{95}
Abril	Q_{95}
Mayo	Q_{95}
Junio	Q_{50}
Julio	Q_{50}
Agosto	Q_{95}
Septiembre	Q_{95}
Octubre	Q_{95}
Noviembre	Q_{100}
Diciembre	Q_{100}

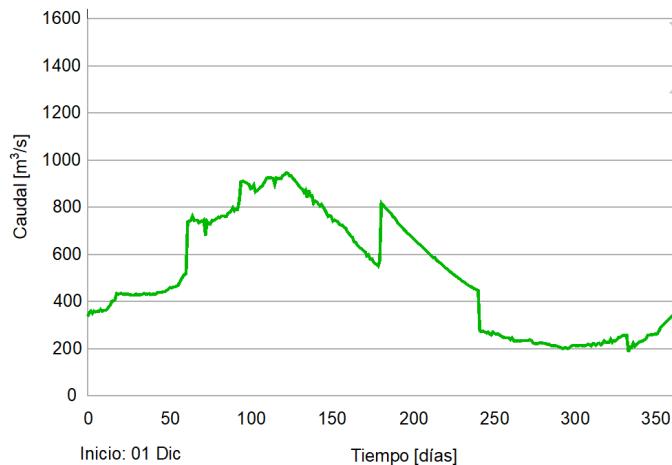


Figura 5.10: Hidrograma de caudales mínimos ambientales

Además de estas condiciones ambientales, el llenado de los embalses debe cumplir otras limitaciones e involucra operaciones especiales. Por ello, este requerimiento de caudal ambiental es indicativo, y en general resulta esperable que el hidrograma de salida durante el llenado sea diferente y con caudales mayores aunque sea en algunos meses.

Por ejemplo, una consideración en este sentido está dada por el hecho de que la fecha del inicio del llenado es susceptible de ser modificada por numerosos motivos: en ocasiones hay que esperar un momento propicio mientras que en otros casos se opera en función de otros condicionantes.

Finalmente, el hidrograma de salida de llenado de ambos embalses ha de definirse atendiendo a consideraciones que incluyen niveles de parada que responden a cuestiones de instrumentación y seguridad de presas, capacidad de los órganos de descarga, salto mínimo de las turbinas (temporarios y permanentes), velocidad máxima admisible de ascenso del nivel de agua en el embalse, fecha de inicio del llenado, y los recién expuestos caudales mínimos ambientales de

referencia.

En la Figura 5.11 y la Figura 5.12 se ejemplifican resultados de la modelación de los movimientos de embalse durante el llenado de ambas presas. En cada caso se propuso una fecha de inicio dada, que no es definitiva, y aplicando el MOE se obtuvieron nivel y caudal erogado. Se aprecia que es posible concretar cada proceso de llenado en el transcurso de un período hidrológico (menos de un año). En el estudio del llenado de NK se presenta también el caudal efluente del embalse de aguas abajo, atendiendo que son de interés los hidrogramas que llegarán al estuario. Ambos casos satisfacen los caudales ambientales del tramo del río que vincula JC con el estuario.

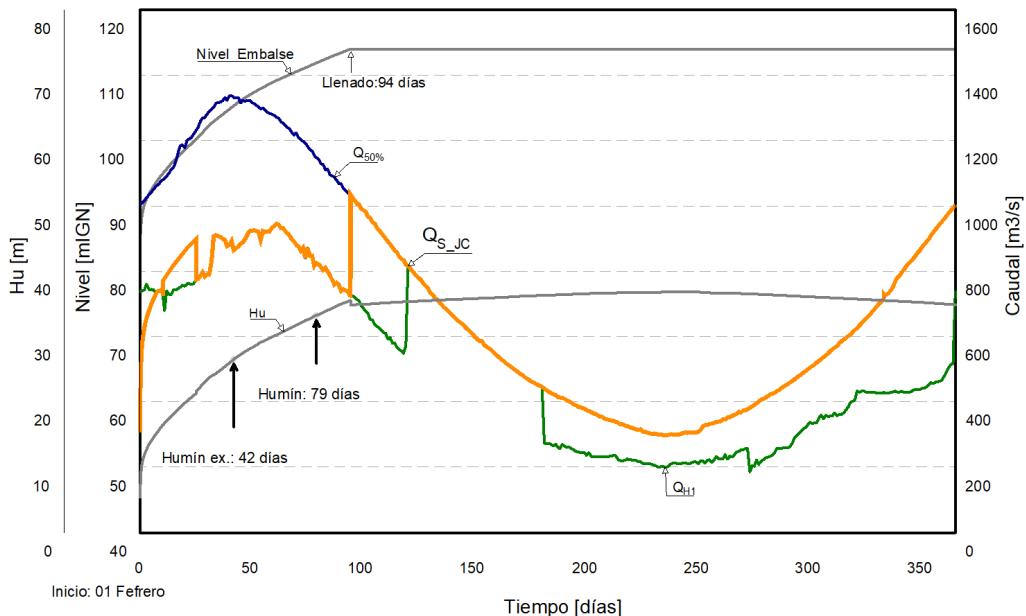


Figura 5.11: Evolución temporal de niveles y caudales durante el llenado del embalse JC. Nivel de embalse y salto útil H_u se indican en gris, mientras que caudal ingresante de año medio Q_{50} se presenta en azul, caudal mínimo ambiental de referencia Q_{H1} se representa en verde, y caudal de salida del llenado Q_{sjc} aparece en naranja

Según se ha explicado previamente, la fecha de inicio del llenado puede ser modificada durante la etapa de proyecto o incluso en la de ejecución. Para poder abarcar una variedad de escenarios posibles, se han efectuado simulaciones empleando el Modelo de Operación de Embalses para evaluar la evolución temporal de niveles y caudales ante fechas de inicio de llenado correspondientes a todos los meses del año. Esto permite dotar de generalidad a los mínimos caudales de salida que determinarán el comportamiento del estuario, aportando una visión global de los posibles efectos.

En la Figura 5.13 se presentan los caudales de salida durante el llenado de JC para 10 fechas de inicio diferentes. Cada hidrograma respeta las consideraciones enumeradas previamente e inicia el primer día del mes. Se exceptúa iniciar el llenado en los meses de junio y julio en virtud de mantener el principio de precautorio para preservar el hábitat de invernada del Macá Tobiano. El gráfico presenta además a modo de referencia el hidrograma envolvente mínimo H1 ya definido en la Tabla 5.1.

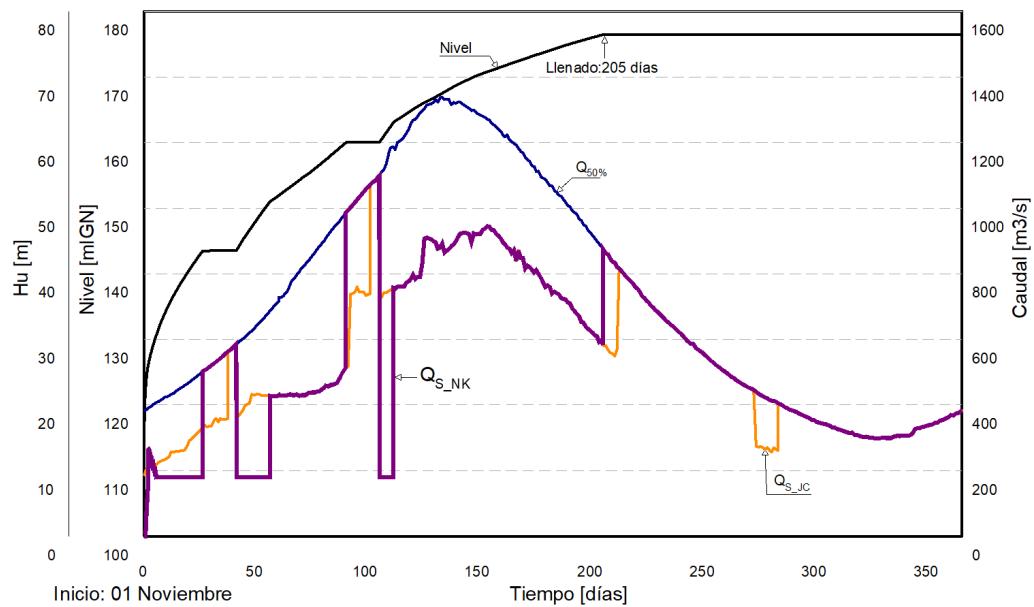


Figura 5.12: Evolución temporal de niveles y caudales durante el llenado del embalse NK. Nivel de embalse se indica en negro, mientras que caudal ingresante de año medio $Q_{50\%}$ se presenta en azul, caudal erogado por NK Q_{SNK} se grafica en morado, y caudal de salida del llenado Q_{SJC} aparece en naranja

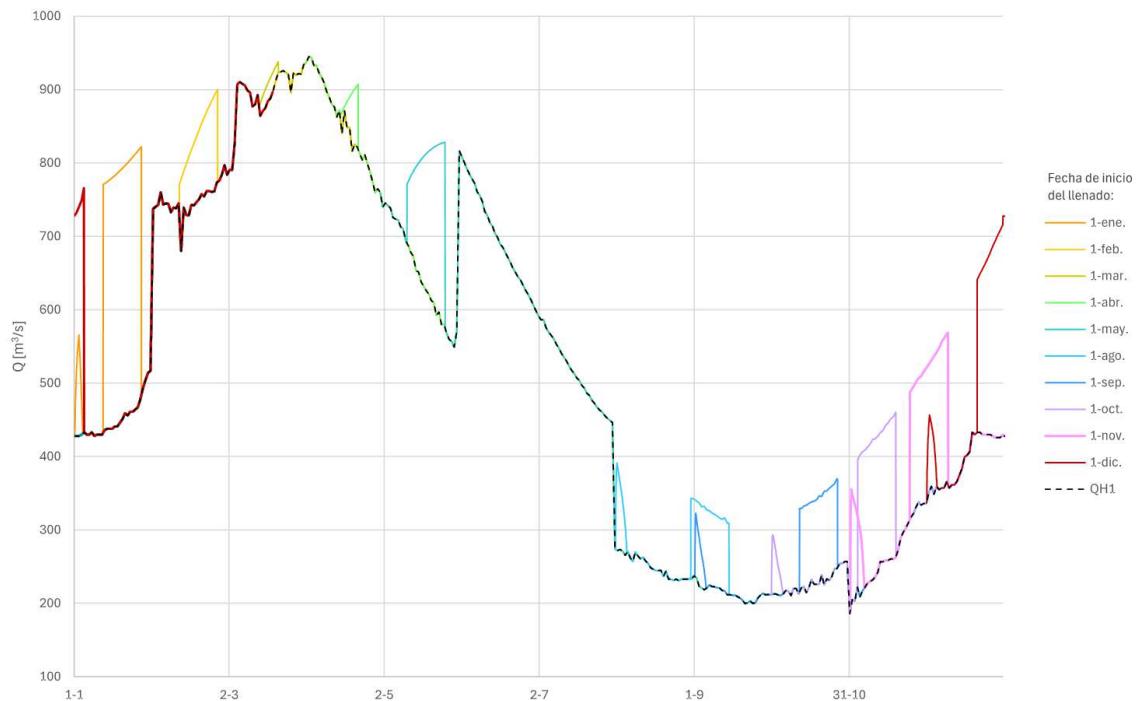


Figura 5.13: Hidrogramas salientes de JC durante el llenado de su embalse, para distintas fechas de inicio de llenado. A modo de referencia, en línea discontinua se presenta el caudal mínimo ambiental Q_{H1}

En la Figura 5.14 se aplica una metodología similar para evaluar los caudales salientes de JC durante el llenado de NK. Este embalse tiene un mayor volumen de agua que retener, por lo cual requiere un período de llenado de mayor extensión temporal. Otra particularidad es que los caudales erogados por NK pueden complementarse utilizando la reserva de JC para respetar los valores mínimos establecidos por Q_{H1} . El gráfico presenta únicamente la erogación desde JC, puesto que es éste el hidrograma que interesa para evaluar la respuesta del estuario.

En las alternativas analizadas en la Figura 5.13 y la Figura 5.14, el llenado de cada embalse

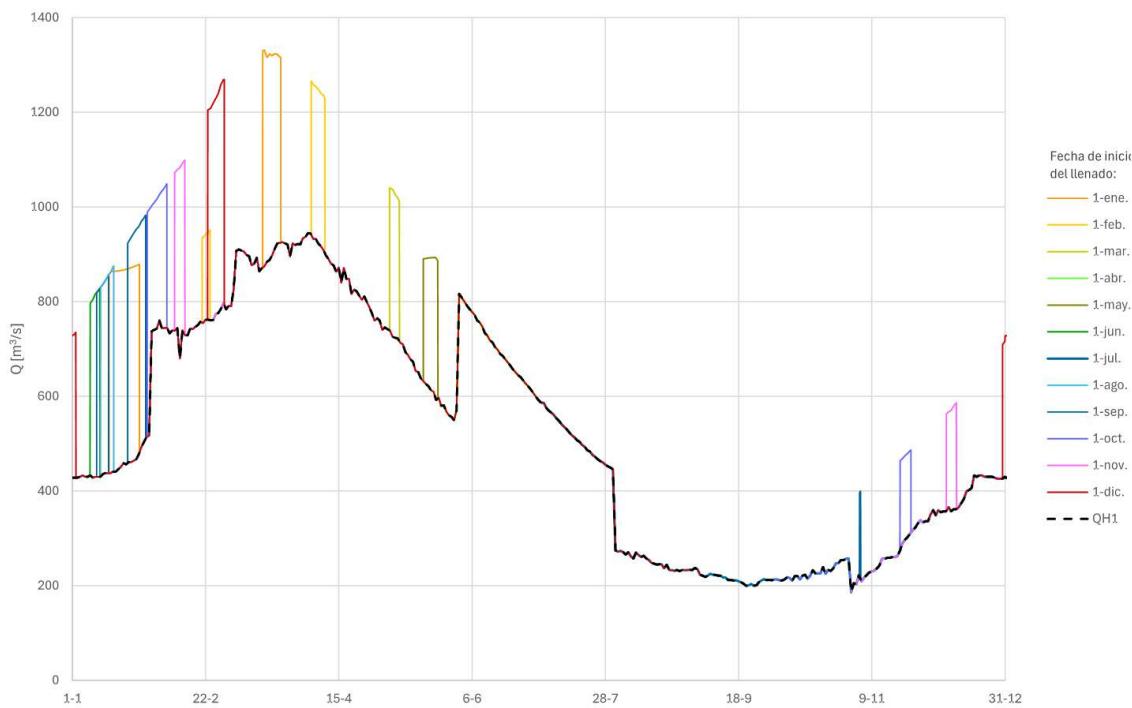


Figura 5.14: Hidrogramas salientes de JC durante el llenado del embalse NK, para distintas fechas de inicio de llenado. A modo de referencia, en línea discontinua se presenta el caudal mínimo ambiental Q_{H1}

fue definido atendiendo a la preservación del hábitat aguas abajo de las presas (río y estuario) y proponiendo distintas fechas de inicio. Como resultado, se obtiene un hidrograma envolvente mínimo en la salida de JC, que trasladado hacia aguas abajo constituye el de ingreso al estuario. Se trata entonces de un escenario envolvente que subsana la incertidumbre respecto a las fechas de inicio de los llenados. Por este motivo, resulta relevante para definir la estrategia de llenado tener presentes también los resultados las modelaciones concernientes a caudales ingresantes al estuario Q_{100} , Q_{95} y Q_{50} , presentadas en el capítulo de estudio de situación sin presas.

