



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO
DE OBRAS CIVILES



Fundación
COSMOS

INFORME TÉCNICO Nº6

INFORME FINAL

Proyecto FPA 2023

Implementación del Plan de Manejo del Santuario de la
Naturaleza Humedal río Maipo: Educación Ambiental en
torno al monitoreo del río Maipo



Agosto de 2025

Índice de contenido

1.	Introducción.....	4
2.	Sitio de estudio	4
3.	Métodos y materiales.....	7
3.1	Estación de monitoreo permanente.....	7
3.2	Monitoreo hidrográfico en bote y dron	9
4.	Monitoreo hidrográfico	9
4.1	Visita del 26 de junio de 2025.....	9
5.	Datos estación HOBOLink.....	14
5.1	Serie de datos de nivel, temperatura y conductividad	14
5.2	Serie de turbidez.....	16
5.3	Análisis de datos	18
5.2.1	Análisis de Fourier.....	18
5.2.2	Temperatura	18
6.	Conclusiones y comentarios	23
7.	Referencias	24



Índice de Figuras

Figura 1. Sitio de Estudio.....	6
Figura 2. Estación de monitoreo permanente.	8
Figura 3. Ejemplo de visualización de datos en sitio web.....	8
Figura 4. Monitoreo hidrográfico en bote.	10
Figura 5. Imágenes capturadas con dron (26 junio 2025).....	9
Figura 6. Marea y ubicación de perfiles verticales.....	10
Figura 7. Perfiles de temperatura y salinidad (26 de junio 2025).....	11
Figura 8. Temperatura-salinidad-profundidad	12
Figura 9. Datos caudal y de la estación HOBOLink.	19
Figura 10. Instalación del sensor AQUALOGGER TY en el muelle.	16
Figura 11. Datos sensor AQUALOGGER TY..	17
Figura 12. Espectro de energía señal de temperatura en estuario.....	19



1. Introducción

El presente informe final reúne y sintetiza los principales resultados obtenidos a lo largo del proyecto **“Implementación del Plan de Manejo del Santuario de la Naturaleza Humedal Río Maipo: educación ambiental en torno al monitoreo del río Maipo”**, financiado por el Fondo de Protección Ambiental (FPA 2023) del Ministerio del Medio Ambiente y liderado por la **Fundación Cosmos**. Como contraparte técnica, la **Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM)**, a través de su Departamento de Obras Civiles, tuvo a su cargo la instalación, operación y análisis de un sistema de monitoreo hidrográfico en el estuario, así como la realización de campañas de terreno periódicas orientadas a evaluar la dinámica física del sistema.

En las secciones siguientes se presentan los resultados consolidados de este proceso de monitoreo, así como las principales conclusiones y recomendaciones derivadas de la experiencia adquirida durante el período 2024–2025.

2. Sitio de estudio



El sitio de estudio corresponde a la zona de la desembocadura del río Maipo, que alberga el Santuario de la Naturaleza Humedal Río Maipo, administrado por la Fundación Cosmos (Figura 1). En específico, las mediciones hidrográficas se realizan en la zona estuarina delimitada por el Puente Lo Gallardo, que conecta San Antonio y Santo Domingo, y la desembocadura del río en el Océano Pacífico (Figura 1).

El río Maipo tiene su origen en la cordillera de los Andes, drenando una cuenca de aproximadamente 15.000 km² que contiene extensas superficies de cultivo y una importante actividad industrial (Peña-Guerrero et al., 2020). Existe una alta preocupación respecto de la calidad del agua del río Maipo debido a las persistentes intervenciones que sufre durante su trayectoria desde la cordillera al mar (ej., Rosegrant et al., 2000; Cai et al., 2006). La desembocadura del río Maipo se ubica 1 km al sur del Puerto de San Antonio. El río Maipo es un río de descarga moderada, con un caudal medio anual en la estación fluviométrica más cercana a la desembocadura (Estación Cabimbao, código BNA 05748001-7, ubicada 20 km aguas arriba) de 50 m³/s durante la última década (Roco et al., 2024). En años más recientes, la descarga media anual ha bajado a 30 m³/s, como consecuencia de las extracciones de agua y los efectos de la mega-sequía que ha afectado a Chile Central desde 2010 (ej., Garreaud et al., 2017, 2020). En los meses de verano, el caudal diario en desembocadura puede llegar a los 5 m³/s debido a las extracciones de agua (ej., Flores et al., 2022). En enero de 2023, la desembocadura del río Maipo perdió conexión con el mar por primera vez en la historia, producto de la persistente baja del caudal en los meses precedentes. El régimen fluvial del río Maipo en su desembocadura es caracterizado por una alta estacionalidad, con caudales altos debido a eventos de lluvia episódicos durante el invierno y el derretimiento nival en verano (Peña-Guerrero et al., 2020).

El estuario del río Maipo es una zona de alta complejidad hidrodinámica y morfológica. Los principales forzantes que determinan los procesos físicos en el estuario corresponden al flujo del río, las mareas, el oleaje, y en menor medida, el viento (Flores et al., 2020; Roco et al., 2024). La marea en la zona es de tipo mixta semidiurna, con dos ciclos de llenante y vaciante (de distintas amplitudes) en un período de aproximadamente 24 horas. La amplitud de la marea típicamente no excede los 2 m, clasificándose como micro-mareal (Flores et al., 2022). El río Maipo descarga a una costa energética y expuesta, con valores medios de altura de ola significativa en aguas profundas y período peak de 2.3 m y 13 s, respectivamente (Beyá et al., 2016). El oleaje reinante se origina desde el suroeste, lo que genera corrientes costeras dirigidas hacia el norte que influyen la dispersión del agua saliente del estuario (Flores et al., 2022). De forma similar a muchas otras regiones en el mundo (Ej., California, Sudáfrica, Portugal, Nueva Zelanda), la combinación de condiciones de oleaje fuerte y caudales de río estacionales resulta en la formación de una dinámica barra de arena en la desembocadura (estuario de barra, ver Figura 1).

Estas características morfológicas son típicas de los estuarios en Chile central (Cienfuegos et al., 2017).

