

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**POTENCIAL DE ENERGÍA MARINA EN EL CANAL FITZ ROY**

**MARTINA MONASTERIO <sup>1</sup>**  
**MEGAN WILLIAMS <sup>2</sup>**  
**KARINA SOTO <sup>3</sup>**  
**OSVALDO ARTAL <sup>4</sup>**  
**LEANDRO SUAREZ <sup>5</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA <sup>6</sup>**

**RESUMEN**

La exploración de recursos energéticos marinos ha estado en constante avance, y en este contexto, el Canal Fitz Roy en la Patagonia Chilena emerge como candidato significativo, al conectarse con dos grandes senos y exhibir corrientes mareales favorables para la conversión de energía. Este estudio presenta una evaluación cuantitativa del potencial energético en el Canal Fitz Roy, empleando datos de velocidad obtenidos mediante el modelo hidrodinámico tridimensional FVCOM. Además, se identifica la entrada de la marea desde Seno Otway al Seno Skyring, con cambios en la amplitud debido a la configuración del Canal. Los resultados indican una presencia de corrientes medias de  $1.7(m/s)$ , con una densidad de potencia media estimada en torno a  $8 kW/m^2$  en la zona del Canal.

---

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - martina.monasterio@sansano.usm.cl

<sup>2</sup>Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - megan.williams@uc.cl

<sup>3</sup>Investigadora Postdoctoral, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - karina.soto@usm.cl

<sup>4</sup>Investigador, Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) - osvaldo.artal@ifop.cl

<sup>5</sup>Coordinador I+D, Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC) - leandro.suarez@meric.cl

<sup>6</sup>Profesor Asociado, Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - cescauri@ing.puc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, Chile se encuentra en una etapa de transición hacia una matriz energética más sustentable y limpia. Con la meta de producir el 70 % de la electricidad a partir de fuentes renovables para el año 2050 (Ministerio de Energía de Chile, 2021) se hace necesario buscar nuevas fuentes de energía renovable. En este contexto, la energía mareomotriz se presenta como una opción atractiva para Chile, especialmente considerando que la costa chilena ha sido reconocida como una de las más energéticas de América del sur (Cruz et al., 2009).

En respuesta a esta necesidad, se han llevado a cabo diversos estudios y evaluaciones sobre el potencial de energía mareomotriz en canales mareales, destacando entre ellos el caso del Canal Chacao en el sur de Chile. En el estudio de la Dra. Maricarmen Guerra (Guerra et al., 2017), se caracteriza el recurso mareomotriz en la zona, permitiendo demostrar el gran potencial de la energía mareomotriz como una valiosa fuente de energía renovable en Chile. La presencia de islas y canales en regiones con grandes amplitudes de marea suele dar lugar a velocidades elevadas y a un potencial de energía mareomotriz importante (Guerra et al., 2017; Artal et al., 2019; Polagye et al., 2009; Dominicis et al., 2018).

Una de las zonas que ha sido y será clave para el desarrollo de futuras instalaciones es la Región de Magallanes y la Antártica Chilena de Los Recursos Energéticos de la Universidad de Magallanes (2015), donde se encuentra el Canal Fitz Roy (S52 ; W71). Debido a su angosta geometría y unión entre dos grandes senos de agua (Seno Otway y Seno Skyring, Figura 1), este canal ha despertado interés como un sitio estratégico para la generación de energía a partir del recurso mareomotriz según el de Los Recursos Energéticos de la Universidad de Magallanes (2015). Sin embargo, a pesar de algunos estudios previos, el conocimiento sobre la dinámica del canal y su potencial energético es limitado. Por lo tanto, se hace necesario llevar a cabo un estudio que permita una evaluación y caracterización más detallada del recurso en el Canal Fitz Roy, con el objetivo de identificar zonas estratégicas para la extracción de energía mareomotriz. Para lograr esto, se utilizará el modelo de circulación oceánica FVCOM (*Finite Volume Community Ocean Model*) (Chen et al., 2003), que considera los gradientes de presión debido a la marea en la generación de velocidades mareales.

Si bien, existen diferentes enfoques numéricos para evaluar la magnitud del recurso mareomotriz, que van desde modelos analíticos simplificados hasta modelos tridimensionales de mayor complejidad que ofrecen una estimación más precisa de la energía disponible, en este contexto se empleará la modelación tridimensional para llevar a cabo una evaluación precisa del potencial de energía marina en el Canal Fitz Roy.