La Figura 5.15 pone de manifiesto la relación entre el hidrograma envolvente de caudales mínimos Q_{H1} y los estudiados durante el análisis del estuario en condiciones naturales medias y extremas. La composición de las modificaciones que experimentó la salinidad en estos escenarios permite inferir en forma aproximada la evolución que tendrá dicho parámetro durante el llenado, y poner una cota máxima a los valores de salinidad que podrían observarse.

Asumiendo que el hidrograma H1 es aceptable ecológica y ambientalmente, es posible afirmar que los escenarios modelados engloban las máximas afectaciones resultantes del llenado que se pueden dar en el tramo aguas abajo del río y en el estuario, incluso contemplando distintas fechas de inicio.

Por último, se recuerda que estos escenarios de llenado han sido planteados suponiendo que el río Santa Cruz trae un caudal medio a las presas (Q_{50}), pero llegado el momento podrán tener lugar otros hidrogramas de ingreso a los embalses. En un año hídricamente rico, con un derrame anual superior, el llenado podrá efectuarse en menos tiempo. Si por el contrario, los caudales

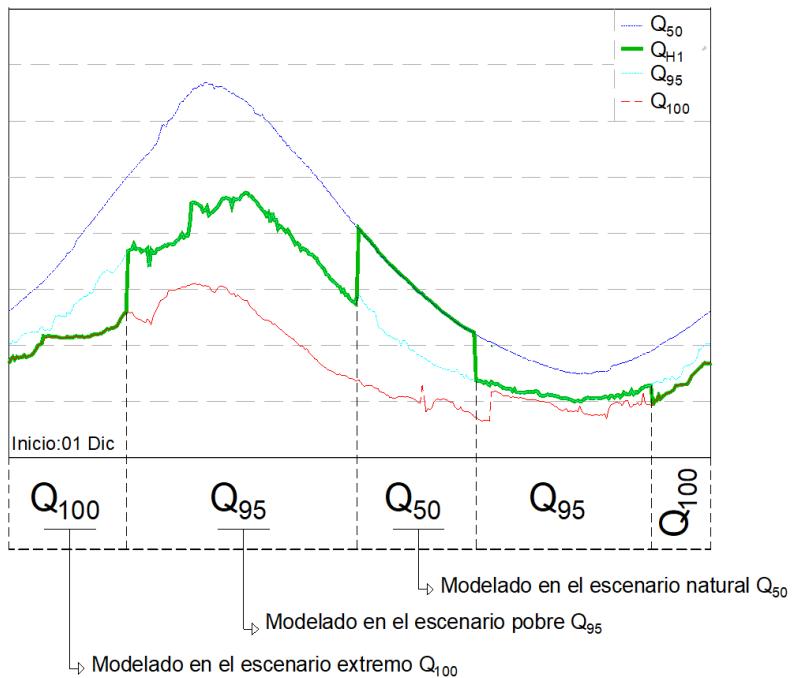


Figura 5.15: Representación gráfica del hidrograma de referencia de caudales mínimos ambientales Q_{H1} , superpuesto a hidrogramas de distinta excedencia que lo componen

son más bajos por tratarse de un año hídricamente pobre, el tiempo que demandará la maniobra de llenado será mayor. Las premisas de erogación mínima aguas abajo de JC para mantener el hábitat seguirían siendo aplicables en ambos casos.

5.3.4. Criterio con que se valoraron afectaciones durante el llenado

A partir del análisis de comportamiento del estuario en situación natural recogido en el Capítulo *Modelación del estuario en estado natural*, pudo identificarse que la hidrodinámica del estuario no es particularmente sensible a variaciones en los caudales que llegan del río Santa Cruz, pero que en cambio los fenómenos de transporte sí experimentan cambios al modificar el hidrograma del río. Según se presentó en el Capítulo *Caracterización del medio físico*, las mediciones en campo de variables transportadas como los sedimentos o nutrientes presentan desafíos que dificultan su caracterización e interpretación. Adicionalmente, aun contando con datos que hicieran viable la calibración de un modelo numérico que incluya estos parámetros, la simulación de este tipo de variables requiere una mayor complejidad y esfuerzo computacional. Por su parte, la salinidad constituye un trazador conservativo más sencillo de modelar, y cuyo comportamiento ha sido satisfactoriamente caracterizado en campo. Atendiendo además a que es un parámetro que caracteriza al medio natural, se ha elegido como una variable de interés para caracterizar efectos durante el llenado de los embalses.

La salinidad fue seleccionada como parámetro para evaluar modificaciones en el ambiente en que reside la biota. Se cuantifica su variación en el estuario en general y, contemplando la importancia de preservar el hábitat del Macá Tobiano y la provisión de agua potable, se estudia en detalle su variación en la zona de invernada de esta ave y en la toma de agua de Puerto Santa Cruz. Estas modificaciones se contextualizan contrastándolas con las naturalmente observadas en un año medio.

5.4. Verificación de llenados de proyecto

A continuación se presentarán los resultados de dos modelaciones del proyecto de llenado de las represas, una de cada llenado de su embalse. Son dos escenarios posibles de llenado, con fechas de inicio definidas y que contemplan todos los aspectos que requieren los procedimientos del llenado. Cada una de ellas da como resultado un hidrograma de ingreso al estuario de los ríos Santa Cruz y Chico. Aplicando esta condición de contorno al modelo del estuario descripto en el Capítulo 3, ha sido posible evaluar la respuesta de la salinidad ante ambas propuestas de llenado.

En las próximas páginas, los resultados de las modelaciones para caracterización de la salinidad muestran su evolución en tiempo y espacio. En cualquiera de los escenarios planteados, dada una estación de monitoreo se observa que la salinidad presenta una variación temporal dependiente del caudal ingresante desde los ríos y de los niveles de marea.

Los resultados se examinan desde tres perspectivas:

- Evolución de la salinidad durante llenado comparada con la observada durante un año medio, Q_{50} . Los datos medios mensuales se presentan para todas las estaciones, mientras que el detalle de evolución temporal horaria se muestra para estaciones seleccionadas: 04, 07 y 10.
- Salinidad en la toma de agua de Puerto Santa Cruz (ver ubicación en Figura 1.11), a fin de disponer de un referencia para evaluar su operatividad.
- Salinidad en el sector de estuario ocupado por el Macá Tobiano durante su invernada. Para definir el criterio, se ha considerado el patrón de distribución del ave⁴. Se hace notar que estando las estaciones definidas en la línea de máxima profundidad, serían representativas de los canales principales que el mismo prefiere; por otra parte, al tener mayor presencia el

⁴Las observaciones efectuadas durante una invernada muestran que estas aves suelen agruparse en distintos puntos del río, pero no se las encuentra asociadas a una zona específica. Más bien, parece que se relacionan con afloramientos de alimento y se mueven siguiendo la marea, utilizando principalmente los canales principales para desplazarse. Durante estos recorridos, se alimentan y pueden considerarse casi como partículas transportadas por la corriente. Aproximadamente el 90 % de los individuos se registraron entre Isla Leones y Cañadón Misionero (ver Figura 1.14). Otros reportes que mencionan que las detecciones se realizaron principalmente en la zona donde se unen los ríos Chico y Santa Cruz (sector Frigorífico). Allí, los individuos se desplazaban tanto dentro del río Chico como en el río Santa Cruz, y los máximos conteos se dieron en momentos intermedios de los ciclos de marea. Las observaciones más alejadas de esta área correspondieron a ejemplares vistos cerca de Puerto Santa Cruz.

Macá Tobiano entre Cañadón Misionero e Isla Leones, se hace hincapié en las Estaciones 08 a 11.

5.4.1. Modificaciones durante llenado del embalse Gdor. Jorge Cepernic

El presente punto expone la respuesta del estuario ante una propuesta de llenado de proyecto ideal. De entre los hidrogramas posibles ya discutidos, se ha adoptado el correspondiente a una fecha de inicio concreta, a fin de ilustrar las modificaciones que resultarían de dicho escenario.

Esta elección no invalida el hecho de que la fecha de inicio de llenado efectiva sea finalmente otra llegado el momento.

Hidrograma de llenado del embalse Gdor. Jorge Cepernic

La propuesta del hidrograma de llenado del embalse JC que se discute a continuación se basó en consideraciones energéticas y técnicas, en la comprensión de la dinámica de respuesta del estuario aportada por la modelación de otros escenarios de llenado, incorporando las decisiones de efectuar pausas orientadas a minimizar afectaciones en los meses de invernada del Macá Tobiano (junio y julio), y evitando llenar durante los meses hídricamente más pobres (septiembre y octubre), que de por sí en un año medio exhiben la mayor salinidad media.

Previamente a estudiar las afectaciones en el estuario, fue necesario definir el hidrograma aplicando el Modelo de Operación de Embalse. En líneas simples, se recuerda que dicho modelo se basa en el principio de conservación de masa: el volumen de agua acumulado en el embalse provoca variaciones en su nivel, y está dado por la diferencia entre el caudal que ingresa desde el río y el erogado hacia aguas abajo. Se consideró una serie de caudales medios diarios históricos ingresantes desde Charles Fuhr, se propuso una erogación acorde a las consignas descriptas en el párrafo anterior y se modeló la evolución de nivel de embalse resultante hasta alcanzar la cota de diseño.

El escenario de llenado resultante se extiende entre el 01/04 y el 09/12 de un mismo año, y presenta algunas interrupciones dentro de dicho período. En líneas generales, el llenado se efectúa erogando Q_{100} entre el 01/04 y el 25/04, Q_{98} entre el 11/05 y 30/05, Q_{100} entre 30/07 y 31/08, y Q_{95} entre el 31/10 y 09/12, mientras que en los restantes períodos se eroga el mismo caudal observado en Charles Fuhr.

El mismo se presenta en la Figura 5.16, donde se grafica el caudal que aporta el río así como el erogado aguas abajo de la presa JC. Todos ellos se muestran solo en el ciclo de llenado del embalse, es decir desde mediado de marzo a mediados de diciembre. También se representan Q_{95} , Q_{98} y Q_{100} como hidrogramas de referencia. La Tabla 5.2 presenta algunos valores orientativos (aproximados): caudales medios mensuales que resultan de este escenario, así como los valores de un hidrograma natural que ingresa al embalse y la proporción entre ambos⁵.

⁵En los caudales de año medio reportados, existe una ligera diferencia entre el caudal del escenario de referencia

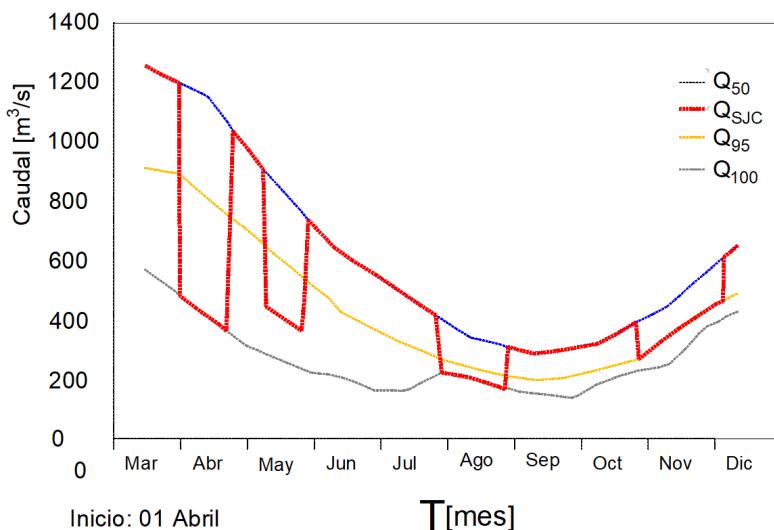


Figura 5.16: Hidrogramas resultantes del llenado del embalse JC. Caudal del río Santa Cruz que ingresa a JC (azul) y erogado hacia aguas abajo (rojo). Caudal con excedencia del 95 % y 100 % indicados como referencia (naranja y gris respectivamente)

Tabla 5.2: Caudales medios mensuales correspondientes al escenario de llenado del embalse JC

Mes	Q entrante [m ³ /s]	Q erogado [m ³ /s]	Q erogado/entrante [%]
Abril	1155	556	48
Mayo	926	596	64
Junio	682	668	98
Julio	510	496	97
Agosto	364	205	56
Septiembre	284	284	100
Octubre	320	320	100
Noviembre	443	360	81

En la Figura 5.17 se presenta la conceptualización de modelo de estuario resultante, escenario que se analiza a continuación.



Figura 5.17: Esquema de la modelación del estuario durante el llenado del embalse JC

Modificación espacio-temporal de la salinidad

A fin de examinar la evolución temporal de la salinidad, se presenta en la Figura 5.18 la serie de valores observados en Estación 07 durante el llenado. La salinidad en condiciones de año medio

de Tabla 5.2 y el caudal ingresante al embalse. Conceptualmente corresponden a un mismo escenario y deberían ser iguales. La diferencia radica en que las modelaciones fueron realizados en distintos años, con lo cual las series históricas actualizadas consideradas son diferentes en su longitud y arrojan promedios ligeramente diferentes.

se representa a modo de referencia. En ambos escenarios, la misma presenta una variación semidiurna de gran amplitud ocasionada por las mareas (que se observa como un área sombreada debido a la escala del gráfico) y una evolución anual más lenta, asociada a los caudales del río Santa Cruz.

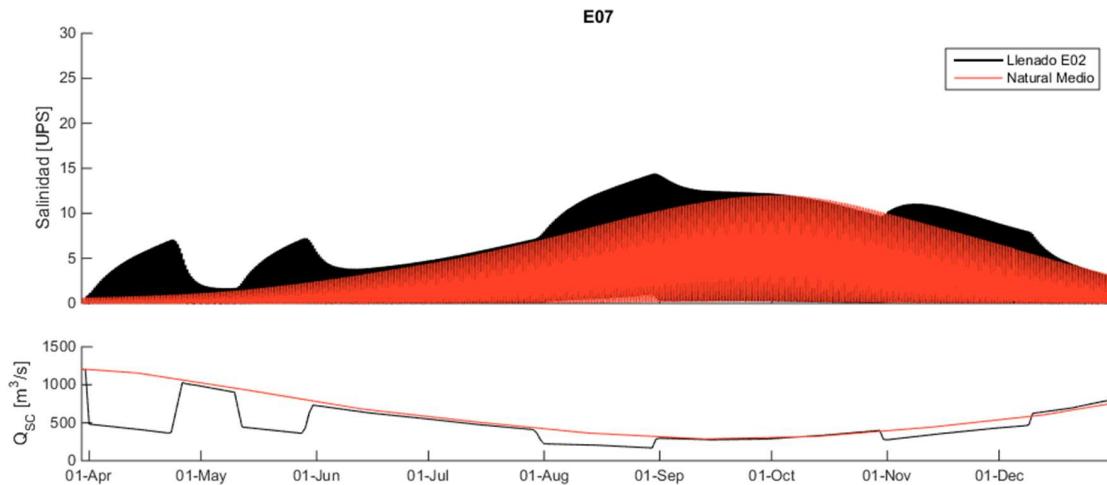


Figura 5.18: Llenado del embalse JC. Evolución temporal de la salinidad en la Estación 07 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación

Contrastando la salinidad durante el llenado con su hidrograma correspondiente, se evidencia un aumento de la salinidad en cada período de reducción de caudales. A su vez, las pausas del llenado resultan en una reducción progresiva de la salinidad hasta recuperar los valores de un año medio. En contraste a las anteriores etapas de llenado, en que la salinidad es siempre creciente, la cuarta etapa (con hidrograma del río en crecida en noviembre-diciembre) implica un desplazamiento respecto de la situación de base pero dado que el caudal aumenta con el tiempo, la salinidad disminuye. Si bien las salinidades más elevadas durante el llenado se observan en agosto, cuando se erogan desde el embalse los menores caudales, es a fines de abril cuando se aprecia la mayor diferencia con respecto a la situación de base, debido a la disparidad porcentual entre caudales Q_{50} y Q_{100} para ese mes.