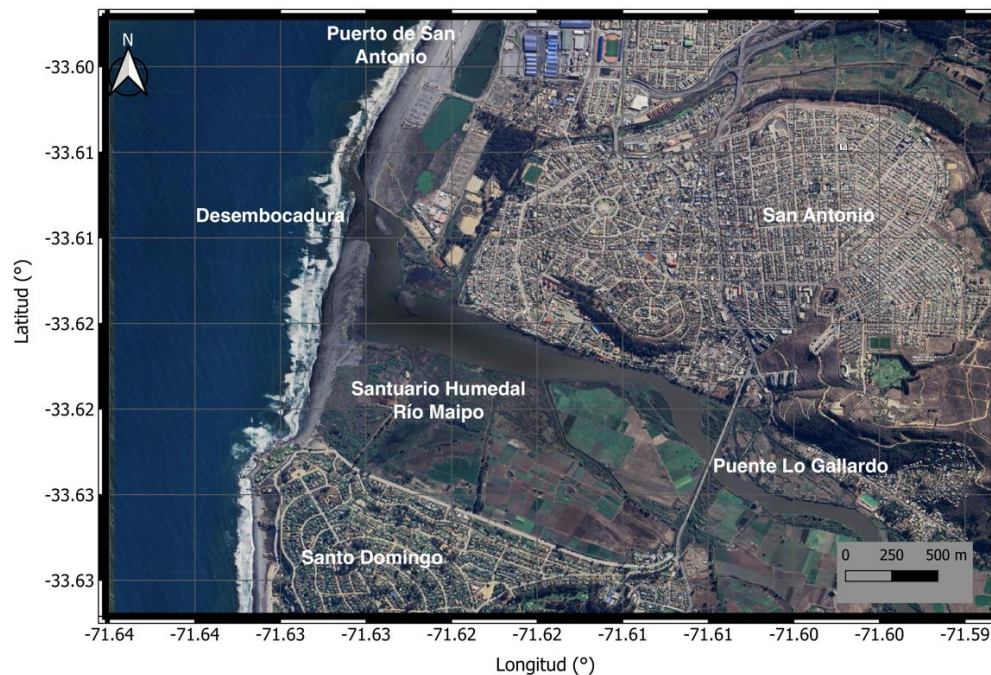


Figura 1. Sitio de Estudio. Imagen tomada de Google Earth correspondiente al 01/05/2023 (última imagen disponible).

Estudios previos realizados en el estuario indican que los parámetros hidrográficos e hidrodinámicos, tales como salinidad, temperatura y velocidad del flujo, están fuertemente modulados por las mareas en condiciones de bajo flujo del río (Flores et al., 2022; Roco et al., 2024). En condiciones normales (sin crecidas), la estructura del campo de salinidad ha mostrado una dinámica que es controlada por la marea, con masas de agua de asociadas al río y al mar. Frecuentemente se observa a una alta estratificación vertical, particularmente durante marea llenante a medida que el agua salada ingresa al estuario (Jusari et al., 2023; Roco et al., 2024). Se ha observado la presencia de una cuña salina con fuertes gradientes verticales de salinidad, con dos capas bien marcadas: una capa superficial con salinidades bajas (0-5 psu) y una capa de fondo con alta salinidad (32-35 psu). La cuña salina retrocede y desaparece a medida que los niveles de marea bajan durante la fase vaciante (Jusari et al., 2023). La estructura de la temperatura sigue la evolución temporal de la salinidad, con cambios moderados que confirman la presencia de masas de agua distintas (Jusari et al., 2023). La velocidad del flujo muestra un cambio de dirección a medida que transcurre el ciclo mareal. En fase llenante, las velocidades son en dirección este,



es decir, hacia la tierra. Por otro lado, en fase vaciante, las velocidades tienden a ser en dirección oeste, hacia el océano (Jusari et al., 2023; Roco et al., 2024). En situaciones de crecidas del río, se espera que el agua del estuario sea totalmente fresca (0 psu) debido a los altos caudales, sin estratificación vertical. Es importante notar que los resultados de los estudios anteriores son el resultado de campañas de terreno realizadas en condiciones de caudales bajos durante los años 2019, 2021 y 2022, que contrasta con los altos caudales observados durante 2023 y 2024 resultantes de eventos hidrometeorológicos extremos.

3. Métodos y materiales

3.1 Estación de monitoreo permanente

A fines de Julio de 2024, y como parte del Proyecto FPA, se instaló una estación de monitoreo permanente, capaz de transmitir datos en forma remota a una plataforma web, para el acceso quasi-instantáneo de los datos (Figura 2). Desde el sitio web es posible revisar el estado de los instrumentos e identificar si ha existido algún error en la transmisión de datos. Asimismo, es posible visualizar los datos en gráficos como serie de tiempo (Figura 3), y realizar la descarga de los mismos. Las descargas son realizadas en paquetes que son definidos por los administradores de la estación (Fundación Cosmos y UTFSM), por ejemplo, los últimos 7 días, el último mes, o hasta 180 días. En este informe, la visualización y el análisis de los datos descargados se realiza mediante el software Matlab®.

La plataforma contempla la medición de nivel de agua, conductividad eléctrica y temperatura, en dos niveles de la columna de agua: superficie (50 cm de profundidad) y al fondo (20 cm desde el fondo). La medición en el fondo entrega el nivel de agua total en ese punto del estuario. Este nivel incluye las variaciones producto de la marea y las variaciones asociadas al flujo del río. Eventualmente, esta medición podrá incluir variaciones de nivel producto del viento, en casos de vientos fuertes con larga línea de acción. Mediante la medición de presión (nivel), conductividad eléctrica y temperatura, es posible estimar la salinidad del agua (en unidades de psu, partes por millón). Esto se logra aplicando una ecuación de estado, llamada Thermodynamic Equation of Seawater (TEOS-10) (e.j., Feistel, 2005). En términos generales, a medida que aumenta la temperatura la salinidad tiende a aumentar, debido a que a mayor temperatura la cantidad de sales que puede ser disuelta en el agua aumenta producto del mayor movimiento molecular. De igual manera, al aumentar la conductividad eléctrica aumenta la salinidad, como consecuencia de la mayor presencia de iones.



Figura 2. Estación de monitoreo permanente. Foto tomada el 19 de Octubre de 2024

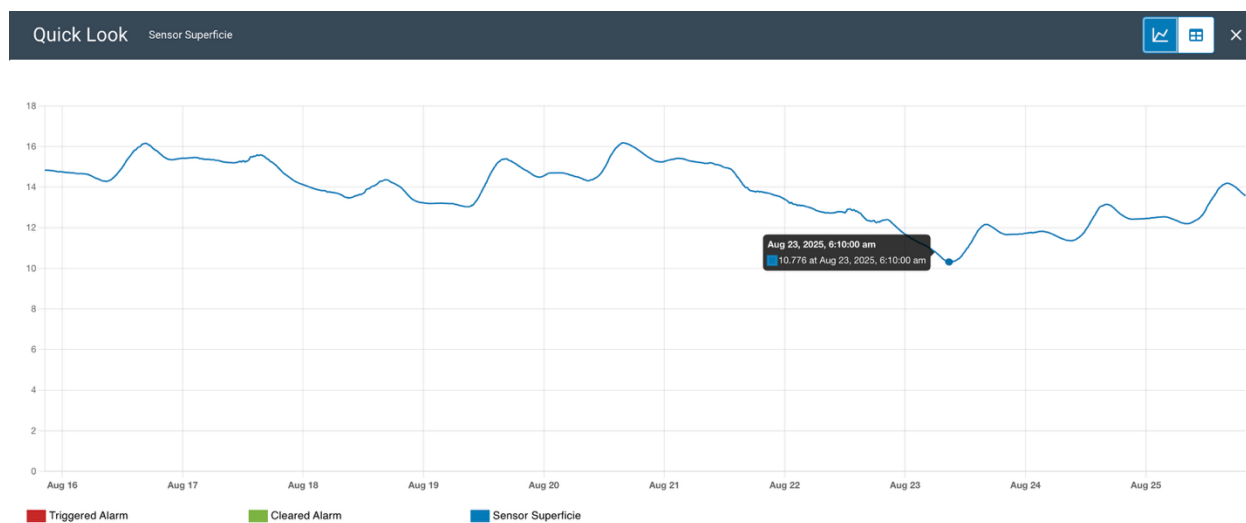


Figura 3. Ejemplo de visualización de datos en sitio web. Sensor de temperatura en superficie, para los días 16 agosto a 25 de agosto.

