



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA

Y POLÍTICA HÍDRICA

REPÚBLICA ARGENTINA

CONICET



**FUNDACIÓN
YPF**

Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica

Proyecto PIO CONICET – Fundación YPF

INFORME N° 3 – Campaña de mediciones de velocidad de corrientes de marea en el estuario del río Santa Cruz y comparación con los resultados de los modelos numéricos



*Proyecto INA 372
Informe LHA 03-372-19
Ezeiza, mayo de 2020*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo Spalletti

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Julio C. DE LÍO (a/c)

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Mag. Mariano RE

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Mag. Mariano RE

Mayra MORALE

Ing. Mag. Nicolás TOMAZIN

Arq. Sebastián PERALTA

Lic. Federico HASPERT

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Ing. Lucas BINDELLI

Ing. Martín IRIGOYEN

Ing. Luciano HERGENREDER Lic. Nicolás ORTIZ

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Martín IRIGOYEN

Ing. Luciano HERGENREDER

Lic. Nicolás ORTIZ

Ing. Leandro KAZIMIERSKI

Ing. Lucas BINDELLI

Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica

RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados de la campaña de mediciones realizada en el estuario del río Santa Cruz durante diciembre de 2018. Se realizaron observaciones de velocidades de corriente superficial utilizando dos flotadores de bajo costo y la medición de dos secciones transversales en la boca del estuario con un ADCP, obteniendo valores de niveles, profundidades y velocidades. Los datos obtenidos se comparan con valores simulados con un modelo numérico implementado para esa zona de interés y durante el mismo período. En general, se observa un buen acuerdo entre las distintas series, con leves subestimaciones para valores de profundidades (según el modelo digital del terreno desarrollado) y de velocidades por parte del modelo.

Descriptores temáticos: corrientes de marea, velocimetría Doppler, potencial energético, modelación numérica.

Descriptores geográficos: Estuarios Patagónicos, Santa Cruz, río Santa Cruz, Mar Argentino.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Problema	3
1.2. Proyecto PIO CONICET-FYPF 2016-2017	4
1.3. Estuarios patagónicos	5
1.4. Tercer informe	7
2. CAMPAÑA DE MEDICIONES	8
2.1. Sitio de interés	8
2.2. Objetivo de la campaña	8
2.3. Instrumental	9
2.4. Metodología	9
2.5. Resultados	10
3. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	15
3.1. Introducción	15
3.2. Modelo hidrodinámico	15
3.3. Análisis de niveles de la superficie libre	16
3.4. Análisis batimétrico	17
3.5. Análisis de velocidades con flotadores	18
3.6. Análisis de velocidades medias con ADCP	20
4. CONCLUSIONES	22
REFERENCIAS	23
ANEXO I: FOTOGRAFÍAS DE LA CAMPAÑA	25

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema

El aprovechamiento de la energía proveniente de las mareas puede ser de dos tipos: utilización de la energía potencial provocada por la diferencia de nivel de agua en centrales ubicadas en presas que cierran sitios con buena amplitud de marea, o captación de la energía cinética de las corrientes de marea con turbinas localizadas en zonas de alta velocidad.

La generación de energía mareomotriz en presas se realiza mediante los mismos principios de la generación hidroeléctrica con la diferencia de que puede construirse una central de ciclo doble (dos direcciones del flujo). Esta tecnología está suficientemente probada, pero las instalaciones que la contienen implican un alto costo ambiental e inversiones iniciales significativas.

La energía cinética de las corrientes de marea está relacionada con el constante movimiento de los flujos de marea. El aprovechamiento de esta energía es reciente, encontrándose en una etapa de desarrollo y existiendo una gama variada de soluciones. La producción de energía se efectúa a través de un sistema de turbinas que se instalan subacuáticamente. El concepto de generación es similar al de la explotación de la energía eólica; sin embargo, debido a la alta densidad del agua respecto de la del aire, un sistema de turbinas hidrocínicas puede producir la misma cantidad de energía a una menor velocidad de rotación y en un área más pequeña. Esta ventaja relativa resulta importante, además de la previsibilidad de las mareas respecto de la del viento.

Estos sistemas presentan algunas ventajas sobre el uso de la energía mareomotriz: no se requieren obras de retención, se reducen impactos visuales, existe la posibilidad de no interferencia con la navegación y se reduce el impacto sobre los ecosistemas. Sin embargo, el sistema de producción de energía a través de las corrientes de marea cuenta con algunas desventajas como el sometimiento a grandes fuerzas de arrastre de las estructuras, el desarrollo de procesos de corrosión y *fouling* sobre turbinas, la reducción de las posibilidades de prácticas recreativas en el cuerpo de agua, la necesidad de velocidades superiores a 1 m/s y la necesidad de grandes profundidades.

Las desembocaduras de los ríos son zonas ideales para aprovechamiento de las mareas, debido a la confluencia de las mareas con el río y a la morfología propia de la desembocadura. Esta situación, más una buena amplitud de mareas, abre la oportunidad a que esta energía sea aprovechada en zonas próximas al territorio y cercanas a puntos de consumo como ciudades o puertos. En la Argentina, estas posibilidades se combinan en los estuarios de la Patagonia Austral.

En este contexto, el desafío de aprovechar el potencial energético de la costa argentina se

encuentra inserto en distintas estrategias gubernamentales. Entre ellas, el Plan Argentina Innovadora 2020¹ (Plan Nacional de Ciencia Innovación y Tecnología Productiva). En este plan, 'Energía' es uno de los seis sectores estratégicos en donde uno de los núcleos socio-productivos es 'Energías del mar'. También en línea con este plan se presenta el ambicioso proyecto 'Pampa Azul'², que es una iniciativa interministerial que facilita investigaciones científicas en el Mar Argentino incluyendo actividades de exploración y conservación, de innovación tecnológica para los sectores productivos vinculados al mar, y de divulgación científica dirigida al público en general. Por todo esto, en la Argentina existen condiciones favorables para avanzar con el estudio de las energías marinas.

1.2. Proyecto PIO CONICET-FYPF 2016-2017

El proyecto "Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica" (PIO CONICET-FYPF 2016-2017) fue seleccionado en el marco de la convocatoria 2016-2017 de los Proyectos de Investigación Orientados sobre investigación en energía que impulsan la Fundación YPF y el CONICET (Argentina). Esta convocatoria se orienta a la promoción de un nuevo modelo de investigación científica que aborde las necesidades y oportunidades de mejora en la industria energética y contribuya con el desarrollo de la Argentina.

Esta propuesta involucra a tres grupos de trabajo del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA): Programa de Hidráulica Computacional (PHC), Programa de Hidráulica Fluvial (PHC) y Programa de Hidráulica Marítima (PHM).

El objetivo general de esta propuesta consiste en evaluar el potencial hidrocínético en el entorno de cinco estuarios patagónicos mediante la implementación de herramientas de simulación numérica avanzadas para el desarrollo de estudios de ingeniería costera. Esta idea apunta a establecer un avance concreto sobre la caracterización de un recurso estratégico que, a la luz del desarrollo prominente de nuevas tecnologías de explotación, pronto puede convertirse en una fuente energética competitiva.

Para este estudio los objetivos específicos que se plantean son los siguientes:

Describir espacial y temporalmente la hidrodinámica en el entorno de cinco estuarios patagónicos: Analizar el potencial energético de las corrientes de marea a través del comportamiento de las siguientes variables, teniendo en cuenta su variación temporal y espacial: velocidades medias y máximas, potencia y energía aprovechable.

Implementar, calibrar y validar modelos hidrodinámicos en cinco estuarios patagónicos: Desarrollar herramientas de análisis que permitan el mejor diagnóstico y estudio de capacidades de los estuarios para la generación de energía hidrocínética. Esto permitirá obtener la información de base necesaria para evaluar localmente el potencial energético.

Representar resultados en un Sistema de Información Geográfica (SIG): Un SIG

¹ www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar/

² <http://www.pampazul.gob.ar/>

permitirá visualizar, analizar e interpretar los resultados de las modelaciones con el objetivo de entender las relaciones, procesos, patrones y tendencias que intervienen en la dinámica de las corrientes de marea y su impacto sobre el potencial energético.

Estimar en forma preliminar el potencial energético hidrocínético en cada emplazamiento: Se prevé identificar tipos de dispositivos convenientes para cada aprovechamiento teniendo en cuenta la tecnología instalada en la actualidad, analizando las singularidades físicas del lugar y las características de la dinámica de las corrientes de marea simuladas.