Este enfoque proporcionará una base para futuras instalaciones de energía marina en el Canal Fitz Roy, contribuyendo al desarrollo sostenible de fuentes de energía renovable en la región y el país.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. OBSERVACIONES

La zona focal de investigación se corresponde con el Canal Fitz Roy, donde por el sur está unido a Seno Otway y por el norte está unido a Seno Skyring. Aquí, se dispone de mediciones in situ obtenidas a través de dos campañas de campo, uno de un estudio del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en 2021 Pinilla et al. (2022) y la segunda una campaña de oportunidad realizada por los autores de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) en enero y febrero de 2023. Estas expediciones comprendieron la recopilación de datos atmosféricos y mediciones del nivel de la superficie del canal mediante la utilización de mareógrafos. Estas mediciones contribuyen a un análisis preliminar y a una mejor comprensión del comportamiento en el Canal Fitz Roy, desempeñando un papel fundamental en la validación del modelo numérico empleado. Es importante destacar que en el futuro será necesario llevar a cabo mediciones de corrientes para validar los resultados de velocidades obtenidos a través de dicho modelo.

La ubicación de las mediciones realizadas se muestra en la figura 1

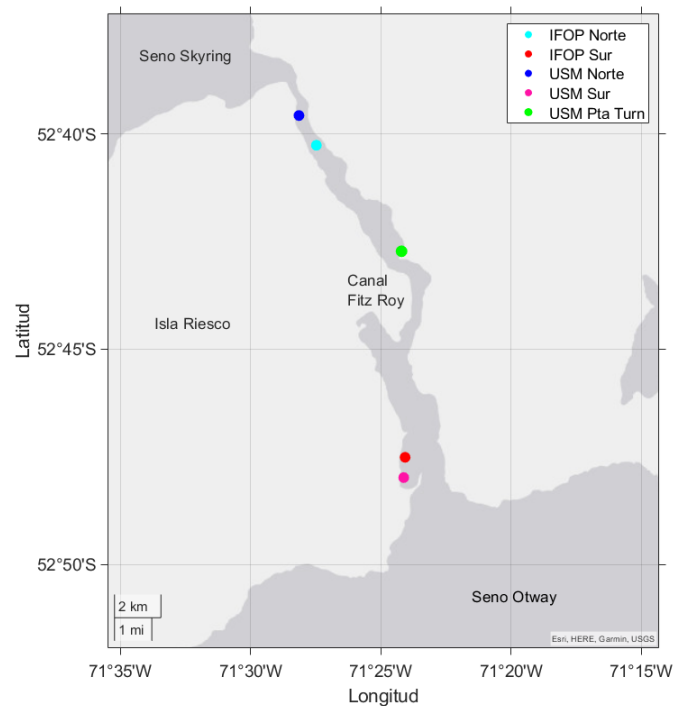


Figura 1: Ubicación mediciones in situ Canal Fitz Roy. Los puntos IFOP corresponden a mediciones de febrero hasta noviembre de 2021 y los puntos USM corresponden a mediciones en febrero 2023.

### 2.1.1. Campaña de Terreno IFOP - 2019

En el año 2021, el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) lleva a cabo una extensa campaña de campo en el Canal Fitz Roy y sus áreas adyacentes. Esta campaña abarca mediciones continuas desde febrero hasta noviembre, durante las cuales se recopila una variada gama de datos. Estos incluyen mediciones del nivel de superficie del canal, presión atmosférica, dirección e intensidad del viento, así como perfiles de conductividad, temperatura y profundidad a lo largo del canal (Pinilla et al., 2022). De estos datos solo fueron considerados mediciones del nivel de superficie del canal.

### 2.1.2. Campaña de Terreno USM - 2023

En el año 2023, se lleva a cabo una campaña de terreno en el canal Fitz Roy, con mediciones in situ de la presión de la columna de agua en varios sectores del canal. Estas mediciones se realizaron de manera esporádica durante el mes de febrero del 2023.

## 2.2. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos son sometidos a un proceso de filtrado para identificar valores atípicos (*outliers*) y se aplica una corrección para la presión atmosférica. Posteriormente, los datos de presión del agua recopilados por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en las dos estaciones en el canal son sometidos a un análisis armónico usando T\_Tide (Pawlowicz et al., 2002). Este análisis tiene como objetivo la predicción de las fases y amplitudes de las componentes armónicas predominantes de la marea para separar efectos de la marea de otros efectos atmosféricos o oceanográficos de la región (ver Figura 3).