3.2 Monitoreo hidrográfico en bote y dron

Durante todas las campañas, el monitoreo de las condiciones de salinidad y temperatura del estuario se realiza a bordo de un bote pescador, navegando entre la barra de arena y el puente Lo Gallardo, tomando mediciones de perfiles verticales a lo largo del recorrido (Figura 4a). Para la toma de perfiles verticales a bordo del bote se utiliza un instrumento CastAway CTD ([sitio web](#)), que permite obtener mediciones de presión (desde donde se obtiene la profundidad), temperatura y conductividad eléctrica (Figura 4b). A partir de estas 3 variables, se obtiene la salinidad del agua mediante el uso de una expresión matemática (Ej., Feistel, 2005). El rango de medición del instrumento es de 0-100 dBar para la presión, 0-100000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para conductividad eléctrica y -5°C a 45°C para la temperatura. El instrumento incorpora un GPS para determinar la ubicación exacta de la medición, y toma mediciones a 5 Hz (cinco mediciones por segundo), lo que permite una alta precisión a medida que es operado y desciende en la columna de agua. Los análisis de datos y gráficos se realizan a través del software Matlab®.

Asimismo, en cada campaña, y para obtener una descripción general del sitio y las condiciones particulares de medición, se realizan vuelos de dron complementarios. Se dispone de dos drones: un dron Mavic Air 3 y un dron Mavic Mini 4 Pro. Los drones tienen una capacidad de vuelo de aproximadamente 25 minutos, dependiendo de las condiciones de viento. Se capturan imágenes y videos durante la recolección de datos in-situ, para posterior análisis y evaluación (Ej., Figura 4a).





Figura 4. Monitoreo hidrográfico en bote. (a) Imagen capturada con dron donde se observa el bote realizando mediciones en el estuario. (b) Imagen del CastAway CTD (tomada del sitio web del instrumento)

4. Resultados

4.1 Resumen de campañas de terreno

Durante el período de ejecución del proyecto se llevaron a cabo ocho campañas hidrográficas en el estuario del río Maipo, las cuales permitieron caracterizar la variabilidad espacio-temporal de las propiedades físicas del sistema. A continuación, se presenta un resumen de cada visita, con sus principales observaciones y resultados. Los detalles de cada visita se pueden encontrar en el informe de avance respectivo.

10 de julio de 2024: Las mediciones capturaron la parte final de la marea llenante y el comienzo de la marea vaciante. Las imágenes y videos de dron mostraron, en términos de la morfología de la desembocadura, la presencia de una barra de arena en desarrollo (Figura 5a), de bastante menores dimensiones que lo observado en períodos anteriores al 2023, producto de las crecidas observadas durante el año 2023. Se realizaron perfiles verticales de temperatura y salinidad en distintos puntos del estuario. De forma notable, no se apreció la presencia de agua salada en el estuario; todos los perfiles recolectados mostraron agua dulce (con salinidad entre 0-1 psu) en la totalidad de la columna de agua, independiente de la profundidad de la medición. La estación DGA de Cabimbao estuvo fuera de operación, por lo que no fue posible contar con estimación del caudal del río. Sin embargo, al no existir agua salada en el estuario se infirió que el caudal fue lo suficientemente alto para impedir el ingreso de la cuña salina.

26 de septiembre de 2024: Las mediciones capturaron condiciones de marea vaciante. En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra de arena extensa, de bastante mayores dimensiones que lo observado en la visita de julio 2024 (Figura 5b). Al igual que lo reportado en la visita de julio, no se apreció la presencia de agua salada en el estuario; todos los perfiles recolectados mostraron agua dulce (con salinidad entre 0-1 psu) en la totalidad de la columna de agua, independiente de la profundidad de la medición. La estación fluviométrica de Cabimbao (DGA) marcó aproximadamente 60 m³/s durante el muestreo, lo que correspondió a un caudal elevado acorde a los promedios de los últimos años.

19 de octubre de 2024: La campaña se planificó para medir condiciones de marea llenante en período de sicigia, a fin de maximizar el efecto mareal y determinar si había presencia de sal en el estuario. En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra litoral de



arena más extensa que en visitas de meses anteriores, que fue forzando una migración de la desembocadura del río, que descargó con una prominente inclinación hacia el norte (Figura 5c). No se apreció la presencia de agua salada en el estuario, incluso en las condiciones de marea llenante en sicigia de la campaña. Todos los perfiles recolectados mostraron agua dulce (con salinidad entre 0-1 psu) en la columna de agua completa. El caudal de la estación Cabimbao reportó 90 m³/s, suficientemente alto para impedir la entrada de agua de mar y la formación de una cuña salina.

21 de diciembre de 2024: Las mediciones capturaron condiciones de marea llenante. En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra de arena extensa, cuyo desarrollo forzó a la desembocadura a migrar hacia el norte, formando un canal de descarga casi paralelo a la costa (Figura 5d). No se apreció la presencia de agua salada en el estuario; todos los perfiles recolectados mostraron agua dulce (con salinidad entre 0-1 psu) en la totalidad de la columna de agua, independiente de la profundidad de la medición. La estación fluviométrica de Cabimbao (DGA) reportó aproximadamente 85 m³/s durante el muestreo.

01 de febrero de 2025: El monitoreo se realizó en marea llenante. En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra litoral de arena más extensa que en meses anteriores, que fue forzando considerablemente la migración de la desembocadura hacia el norte, formando una descarga casi paralela a la costa (Figura 5e). El caudal en la estación de Cabimbao fue de aproximadamente 55 m³/s, inferior a los caudales reportados en visitas anteriores. En algunos perfiles se apreció la presencia de agua salada en el estuario y una cuña salina (Figura 6a). Lo anterior ocurrió en los perfiles tomados más cerca de la desembocadura.