Respecto a los tiempos de recuperación tras cada interrupción de llenado, en la Tabla 5.3 se han seleccionado algunos valores observados en pleamar en situación natural y de llenado. Los apartamientos máximos hacia el final de cada etapa rondan las 4 UPS (salvo en diciembre). Se recuerda al lector que los apartamientos de los valores medios son más reducidos debido a que durante la parte del ciclo diario de marea cercano a bajamar la salinidad permanece casi siempre nula. Por otra parte, estos apartamientos deben analizarse en el contexto de variación semidiurna preexistente.

A fin de contemplar la variabilidad espacial en el estuario, en la Figura 5.19 y la Tabla 5.4 se presenta un análisis de evolución temporal similar para Estaciones 04 y 10.

Se observa que en abril y mayo el llenado provoca que el desplazamiento del frente salino sea tal que el mismo alcance la Estación 04 cerca de pleamar, algo que no ocurriría naturalmente en

Tabla 5.3: Llenado del embalse JC. Evolución de la salinidad en la Estación 07 tras interrupciones del llenado

Fecha	Δt pausa [días]	Salinidad pleamar E07 [UPS]		
		Natural	Llenado	Diferencia
26-Apr	1	1.0	5.6	4.6
	5	1.1	2.4	1.3
	10	1.3	1.8	0.5
	15	1.4	1.7	0.3
31-may	1	2.4	6.5	4.1
	5	2.6	4.6	2.0
	10	3.0	3.9	0.9
	15	3.3	3.9	0.6
	20	3.6	4.1	0.5
1-sep	1	10.3	14.3	4.0
	5	10.7	13.4	2.7
	10	11.1	12.7	1.6
	15	11.4	12.5	1.1
	20	11.7	12.4	0.7
10-Dec	1	5.5	7.9	2.4
	5	5.0	6.0	1.0
	10	4.5	4.7	0.2
	15	4.0	3.9	0.0
	20	3.4	3.3	0.0

esa época del año (sí entre julio y noviembre). El apartamiento más significativo respecto de la situación media inalterada se da en agosto, del orden de 2.5 UPS. La recuperación es inmediata tras cada interrupción del llenado (Tabla 5.4).

En la Estación 10 se observa que los valores en bajamar sí se ven afectados durante el llenado. Al igual que en la Estación 07, los mayores apartamientos respecto de la salinidad de un año medio ocurren hacia abril (una diferencia máxima de 6 UPS), si bien se alcanzan salinidades algo mayores hacia agosto (hasta 22.7 UPS). El aspecto positivo de las observaciones de agosto es que los valores alcanzados no serían sensiblemente mayores que los máximos anuales observados en septiembre-octubre de un año medio. El retorno a las condiciones naturales una vez finalizado el llenado es más lento que para la Estación 07 (Tabla 5.4).

El análisis hasta aquí efectuado se centra en describir la variabilidad temporal. A fin de ofrecer una interpretación más tangible de la distribución espacial de salinidad en el estuario, en la Figura 5.20 se representa un mapa de salinidad en el estuario hacia fines de agosto. Esta fecha se ha seleccionado contemplando que entonces ocurren los máximos valores de salinidad durante el llenado, eligiendo específicamente un momento cercano a pleamar⁶ para ofrecer una caracterización de la máxima afectación posible. La comparación gráfica de los resultados durante llenado y en un año medio permite apreciar el máximo avance del frente salino durante todo el llenado: en el tramo final del río Santa Cruz la salinidad que en situación natural estaba debajo de 10 UPS pasaría a superar ese valor en esta pleamar, a la par que en contraste con la situación natural salinidades superiores a 20 UPS serían observables varios kilómetros aguas arriba de Isla Leones.

⁶El lector debe saber que si bien el paso de tiempo de cálculo es del orden del minuto, el almacenamiento de mapas se ha configurado con intervalos de dos horas. Por ende, los resultados no son en el momento mismo de pleamar sino en sus cercanías. También se hace mención de que los colores del mapa en la Isla Leones y en algún sector de barrancos no es representativo del momento graficado, sino que es producto de la condición inicial de salinidad, que se ha asignado también a sectores que quedan en todo momento fuera del agua (por ende, conservan el valor inicial sin modificar).

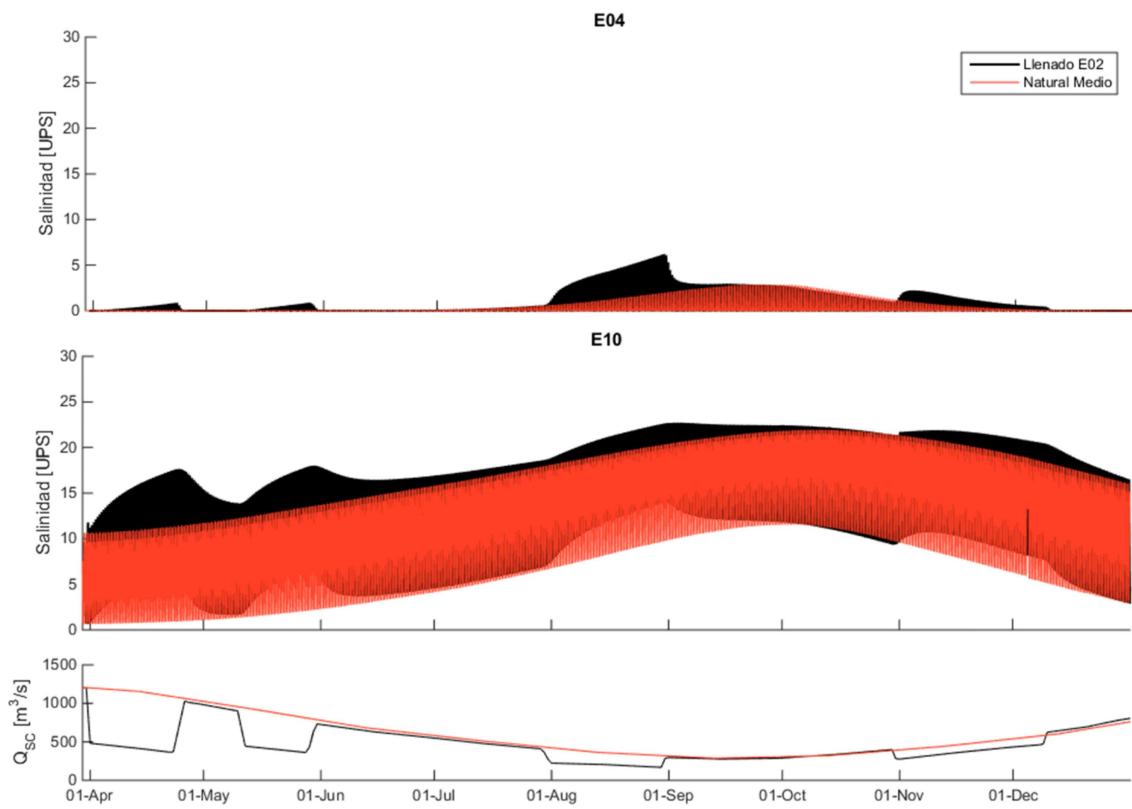


Figura 5.19: Llenado del embalse JC. Evolución temporal de la salinidad en las Estaciones 04 y 10 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación



Figura 5.20: Máximo avance del frente salino durante el llenado del embalse JC. Distribución espacial de salinidad el 30 de agosto cerca de pleamar, para el escenario de llenado (izq.) y en un año medio (der.)

Para profundizar en la variabilidad espacial de las afectaciones, a continuación se emplean diagramas de cajas que permiten evaluar simultáneamente las Estaciones 01 a 14 (definidas en la Figura 3.8) en forma cuantitativa. En ellos, cada estación queda representada por el valor medio y su variabilidad, poniendo en contexto las fluctuaciones observadas⁷. Se han seleccionado dos meses de significativa afectación.

En la Figura 5.21 se examina el mes de agosto, pues es el que presenta las salinidades más

⁷Se recuerda al lector que en cada caja la marca central es la mediana, los bordes de la caja son los percentiles 25 y 75, y las barras se extienden a los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos. Los valores atípicos (aqueños que exceden $\pm 2.7\sigma$ para una distribución normal) no se han representado. Mientras que la extensión de las cajas refleja las variaciones semidiurnas asociadas a pleamar y bajamar, las medianas vienen condicionadas principalmente por el caudal aportado por el río Santa Cruz.

elevadas del llenado. En este caso, el mayor apartamiento respecto de la condición de año medio se da en Estación 08, con un aumento de la salinidad media de 7.1 a 10 UPS (notar que los percentiles 25 y 75 para Q_{50} se encuentran en 3.5 y 10.6 UPS respectivamente).

Tabla 5.4: Llenado del embalse JC. Evolución de la salinidad en las Estaciones 04 y 10 tras interrupciones del llenado

Fecha	Δt pausa [días]	Salinidad pleamar E04 [UPS]			Salinidad pleamar E10 [UPS]		
		Natural	Llenado	Diferencia	Natural	Llenado	Diferencia
26-Apr	1	0.0	0.0	0.0	11.5	17.5	6.0
30-Apr	5	0.0	0.0	0.0	11.7	15.8	4.1
5-may	10	0.0	0.0	0.0	12.0	14.5	2.5
10-may	15	0.0	0.0	0.0	12.2	13.9	1.7
31-may	1	0.0	0.1	0.1	13.6	18.0	4.4
4-jun	5	0.0	0.0	0.0	13.9	17.4	3.5
9-jun	10	0.0	0.0	0.0	14.3	16.7	2.4
14-jun	15	0.0	0.0	0.0	14.6	16.5	1.9
19-jun	20	0.0	0.0	0.0	15.0	16.5	1.5
1-sep	1	2.1	4.5	2.4	20.4	22.7	2.3
5-sep	5	2.3	3.1	0.8	20.7	22.7	2.0
10-sep	10	2.5	2.9	0.4	21.0	22.6	1.6
15-sep	15	2.7	3.0	0.3	21.2	22.5	1.3
20-sep	20	2.9	2.9	0.0	21.5	22.5	1.0

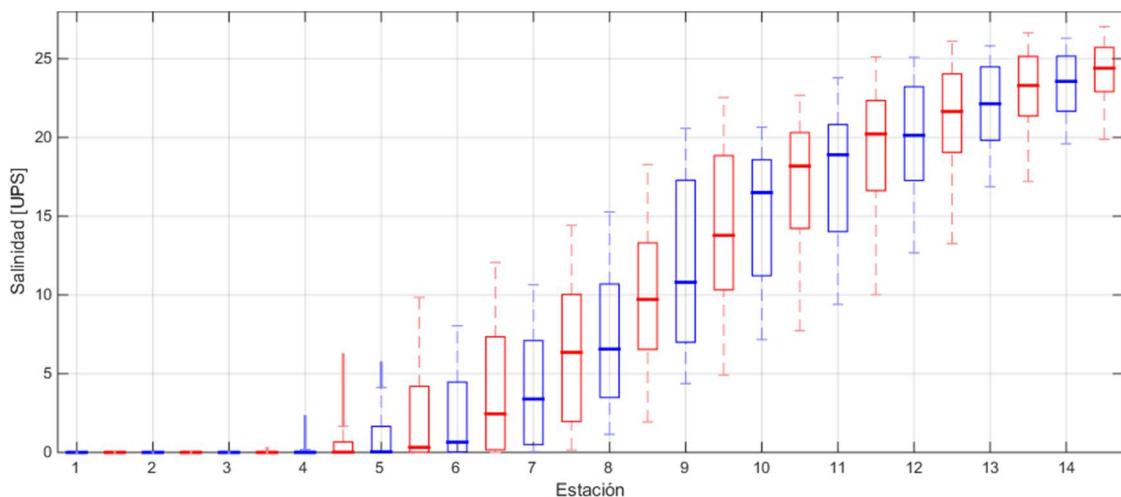


Figura 5.21: Llenado del embalse JC. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de agosto, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)

En la Figura 5.22 se detalla la evolución espacial para el mes de abril, de interés debido a que presenta una relación mínima entre caudal erogado y de año medio (según se consignó en la Tabla 5.2, es del 48 %). En este caso la mayor modificación en la salinidad tiene lugar hacia aguas abajo, con incrementos de los valores medios de 4.5 UPS en las Estaciones E10 y E11.

Por último, a fin de tener un panorama completo de la afectación de la salinidad durante el proceso de llenado, la Figura 5.23 presenta mes a mes la salinidad en las distintas estaciones durante el llenado. Para cada estación se consigna la salinidad media, de manera que la línea roja continua representa la evolución longitudinal de la media a lo largo de todo el estuario. Asimismo, en cada estación se calculó el valor de salinidad comprendido entre los percentiles 5 y 95 (es decir, aquellos que son superados el 95 % del tiempo, excluyendo los valores máximos que ocurren

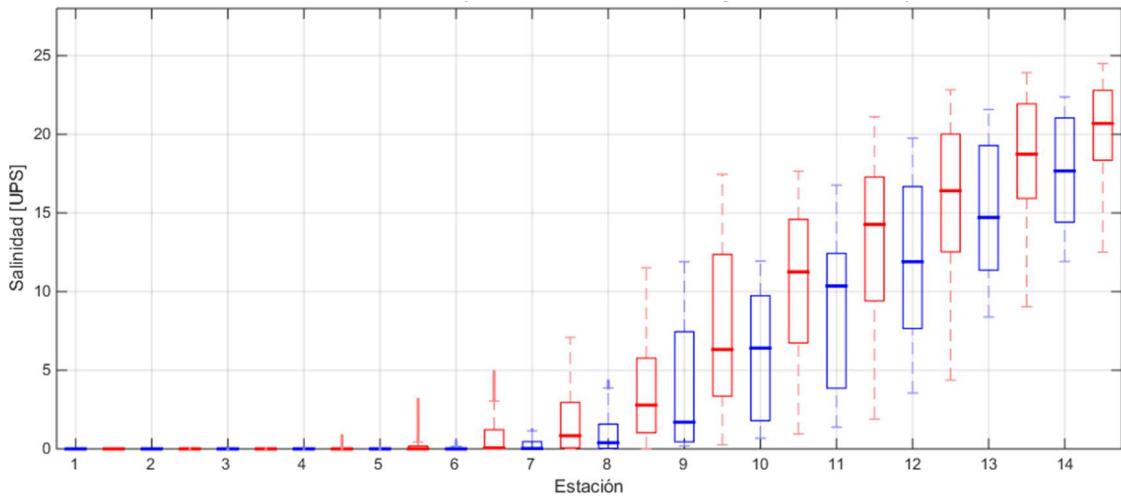


Figura 5.22: Llenado del embalse JC. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de abril, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)

menos de 5 % de las veces), valores que quedan comprendidos dentro del área roja sombreada. La afectación a la que se somete el estuario puede valorarse rápidamente gracias a que se ha superpuesto en color azul la misma información (percentiles 5, 50 y 95) pero correspondiente al escenario de base.