## 2.3. MODELO NUMÉRICO

Para poder estimar el recurso de energía potencial en el Canal Fitz Roy, se utiliza FVCOM (Chen et al., 2003), que utiliza una malla no estructurada, siendo un modelo tridimensional hidrodinámico de volúmenes finitos que resuelve las ecuaciones primitivas de circulación oceánica para masa y la cantidad de movimiento en dirección  $x$ ,  $y$  y  $z$ , que corresponden a este-oeste, norte-sur y dirección vertical respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_0}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q_0}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (4)$$

donde  $u$ ,  $v$ , y  $w$  son las velocidades en las direcciones este, norte y vertical.  $F_u$  y  $F_v$  representan los términos difusivos para el momentum horizontal.  $K_m$  es el coeficiente de viscosidad vertical de remolino; finalmente  $P$  y  $q_0$  son los componentes hidrostáticos y no-hidrostáticos de la presión.

## 2.4. Dominio, condiciones iniciales y de borde

El dominio de la malla abarca una extensa área de estudio que supera significativamente los límites del Canal Fitz Roy, tal como se ilustra en la figura 2. Esta malla abarca la totalidad de la región meridional de la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, extendiéndose desde el océano Atlántico hasta el Pacífico y se ha demostrado la habilidad de cuantificar energía marina en el Estrecho de Magallanes (Suarez et al., 2021). Además, es importante destacar que la resolución espacial de la malla en el canal Fitz Roy es de aproximadamente 200 m.

Las condiciones de borde son aplicadas a los nodos adyacentes a ambos océanos (Figura 2). Estas condiciones de borde incluyen la altura de marea, extraídas del modelo global de mareas TPX09-atlas, un modelo global de resolución de  $1/30^\circ$  (Egbert and Erofeeva, 2002). Por el lado Atlántico la altura de marea alcanza un amplitud de 8 m y por el lado Pacífico aproximadamente 1 m. Las condiciones iniciales están definidas con una altura inicial de 0, siendo este un nivel de reposo en todo el dominio. El modelo se corre para un periodo de 45 días entre el mes de abril y mayo del 2021 de tal manera de hacerlo coincidir con las mediciones de IFOP.

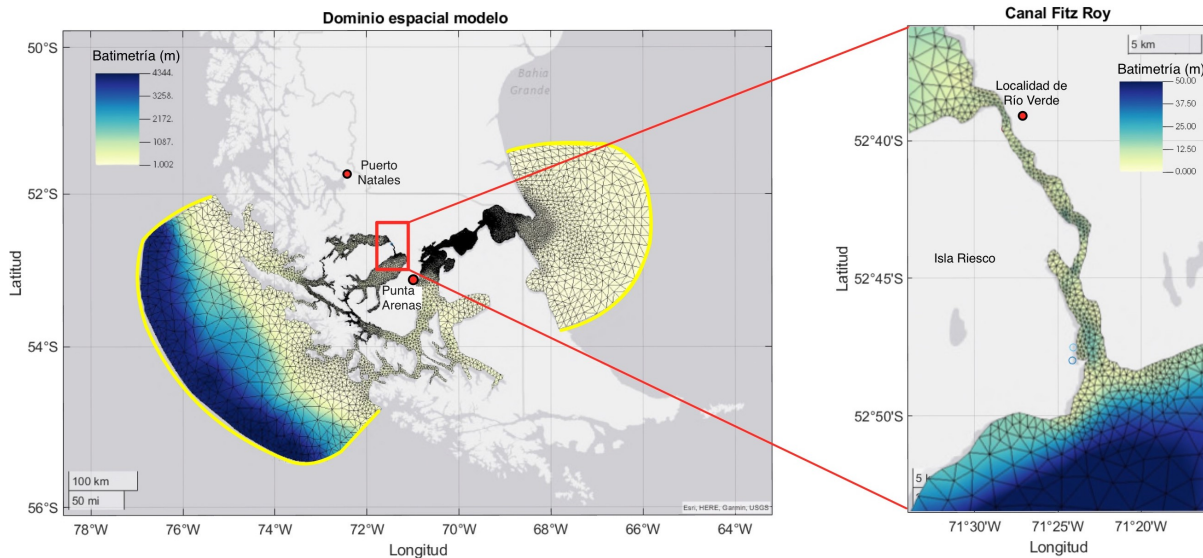


Figura 2: Malla del modelo numérico de FVCOM. Las condiciones de borde son la altura de marea del modelo TPX09-atlas en los límites en el Pacífico y Atlántico.