23 de marzo de 2025: Las mediciones capturaron condiciones de comienzo de marea llenante. El desarrollo de la barra forzó a la desembocadura a migrar hacia el norte, formando un canal que descargó paralelo a la costa, que se curvó al final para descargar con un pequeño ángulo (Figura 5f). La estación fluviométrica de Cabimbao (DGA) reportó aproximadamente 42 m³/s durante el muestreo. No se apreció la presencia de agua salada en el estuario; todos los perfiles recolectados mostraron agua dulce (con salinidad entre 0-1 psu) en la totalidad de la columna de agua, independiente de la profundidad de la medición (Figura 6b).

14 de mayo de 2025: El monitoreo se realizó en condiciones de marea vaciante. En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra litoral menos extensa que lo observado durante el mes de marzo de 2025, producto de las lluvias y aumentos de caudal registrados durante los días 7-10 de mayo (Figura g). Pareció que la desembocadura estaba volviendo a la ubicación original que tenía previo al cierre registrado en 2022, es decir, descargando en la zona



del enrocado de protección. Se aprecia algo de salinidad en profundidades elevadas, lo que podría corresponder a acumulaciones por batimetría o “salinity pockets” (Figura 6c). El caudal observado en la estación de Cabimbao durante la visita fue de aproximadamente $63 \text{ m}^3/\text{s}$.

26 de junio de 2025: El monitoreo se realizó en condiciones de marea alta (principios de la fase vaciante). En términos de la morfología de la desembocadura, se apreció una barra litoral extensa, que admitió algo de sobrepaso por oleaje en su parte norte (Figura 5h). Se observó que el río volvió a descargar en la zona del enrocado. No se observó la presencia de agua salada en el estuario, con todos los perfiles uniformes en la vertical en términos de salinidad con valores entre 0-1. El caudal observado en la estación de Cabimbao durante la visita fue de aproximadamente $70 \text{ m}^3/\text{s}$.

En términos generales, las campañas realizadas durante el período 2024–2025 mostraron que la desembocadura del río Maipo evolucionó progresivamente hacia la configuración morfológica previa al cierre registrado en 2022, limitada por el enrocado de protección hacia el norte (Figura 5h). La dinámica morfológica estuvo dominada por el desarrollo y migración de la barra de arena, que en varias ocasiones forzó la descarga a orientarse de manera casi paralela a la costa. Desde el punto de vista hidrográfico, en la mayoría de las visitas no se observó intrusión salina, registrándose perfiles uniformes de agua dulce en toda la columna, lo que se explica por los caudales relativamente altos que prevalecieron en gran parte del período. La única excepción correspondió a la campaña de febrero de 2025, en pleno verano, cuando los menores caudales permitieron la entrada parcial de la cuña salina en la zona cercana a la desembocadura. Estos resultados destacan que la ocurrencia de intrusión salina está fuertemente condicionada por la estacionalidad fluvial, y refuerzan la importancia de contar con la información continua de la estación de monitoreo permanente para complementar las observaciones de terreno y capturar la dinámica diaria y estacional del sistema.

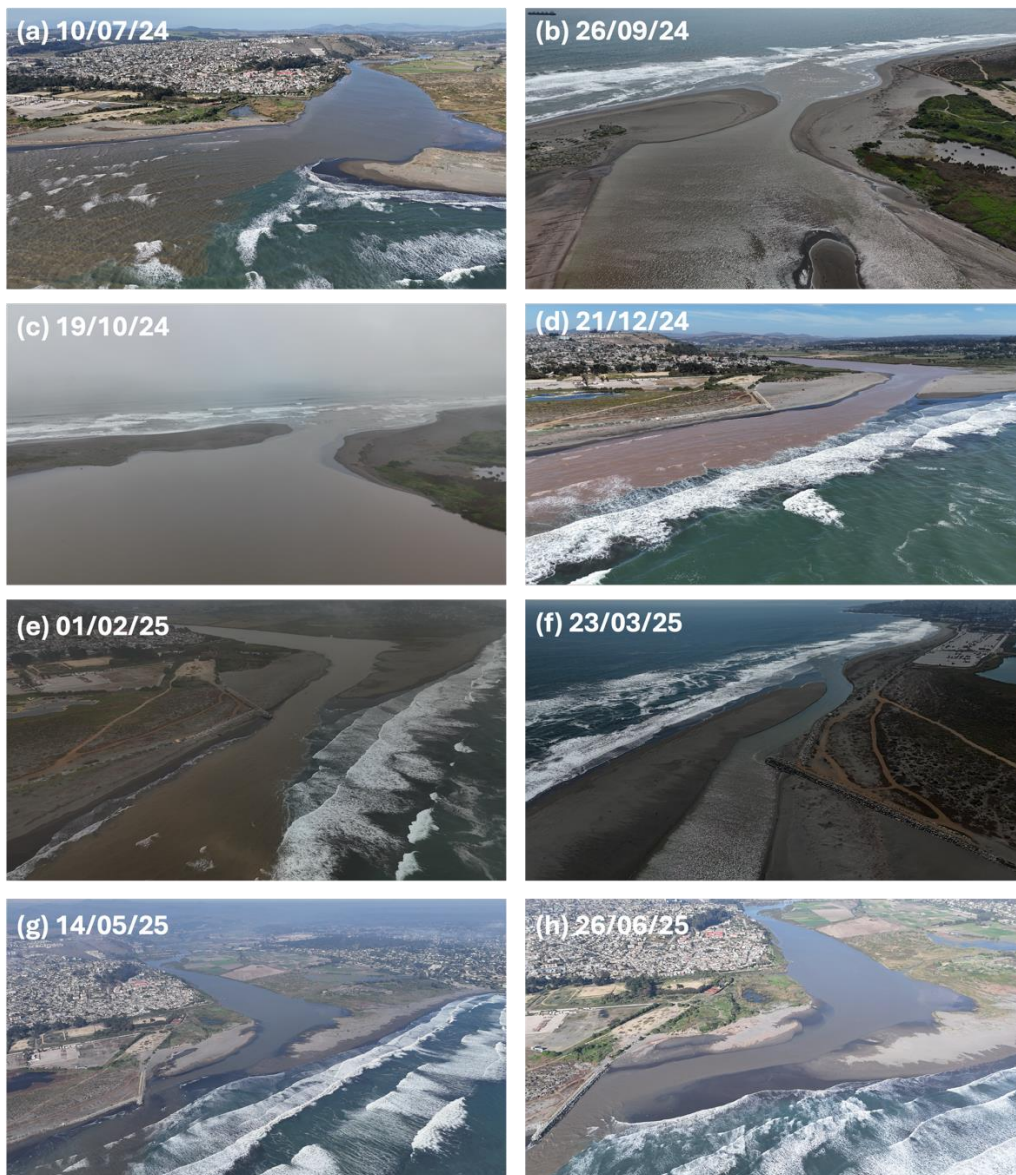


Figura 5. Configuración morfológica de la desembocadura para las distintas visitas realizadas durante 2024-2025.