1.3. Estuarios patagónicos

Los estuarios patagónicos a estudiar en este proyecto son: estuario del río Deseado, estuario del río Santa Cruz, estuario del río Coyle, estuario del Río Gallegos y estuario del Río Grande (Figura 1.1). En la provincia de Santa Cruz se tienen cuatro estuarios (Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle y Río Gallegos) mientras que en Tierra del Fuego se destaca el del Río Grande entre numerosos estuarios pequeños. En estos estuarios se tienen amplitudes máximas de marea que van de los 6,18 m a los 13,07 m y amplitudes medias en el rango 4,34 – 8,37 m. Tres de estas locaciones son destacadas por la NOAA³ entre las 50 estaciones con mayor registro de amplitud de marea en todo el mundo (Río Gallegos, Puerto Santa Cruz y Río Coyle).

En general los estudios antecedentes que involucran a cada uno de estos estuarios tienen perspectivas varias. Entre ellas se destacan abordajes que tienen que ver con la calidad del agua (Esteves et al., 1997, Tarela y van Avermaete., 2009; Tarela et al., 2005), la geomorfología y la geología (Isla y Bujalesky, 2004; Isla et al., 2004), cuestiones ambientales (Ferrari et al., 2002; Lofiego et al., 2009; Lloreda y Pellanda, 2008), y obras (Francisca et al., 2005). Específicamente vinculado con el estudio de la hidrodinámica de uno de los estuarios, se reconoce el trabajo de Speroni et al. (2005), en donde se estudiaron las corrientes de marea a partir de información obtenida en campo.

En la Argentina, la historia de la energía mareomotriz se concentra en torno a los estudios realizados para los golfos Nuevo y San José en la Península de Valdés, con propuestas que ya cuentan con casi un siglo de antigüedad. Ideas más recientes tienen que ver con las posibilidades de los estuarios del Río Deseado, Río Gallegos y Río Grande. Los pocos estudios actuales sobre esta temática ponen un mayor énfasis en la tecnología de los dispositivos que en la caracterización del recurso. En cuanto al análisis del potencial energético de alguno de los estuarios aquí analizados, se destaca el trabajo de Buono et al. (2016) en donde se caracteriza el recurso de las corrientes de marea en el estuario del río Gallegos y su potencial energético.

En la Tabla 1.1 se presentan las características geométricas de cada estuario y las predicciones de amplitud de marea media y máxima (SHN, 2016, 2017). En la

³ <https://tidesandcurrents.noaa.gov/>

Tabla 1.2, respecto de cada estuario, se destacan los datos y antecedentes necesarios para la implementación de modelos numéricos en cada uno de ellos.

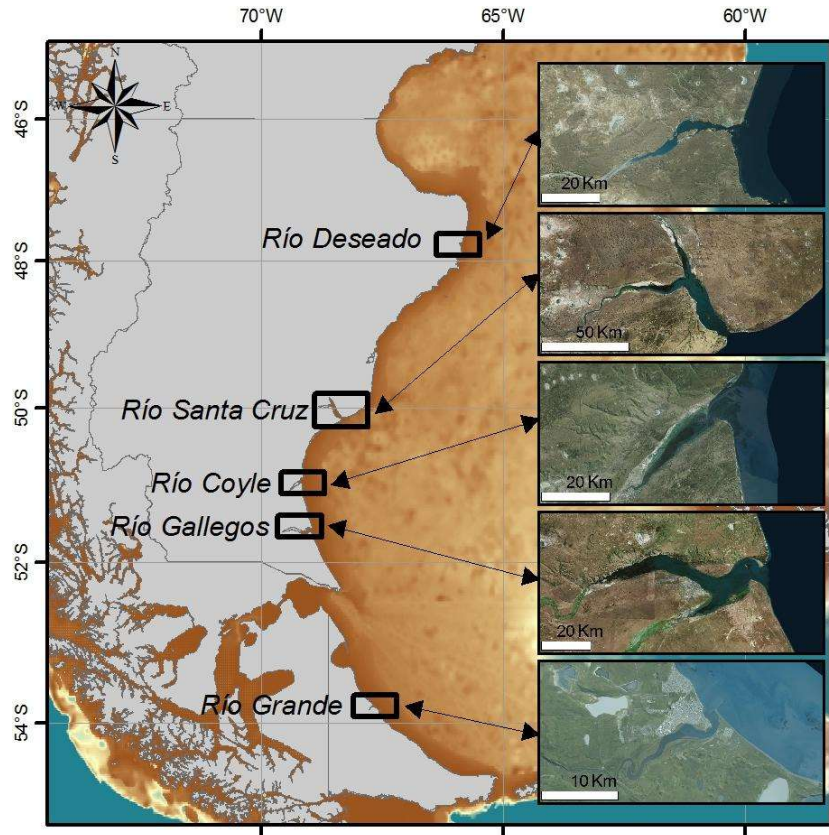


Figura 1.1. Localización de las zonas de estudio

Tabla 1.1. Características generales de los estuarios

Estuario	Río Grande	Río Gallegos	Río Coyle	Río Santa Cruz	Río Deseado
Dimensiones aproximadas	4 x 0.3 km	35 x 3 km	20 x 1 km	40 x 5 km	25 x 2 km
Ancho de boca	400 m	4000 m	4600 m	2100 m	1200 m
Descarga fluvial significativa	NO	NO	NO	SI	NO
Infraestructura cercana	SI	SI	NO	SI	SI
Amplitud media (SHN, 2016)	5.60 m	8.37 m	7.70 m	8.11 m	3.68 m
Amplitud máxima (SHN, 2016)	8.53 m	13.03 m	-	12.63 m	5.77 m
Amplitud media (SHN, 2017)	5.60 m	8.35 m	7.70 m	8.10 m	3.86 m

Amplitud máxima (SHN, 2017)	8.42 m	12.66 m	-	12.34 m	5.72 m
-----------------------------	--------	---------	---	---------	--------

Tabla 1.2. Características generales de los estuarios

Estuario	Río Grande	Río Gallegos	Río Coyle	Río Santa Cruz	Río Deseado
Datos batimétricos	SI	SI	NO	SI	SI
Predicción de marea	Puerto patrón	Puerto patrón	Puerto secundario	Puerto patrón	Puerto patrón
Niveles observados	SI	SI	NO	SI	SI
Velocidades observadas	SI	SI	NO	SI	SI
Antecedentes de modelación	SI	SI	NO	NO	SI

1.4. Tercer informe

El Proyecto “Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica” (PIO CONICET-FYPF 2016-2017), se desarrolla en tres ejes: i) Búsqueda de información de base: recolección, puesta en valor y generación de nueva información de base en cada uno de los estuarios y evaluación del estado del arte de los aprovechamientos energéticos basados en corrientes de marea; ii) Modelación numérica y generación de productos: implementación de modelos 3D de detalle de cada estuario, análisis espacial y temporal (estadísticas) de velocidades de corriente y potencial energético, y caracterización hidrológica de los ríos tributarios a los estuarios; y iii) realización de una campaña de mediciones en campo de variables hidrodinámicas.

En este tercer informe se presenta i) el instrumental para la campaña de medición realizada en el Estuario del río Santa Cruz el día 12 de diciembre de 2018 mediante técnicas de ADCP y medición con flotadores; ii) los resultados obtenidos en la campaña; y iii) la comparación de los datos obtenidos en la campaña con los resultados del modelo numérico presentado en el Segundo Informe (Bindelli et al., 2020).

2. CAMPAÑA DE MEDICIONES

2.1. Sitio de interés

Las mediciones se llevaron a cabo en un sector del estuario del río Santa Cruz que las simulaciones computacionales indicaron como óptimas en cuanto a la disponibilidad del recurso energético. Específicamente se trata de la zona de la boca del estuario, aproximadamente entre Punta Entrada y Punta Cascajo, a unos 5 km al SE de Punta Quilla (Figura 2.1).