Tal como se anticipó, la amplia diferencia entre Q_{50} y Q_{100} en el mes de abril resulta en una afectación significativa. La pausa de llenado entre 25/04 y 11/05 favorece el decrecimiento de la salinidad en mayo. En junio inicia una segunda pausa de llenado (motivada por la protección del hábitat de invernada del Macá Tobiano) y gracias a ella comienza la recuperación ese mismo mes, continuando de manera que en julio las modificaciones ya son inapreciables. Durante el mes de agosto se retoma el llenado y con él aparece una diferencia entre los escenarios natural y de llenado. En septiembre y octubre, una nueva interrupción del llenado tiene lugar, cumpliendo con la finalidad de evitar generar valores máximos anuales de salinidad que superen los observados en un año medio. En noviembre reinicia el llenado con Q_{95} y aparece un apartamiento respecto de la situación de año medio. En diciembre se da por finalizado el llenado, con lo cual la afectación media al estuario comienza a disminuir.

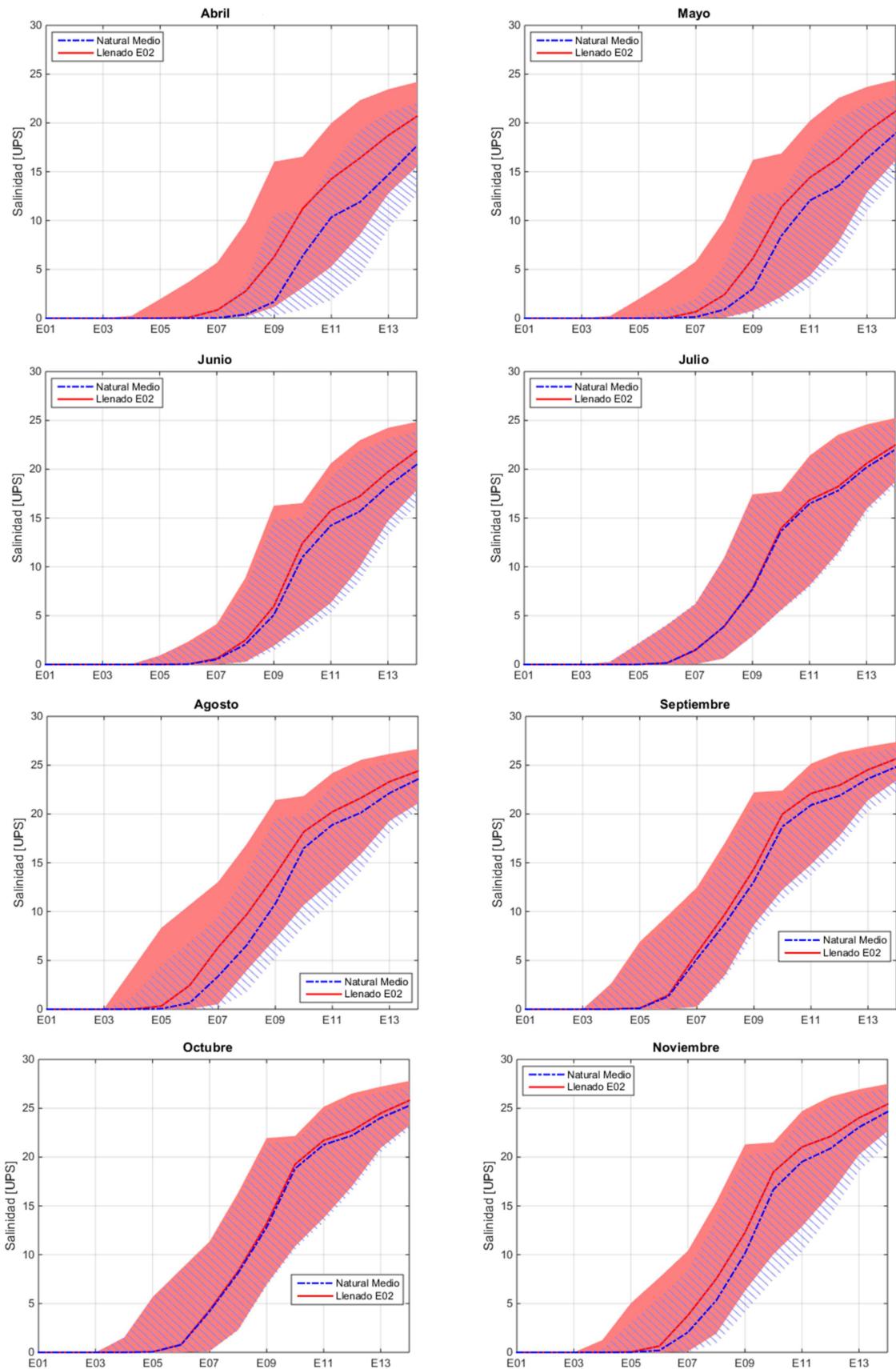


Figura 5.23: Llenado del embalse JC. Salinidad mensual desde abril hasta noviembre, en función de las estaciones de monitoreo, comparando llenado (rojo) y situación de base (azul). Las áreas comprenden los percentiles 5 % y 95 %, y las curvas indican la media

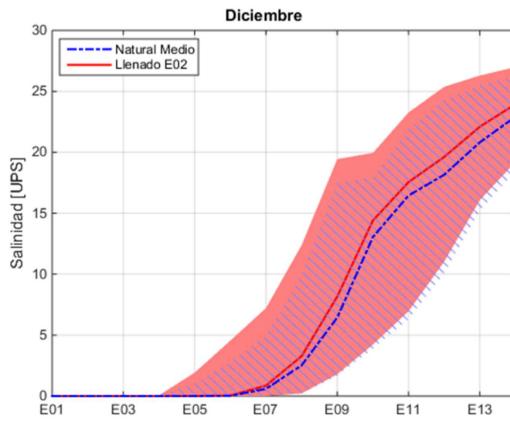


Figura 5.23 (continuación): Llenado del embalse JC. Salinidad mensual en diciembre, en función de las estaciones de monitoreo, comparando llenado (rojo) y situación de base (azul). Las áreas comprenden los percentiles 5 % y 95 %, y las curvas indican la media

Afectaciones durante la invernada del Macá Tobiano

Según exige el EsIA, los meses de junio y julio el caudal erogado durante el llenado debe ser el observado en Charles Fuhr, a fin de minimizar modificaciones en el estuario durante la invernada del Macá Tobiano.

En la Figura 5.24 se examinan las afectaciones que ocurren esos meses en la zona donde se han hecho avistamientos del Macá Tobiano. El mapa de colores representa el aumento de salinidad media en todo el mes, con respecto a la que se observaría en situación de año medio. Dado que hasta el 30/05 hay una reducción de caudales respecto de Q_{50} , en la primera parte de junio se produce la recuperación de la salinidad natural y por ello el promedio mensual arroja valores del orden de 1 o 1.6 UPS por encima de lo habitual para ese mes en el sector de interés. En julio las diferencias son mínimas.

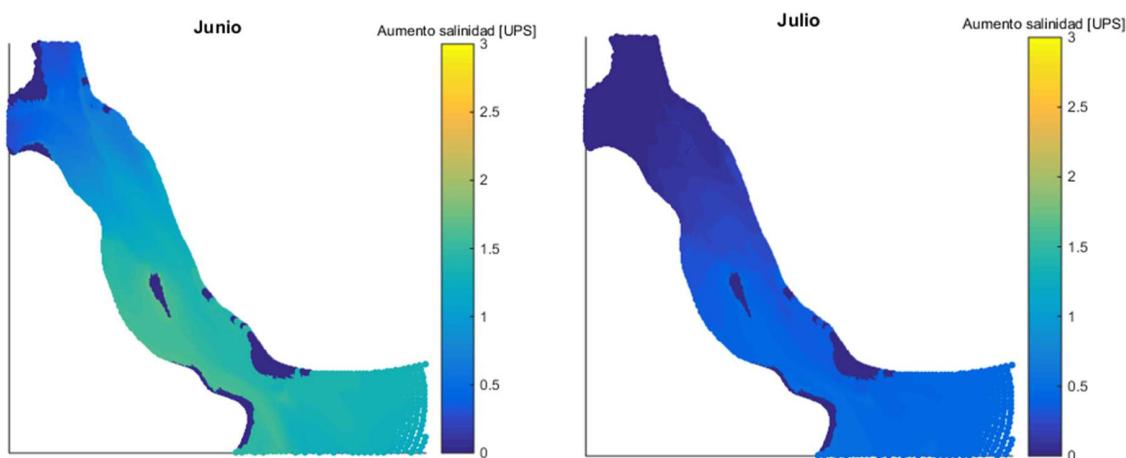


Figura 5.24: Llenado del embalse JC. Aumento de la salinidad en el sector ocupado por el Macá Tobiano durante el llenado en los meses de junio y julio, respecto de un año medio

Si se postprocesan las series temporales de salinidad en las Estaciones 08 a 11 (sector con

mayor cantidad de avistajes del Macá Tobiano), es posible establecer el porcentaje de tiempo en que se supera un nivel de salinidad dado en este área. Esta información se presenta para los meses de junio y julio en la Figura 5.25, permitiendo contrastar el escenario de referencia con el de llenado.

Para el mes de junio, los valores de salinidad en dicho sector se varían en el rango de 0 a unas 20 UPS. Se aprecia una pequeña diferencia entre las curvas de excedencia correspondientes a llenado y año medio, consistentes con el ligero incremento de salinidad remanente tras la pausa del llenado. Durante el 5% del tiempo la salinidad permanece nula en ambos escenarios; de ahí que ambas curvas adopten el valor 95% para 0 UPS. Mientras que en el año medio no se superan las 19 UPS (valor que presenta excedencia de 0% según el gráfico), durante el llenado el valor máximo alcanza las 21 UPS. El valor medio de salinidad en el área bajo estudio está dado por la salinidad superada el 50% del tiempo: cerca de 7 UPS en escenario natural, y de 8 UPS durante llenado.

En el mes de julio se evidencia una vez más que las afectaciones son prácticamente imperceptibles: ambas curvas prácticamente se solapan, presentando el valor medio una diferencia de unas 0.2 UPS (que incluso podrían atribuirse a la diferencia de hidrogramas explicada al presentar la Tabla 5.2).

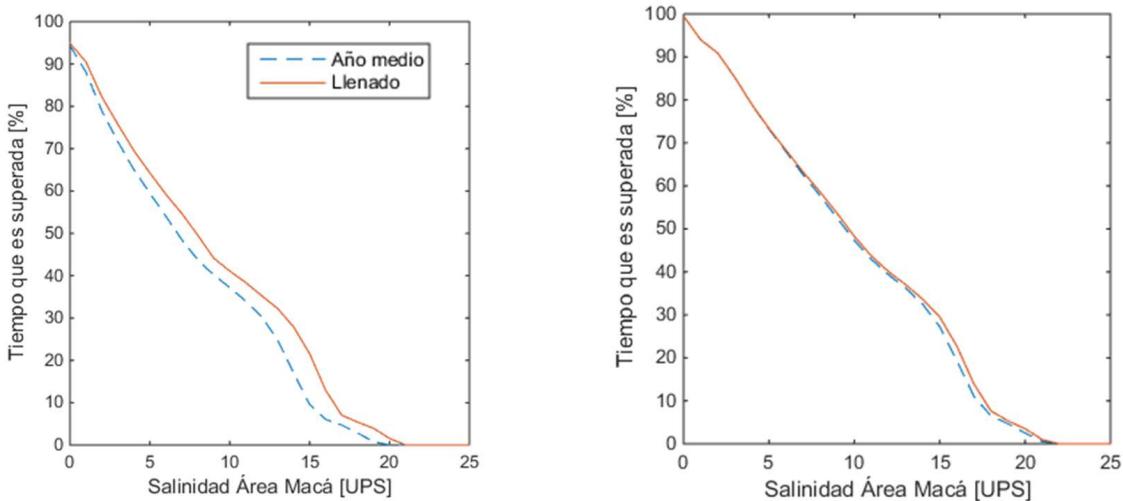


Figura 5.25: Llenado del embalse JC. Superación de valores de salinidad en Estaciones 08 a 11 para el mes de junio (izq.) y julio (der.) para escenario de llenado (línea continua) y año medio (línea discontinua)

Para finalizar el análisis, la misma información se representa en forma discretizada las variaciones de salinidad mediante diagramas de cajas para las Estaciones 01 a 14 definidas en la Figura 3.8. El mes de junio se presenta en la Figura 5.26, permitiendo identificar que la mayor modificación en la salinidad tiene lugar en las Estaciones 11, 12 y 13, con aumento de 1.4 UPS. Se observa que en las estaciones donde se ha avistado el Macá Tobiano (08 a 11), el apartamiento del valor medio es de entre 0.5 y 1.4 UPS. Estos desplazamientos son pequeños si se contrastan con las variaciones semidiurnas (comparar el desplazamiento de la línea que indica valor medio con el alto de las cajas).

Para el mes de julio ya se ha visto que las modificaciones son casi despreciables; se las presenta

en forma de diagrama de cajas en la Figura 5.27.

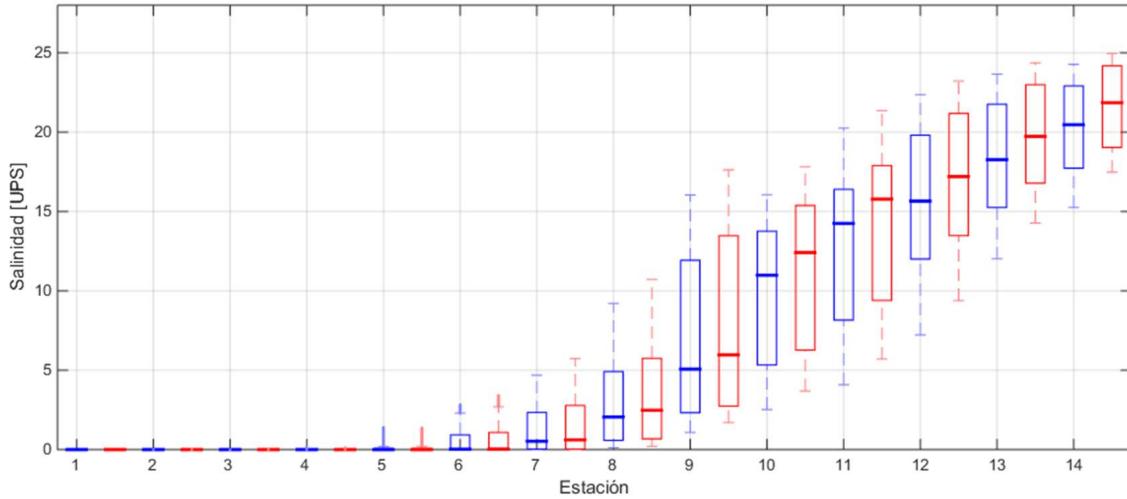


Figura 5.26: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de junio, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)

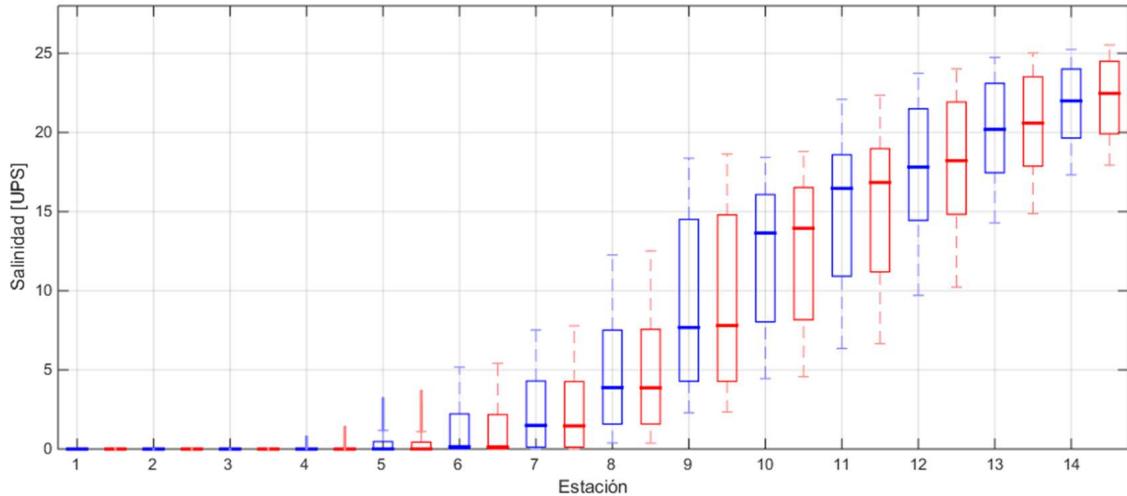


Figura 5.27: Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad en cada estación para el mes de julio, durante el llenado (rojo) y su contraste con la situación sin intervención (azul)

Afectaciones en la toma de agua de Puerto Santa Cruz

La ubicación de la toma de agua de Puerto Santa Cruz fue definida en Figura 1.11. Teniendo en cuenta que de ella depende la provisión de agua potable a dicha localidad, es de interés analizar en detalle la disponibilidad de agua dulce en ese sitio.