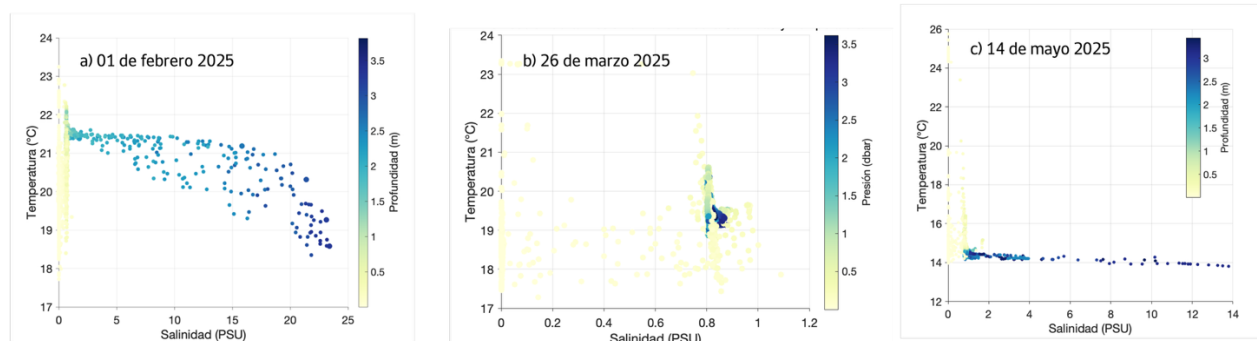


Figura 6. Salinidad versus temperatura para campañas en 2025

5. Datos estación HOBOLink

5.1 Serie de datos de nivel, temperatura y conductividad

La estación HOBOLink comenzó a registrar el día 12 de agosto de 2024. La estación está configurada para tomar mediciones cada 10 minutos, y enviar datos a la plataforma online cada 30 minutos. Las variables registradas y sus unidades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables registradas por la estación de monitoreo permanente

Variable	Unidad
Nivel	metros
Temperatura	° Celsius
Conductividad eléctrica	mS/m (micro Siemens por metro)

Las variables nivel, temperatura y conductividad se registran en dos puntos de la columna de agua: fondo y superficie. El sensor de profundidad se ubica a 20 cm del fondo, por lo que a la medición de nivel del instrumento se le debe agregar dicho offset, lo que se hace de forma automática gracias a una configuración previa. El sensor de superficie se encuentra instalado bajo la balsa flotante que sostiene el muelle, aproximadamente a 50cm de profundidad.

Los datos crudos provenientes de la plataforma desde su instalación hasta el día 25 de agosto de 2025 se muestran en la Figura 6. Es posible observar que, si bien la plataforma ha estado operativa



de forma continua, el sensor de profundidad ha sufrido problemas en tres oportunidades, la última de las cuales persiste hasta la fecha de elaboración de este informe. El sensor se encuentra bajo diagnóstico por parte de la empresa Unisource, y se espera que vuelva a ser instalado prontamente. El sensor de superficie ha transmitido datos de forma continua, sin errores hasta la fecha (Figura 6b).

La Figura 7a muestra la serie de caudal en la estación DGA de Río Maipo en Cabimbao, ubicada aproximadamente 20 km aguas arriba de la desembocadura. Es posible observar que el caudal se ha mantenido en niveles altos respecto de las condiciones observadas en años anteriores (ej., Roco et al., 2024), y no ha bajado de 40 m³/s desde que la estación de monitoreo fue instalada. Para referencia, en períodos de verano de los años 2019-2020, el caudal sólo alcanzaba los 5-10 m³/s (ej., Flores et al., 2022). Durante los últimos meses (mayo-junio-julio-agosto 2025), se observan peaks de caudal asociados con eventos de lluvia, de alrededor de 150 m³/s, y valores base entre 70-80 m³/s.

La Figura 7b muestra la serie de nivel de agua para los sensores de profundidad y superficie. El sensor de profundidad muestra la variabilidad mareal, asociada a los ciclos semi-diurnos, diurnos y de sicigia/cuadratura. En esta figura se han filtrado los datos, mostrando aquellos que se encuentran dentro del rango esperado de variabilidad (0-3 m). La serie de nivel correspondiente al sensor de superficie muestra un nivel aproximadamente constante, debido a su posición invariante en la columna de agua (fondo de la balsa). Se aprecia que el sensor de profundidad deja de registrar de manera aceptable en los últimos meses.

La Figura 9c muestra las series de temperatura para ambos sensores. Se observa que ambos sensores registran los mismos valores durante casi todo el período de datos disponibles, salvo en aquellos episodios donde se observan aumentos en la conductividad y la salinidad (Figura 7b,c,d). Durante estos períodos, se observan diferencias que pueden llegar a los 6°C, indicando estratificación por temperatura en la columna de agua, donde la temperatura en el fondo es menor, como es de esperar (debido al ingreso de agua de mar por el fondo). Por otro lado, se observa una tendencia al alza de las temperaturas desde el mes de agosto 2024 y hasta comienzos del mes de marzo 2025, para luego comenzar a disminuir gradualmente hasta los últimos valores registrados en julio 2025. Las máximas temperaturas se alcanzaron en enero 2025, siendo del orden de 24°C. Hacia fines de agosto 2025, fecha de elaboración de este informe, la temperatura del agua es del orden de los 15°C, con una tendencia al alza. Se observa, que desde mediados de junio el sensor de profundidad registra valores cercanos a 0 °C, valores que deben ser descartados.



Los datos de conductividad eléctrica muestran poca variabilidad entre agosto 2024 y enero 2025, manteniéndose en un valor relativamente constante de aproximadamente 1000 mS/m (Figura 6d), lo que corresponde a agua dulce. De igual forma que para la temperatura, durante ese período no existen grandes diferencias en los valores registrados por los sensores de fondo y superficie, sugiriendo la ausencia de estratificación por salinidad. A partir de los datos de conductividad, temperatura y profundidad, se obtiene la serie de salinidad (Figura 6e). La salinidad se mantiene constante durante el período agosto 2024 y enero 2025, en valores de aproximadamente 0.6 psu. Este valor corresponde a agua dulce, sin presencia de sal. Notamos que no se obtiene un valor igual a 0 psu debido a que el agua de río contiene cierto nivel de sales y a la sensibilidad de los sensores. Lo anterior es consistente con lo observado en las visitas a terreno y los perfiles verticales obtenidos. Entre enero 2025 y abril 2025 se observan períodos de aumento de la conductividad y salinidad (Figura 7d,e). Estos períodos coinciden con el período de menores caudales observados en la estación Cabimbao, lo que sugiere una relación directa entre estas variables. Los sensores muestran variabilidad en la conductividad y salinidad tanto en profundidad como en superficie, si bien las variaciones en superficie son menores. La salinidad en el fondo alcanza un máximo de 11 psu en febrero 2025. Se observa que durante marzo y abril 2025, existen eventos más prolongados de salinidad en los sensores, los que en general coinciden con los períodos de sicigia, donde existe una mayor amplitud del rango mareal (Figura 7d,e). Notamos que los valores de salinidad alcanzados no son muy elevados, considerando que el agua de mar tiene salinidad aproximada entre 33-35 psu. Lo anterior sugiere que la cuña salina apenas logró llegar a la ubicación de los sensores en el estuario (aproximadamente 2km desde la desembocadura, medidos a lo largo del cauce). Durante el mes de mayo 2025, se observa que las señales de salinidad y conductividad vuelven a sus valores base, observados con anterioridad al verano, correspondientes a agua dulce. Lo anterior correlaciona con el aumento de los caudales del río en época de otoño, y las crecidas registradas durante ese mes. Durante los meses de junio, julio y agosto, no se registra presencia de sal en el estuario, lo que es esperable debido a los altos valores de caudal registrados y es consistente con lo que se ha observado durante el último año.