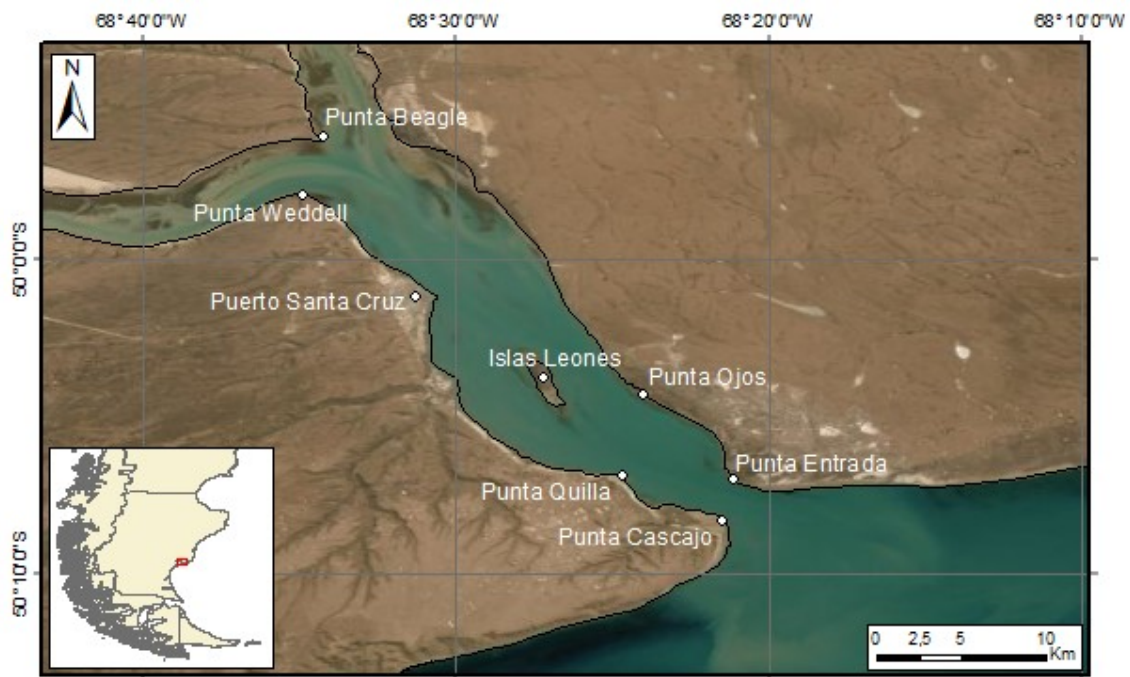


Figura 2.1. Sitio de interés.

2.2. Objetivo de la campaña

El objetivo de la campaña consistió en obtener registros de velocidades de corriente en toda la columna de agua en la boca del estuario del río Santa Cruz, a unos 5 km al SE de Punta Quilla. Para esto se utilizó un equipo perfilador de velocidades de efecto Doppler acústico (ADCP por sus siglas en inglés), y dos flotadores con posicionamiento por GPS para medir velocidades superficiales en el tramo Punta Quilla - Punta Cascajo. Los registros obtenidos

fueron luego contrastados con los resultados de las simulaciones computacionales de este estuario en la misma fecha y horario en que se llevó a cabo la campaña.

2.3. Instrumental

La logística de la campaña contó con un fuerte apoyo del Destacamento Puerto Santa Cruz de la Prefectura Naval Argentina, que puso a disposición una embarcación para realizar las observaciones. El equipo del Jefe de Operaciones del Destacamento, Sub-Prefecto Diego Enríquez, estuvo a cargo de las maniobras del bote semirrígido.

Las tareas de medición de velocidades y profundidades en las secciones transversales al flujo fueron llevadas a cabo empleando un perfilador acústico de velocidades con efecto Doppler (ADCP) de marca Sontek/Xylem modelo RiverSurveyor M9 (SN 5188). El ADCP es un instrumento que calcula la velocidad de la corriente en sus tres componentes, para una serie de celdas que dividen la columna de agua. El principio de funcionamiento del dispositivo se basa en el efecto Doppler acústico: el equipo emite un pulso sonoro de frecuencia fija y recibe el rebote acústico de la onda proveniente de partículas microscópicas transportadas por el escurrimiento, principalmente sedimentos. La señal recibida por el ADCP se encuentra desplazada a una mayor frecuencia debido al efecto Doppler. Dado que la diferencia de frecuencias entre la onda emitida y la recibida es proporcional a la diferencia de velocidades entre el ADCP y las partículas transportadas por el agua, y suponiendo que las partículas microscópicas en las que rebota el pulso acústico se desplazan a la misma velocidad que el agua, es posible determinar esta última al registrar el desplazamiento de frecuencias. De manera adicional, el equipo posee una sonda (*vertical beam*) que permite determinar la distancia al fondo.

Los flotadores utilizados en esta campaña se construyeron de acuerdo al prototipo CODE (*Coastal Ocean Dynamics Experiment*) desarrollado por Davis (1985) y que fuera utilizado en la Argentina en el entorno del puerto de Mar del Plata (Luteijn, 2013). Consisten básicamente en cuatro velas de lona que se disponen en forma de cruz, vistas en planta. Las velas se despliegan en un plano vertical, afirmadas sobre dos ejes fijos horizontales: uno inferior, sumergible y otro superior, flotante. Ambos quedan vinculados a través de un mástil vertical fabricado en caño de PVC que a su vez alberga al receptor GPS en el extremo superior. Las dimensiones del dispositivo son 1,02 m en vertical (aproximadamente 0.90 m sumergidos), y 1.20 m de largo en los ejes horizontales.

El flotador A fue equipado con un teléfono celular Samsung Galaxy J1 Mini al cual se le instaló la aplicación Geo Tracker para la grabación de la trayectoria cuya performance fue previamente testeado con un GPS HiPer V de Topcon arrojando resultados satisfactorios. El flotador B fue equipado con un GPS Garmin eTrex 10.

2.4. Metodología

La zona de trabajo corresponde a la boca del estuario del río Santa Cruz, desde la progresiva correspondiente al puerto de Punta Quilla hasta el estrechamiento localizado 5 km aguas abajo, entre Punta Cascajo al Norte y Punta Entrada, al Sur (Parque Nacional Monte León).

Se utilizó un equipo ADCP para registrar velocidades en una sección de interés situada en

proximidades del estrechamiento, del lado exterior. De acuerdo con los resultados presentados en el Segundo Informe sobre la modelación implementada en el estuario del río Santa Cruz (Bindelli et al., 2020), la boca del estuario fue identificada como de gran potencialidad para el aprovechamiento de las corrientes de marea. Si bien las transectas realizadas con el ADCP no atravesaron la zona de mayor potencial por cuestiones logísticas, las mediciones se llevaron a cabo en un entorno de características similares (buenas profundidades y velocidades levemente menores). El sensor se utilizó vinculado a una embarcación semirrígida a los efectos de evitar influencia magnética.

Por otra parte, se obtuvieron los registros de trayectoria GPS de los flotadores, ambos entre la progresiva de Puerto Punta Quilla y la sección de medición ADCP, en el estrecho de Punta Cascajo. Para ello, los flotadores se arrojaron en dos posiciones sobre una misma sección transversal del estuario; el flotador A se arrojó a unos 392 m y el B a 2471 m del muelle de Punta Quilla. Los flotadores derivaron con la corriente durante 98 y 85 minutos respectivamente hasta alcanzar la sección de medición ADCP, donde finalmente fueron recuperados.

2.5. Resultados

2.5.1. Consideraciones

La campaña de mediciones se llevó a cabo el día 12 de diciembre de 2018 entre las 14:30 y las 16:57 hs. De acuerdo con la tabla de mareas del Servicio de Hidrografía Naval en Punta Quilla, dicho período fue posterior a la segunda pleamar de la fecha (9.80 m a las 14:10hs) y previo a la segunda bajamar (2.40 m a las 20:47hs), por lo que el flujo en todo momento fue saliente: del estuario hacia el mar.

En la Figura 2.2 se ha graficado la evolución en el tiempo de las elevaciones registradas por el GPS (sobre la embarcación) durante las dos transectas de medición con ADCP. En términos generales, se observó un descenso de aproximadamente 5 metros debido al efecto de marea. Sin embargo, cabe aclarar que las trayectorias logradas en ambos cruces no fueron coincidentes por los motivos que se indican a continuación.