De acuerdo con las estaciones de monitoreo definidas en la Figura 3.8, la toma de agua se ubica en cercanías de la Estación 06. Por ello en la Figura 5.28 se representa la evolución anual de la salinidad en dicha ubicación. Se observa que en un año medio la salinidad allí es baja, con valor nulo en bajamar. En abril es casi nula la mayor parte del tiempo, mientras que en octubre pueden alcanzarse unas 9 UPS en cercanías de pleamar. En contraste, si bien el llenado resulta en salinidades de bajamar que continúan nulas, provoca aumentos de los valores de pleamar. En abril y segunda quincena de mayo, el avance del frente salino en pleamar va creciendo hasta un

máximo de unas 5 UPS; si bien los valores anuales más altos se alcanzan los últimos días de agosto, con casi 12 UPS.

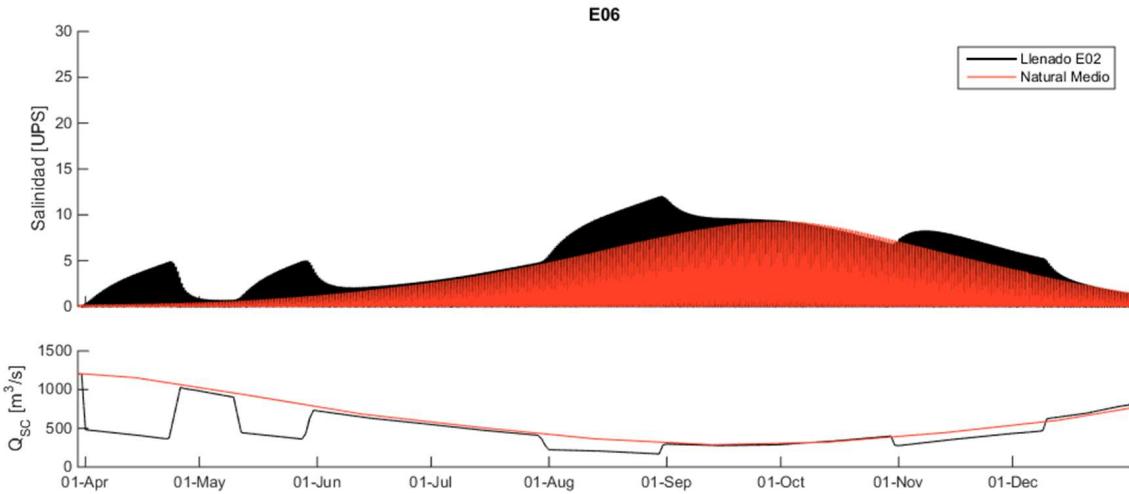


Figura 5.28: Evolución temporal de la salinidad en la Estación 06 durante el llenado y en situación sin intervención (arriba), incluyendo la evolución de caudales correspondientes a cada uno (abajo) para facilitar su interpretación

En la Figura 5.29 se presentan algunas curvas de duración que permitirán a los operarios estimar cuántas horas por día podrá funcionar la planta potabilizadora. Las gráficas indican el porcentaje del tiempo que cierto nivel de salinidad es superado. Por ejemplo, en un abril medio sólo el 20 % del tiempo se presenta una salinidad no nula, mientras que aumenta a 46 % durante el llenado. Por otra parte, en agosto, el mes más comprometido, la planta pasaría de disponer de agua dulce un 39 % del tiempo a 22 %. En la Figura 5.29 se evalúa mes a mes el porcentaje de tiempo que hay agua dulce en cercanías de la planta⁸.

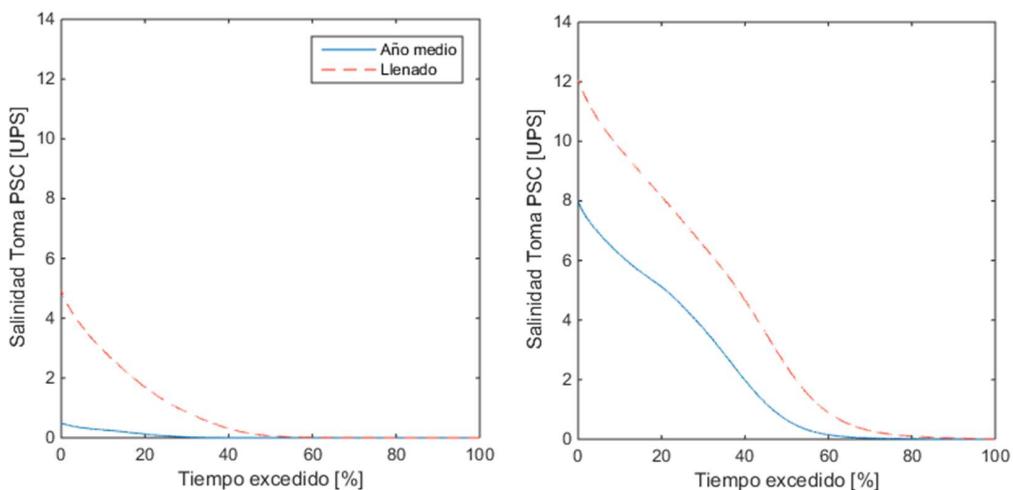


Figura 5.29: Curvas de superación de salinidad en cercanías de toma de agua Puerto Santa Cruz (Estación 06): mes de agosto (izq.); mes de abril (der.)

⁸Para esta estimación, se han considerado valores debajo de 0.25 UPS.

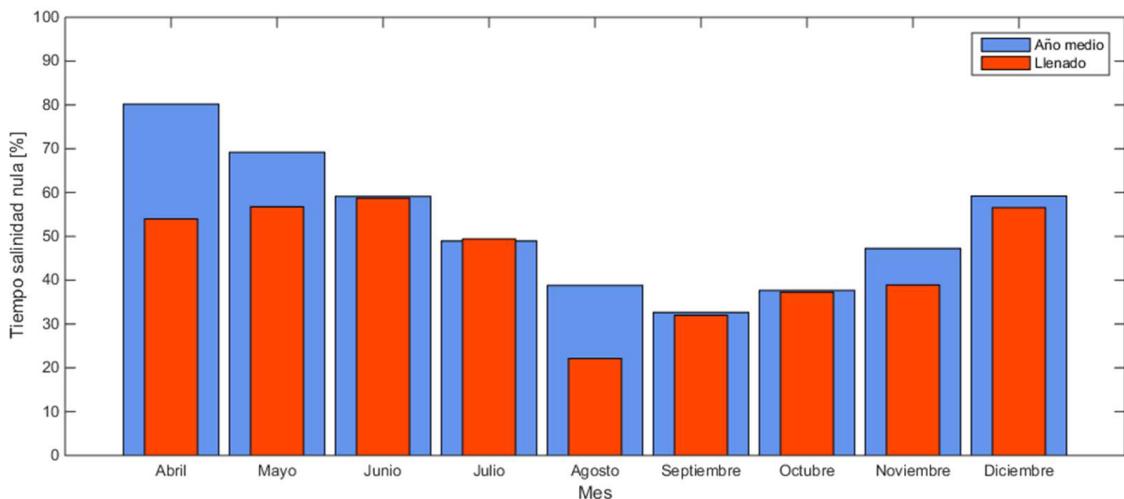


Figura 5.30: Presencia de salinidad nula en cercanías de toma de agua Puerto Santa Cruz (Estación 06)

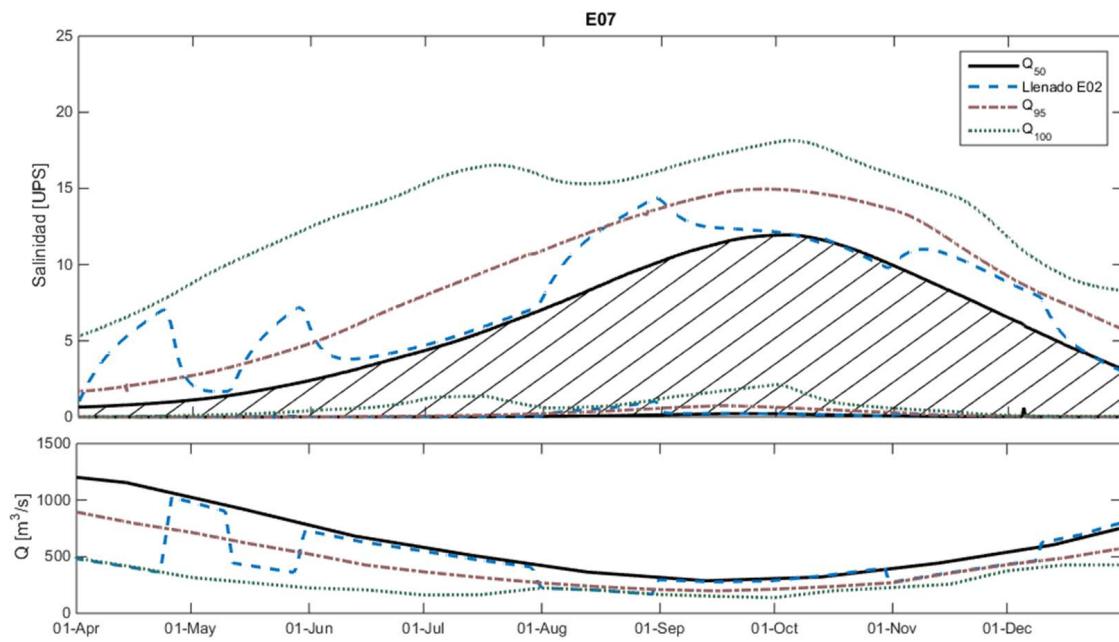
Comentarios finales sobre el llenado del embalse Gdor. Jorge Cepernic

El escenario de llenado propuesto como proyecto ha atendido a premisas técnicas y ambientales. Al pausar el llenado durante la invernada del Macá Tobiano, se logró minimizar la modificación de salinidad durante junio y evitarla en julio. Este escenario se planteó además buscando no castigar los meses hídricamente más pobres (septiembre-octubre), un objetivo que se ha cumplido.

La Figura 5.31 presenta la comparación del escenario actual con las afectaciones que generaría sostener Q_{95} y Q_{100} a lo largo de todo un año, a modo de referencia. Las etapas de llenado de abril y agosto son las más exigentes en el sentido de que el llenado se plantea con Q_{100} , si bien su permanencia es tal que no se alcanzan las afectaciones máximas que potencialmente podría generar Q_{100} . La instancia de llenado noviembre-diciembre se ajusta a Q_{95} , y sus afectaciones tienden a las resultantes de dicho hidrograma. Tal como es esperable, la etapa de llenado de mayo, correspondiente a Q_{98} , tiende a afectaciones acotadas entre las de Q_{95} y Q_{100} .

Resta recordar que dado que la elección del hidrograma de llenado no es definitiva, las curvas correspondientes a Q_{95} y Q_{100} en la Figura 5.31 permiten acotar los efectos que otro escenario de llenado más desfavorable podría tener.

Se han caracterizado los incrementos de salinidad resultantes de un posible hidrograma de llenado de JC. Según se anticipó en este texto, los efectos se encuentran dentro de los valores límite previstos para los escenarios que globalizan todos los posibles hidrogramas de llenado.



5.4.2. Modificaciones durante el llenado del embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

El llenado del embalse NK se planifica contemplando un hidrograma ingresante de duración 50 % (Q_{50}) y haciendo uso del volumen ya almacenado en el embalse JC para optimizar el proceso. Consecuentemente, el modelo de operación de embalse simula la operación de ambas presas, de manera que el hidrograma de erogaciones que llegan al estuario abarca el llenado del embalse aguas arriba hasta que alcanza su nivel de operación y la recuperación del nivel del compensador JC. Esto se ilustra en la Figura 5.32.

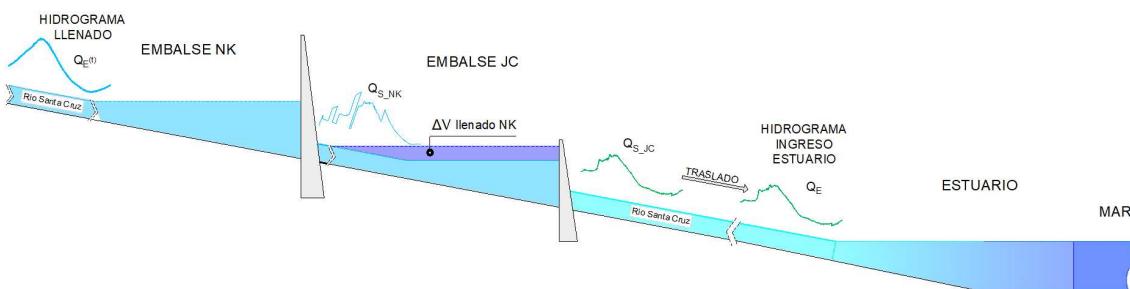


Figura 5.32: Esquema de la modelación del estuario durante el llenado del embalse NK

Para el hidrograma se prevé erogar caudales Q_{100} entre los meses de noviembre y enero, y Q_{95} el resto del tiempo de llenado, en concordancia con la recomendación de los estudios de caudal ambiental del tramo final del río ejecutados por Universidad de Valladolid (propuesta identificada como H1 en ese texto [9]).

El hidrograma propuesto resulta en un llenado que se extiende por 205 días, desde 01/11 hasta

21/05, requiriendo un día adicional tras la pausa por presencia de Macá Tobiano, completándose el llenado con Q_{95} el 01/08 del año siguiente al inicio. Comprende una erogación de caudal mínimo observado entre noviembre y enero, y posteriormente Q_{95} hasta fin del llenado (Figura 5.33).