En síntesis, los registros de la plataforma permiten establecer un ciclo anual claro de la temperatura del agua, con un aumento progresivo desde agosto 2024 hasta un máximo cercano a 24 °C en enero de 2025, seguido de un descenso gradual hasta valores del orden de 10 °C en julio de 2025, para volver a aumentar durante agosto 2025 y mantener una tendencia al alza. Estos patrones son consistentes con la estacionalidad climática y con las observaciones de las campañas de terreno. En cuanto a la salinidad, los datos confirman que durante gran parte del período monitoreado las condiciones correspondieron a agua dulce, con valores en torno a 0.6 psu, sin evidencias de estratificación significativa. Solo entre enero y abril de 2025, coincidiendo con caudales reducidos y mareas de sicigia, se detectaron eventos de intrusión salina en el fondo,



alcanzando un máximo de 11 psu, lo que indica que la cuña salina logró incursionar transitoriamente hasta la ubicación de los sensores. Posteriormente, con el aumento de los caudales en otoño e invierno, las señales de salinidad retornaron a condiciones de agua dulce, confirmando el rol dominante de la descarga fluvial en el control de la intrusión marina en el estuario del Maipo.

A fines de marzo de 2025 se instaló un sensor de turbidez AQUALOGGER TY en el muelle, el cual registra turbidez (0–10000 NTU) y temperatura. Los datos de temperatura coinciden con los del sensor superficial de la estación HOBO, mostrando un descenso gradual desde su instalación. En cambio, la señal de turbidez evidenció problemas por acumulación de sedimentos en el sensor, lo que generó lecturas artificialmente elevadas, corregidas tras limpiezas realizadas en mayo y junio. En los períodos posteriores a estas mantenciones se registraron variaciones coherentes con el ciclo mareal, alcanzando valores máximos de hasta 250 NTU, significativamente mayores a los observados en estudios previos, lo que confirma la alta turbidez del estuario en los últimos meses. Estos resultados subrayan la necesidad de limpiezas semanales del instrumento para obtener datos confiables.

5.2 Análisis de datos

El análisis de datos que se presenta corresponde al análisis utilizando la totalidad de los datos recolectados por la estación de monitoreo permanente, al día 25 de agosto de 2025. Es importante notar que el sensor de profundidad no está operativo.

5.2.1 Análisis de Fourier

El análisis de los datos recolectados por la estación de monitoreo permanente se centrará en la determinación de los períodos y frecuencias fundamentales de las series de tiempo. Lo anterior se realiza mediante el cálculo de los espectros de energía aplicando análisis de Fourier. El análisis de Fourier es una herramienta matemática que descompone una señal compleja en una suma de ondas sinusoidales simples de diferentes amplitudes y frecuencias. Los espectros de Fourier básicamente muestran cómo está distribuida la energía de la señal en las distintas frecuencias que la componen, permitiendo la identificación de las frecuencias más importantes y dominantes de la señal. El espectro de Fourier se obtiene mediante la aplicación de la Transformada Discreta de Fourier (ej., Thomson and Emery, 2014)



$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi fn/N}$$

donde $X(f)$ es la transformada de Fourier para la frecuencia f , $x(n)$ es el valor de la señal en el punto n , N es el tamaño de la muestra, y la exponencial corresponde a la representación compleja de una senoide. El espectro de potencia (o energía), se obtiene mediante $|X(f)|^2$, es decir, mediante la magnitud de la transformada de Fourier al cuadrado. Las frecuencias peak corresponde a aquellas que concentran la mayor parte de la energía de la señal. El análisis de Fourier se realiza mediante el software Matlab®

5.2.2 Análisis armónico de la señal de marea

De forma similar al análisis de Fourier, el análisis armónico de señales de marea descompone las variaciones del nivel del agua (en océano o aguas interiores) en una suma de ondas sinusoidales. Cada una de las ondas sinusoidales está asociada a un componente armónico que representa una influencia astronómica o geofísica. Este tipo de análisis permite identificar las principales componentes de la marea en cierto lugar (semi-diurna, diurna, etc.) y predecirlas con alto grado de precisión. La señal de nivel $h(t)$ debe registrarse por un período lo suficientemente largo para la identificación de periodicidades, generalmente períodos entre 1 mes y 1 año. Con 2 a 3 meses de datos ya se logra identificar las componentes más relevantes. La señal de nivel/marea se modela según (ej., Thomson and Emery, 2014)