## **2.5. Validación del modelo**

La validación del modelo se concentra exclusivamente en el ámbito geográfico del Canal Fitz Roy, ya que será contrastado con las mediciones in situ obtenidas durante la campaña efectuada por IFOP en 2021. Este proceso de validación será efectuado utilizando los datos de mareas correspondientes al mes de abril y mayo. Es importante destacar que se considera aceptable un margen de error RMS de hasta el 10 %.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Marea en el Canal Fitz Roy**

Con base en los datos recopilados de las dos campañas de terreno, es factible proporcionar tanto una descripción cualitativa como cuantitativa de las mareas en el Canal Fitz Roy, considerando su lado norte y sur. Con las mediciones de IFOP se observa que la amplitud de marea en el Seno Otway es 2 veces mayor que la amplitud en el Seno Skyring y corresponde a un rango de marea mayor en el sur del canal que en el norte (Figura 3). Por otro lado con las mediciones de la USM, se ha determinado que la onda mareal ingresa por la zona del Seno Otway, y hay un desfase de aproximadamente 48 minutos entre marea alta en el sur y en el norte, observando una reducción en la amplitud de la onda mareal en esta última ubicación, un efecto atribuible a las restricciones impuestas por la configuración geométrica del Canal (Figura 4).

En relación a los datos obtenidos por el IFOP en 2021, se ha aplicado un análisis armónico con el objetivo de reconstruir la marea mediante sus componentes principales y usar solamente la marea para la cuantificación de potencial mareomotriz. Los resultados para el periodo de estudio se exhiben en la Figura 3. El nivel de agua muestra variabilidad diurna y semidiurna. El residuo de la marea (la resta entre el nivel de agua y los componentes mareales) muestra que en el norte del canal, existe una variación de altura debido a procesos atmosféricos y oceanográficos que puede causar la misma variabilidad en la marea. En contraste, en el sur la componente de baja frecuencia es pequeña en comparación a la marea. En total se aprecia una disminución del 50 % en la amplitud de la marea en la zona norte del Canal Fitz Roy en comparación con la región sur. Es relevante señalar que se observa una correlación significativa en los residuales entre ambas zonas, fenómeno que posiblemente pueda estar influenciado por factores atmosféricos y se investigará en futuros trabajos.