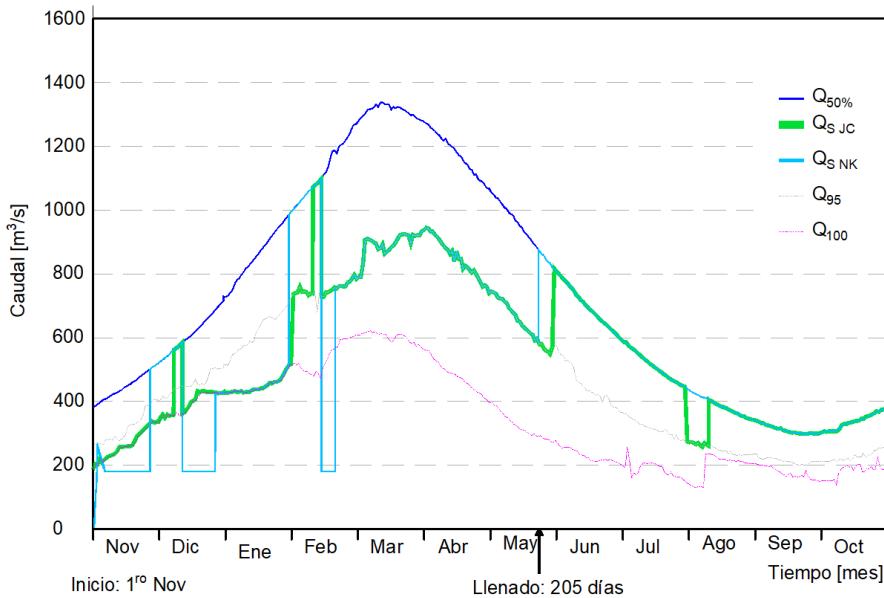


Figura 5.33: Llenado del embalse NK. Hidrograma saliente del embalse NK Q_{SNK} y erogado en el embalse JC Q_{SJC} . Se contrastan con el ingresante al sistema de aprovechamientos en un año medio Q_{50} , y las referencias de Q_{100} y Q_{95}

Modificación espacio-temporal de la salinidad

En la Figura 5.34 se representa la serie temporal de salinidad a lo largo de un año, en tres estaciones seleccionadas de los sitios de la Figura 3.8: Estación 04, en la parte final del río Santa Cruz; Estación 07, en cercanías del encuentro de los ríos Santa Cruz y Chico; y Estación 10, en medio del estuario. En un año medio, a corto plazo se aprecia una variabilidad semidiurna, superpuesta a una variación lenta en que el valor medio de la salinidad es mayor en los meses más pobres (hacia septiembre) y menor hacia los meses más ricos (marzo).

Para el escenario del llenado, se observa que la disminución abrupta de caudal al iniciar el llenado el 01/11 conlleva un gradual aumento a posteriori de la salinidad respecto de la condición no perturbada. Valores máximos de salinidad ocurren hacia noviembre, ligeramente superiores a la máxima salinidad de año medio observada en septiembre (valor máximo en pleamar de unos 13.3 UPS frente a 12 UPS). Luego se reduce paulatinamente, siempre por encima de los valores de año medio, en virtud de los mayores caudales erogados. Al finalizar el llenado, inicia rápidamente el retorno a valores de año medio. Por este motivo, la afectación durante la invernada del Macá Tobiano presenta escasa duración temporal: por ejemplo, en la Estación 07 se observa que transcurrida la primera semana de junio el apartamiento de la condición de año medio es despreciable. En la Tabla 5.5 pueden consultarse valores medios mensuales a modo de referencia.

Hecha la valoración de la evolución temporal de la salinidad, se procede a discutir su distribución

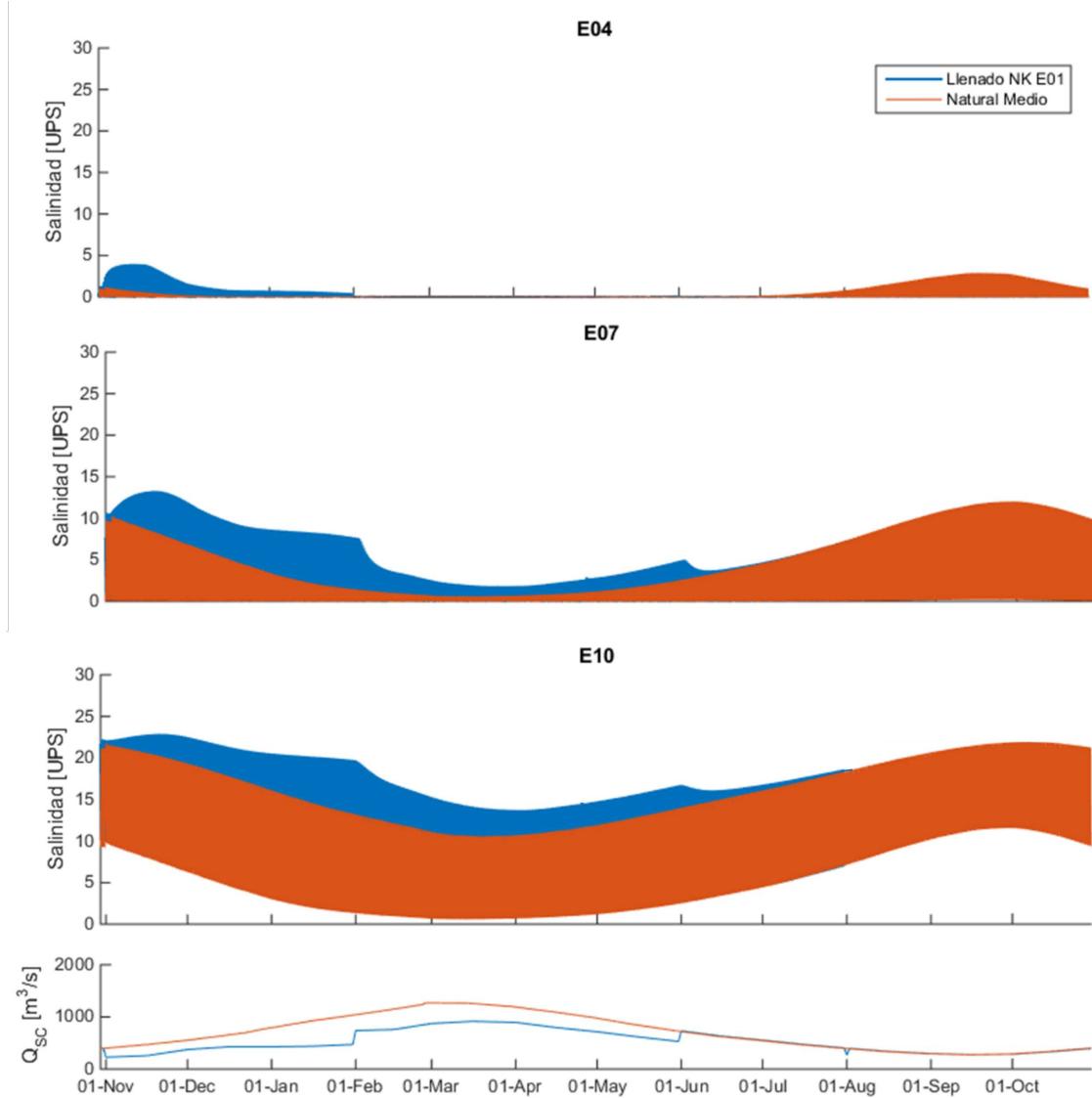


Figura 5.34: Salinidad observada durante llenado NK-01 (azul) y en un año medio (naranja) en las Estaciones 04, 07 y 10. En la parte inferior, hidrogramas de río Santa Cruz a modo de referencia

espacial. En estaciones ubicadas aguas arriba, en el tramo final del río (como es el caso de la Estación 04) la salinidad responde rápidamente a cambios en el caudal. En la Figura 5.34 se observa que tan pronto inicia el llenado en noviembre, la salinidad aumenta velozmente; y que ante el incremento abrupto de caudal pasando de Q_{100} a Q_{95} en febrero, las afectaciones que conlleva el llenado desaparecen inmediatamente. Además, la duración del apartamiento respecto de la situación natural es menor: si bien el período continuo de reducción de caudales abarca 7 meses, la modificación es perceptible sólo durante 3 meses. Por el contrario, en la parte del estuario más próxima al mar, el tiempo de respuesta de la salinidad es mayor. En efecto, de evaluar la Estación 10 en la Figura 5.34 se aprecia una variación de valores extremos más lenta y sostenida en el tiempo.

Una más fácil interpretación de la variabilidad espacial puede efectuarse consultando la Figura 5.38, que presenta mes a mes mapas de la distribución espacial de salinidad. En ella, la escala de colores representa la salinidad, en rojo se indica la posición del frente salino y la grilla de refe-

rencia tiene una separación de 1 km. Al iniciar el llenado en noviembre, el frente salino se ubica entre las Estaciones 03 y 04, presentando una pequeña modificación respecto de la situación natural. Hacia enero, mes en que tiene lugar la modificación de salinidad más notoria, el incremento de caudal provoca un desplazamiento del frente de unos 2 km hacia aguas abajo, si bien en condiciones de año medio este retroceso suele ser del orden de 9 km. Cuando se eroga Q_{95} en lugar de Q_{100} , la discrepancia respecto al año medio disminuye, y para abril el desplazamiento del frente salino respecto de su posición en sin afectación difiere en alrededor de 3 km. Hacia el mes de junio, una vez finalizado el llenado, no se aprecia entre ambos mapas ninguna diferencia significativa.

Afectaciones durante la invernada de Macá Tobiano

El llenado finaliza a fines de mayo, y el mes siguiente la salinidad retorna progresivamente a valores semejantes a los del escenario de año medio. Contemplando que la presencia de Macá Tobiano se da en los meses de junio-julio, el llenado impacta unos pocos días en la salinidad del hábitat durante su invernada.

Por ejemplo, en la Estación 04 no existen modificaciones, en la Estación 07 un promedio ponderado de la salinidad observada en todo el mes de junio pasa de 1.2 UPS en un año medio a 1.4 UPS, mientras que para la Estación 10 se incrementa de 9.8 a 10.8 UPS. En julio no se aprecian modificaciones significativas.

La Figura 5.35 permite examinar la distribución espacial de las leves variaciones que experimenta el hábitat del Macá Tobiano respecto del año medio en cuanto a la salinidad media durante los meses de invernada.

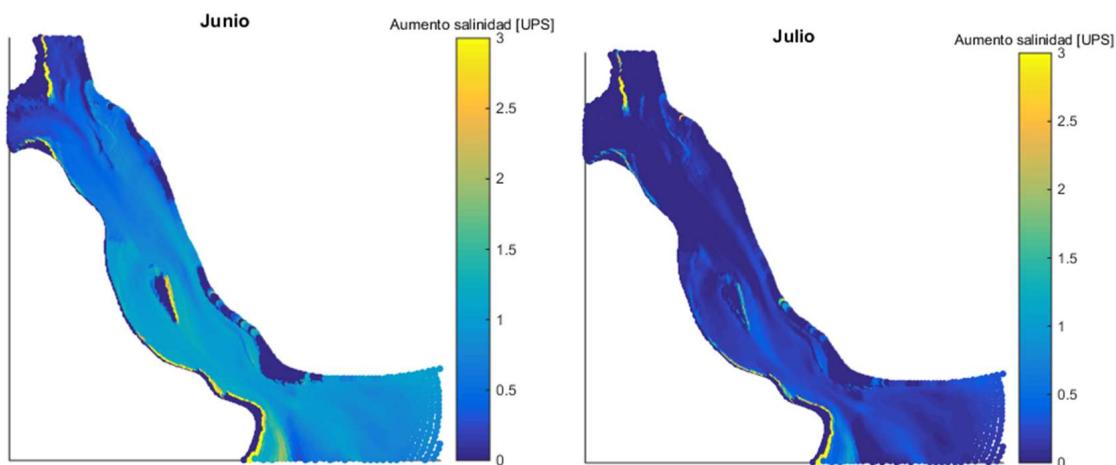


Figura 5.35: Modificaciones de la salinidad durante la invernada del Macá Tobiano para hidrograma NK-01

Afectaciones de las tomas de agua

La toma de agua de Puerto Santa Cruz se encuentra sujeta a problemas de operación incluso en situación actual (sin intervención), por el avance del frente salino en horarios próximos a pleamar.

En la Figura 5.36 se representa mensualmente el porcentaje de tiempo en que hay disponibilidad de agua dulce. Para un año medio, se ven más comprometidos los meses de aguas bajas, con agua dulce disponible sólo 32 % del tiempo en septiembre. Durante el llenado, la ausencia de agua dulce se intensifica entre noviembre y mayo, siendo el mes de menor disponibilidad noviembre (31 %). Por su parte, la toma de Piedrabuena (ubicada en proximidades de la Estación 01 de la Figura 3.8), tiene en ambos escenarios permanente acceso a agua dulce.

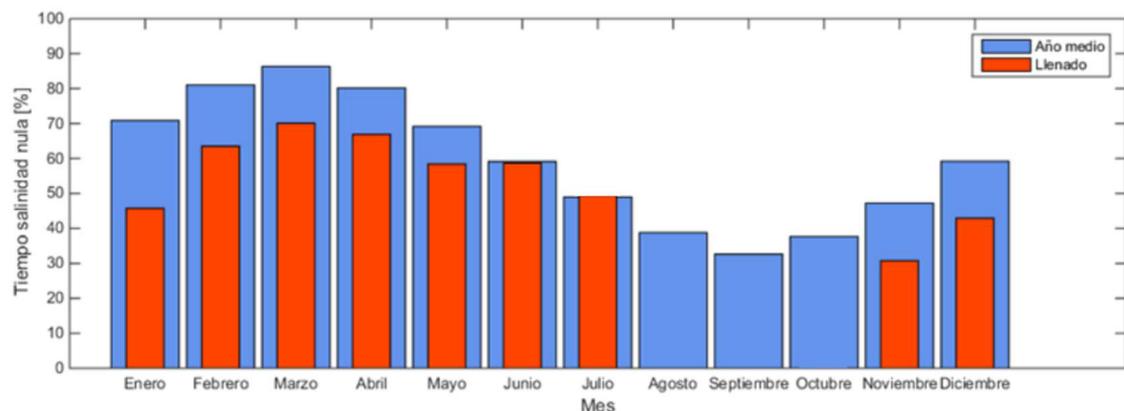


Figura 5.36: Tiempo en que se mantiene salinidad nula en toma de agua de Puerto Santa Cruz, en año medio y durante el escenario del proyecto de llenado de NK

Comentarios finales sobre el llenado del embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner

Se han modelado las afectaciones a la salinidad durante el escenario de proyecto del llenado de la presa NK con inicio en noviembre como el más favorable para el proyecto. Para este escenario, además de ofrecer cuantificaciones generales espacio-temporales de salinidad en el área bajo estudio, se ha constatado la no afectación durante la invernada del Macá Tobiano, se ha cuantificado la reducción de disponibilidad de agua dulce en la toma de agua de Puerto Santa Cruz y se ha determinado que no se modifica la presencia de agua dulce en la toma de Piedrabuena.

En la Figura 5.37 se contrasta la envolvente de salinidad generada durante el llenado en las Estaciones 04, 07 y 10 (Figura 3.8), respecto de las esperadas para un año medio Q_{50} , así como las correspondientes a los caudales de interés ambiental Q_{95} y Q_{100} . Se observa que no se superan los valores que generarían estos últimos dos hidrogramas sostenidos en el tiempo. Valores numéricos correspondientes a la Estación 07 pueden consultarse en la Tabla 5.5, contrastando la salinidad del escenario de llenado con el año medio (recuérdese que los valores de las envolventes Q_{95} y Q_{100} pueden buscarse en la Tabla 4.8).