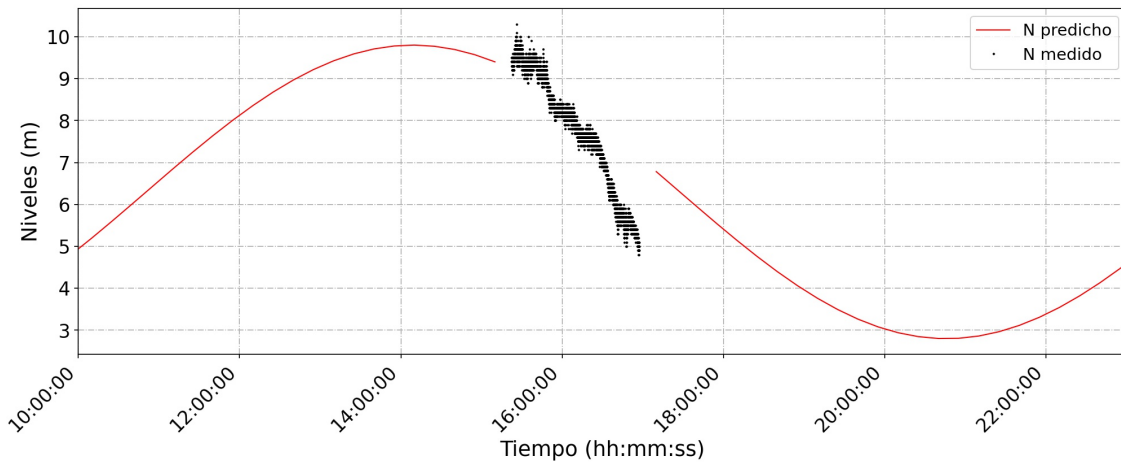


Figura 2.2. Elevaciones GPS de la embarcación junto con los niveles predichos por el Servicio de Hidrografía Naval para Punta Quilla.

La metodología de disposición, seguimiento y recolección de los flotadores se desarrolló según lo previsto, sin observaciones.

Cabe señalar varias particularidades en relación a las mediciones efectuadas con ADCP desde la embarcación semirrígida:

- Fue posible efectuar una correcta calibración del compás interno del equipo.
- El dispositivo de sujeción pudo operarse con facilidad. No se observaron desviaciones crecientes en las mediciones de rolido y cabeceo, lo que indicaría que el sensor mantuvo su verticalidad.
- El oleaje fue particularmente más intenso durante el primer cruce.
- Se produjo una falla en la carga de la línea de costa y sección de medición predefinida en el sistema de visualización de posición GPS en el software RiverSurveyor, por lo cual la navegación tuvo que realizarse por observación de costa.
- Aproximadamente a la mitad del segundo cruce de mediciones ADCP se divisaron ambos flotadores, por lo que se decidió recuperarlos. Las maniobras necesarias para recolectar los flotadores generaron que el semirrígido derivara con la corriente en dirección saliente al estuario, apartándose de la transecta de medición ADCP prevista en aproximadamente 700 m (ver Figura 2.3).
- Grupos de toninas (*delfines de Commerson*) acompañaron a la embarcación en ambos cruces y, en ocasiones, interfirieron con las mediciones del ADCP. El error generado se manifestó como faltantes en el registro de velocidades. La situación mencionada se dio fundamentalmente en las verticales cercanas a la costa Sur del segundo cruce.
- Las profundidades del estuario hacia la costa Norte resultaron excesivas para el perfilador de corriente utilizado, que sólo obtuvo valores en los 25 m de la vertical más cercanos a la superficie.

2.5.2. Mediciones con el ADCP

En las Figura 2.3 se presentan las trayectorias de la embarcación en los dos cruces efectuados durante la campaña.



Figura 2.3. Trayectorias de la embarcación (mediciones ADCP). Cruce 1 en amarillo, cruce 2 en naranja.

La calibración del equipo se realizó en cercanías de la sección de medición, hacia la costa Sur, a las 15:10 hs. El primer cruce (de S a N) tuvo una duración de 27 minutos, entre las 15:22 y las 15:49 hs, mientras que se tardó 68 minutos en realizar el segundo (de N a S), entre las 15:49 hs y las 16:57 hs.

El apartamiento de la sección prevista que tuvo lugar aproximadamente hacia la mitad del segundo cruce anula la posibilidad de comparar entre sí las velocidades registradas en las dos transectas.

En el primer cruce (Figura 2.4), iniciado aproximadamente una hora después de la pleamar, la velocidad media de la corriente fue de 0.93 m/s, con valores máximos de aproximadamente 1.60 m/s. La velocidad media de la embarcación fue de 1.65 m/s, con valores máximos de 2.00 m/s, por lo que, en términos generales, resultó elevada.

En el segundo cruce (Figura 2.5), se observaron valores de velocidad de la corriente de hasta 2.50 m/s hacia el final del registro, 2hs 40min después de la pleamar, y una velocidad media de 1.24 m/s. En este caso, la velocidad de la embarcación fue mayoritariamente menor a la velocidad de la corriente de 0.83 m/s en promedio, con máximos de 2.00 m/s.

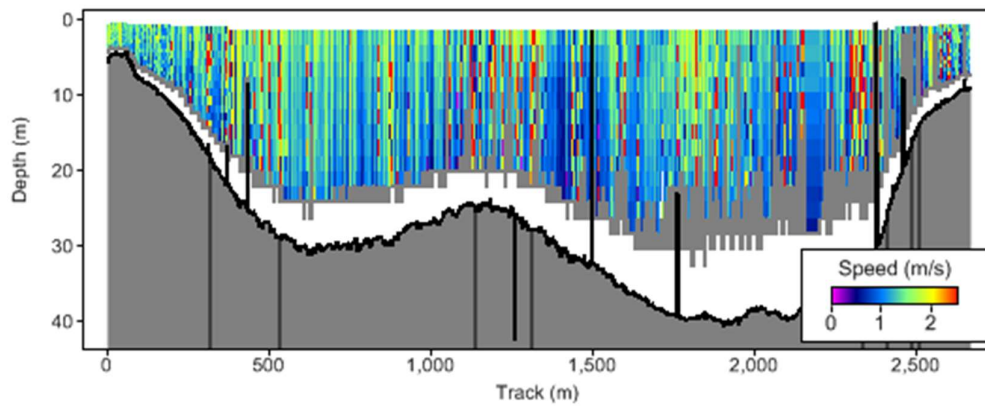


Figura 2.4. Velocidades medidas con el ADCP durante el cruce 1.

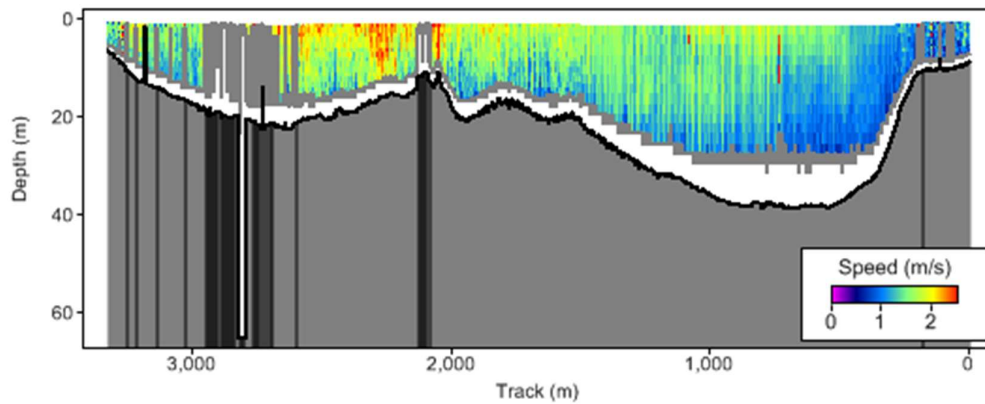


Figura 2.5. Velocidades medidas con el ADCP durante el cruce 2.

2.5.3. Mediciones con los flotadores

En la Figura 2.6 se pueden observar las trayectorias obtenidas a través de la deriva de los flotadores A (equipado con celular) y B (equipado con GPS).