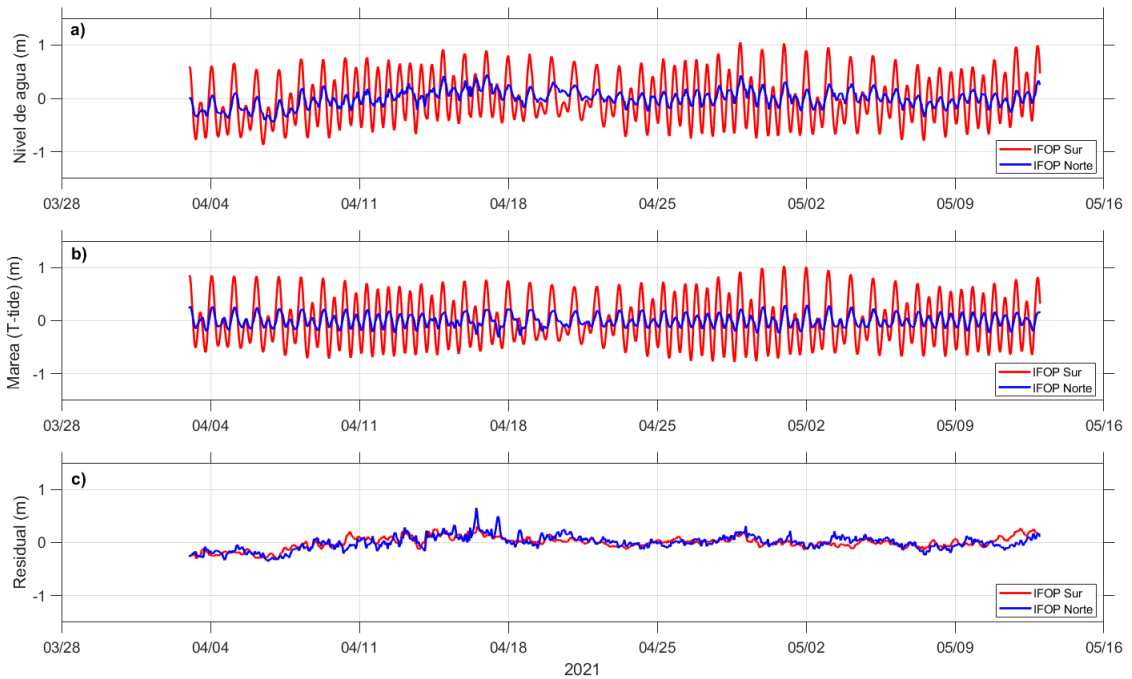


Figura 3: Análisis armónico de la altura de agua para Canal Fitz Roy. (a) Nivel de agua, (b) marea, (c) el residuo entre las mediciones y las alturas del análisis armónico.

Por otro lado, con las mediciones de la campaña del 2023, se puede evidenciar nuevamente la reducción en la amplitud de la onda mareal, a medida que esta se desplaza a lo largo del Canal, como se muestra en la figura 4.

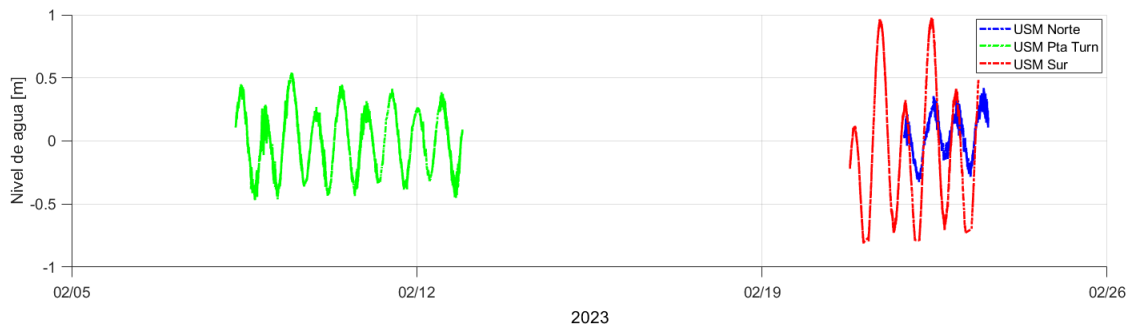


Figura 4: Mediciones de altura de agua en el Canal Fitz Roy en el año 2023

### 3.2. Velocidades y marea por el modelo FVCOM

A partir de las simulaciones se obtiene el nivel de agua en la superficie, las cuales serán validadas con las mediciones in situ en el norte y sur del canal, y además se determina la velocidad efectiva en

dirección del eje de máxima varianza, promediada en la vertical para poder estimar el recurso mareomotriz. Como se muestra en la figura 5 y 6. El periodo de estudio abarca 45 días, comprendidos entre los meses de abril y mayo.

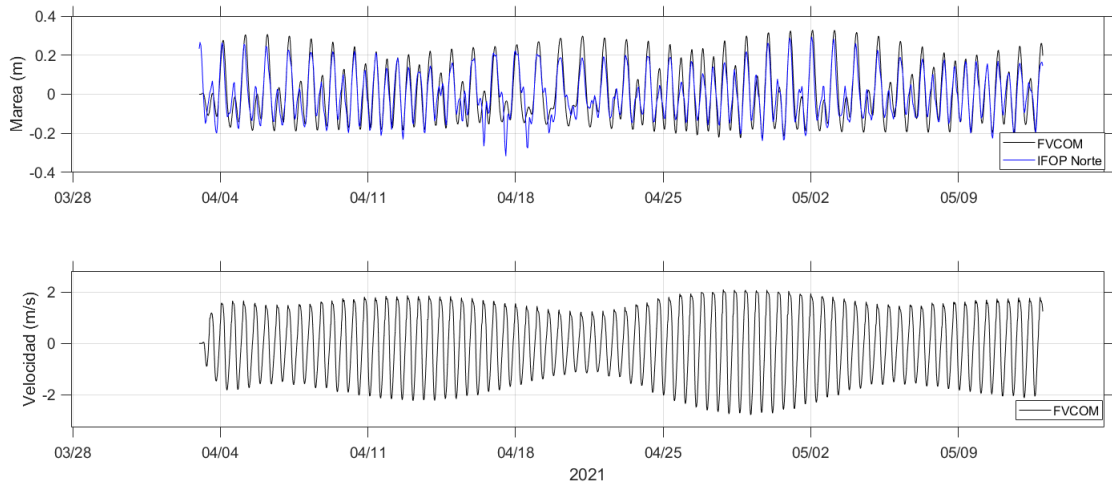


Figura 5: (a) Comparación de altura de marea de las mediciones y del modelo, y (b) la velocidad U calculado con el modelo para el punto FR Norte.