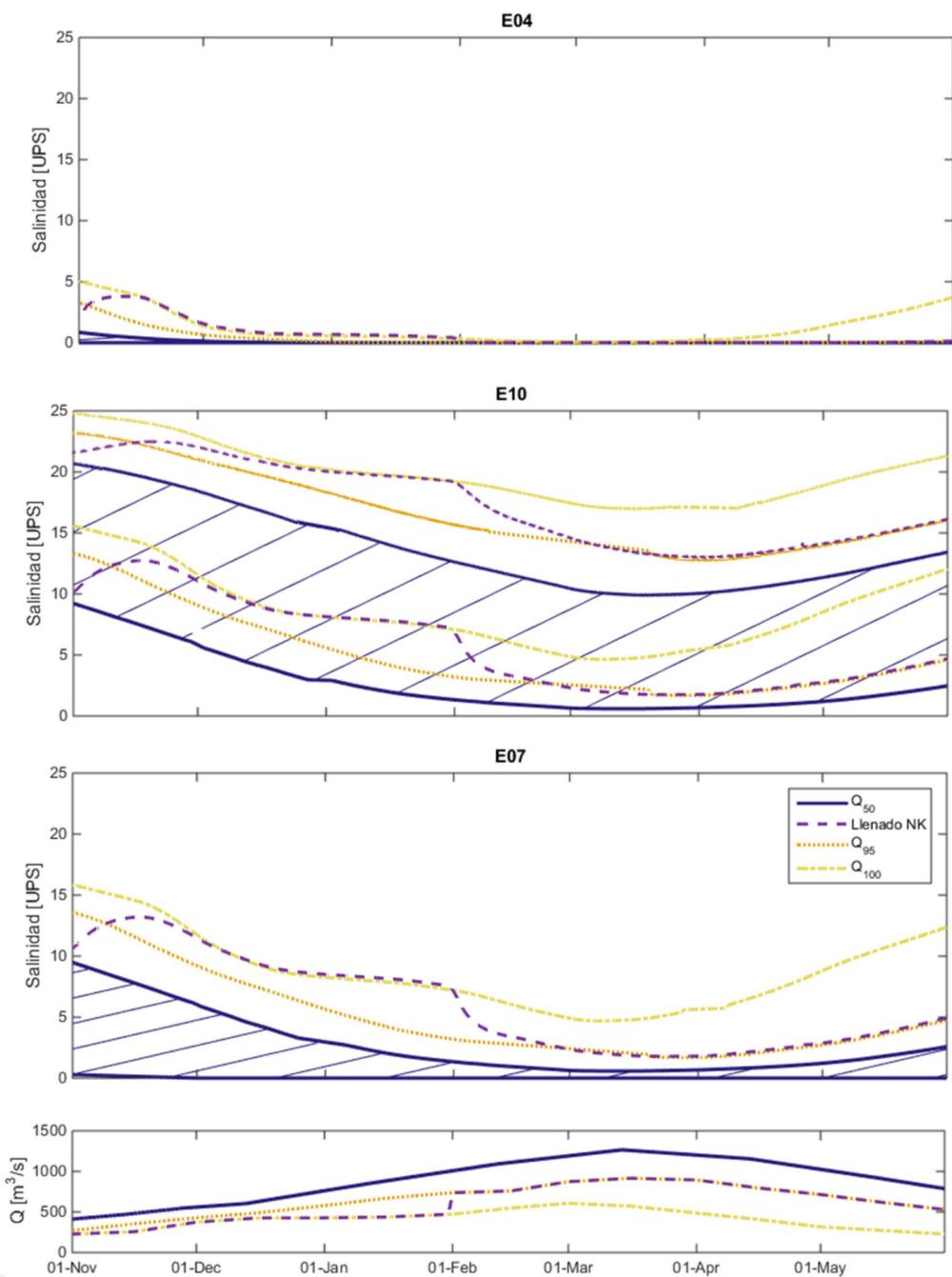


Figura 5.37: Contraste de envolventes de salinidad durante diversos escenarios en Estaciones 04, 07 y 10: llenado de NK, y valores correspondientes a año medio, Q_{100} y Q_{95} a modo de referencia. En la gráfica inferior, los hidrogramas sirven de referencia

Finalmente, el lector puede enriquecer su interpretación con los mapas de salinidad y posición media mensual del frente salino comparativos presentados en la Figura 5.38. En las mismas se muestra a título orientativo la posición media del frente salino para dos escenarios: de izquierda a derecha, se representan mapas para año medio y para el llenado de NK. La escala de colores representa la salinidad y es la misma para todas las imágenes, mientras que en rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km.

Tabla 5.5: Comparativa entre escenario de referencia (año medio) y los correspondientes a escenarios de llenado del embalse NK, indicando valores medios mensuales de caudal de río Santa Cruz y salinidad en Estación 07. NM = "no modelado" debido a que no se esperan afectaciones

Mes	Esc. referencia		Llenado NK	
	Q [m ³ /s]	Sal. [UPS]	Q [m ³ /s]	Sal. [UPS]
Enero	924	0.6	446	3.2
Febrero	1152	0.2	786	1.2
Marzo	1245	0.2	901	0.5
Abril	1086	0.2	794	0.7
Mayo	843	0.5	611	1.3
Junio	627	1.2	627	1.4
Julio	466	2.3	466	NM
Agosto	338	3.9	338	NM
Septiembre	284	5.4	284	NM
Octubre	348	4.8	348	NM
Noviembre	473	3.1	284	5.9
Diciembre	663	1.5	416	3.9

Se concluye esta sección recordando una vez más que los hidrogramas propuestos no son definitivos, pero que es de esperar que en caso de surgir otras propuestas, las mismas respeten los caudales Q_{100} o Q_{95} , y por ende presenten afectaciones acotadas dentro de lo discutido en la sección dedicada a respuestas del estuario ante hidrogramas de relevancia ambiental.

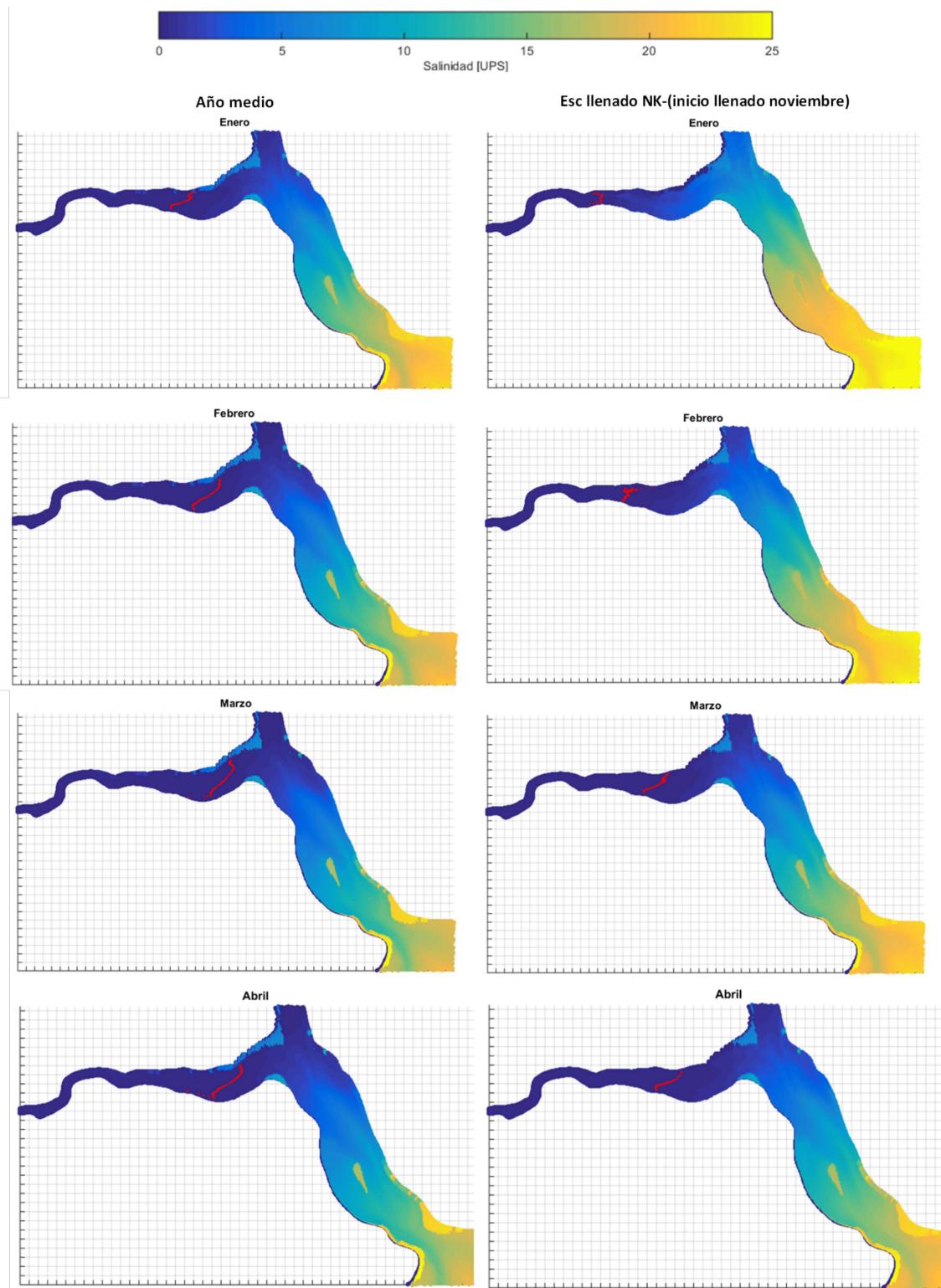


Figura 5.38: Valores medios mensuales de distribución espacial de la salinidad para distintos escenarios: de izquierda a derecha año medio, e izquierda escenario de llenado NK. En rojo se indica la posición del frente salino. La grilla de referencia tiene una separación de 1 km

5.5. Modificaciones en la temperatura del río Santa Cruz

No existen aún estudios específicos que indiquen si la temperatura del río Santa Cruz experimentaría alguna modificación por el llenado de las represas, si bien es posible que tengan lugar

fenómenos de estratificación del agua del embalse. A título de análisis de sensibilidad, se propone arbitrariamente evaluar el efecto de aumentar la temperatura del agua del río Santa Cruz en 1 °C para un escenario de verano, contrastando en el efecto de que ingrese a 14.3 °C o a 13.3 °C. Se aprecia en la Figura 5.39 que la mayor diferencia tiene lugar en el río, tal como era de esperar, y que en la zona de encuentro con río Chico las modificaciones abarcan un tramo hacia aguas arriba de este último, con magnitud en torno a 0.6 °C. Continúa la reducción de modificaciones hacia aguas abajo, hasta ser despreciable aguas abajo de Isla Leones.

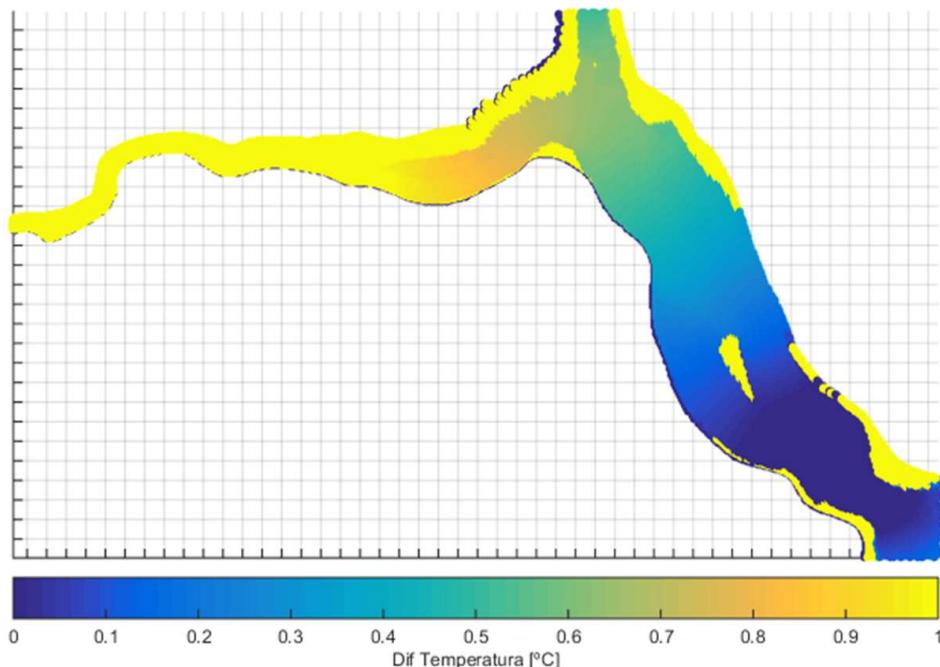


Figura 5.39: Diferencia entre temperaturas medias observadas ante un incremento de 1 °C en río Santa Cruz en verano

Para contextualizar estas potenciales afectaciones, es pertinente recordar que las temperaturas presentan una variación diaria producto tanto de la incidencia de la radiación solar (que se manifiesta sobre todo en el sector aguas arriba) como el efecto de las mareas (mecanismo que prepondera en el sector aguas abajo). Valores mensuales de esta variabilidad se recogen en la Tabla 2.13, elaborada a partir de valores de temperatura del agua medidos en Isla Pavón: en el período registrado alcanzó una variabilidad máxima de 1 °C en diciembre.

En cuanto a la variabilidad a largo plazo, el mapa de la Figura 5.40 da cuenta de la diferencia de temperaturas correspondientes a los valores medios observados en los meses de enero y julio. Se aprecia que las mayores diferencias en el área de interés tienen lugar en el río Santa Cruz y su confluencia con río Chico, siendo del orden de 10 °C (consistente con las condiciones de borde impuestas, temperatura de río Santa Cruz 13.3 °C y 3 °C según el mes). Hacia Isla Leones y aguas abajo, la diferencia se hace cada vez menor.

Estas predicciones quedan a disposición de biólogos y ecólogos a fin de que puedan valorar los potenciales efectos en la biota que este tipo de modificaciones, en caso de ocurrir, podrían suponer.

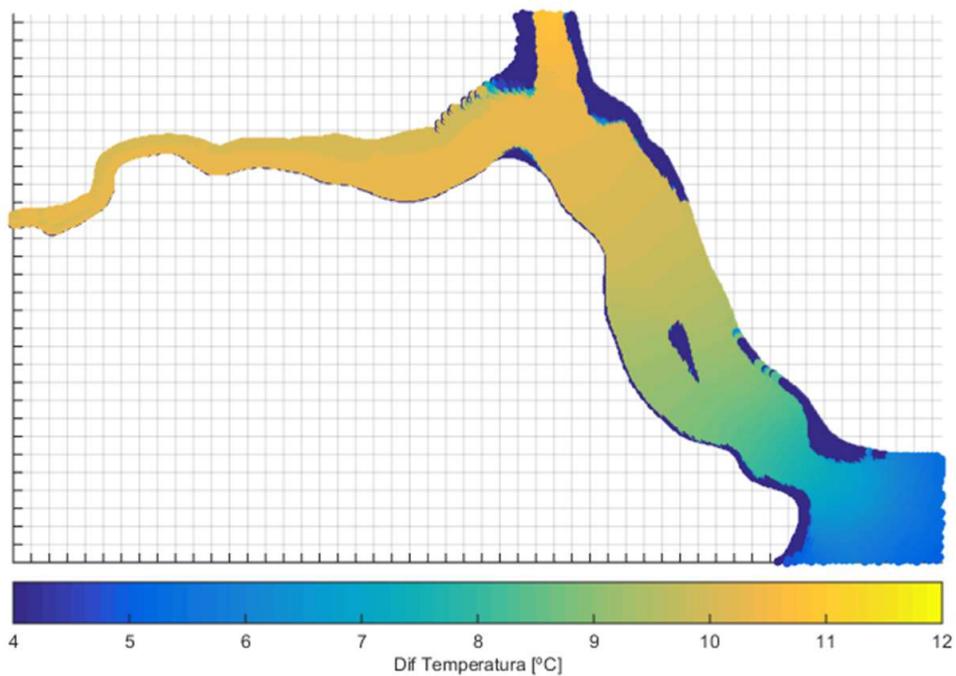


Figura 5.40: Diferencia entre temperaturas medias observadas en verano e invierno

5.6. Conclusiones

La construcción de las presas tiene cuatro hitos fuertemente marcados: el inicio de la construcción, el desvío del río, el comienzo del llenado del embalse y el inicio de la generación de las turbinas. Para las presas del río Santa Cruz, se espera que los caudales líquidos en el tramo final del río se vean modificados únicamente en la etapa de llenado, instancia durante la cual podrá verse afectada la salinidad en el estuario.