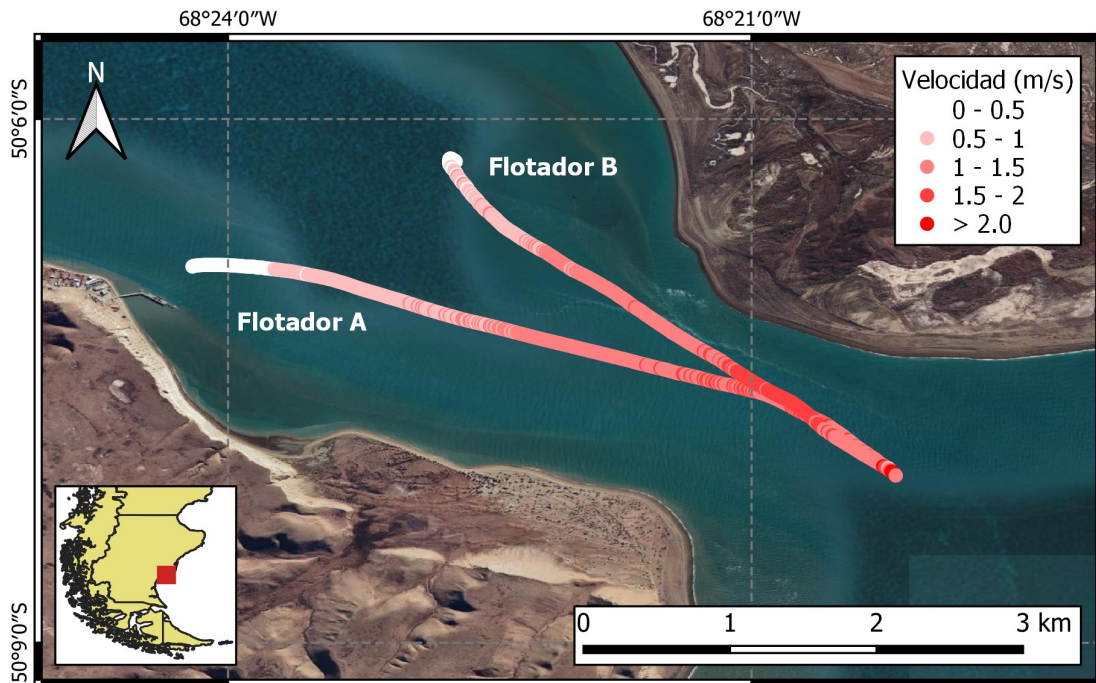


Figura 2.6. Trayectorias de flotadores.

De acuerdo a la información brindada punto a punto por los sistemas GPS utilizados se pudo estimar la velocidad en cada punto de medición, superándose los 2 m/s en el tramo final de la medición.

En el caso del flotador A el resultado de la medición permitió estimar una trayectoria de 5291 m en 98 minutos, desarrollando una velocidad media de 0.90 m/s. En el caso del flotador B la distancia recorrida fue de unos 4491 m en 85 minutos, siendo la velocidad media obtenida de unos 0.88 m/s.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

3.1. Introducción

Los datos obtenidos en la campaña resultan de gran utilidad para la calibración y validación de los modelos hidrodinámicos. En esta instancia se presenta una comparación entre los valores de niveles, profundidades y velocidades obtenidas en campo y el modelo del estuario del río Santa Cruz para el dominio del Rank 3 presentado en el Segundo Informe (Bindelli et al., 2020). Para poder efectuar este análisis se realizó una nueva simulación que abarcara el período temporal de la campaña.

3.2. Modelo hidrodinámico

El Rank 3 del modelo hidrodinámico (Figura 3.1) abarca la zona del estuario y su desembocadura al Océano Atlántico. Se extiende desde el final de los brazos de los ríos Chico y Santa Cruz (Punta Beagle), hasta la zona exterior de Punta Entrada. El modelo cuenta con dos bordes abiertos: uno de 16 km al Este y otro de 54 km al Sur.

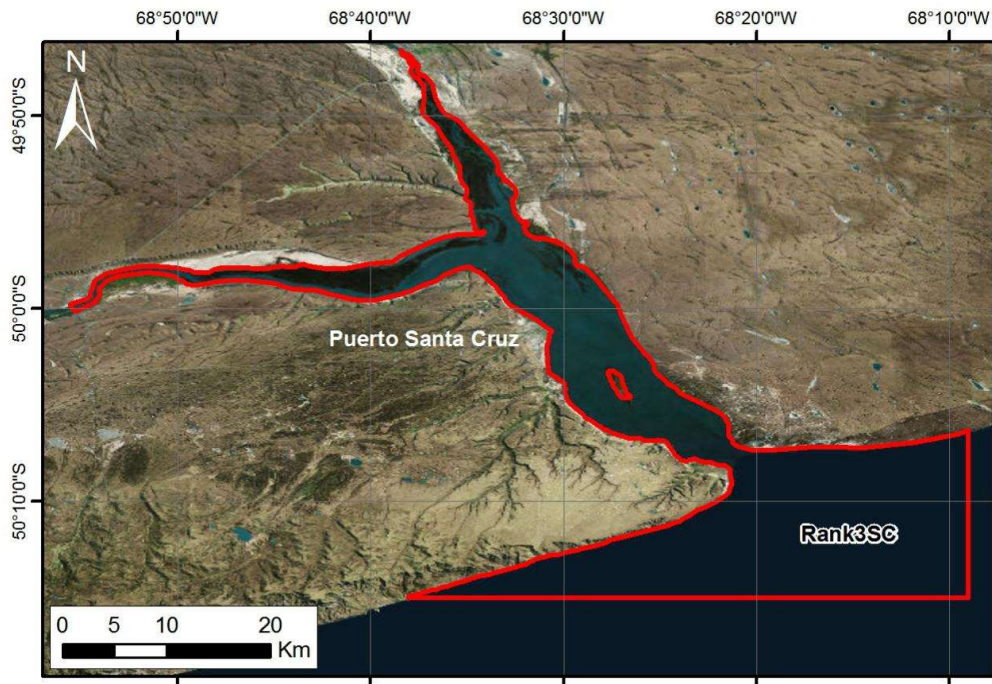


Figura 3.1. Dominio del Rank 3 – Estuario del Río Santa Cruz.

Las características numéricas se exponen en la tabla siguiente:

Tabla 3.1 Características de las simulaciones con el modelo local Rank 3 SC.

Parámetro	Estuario del río Santa Cruz
Período simulado	25/11/2018 – 18/12/2018
Discretización temporal [s]	15
Modelo de turbulencia	Viscosidad de turbulencia constante: 200
Batimetría	Cartas 2, H4, H367 y H367B del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 37
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	89 x 137
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	630
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	384
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	44.430

3.3. Análisis de niveles de la superficie libre

En la Figura 3.2 se presenta la comparación de la superficie libre obtenida mediante el GPS de la embarcación en las dos transectas realizadas y los resultados del modelo. Se observa que si bien las mediciones presentan una elevada dispersión (producto del oleaje), estas marcan una tendencia descendente que es representada por el modelo, reflejando de esta manera una Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.48 m y una correlación R^2 del 0.97.

Sin embargo, cabe destacar que en las primeras dos terceras partes del recorrido la representación del modelo se aproxima considerablemente a las mediciones, mientras que en el tercio final las mediciones presentan una disminución pronunciada de los niveles, hecho que no ocurre en los datos modelados. Si bien el modelo representa acertadamente a las predicciones de marea provistas por el Servicio de Hidrografía Naval, como se demuestra en el Segundo Informe (Bindelli et al., 2020), la onda de marea medida difiere de estas predicciones (como puede observarse en la Figura 2.2) por lo que dicha diferencia es esperable.

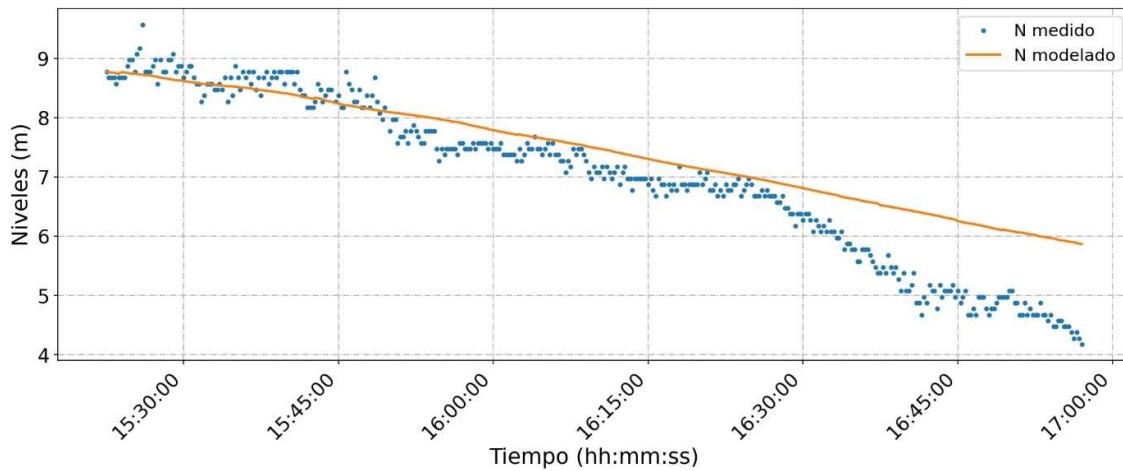


Figura 3.2. Comparación de niveles de la superficie libre medidas con el GPS de la embarcación durante la navegación (azul) y del modelo (naranja) para las Transectas 1 y 2.