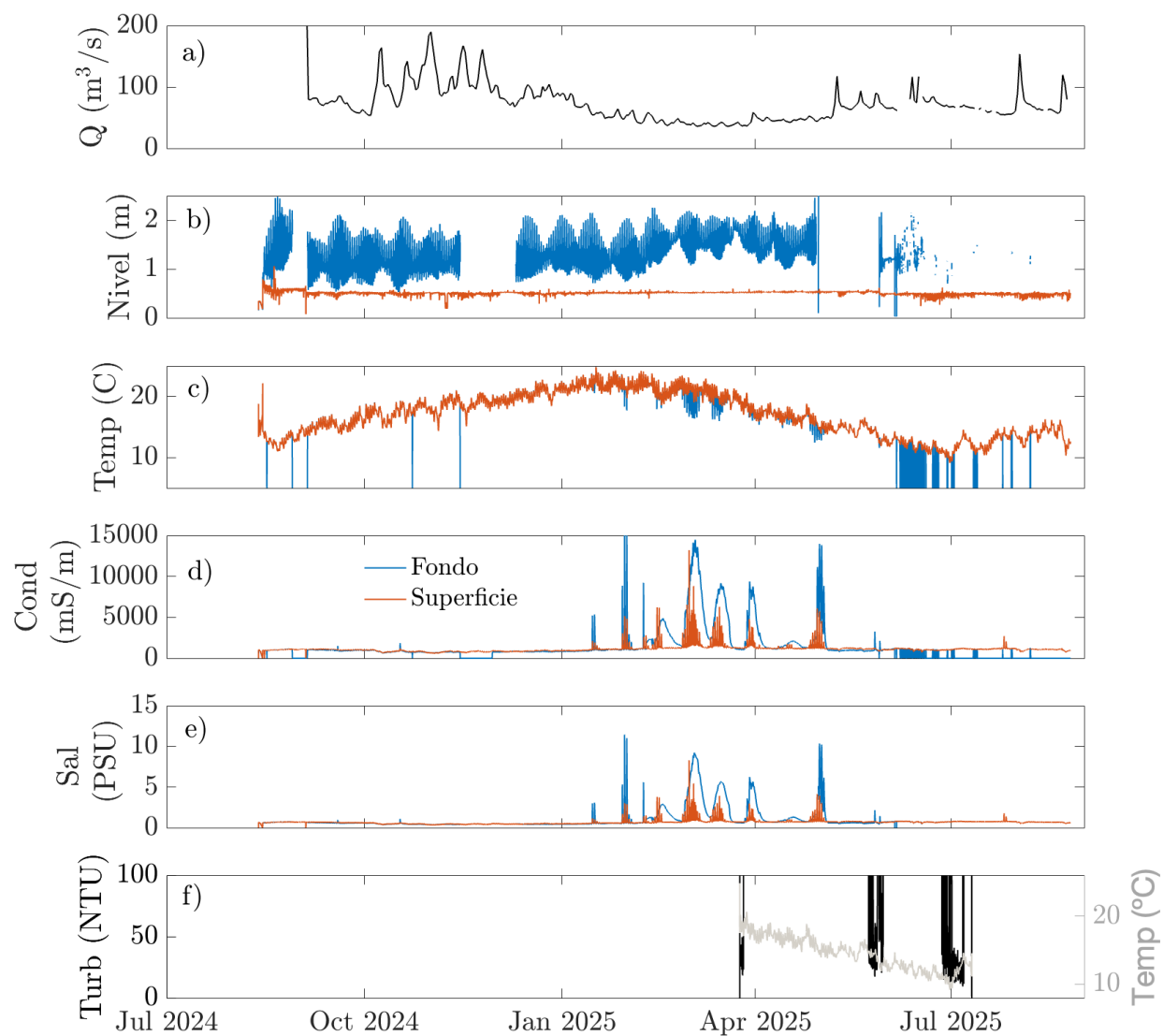


Figura 7. Datos caudal y de la estación HOBOLink. (a) Caudal (DGA, Cabimbao). (b) Nivel. (c) Temperatura. (d) Conductividad eléctrica. (e) Salinidad. (f) Turbidez (negro) y temperatura (rojo).

$$h(t) = A_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i)$$

donde A_0 corresponde a un nivel base, A_i es la amplitud del armónico i , f_i es la frecuencia del armónico i , que está relacionada con los ciclos astronómicos, y ϕ_i es la fase del componente armónico i . La determinación de las amplitudes y las fases se realiza mediante un ajuste de mínimos cuadrados, para cada frecuencia conocida f_i . Conocidos los parámetros es posible reconstruir la señal de marea y predecir los niveles futuros de acuerdo con los ciclos identificados. Los principales armónicos, también llamados constituyentes armónicos, representan las oscilaciones periódicas producto de las fuerzas gravitacionales de la luna, el sol, y las interacciones con la Tierra. La Tabla 2 muestra las principales componentes o constituyentes mareales.

Tabla 2. Principales constituyentes marea

Componente	Tipo	Período
M2	Semidiurna lunar	12.42 horas
S2	Semidiurna solar	12.00 horas
K1	Diurna lunar-solar	23.93 horas
O1	Diurna lunar	25.82 horas
Mf	Quincenal lunar	13.66 días

5.2.3 Nivel y marea

El análisis espectral (Fourier) de ambas señales indica periodicidades dominantes de aproximadamente 0.5 y 1 día (12 y 24 horas, respectivamente), conforme a la dominancia del forzamiento mareal del sistema (Figura 8). Esto refuerza la confianza respecto de los datos recolectados por la estación de monitoreo permanente dentro del estuario, los que han sido consistentes desde el inicio de la medición.

El análisis armónico a la serie de niveles de la marea de San Antonio y a la serie de nivel del estuario (sensor de profundidad), se realiza utilizando el código UTIDE (Codiga, 2011) implementado en Matlab®. Este análisis se utiliza para encontrar las componentes mareales

dominantes (semi-diurna, diurna, etc.), la amplitud y fase de cada una, y el porcentaje de la varianza de la serie explicada por cada constituyente. De este análisis, es posible determinar un número reducido de componentes mareales que expliquen gran parte de la variabilidad de la serie, y así facilitar procesos de reconstrucción mareal y pronósticos. Los resultados para la totalidad de los datos disponibles se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4, para la señal de marea y nivel del estuario, respectivamente. Se aprecia que hay variaciones en las amplitudes de las distintas componentes, pero que son las mismas componentes dominantes en océano abierto y el estuario. Se puede apreciar que sólo existen variaciones mínimas en los valores observados para las componentes armónicas respecto de los resultados observados hasta el informe anterior, al incorporar unas semanas adicionales de datos.

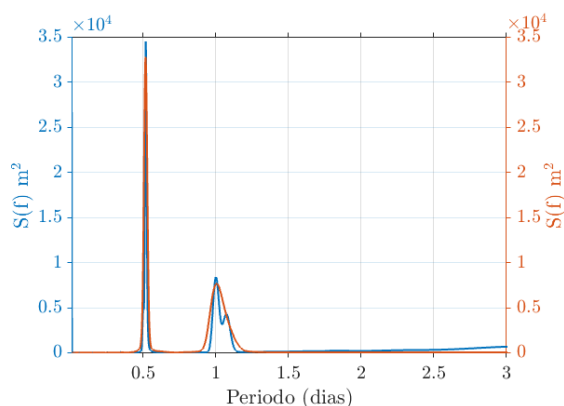


Figura 8. Espectros de energía señal de marea en San Antonio (azul) y nivel en el estuario (rojo).

Tabla 3. Resultados análisis armónico señal marea en San Antonio

Componente	Varianza explicada (%)	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	72.75	0.440	63.5
K1	9.23	0.156	43.6
S2	9.12	0.153	85
O1	4.20	0.103	357
N2	3.92	0.100	32.9

Tabla 4. Resultados análisis armónico señal de nivel sensor profundidad en estuario

Componente	Varianza explicada (%)	Amplitud (m)	Fase (º)
M2	64.06	0.326	73.5
K1	9.54	0.126	52.5
S2	8.08	0.116	95.3
O1	5.17	0.092	340
N2	5.10	0.090	6.9

5.2.4 Temperatura

La Figura 9 muestra que existe un peak dominante asociado a un período de 1 día, y un peak secundario asociado a 0.5 días, lo que sugiere una variabilidad asociada a cambios a escala semi-diaria y diaria de la temperatura de agua del río. Estos resultados son consistentes con los resultados presentados a través del proyecto, y es lo que se espera en cuanto a la física del sistema estuarino.