Durante el llenado de cada embalse, el aumento de nivel se produce a expensas de erogar un caudal menor que el aportado por el río. La propuesta del hidrograma de salida se efectúa atendiendo a cuestiones técnicas y ambientales. En cuanto a las consideraciones ambientales propias del proyecto de las presas del río Santa Cruz, un estudio previo de la Universidad de Valladolid [9] sugiere caudales que permitirían preservar el hábitat de especies presentes en el tramo final del río, recomendando valores mínimos dados por los caudales de excedencia 100 % y 95 % (denominados Q_{100} y Q_{95} , correspondiendo el primero a los observados en el período 1955-1966). Otro criterio relevante es aplicar el principio precautorio durante la invernada del Macá Tobiano: esta ave acude al estuario en los meses de junio-julio, y se propone en esa época minimizar modificaciones respecto de la situación natural, en principio deteniendo el llenado durante esos meses.

El hidrograma de llenado definitivo aún no ha sido establecido, por cuestiones tales como modificaciones en el cronograma de la obra que repercutan en la fecha de inicio posible o qué tan hídricamente rico sea el año de llenado, por ejemplo. En ese sentido, podría analizarse una variedad de hidrogramas. Con esto en mente, se ha optado por describir los efectos que generarían

en el estuario los hidrogramas de llenado resultantes de considerar caudales de relevancia ambiental Q_{95} y Q_{100} , que constituirían los escenarios más extremos a los que podría someterse el estuario. Ellos permiten tomar noción de las máximas afectaciones que podrían ocurrir en caso de erogar caudales distintos a los dos aquí analizados. Como propuestas específicas para el proyecto, se analizaron en detalle los efectos que conlleva un escenario de llenado del embalse JC, y uno del embalse NK.

Los plazos de ejecución de grandes obras hídricas son multianuales y dependen de diversos factores, lo que requiere ajustes en sus hitos. Se han definido caudales adecuados para preservar el hábitat, resultando en una envolvente de hidrogramas de salida del llenado que permiten acotar las máximas afectaciones posibles al río y al estuario, incluso con distintas fechas de inicio.

Se ha caracterizado la evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario para el escenario de llenado del embalse Gdor. Jorge Cepernic, a desarrollarse entre el 01/04 y el 09/12. El mismo consta de cuatro instancias: Q_{100} en abril, Q_{98} en mayo, Q_{100} en agosto, y Q_{95} en noviembre e inicio de diciembre, erogando el resto del tiempo el caudal observado en Charles Fuhr. Las pausas propuestas permiten monitoreo del llenado, evitan cambios en el caudal durante la invernada del Macá Tobiano y alejan el llenado de los meses hídricamente más pobres (septiembre-octubre). Para el hidrograma de llenado del embalse Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner analizado se prevé erogar caudales Q_{100} entre los meses de noviembre y enero, y Q_{95} el resto del tiempo de llenado. En caso de iniciar en noviembre, el llenado se extendería por 205 días, finalizando el 21/05.

Las modelaciones permiten comparar el proceso de llenado con un año medio, mediante una discusión de modificaciones espacio-temporales a la salinidad, mapas con resultados detallados de las afectaciones en época de invernada del Macá Tobiano, y disponibilidad de agua dulce de la planta potabilizadora. Distintas estrategias se aplican para comunicar al lector las modificaciones generales a dinámica espacio-temporal de la salinidad: series temporales en ubicaciones seleccionadas, mapas de distribución de salinidad media mensual y posición del frente salino, diagramas de caja que dan cuenta de la variabilidad espacial y la contextualizan dentro de las fluctuaciones semidiurnas, y seguimiento anual de valores medios mensuales y percentiles 5 y 95 en toda la longitud del estuario.

En los casos estudiados, se observa que los cambios en los valores medios de salinidad ocasionados por el llenado son menores que las variaciones semidiurnas que experimenta naturalmente. Se aprecia además que tras interrupción del llenado, los tiempos de recuperación hasta las condiciones de año medio son más rápidos aguas arriba. Las propuestas analizadas muestran una mínima modificación de las condiciones durante la invernada del Macá Tobiano.

Más allá de que el hidrograma de llenado pueda ser diferente, se recuerda al lector que el análisis corresponde a afectaciones para mareas de amplitud media. Si el llenado se efectuase en un año en que ocurriesen mareas astronómicas de amplitud extrema (cuya ocurrencia es fácilmente

predecible, con más de un año de anticipación), para mantener la posición del frente salino dentro del sector que ocupa naturalmente bastaría con planificar la erogación de un caudal algo mayor durante unos pocos días.

En este estudio, la salinidad es la principal variable analizada para caracterizar el hábitat del estuario y proveer un marco científico que sirva como herramienta para justificar la toma de decisiones concernientes a la definición del hidrograma de salida de JC durante el llenado de los embalses. El caso del aprovechamiento del río Santa Cruz es un claro ejemplo de cómo los aspectos ecológicos y la vinculación con las variables ambientales han ido incorporándose al proyecto de la obras de ingeniería en forma creciente y sistemática, incluso en casos en que la información de base es limitada. Extendiendo en el tiempo el monitoreo actual y con la incorporación de nuevas tecnologías y mediciones, estos estudios se volverán más completos, afianzando cada vez más la interacción entre ingeniería y aspectos ambientales.

CAPÍTULO 6

Reflexiones finales

Esta publicación ha recopilado los principales resultados de años de monitoreo y modelación del estuario del río Santa Cruz, proporcionando una base científica robusta para evaluar los impactos de las presas Pte. Dr. Néstor Carlos Kirchner y Gdor. Jorge Cepernic. Desde la caracterización inicial en campo hasta el desarrollo y aplicación del modelo numérico en Delft3D, el trabajo ofrece una visión integral de la dinámica del estuario.

Un aspecto destacado lo constituye el análisis de la hidrodinámica del estuario en condiciones naturales. Se ha constatado que las mareas, como principal forzante, determinan los niveles y velocidades en gran parte del sistema, modulando también los valores de salinidad. Los caudales fluviales, aunque secundarios en su influencia, desempeñan un papel clave en la posición del frente salino y en los tiempos de residencia, especialmente durante bajamares y caudales mínimos. Estos hallazgos subrayan la singularidad del sistema, caracterizado por amplias variaciones en niveles, corrientes y parámetros físico-químicos.

Las simulaciones bajo escenarios sin presas han permitido establecer una línea base de referencia, esencial para valorar las alteraciones previstas durante el llenado de los embalses. En particular, se identificaron efectos como cambios en la salinidad media y en la dinámica de transporte, cuyo alcance dependerá en gran medida del hidrograma de llenado que finalmente se adopte. Este punto pone de relieve la importancia de diseñar estrategias de operación de embalses que equilibren las necesidades técnicas y los criterios ambientales, minimizando impactos, especialmente durante periodos sensibles como la invernada del Macá Tobiano.

En el marco de las obras de ingeniería de las presas del río Santa Cruz, el estuario se ha posicionado como un tema de estudio prioritario. Las modelaciones numéricas se adoptaron como la herramienta idónea para la caracterización ambiental, fomentando una visión innovadora en la que la toma de decisiones se basa en criterios científicos.

Si bien el presente trabajo ha permitido sentar bases sólidas, persisten desafíos importantes. La información disponible, aunque valiosa, presenta limitaciones que justifican la continuidad del monitoreo, especialmente en lo que respecta al transporte de sedimentos y la influencia de factores meteorológicos. Ampliar y profundizar estos estudios contribuirá a fortalecer la capacidad predictiva del modelo numérico.

Por otro lado, la flexibilidad del modelo desarrollado abre oportunidades para su aplicación en

escenarios futuros, permitiendo explorar medidas de conservación del hábitat en el estuario. El mismo se ha empleado para predecir cuantitativamente potenciales modificaciones en la salinidad durante el llenado de las presas. Estos enfoques son fundamentales para garantizar que el desarrollo hidroeléctrico coexista de manera sostenible con la preservación de los ecosistemas asociados.

El análisis realizado en esta publicación destaca la complejidad y la importancia del estuario del río Santa Cruz como sistema único, y proporciona herramientas valiosas para la toma de decisiones. Los próximos pasos deberán enfocarse en la integración de nuevos datos, la validación continua del modelo numérico y el diseño de estrategias que compatibilicen las demandas energéticas con la conservación ambiental. De este modo, se buscará no solo avanzar en el conocimiento científico, sino también contribuir al manejo responsable de uno de los ríos más emblemáticos de la Patagonia.

El abordaje propuesto para el estuario del río Santa Cruz se alinea con los principios del *manejo adaptativo*, una estrategia que reconoce la existencia de incertidumbres y promueve la toma de decisiones basada en la mejor información disponible. En este sentido, tanto el modelo numérico como las decisiones asociadas a la operación de las presas deben considerarse herramientas dinámicas, sujetas a revisión y mejora continua. Este enfoque constituye un paraguas conceptual para integrar monitoreo, modelación y gestión en un proceso iterativo de mejora y adaptación.

Bibliografía

- [1] Ezcurra & Schmidt S. A. «Concentraciones de sedimentos en suspensión, niveles del mar, temperatura y salinidad en el estuario del río Santa Cruz para distintas condiciones de erosión de las represas». Informe técnico, 2020.
- [2] Aves Argentinas. Serie de informes anuales del Proyecto Macá Tobiano (2011–2023). Disponibles en línea: <https://www.avesargentinas.org.ar/proyecto-maca-tobiano>. Último acceso 2024.
- [3] Timothy P. Boyer, John I. Antonov, Olga K. Baranova, Cathy Coleman, Hernan E. Garcia, Alexey V. Grodsky, Dmitry R. Johnson, Ricardo A. Locarnini, Alexey V. Mishonov, Thomas D. O'Brien, C. R. Paver, James R. Reagan, Dan Seidov, Igor V. Smolyar, and Melissa M. Zweng. *World Ocean Database 2013*. NOAA Atlas NESDIS 72, Silver Spring, MD, 2013.
- [4] J. R. Burau and S. G. Monismith. Structure and flow-induced variability of the subtidal salinity field in northern San Francisco Bay. *Journal of Physical Oceanography*, 32:3003–3019, 2002.
- [5] Intergovernmental Oceanographic Commission. *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. 2010.
- [6] Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (Argentina). Sistema nacional de información hídrica. <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>. [Último acceso: enero 2024].
- [7] Inspección de Obra represa Jorge Cépernic. «Influencia de la marea sobre el nivel del río Santa Cruz en el tramo de la ex-RN3 y Punta Quilla». Informe técnico, 2016.
- [8] Inspección de Obra represa Jorge Cépernic. «Influencia de la marea sobre el nivel del río Santa Cruz en el tramo de la ex RN3 y Punta Quilla - 2da Campaña (IO_JC_IC_IT_03_REV 0A)». Informe técnico, 2017.
- [9] Universidad de Valladolid. «Estudio de Caudal Ecológico. Aprovechamientos hidroeléctricos río Santa Cruz - Argentina». Informe técnico, 2017. Preparado para UTE Represas Patagonia (EILING–CGGC–HCSA).
- [10] Deltares. *Delft3D-Flow, User Manual*, 2014.
- [11] J. E. Edinger, E. M. Buchak, and V. S. Kolluru. Modeling flushing and mixing in a deep estuary. *Water, Air, and Soil Pollution*, 102:345–353, 1998.
- [12] Gary D. Egbert and Svetlana Y. Erofeeva. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2):183–204, 2002.

- [13] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL and Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC. «Informe de la Campaña N°7: Mediciones y Muestreos Mensuales. Caudales Líquidos, Sólidos y Caracterización de los Sedimentos Transportados. Aprovechamiento Hidroeléctrico del Río Santa Cruz», 2019. Informe preparado para: China Gezhouba Group Company Ltd., Electroingeniería S.A., Hidrocuyo S.A. - Unión Transitoria de Empresas.
- [14] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL and Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC. «Informe de la Campaña N°20: Mediciones y Muestreos Mensuales. Caudales Líquidos, Sólidos y Caracterización de los Sedimentos Transportados. Aprovechamiento Hidroeléctrico del Río Santa Cruz», 2022. Informe preparado para: China Gezhouba Group Company Ltd., Electroingeniería S.A., Hidrocuyo S.A. - Unión Transitoria de Empresas.
- [15] R. Garvine, R. McCarthy, and Kuo-Chuin Wong. The axial Salinity distribution in the Delaware estuary and its weak response to river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35:157–165, 1992.
- [16] Ascencio Lara. «Evaluación de la influencia del Proyecto Hidroeléctrico Néstor Kirchner sobre los niveles de agua del Lago Argentino». Informe técnico, 2016.
- [17] Sergio Oscar Liscia, Pablo Cacik, Mariano De Dios, and Brenda Vath. *Crecidas de diseño del río Santa Cruz*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, 2023.
- [18] Sergio Oscar Liscia, María Mercedes Del Blanco, and Juan Manuel Galíndez. *Simulación de operación de embalse y despacho de potencia y energía del aprovechamiento del río Santa Cruz*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, 2024.
- [19] S. Morey and D. Dukhovskoy. Analysis methods for characterizing salinity variability from multivariate time series applied to the apalachicola bay estuary. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29:613–628, 2012.
- [20] Red Hidrometeorológica Nacional. Base de datos hidrológica integrada. <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/#>. Último acceso: Octubre 2017.
- [21] National Centers for Environmental Information. World ocean database 2013 (wod13). <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD13/>, 2013. Último acceso 2025.
- [22] G. M. E. Perillo, editor. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, volume 53 of *Developments in Sedimentology*. Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [23] Serman & Asociados S.A. «Estudio de impacto ambiental: Aprovechamientos hidroeléctricos del Río Santa Cruz (Presidente Dr. Néstor C. Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), Provincia de Santa Cruz – Actualización». Informe técnico, 2017.
- [24] L. P. Sanford, W. C. Boicourt, and S. R. Rives. Model for estimating tidal flushing of small embayments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(6):635–654, 1992.

- [25] Sergio Schmidt and Gabriel Danieli. «Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos. Estuario del Río Santa Cruz. Informe final». Informe técnico, 2017. Preparado para UTE Represas Patagonia.
- [26] Servicio de Hidrografía Naval. Tablas de marea: Puertos del río de la plata y litoral marítimo argentino sudamericano. <https://www.hidro.gov.ar/oceanografia/tmareas>, 2016. Último acceso: 2025.
- [27] OSU Tidal Inversion Software. Tpxo: Global tidal solutions. <https://www.tpxo.net/global>, 2024. Último acceso 2025.
- [28] C. F. Wang, M. H. Hsu, and A. Y. Kuo. Residence time of the danshuei river estuary, taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60(2):381–393, 2004.
- [29] S. A. Wherry, T. M. Wood, H. R. Moritz, and K. B. Duffy. «Assessment of Columbia and Willamette River flood stage on the Columbia Corridor Levee System at Portland, Oregon, in a future climate». Scientific Investigations Report 2018-5161, U.S. Geological Survey, 2019.

ISBN 978-950-34-2574-9



A standard linear barcode representing the ISBN number 978-950-34-2574-9. The barcode is composed of vertical black bars of varying widths on a white background.

9 789503 425749