3.4. Análisis batimétrico

En los relevamientos con ADCP también se obtuvieron los perfiles batimétricos del fondo del estuario presentados en las Figura 2.4 y Figura 2.5. La comparación con la batimetría utilizada en el modelo del Rank 3 (Bindelli et al., 2020) se muestra en la Figura 3.3 **Figura 3.3.** para la Transecta 1 y en la Figura 3.4 para la Transecta 2.

En ambos casos se observa que el modelo digital del terreno subestima las zonas más profundas, pero se representan correctamente las formas características del lecho del estuario. Estos resultados refuerzan la idea de que un nuevo relevamiento batimétrico sería de gran utilidad para una mejor descripción de las corrientes de marea donde la geometría del fondo tiene una gran relevancia.

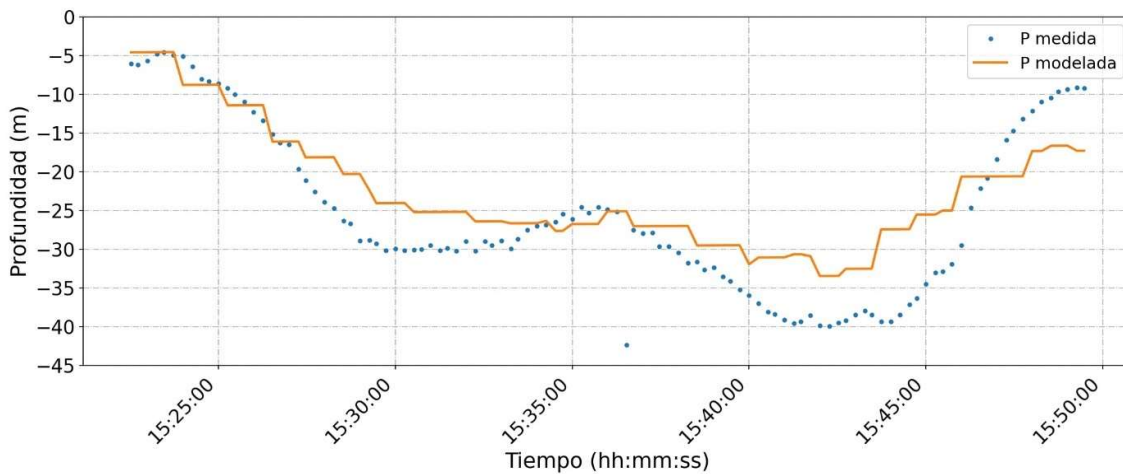


Figura 3.3. Comparación de profundidades medidas con ADCP (azul) y del modelo batimétrico (naranja) de la Transecta 1.

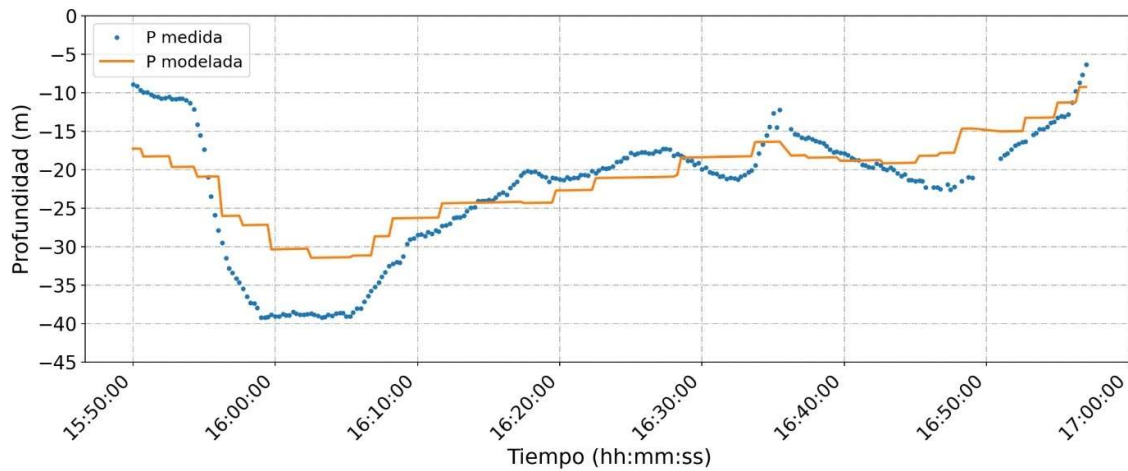


Figura 3.4. Comparación de profundidades medidas con ADCP (azul) y del modelo batimétrico (naranja) de la Transecta 2.

Aplicando nuevamente los mismos indicadores, resulta que, si bien el ECM es elevado, oscilando entre 30 y 22 m, la correlación R^2 entre ambas series de datos es buena (0.86 para la primera transecta y 0.78 para la segunda).

3.5. Análisis de velocidades con flotadores

Tal como se evidencia en las figuras Figura 3.5 y Figura 3.6 los valores de velocidades medidos (tanto para los flotadores como para las transectas) presentan importantes variaciones en cortos períodos de tiempo. Esto dificulta la comparación con los resultados del modelo numérico debido a la falta de precisión de este último, que no logra representar dichas fluctuaciones. Es por ello que previo a las comparaciones que se muestran a continuación, se aplicó sobre las series medidas una media móvil con una ventana de 5 minutos, para trabajar con valores que sí pueden ser representados en el modelo.

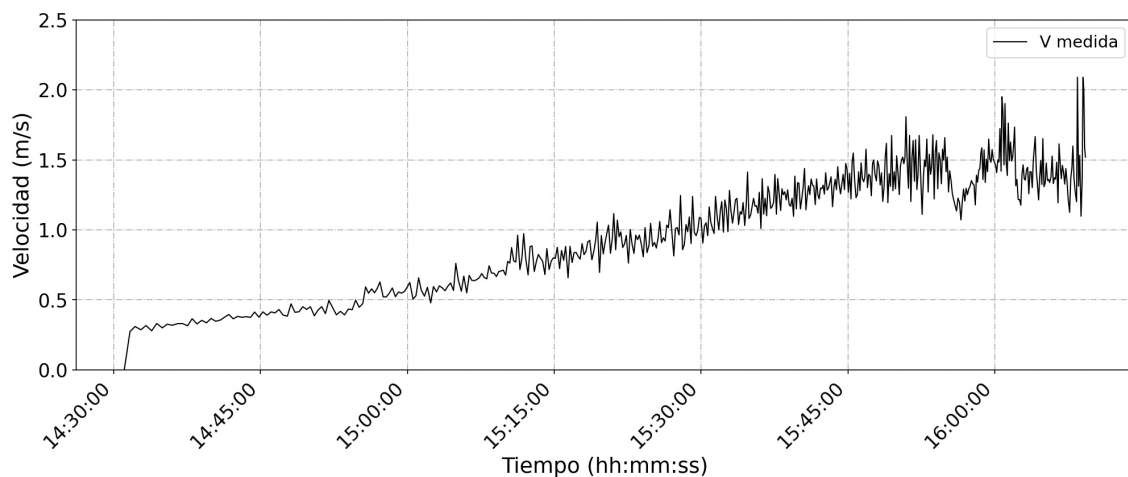


Figura 3.5. Velocidad superficial instantánea del Flotador A.