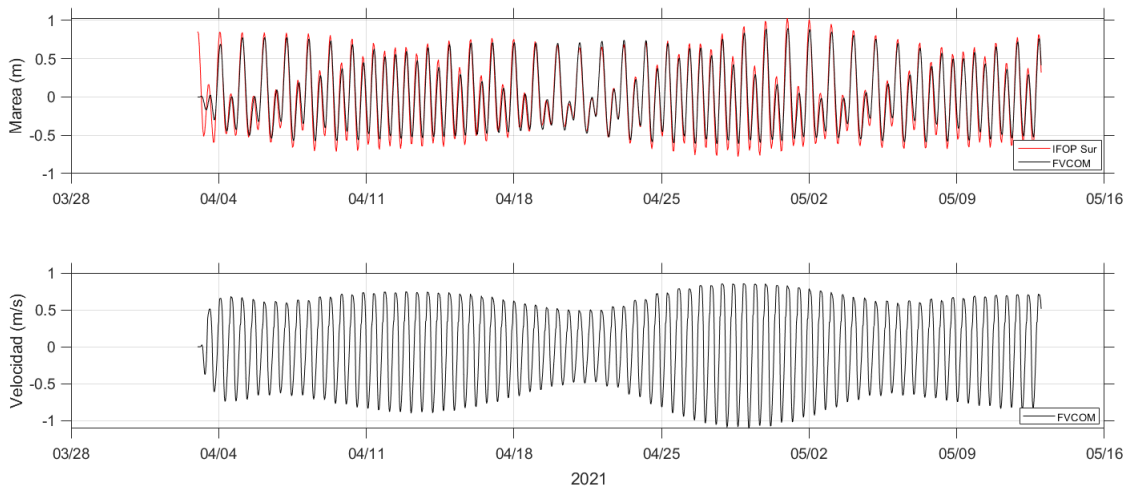


Figura 6: (a) Comparación de altura de marea de las mediciones y del modelo, y (b) la velocidad U calculado con el modelo para el punto FR Sur.

Podemos notar que el comportamiento es similar a los datos en cuanto al rango mareal y a la fase para FR Sur, en cambio para FR Norte el modelo tiende a subestimar el rango mareal, pero la variación temporal es coherente con los datos. A pesar de estas diferencias, se tiene un buen comportamiento del modelo en cuanto a la dinámica de la marea en Canal Fitz Roy.

Con el modelo, se calcula los componentes de marea dominantes en el canal, y se muestran en la

figura 7. Cada armónico tiene una reducción de magnitud entre el sur y el norte. La reducción de amplitud de M2 (periodo 12.42 h) y K1 (periodo 23.93 h) es aproximadamente 0.3 m desde el sur hacia el norte del canal.