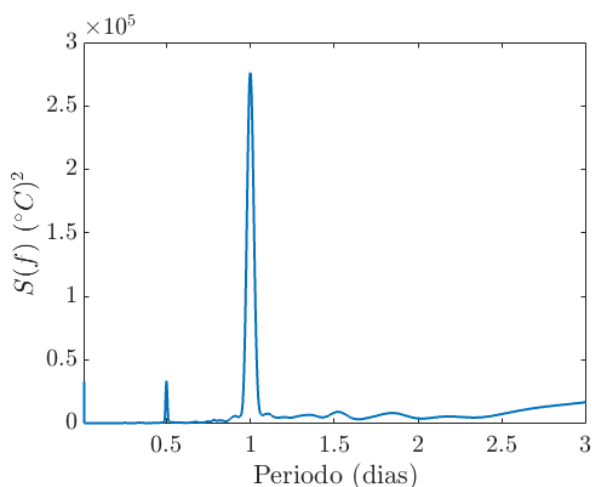


Figura 9. Espectro de energía señal de temperatura en estuario.

5.2.5 Conductividad y salinidad

Las señales de conductividad eléctrica y salinidad presentan mayor variabilidad durante los meses de verano, desde enero 2025 marzo 2025. Como fue mencionado anteriormente, esto tiene



relación directa con la baja de caudales observada en dicho período. Es importante notar que en ningún caso se registró agua completamente salada en el estuario, y que las salinidades máximas alcanzaron los 11-12 psu, sobre un máximo posible de 35 psu (agua de mar). Considerando la poca variabilidad de la señal, realizar análisis de Fourier carece de sentido.

6. Conclusiones y comentarios

El proyecto permitió implementar un sistema de monitoreo hidrográfico continuo en el estuario del río Maipo, complementado con campañas periódicas de terreno y observaciones con dron, que aportaron información importante sobre la dinámica física del sistema. Las mediciones realizadas durante el año de proyecto mostraron que la desembocadura evolucionó gradualmente hacia su ubicación previa al cierre de 2022, condicionada por el enrocado una descarga estrecha. La variabilidad temporal observada fue elevada, en donde la barra de arena respondió de manera dinámica a las variaciones de caudal y las crecidas observadas durante el período. Esta variabilidad sugiere la necesidad de realizar monitoreo continuo a fin de establecer la influencia sobre la dinámica de corrientes y salinidad en el sistema.

En términos hidrográficos, la mayor parte del período reportado estuvo dominada por condiciones de agua dulce en toda la columna y en distintas ubicaciones en el estuario, lo que se explica por los altos caudales registrados en la estación Cabimbao, que rara vez descendieron de 40 m³/s. La excepción más notable ocurrió en febrero de 2025, cuando caudales más bajos (del orden de 55 m³/s) permitieron una intrusión salina moderada, con máximos de 11 psu en el fondo. Este episodio resulta ilustrativo del fuerte control que ejerce la descarga fluvial sobre la dinámica de la cuña salina: cuando los caudales superan un umbral cercano a los 60–70 m³/s, la fuerza del río impide el ingreso de agua de mar, incluso en condiciones de marea alta y sicigia. En cambio, cuando el caudal desciende bajo dicho rango, se observó la presencia de sal en el estuario, pero con salinidades aún bajas en comparación con el agua de mar (33–35 psu). Esta relación caudal–salinidad se observa también en la temporalidad de los datos: entre enero y abril de 2025, coincidiendo con descargas mínimas estacionales, se registraron aumentos de conductividad y salinidad, mientras que en los meses de otoño e invierno, con caudales altos y crecidas por lluvias, los valores retornaron a condiciones de agua dulce. Dicho patrón es consistente con lo documentado en campañas de terreno y evidencia la vulnerabilidad del estuario frente a reducciones de caudal por efectos climáticos o antrópicos.

La estación HOBOLink permitió además registrar un ciclo anual claro de la temperatura, con máximos cercanos a 24 °C en enero de 2025 y mínimos en torno a 10 °C en julio de 2025, en



concordancia con la estacionalidad climática. A fines de marzo de 2025 se incorporó un sensor AQUALOGGER TY, que aportó registros de turbidez y confirmó una alta concentración de sedimentos en suspensión; no obstante, la acumulación de material en el sensor generó la necesidad de limpiezas frecuentes para obtener datos confiables.

En conjunto, los resultados evidencian la importancia de mantener un monitoreo continuo y multiparamétrico en el estuario, dado que este permite detectar de manera oportuna cambios asociados a caudales extremos, intrusión salina, eventos de turbidez y la evolución morfológica de la desembocadura. La información obtenida a través de este proyecto constituye una base sólida de información para la gestión del Santuario de la Naturaleza Humedal Río Maipo y para orientar medidas de manejo frente a los impactos de la variabilidad climática y de las intervenciones humanas en la cuenca. La continuidad de las mediciones es fundamental, y se deben tomar las acciones para garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

7. Referencias

- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., & Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 116, 16-32.
- Cai, X., Ringler, C., & Rosegrant, M. W. (2006). *Modeling water resources management at the basin level: methodology and application to the Maipo River Basin* (Vol. 149). Intl Food Policy Res Inst.
- Cameron, W., and Pritchard, D. (1963). "Estuaries," In: M. N. Hill, Ed., *The Sea*, Vol II, John Wiley and Sons, New York.
- Cienfuegos, R., Campino, J. R., Gironás, J., Almar, R., & Villagrán, M. (2017). River Mouths and Coastal Lagoons in Central Chile. *The Ecology and Natural History of Chilean Saltmarshes*, 15-46.
- Feistel, R. (2005). Numerical implementation and oceanographic application of the Gibbs thermodynamic potential of seawater. *Ocean Science*, 1(1), 9-16.



Flores, R. P., Williams, M. E., & Horner-Devine, A. R. (2022). River plume modulation by infragravity wave forcing. *Geophysical Research Letters*, 49(15), e2021GL097467.

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.

Jusari, N. (2023). Estimación del flujo de sedimentos en suspensión en el estuario del Río Maipo mediante métodos acústicos y ópticos. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil. Universidad Técnica Federico Santa María.

Peña-Guerrero, M. D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., & Meza, F. (2020). Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65(6), 1005-1021.

Roco, A., Flores, R. P., Williams, M. E., & Saldías, G. S. (2024). Observations of river-wave interactions at a small-scale river mouth. *Coastal Engineering*, 189, 104456.

Rosegrant, M. W., & Ringler, C. (2000). Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. *Water Policy*, 1(6), 567-586.

Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. Newnes.

Valle-Levinson, A. (2010). Definition and classification of estuaries. *Contemporary issues in estuarine physics*, 1-11.