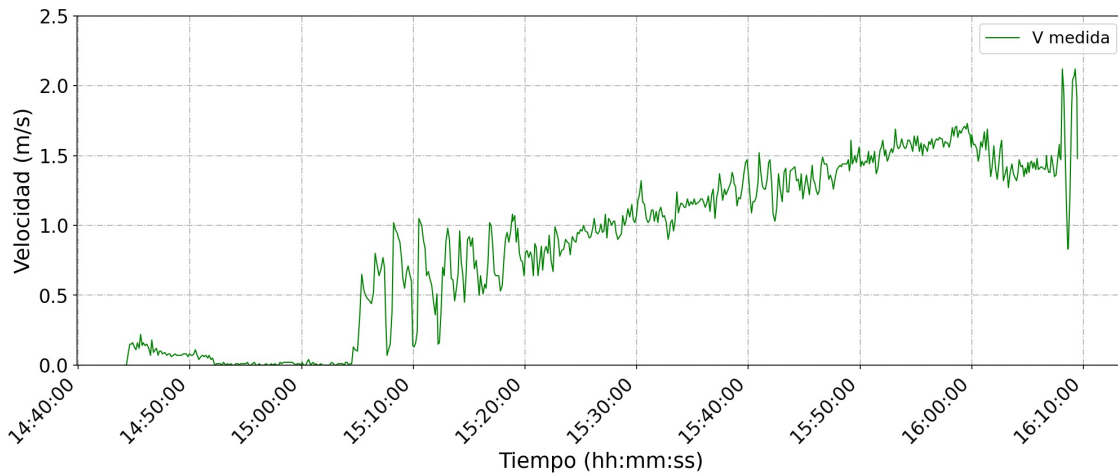


Figura 3.6. Velocidad superficial instantánea del Flotador B.

La comparación de velocidades simuladas y observadas (flotadores) se realizó relevando las velocidades del modelo para un instante de tiempo y una posición determinados por los segundos, para la capa superior de la columna de agua. Fue necesario para ello realizar simulaciones tridimensionales en el estuario, con una discretización en la vertical de diez capas, repartidas en forma proporcional a lo largo de toda la columna de agua (coordenada sigma).

Puede observarse que los valores medidos y modelados se aproximan considerablemente (Figura 3.7 y Figura 3.8), obteniendo un ECM de 0.02 m/s y 0.08 m/s y correlaciones R^2 de 0.86 y 0.89 para el primer y segundo flotador, respectivamente.

Las diferencias observadas en el primer tramo del recorrido del segundo flotador posiblemente correspondan a errores de transmisión de los valores medidos, por lo que la similitud podría ser incluso mejor.

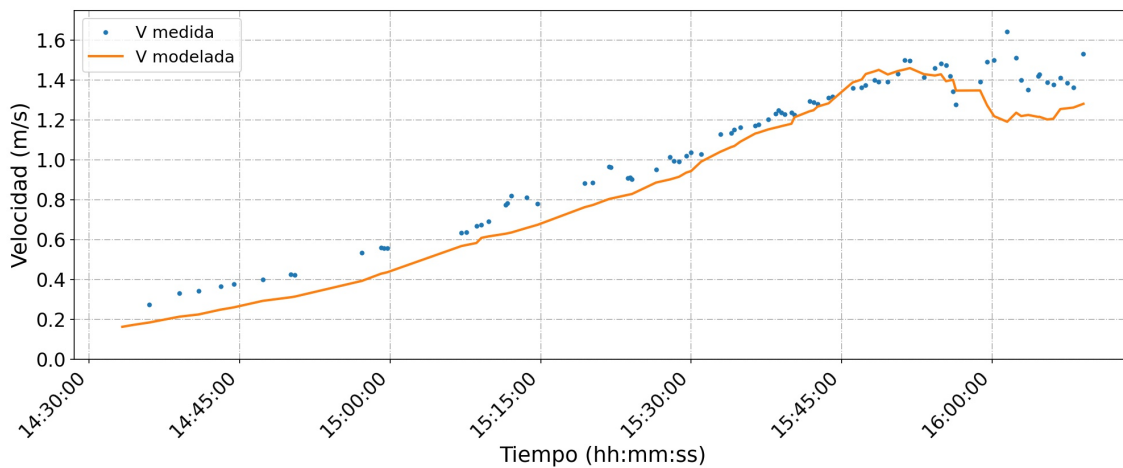


Figura 3.7. Comparación entre velocidades medidas con el Flotador A (azul) y las obtenidas con el modelo (naranja).

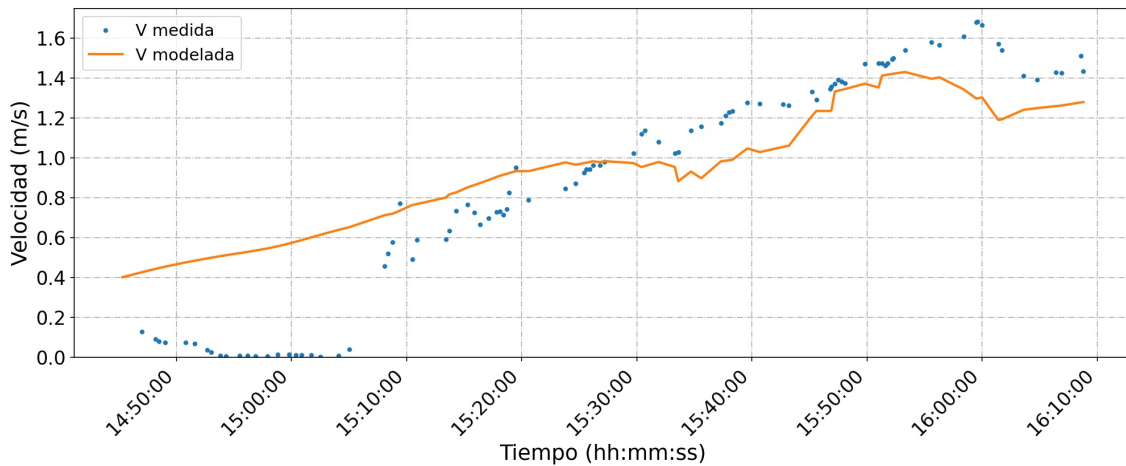


Figura 3.8. Comparación entre velocidades medidas con el Flotador B (azul) y las obtenidas con el modelo (naranja).

3.6. Análisis de velocidades medias con ADCP

Las velocidades medias integradas en la vertical obtenidas con ADCP se compararon con las velocidades del modelo respetando la posición espacial y temporal de ambas mediciones, obteniendo dos pares de curvas. En el caso de la Transecta 1 (Figura 3.9), si bien se observa una correlación inversa, el ECM es bajo (0.16 m/s). Esto puede atribuirse a las consideraciones realizadas en el ítem 2.5, en donde se constatan las elevadas velocidades de desplazamiento del semirrígido, que derivan en valores de velocidades poco confiables (Figura 2.4). Por otro lado, para la Transecta 2, se obtienen resultados significativamente mejores, con un ECM menor a 0.10 m/s y una correlación R^2 del 0.52. Si bien este último no es un valor óptimo, se puede observar en la Figura 3.10 que el modelo aproxima muy bien en las primeras 2/3 partes del recorrido y recién en el último tercio se manifiestan mayores diferencias. Estas diferencias se producen por la presencia de fuertes variaciones en las velocidades medidas a raíz de la interferencia generada por las toninas, cuya incidencia sobre las mediciones puede observarse en la Figura 2.5.

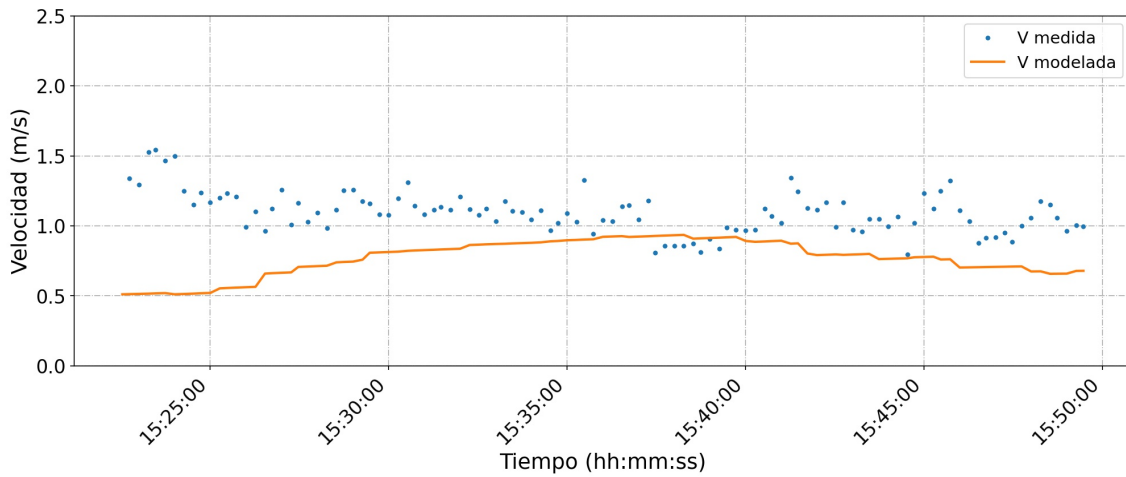


Figura 3.9. Comparación de velocidades medias con ADCP (azul) y del modelo (naranja) en la Transecta 1.