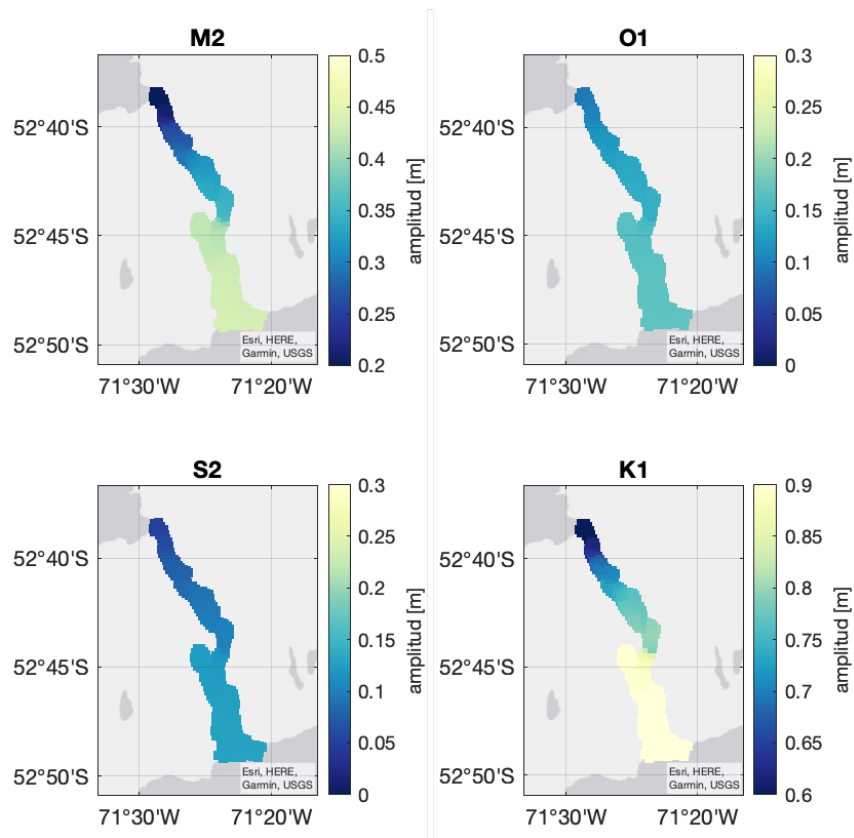


Figura 7: Amplitud mareal de los componentes principales en el Canal Fitz Roy obtenidas de las simulaciones de FVCOM

### 3.3. Potencial de energía mareomotriz

Basándonos en los resultados de las velocidades mareales calculadas por el modelo numérico, se procede a calcular la densidad de potencia (ecuación 5) en cinco ubicaciones de interés distribuidas a lo largo del canal. El análisis en estas ubicaciones tiene como objetivo evaluar la variabilidad espacial a lo largo de la serie temporal. Las ubicaciones seleccionadas se presentan en la figura 8. Vale destacar que la elección estratégica de estos puntos se realizó en consideración de su profundidad y su proximidad a las zonas de constricción del canal y para entender los efectos del cambio de la altura de marea en el potencial.

La densidad de potencia es estimada según:

$$P = \frac{1}{2}\rho U^3 \quad (5)$$

donde  $\rho$  corresponde a la densidad del agua, considerada uniforme en tiempo y espacio con un valor de  $1.015 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  y  $U$  es la velocidad efectiva en dirección del eje de máxima varianza.(e.g., Guerra et al., 2017; Artal et al., 2019).

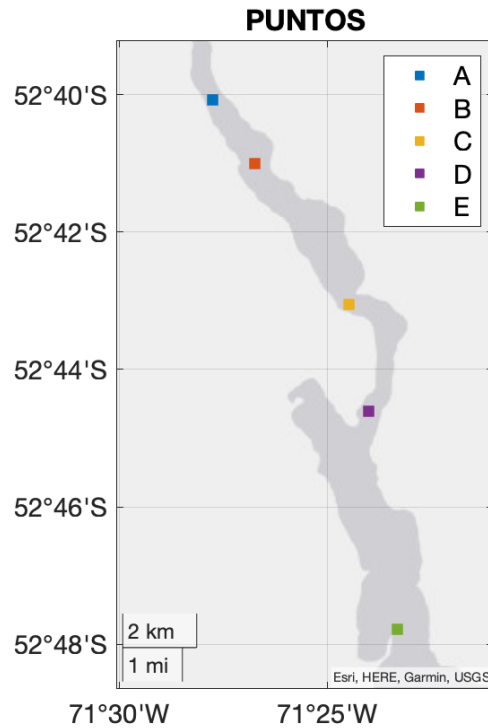


Figura 8: Cinco puntos a lo largo de canal.

Considerando velocidades promediadas en dirección vertical se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los puntos, como se muestra en la Figura 9.