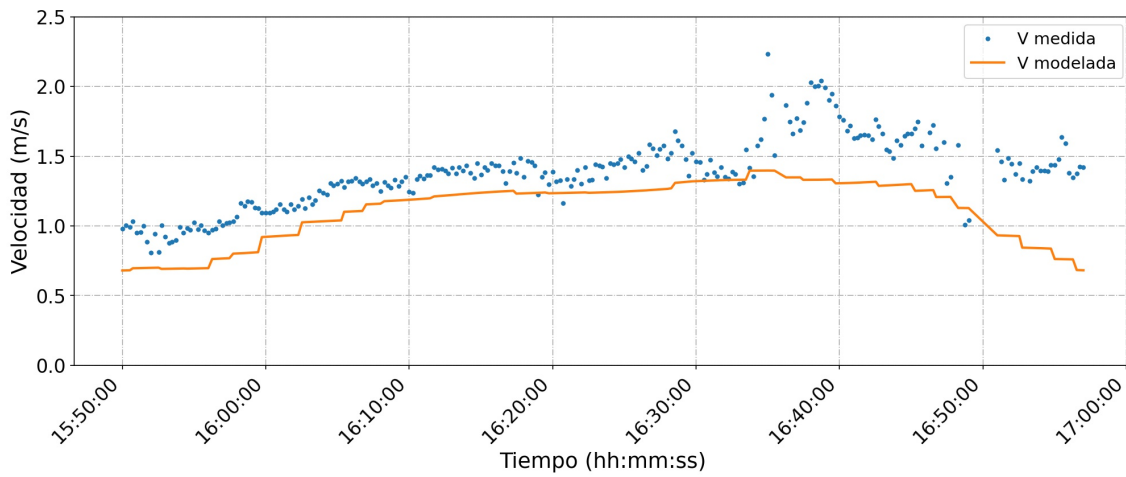


Figura 3.10. Comparación de velocidades medias con ADCP (azul) y del modelo (naranja) en la Transecta 2.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se describieron las características de la campaña de mediciones efectuada en el estuario del río Santa Cruz en diciembre de 2018 y la utilización de esas observaciones en la validación del modelo numérico implementado para esa región.

Respecto al desarrollo de la campaña, se destaca el cumplimiento de los objetivos previamente planteados, posibilitados por las buenas condiciones meteorológicas al momento de efectuar las mediciones.

Si bien existieron dificultades durante la campaña, producto de las maniobras realizadas por la embarcación y la presencia de toninas en contacto con los sensores, además de las limitaciones propias de los instrumentos, los datos obtenidos resultaron ser consistentes y de buena calidad.

En lo que respecta a la comparación entre las mediciones y los valores obtenidos con el modelo numérico, se destaca que:

- Los niveles medidos fueron representados con buena fidelidad por el modelo en las primeras 2/3 partes del recorrido. En el tercio final, se presenta un descenso importante de los niveles medidos, que tampoco se condice con las predicciones del SHN.
- Si bien hay diferencias importantes en la batimetría observada respecto del modelo digital del terreno adoptado (hasta 10 m), estas sólo se presentan en zonas puntuales, mostrando grandes similitudes en el resto del recorrido de ambas transectas. Esto evidencia la necesidad de realizar nuevos relevamientos batimétricos para mejorar la performance de la modelación.
- Las velocidades modeladas presentan un sólido acuerdo con las velocidades medidas, a excepción de aquellos momentos en los que se presentaron problemas en la medición/transmisión de datos. En su mayoría, las mediciones superaron levemente los valores del modelo.

Con todo lo anterior, se puede concluir que, a pesar de las diferencias encontradas en la comparación entre las mediciones y el modelo, este último representa con un grado de precisión aceptable la dinámica de la onda de marea en el estuario del río Santa Cruz, quedando así validado.

Ahora bien, la presencia de velocidades algo más elevadas a las simuladas y profundidades mayores que las adoptadas indica que el potencial hidrocínético en el estuario posiblemente sea aún mayor que el estimado previamente. Se especula que con la realización de nuevas campañas de medición para las tres variables analizadas en este trabajo (niveles, batimetría y velocidades) se impactaría en forma directa en la mejora de la estimación de este potencial.

REFERENCIAS

- Bindelli, L., Kazimierski, L., Re, M., 2020. Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica. Modelos numéricos y potencial energético. Informe LHA 02-372-18, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza.
- Buono, N., Zabaleta, F., Cáceres, R., Tomazín, N., Cecotti, R., 2016. Estudio del recurso energético marino sobre el estuario del Río Gallegos. III Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Ezeiza, Argentina.
- Davis, R., 1985. Drifter Observations of Coastal Surface Currents During CODE: The Statistical and Dynamical Views. *Journal of Geophysical Research*. 90. 4756-4772.
- Esteves, J.L., Gil, M., Commendatore, M., Santinelli, N., Sastre, V., Solís, M., Ocariz, H., González Raies, C., 1997. Evaluación de la contaminación urbana de la ría de Deseado (Provincia de Santa Cruz). Informe Técnico 36, ISSN 0328-462X, Plan de Manejo Integrado de la Zona Costera Patagónica, GEF / PNUD.
- Ezcurra & Schmidt S.A., 2017. Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos: Estuario del río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz – Informe de Avance.
- Francisca, F., Giovine, L., Rodríguez, A., Moya, G., Corral, M., Pagot, M., Hillman, G., 2005. Protección de las márgenes del Río Grande en Tierra del Fuego: Estudio de Caso. *Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 21, pp. 59-69, ISSN 0326-1921.
- Ferrari, S., Albrieu, C., Gandini, P., 2002. Importance of the Rio Gallegos Estuary, Santa Cruz, Argentina, for migratory shorebirds. *Wader Study Group Bull.*, 99, 35-40.
- Isla, F., Bujalesky, G., 2004. Morphodynamics of a gravel-dominated macrotidal estuary: Rio Grande, Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2): 220-228.
- Isla, F., Iantanos, N., Estda, E., 2004. Dinámica submareal y condiciones ambientales de la ría Deseado, Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (3), 367-375.
- Lofiego, R., Noir, G., Urciuolo, A., Iturraspe, R., 2009. Evaluación hidro-ambiental del estuario del Río Grande de Tierra del Fuego, Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2009, Trelew, Argentina.
- Lloreda, L.A., Pellanda, L.A., 2008. Evaluación de los recursos pesqueros costeros de Santa Cruz, provincia de Santa Cruz, Patagonia Argentina. *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.*, II, 535-548.
- Luteijn, J., 2013. Study on sedimentation and effects of mitigating measures at Port of Mar del Plata, Argentina. M. Sc. Thesis Final Report, TU Delft, 163 pp.
- SHN, 2016, 2017, 2018. Servicio de Hidrografía Naval. Tablas de Marea. Argentina.
- Speroni, J.O., Dragani, W.C., Mazio, C.A., 2005. Estudio de corrientes en Puerto Deseado, Provincia de Santa Cruz, Informe técnico N° 02/05, Departamento de Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval.
- Tarela, P.A., van Avermaete, F., 2009. Modelado 3D en el litoral marino: impacto de vertidos industriales y alternativas sustentables, *Mecánica Computacional Vol. XXVIII*, págs. 2833-2850. García Bauza, Lotito, Parente y Vénere (Eds.), Tandil, Argentina.

Tarela, P.A., van Avermaete, F., Calamante, A., Perone, E., Michio, K., Hirai, R., 2005. Diseño Ambiental del emisario submarino de la ciudad de Río Gallegos. Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2005, Mendoza, Argentina.

ANEXO I: FOTOGRAFÍAS DE LA CAMPAÑA



Figura A.1. Bote semirrígido propiedad de Prefectura Naval Argentina.



Figura A.2. *Instalación de ADCP en embarcación.*



Figura A.3. *Armado de flotadores.*



Figura A.4. Sembrado de flotadores.



Figura A.5. Recolección de flotadores.



Figura A.6. *Toninas cerca del semirrigido.*