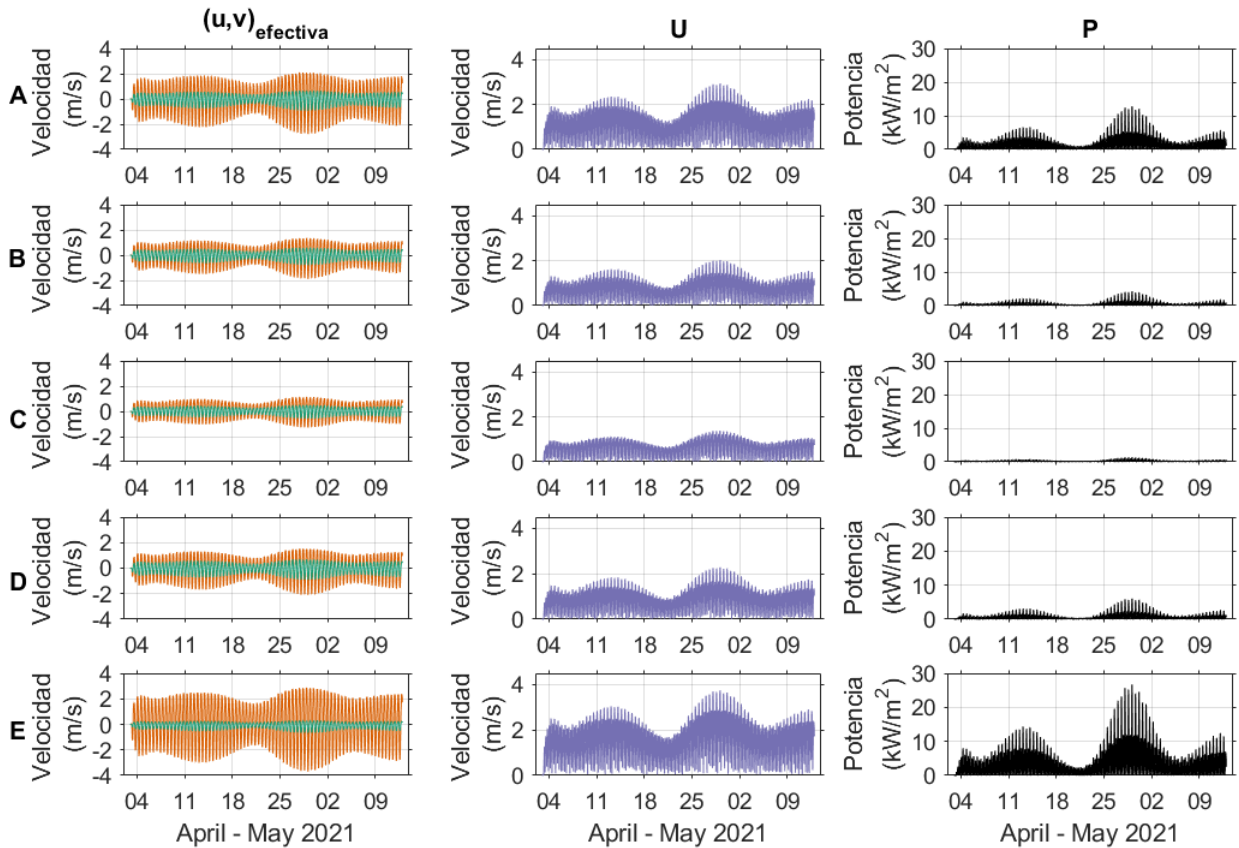


Figura 9: Velocidades y densidad de potencia promediada en la dirección vertical para 5 puntos en el canal (Figura 9). La primera columna tiene velocidad en sentido de la corriente  $v$ (naranja) y en sentido perpendicular  $u$ (verde), la segunda columna tiene la magnitud de velocidad y la tercera columna es la densidad de potencia.

#### 4. DISCUSIÓN

Si bien podemos notar que los valores máximos de densidad de potencia se dan en los extremos del Canal Fitz Roy, punto A y punto E respectivamente, con un valor máximo de  $25\text{kW}/\text{m}^2$  para el punto E, cuando el flujo es hacia el sur. Hay una marcada reducción en la zona central, en particular en el punto C, debiéndose principalmente a su menor profundidad y constricción del canal. Por otro lado podemos notar que debido a la geometría del canal la amplitud de las constituyentes también se ven modificadas, especialmente la componente K1 y la componente M2, siendo éstas las de mayor amplitud.

## 5. CONCLUSIONES

Esta investigación representa un análisis preliminar en la evaluación del potencial de energía mareomotriz en el Canal Fitz Roy, mediante una combinación integral de datos de campo y simulaciones numéricas. La evaluación cuantitativa y cualitativa de las mareas, ha proporcionado una comprensión sólida de los patrones de flujo en el canal. La zona Norte exhiben corrientes persistentes y velocidades elevadas, con una densidad de potencia significativa, considerando que la profundidad máxima en esa zona es de  $40(m)$ , resaltando como sitio atractivo para la captación de energía mareomotriz. Por otro lado, la zona sur representa velocidades comparables, aunque ofrece de igual manera un gran potencial del recurso.

Las perspectivas futuras se van a centrar en la validación de las velocidades del modelo numérico, con énfasis en incluir factores atmosféricos. Cabe mencionar que estos hallazgos no solo contribuyen en el conocimiento del recurso energético, sino para establecer las bases para futuros proyectos de energía mareomotriz en el Canal Fitz Roy, y así avanzar a un futuro energético más sostenible en Chile.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del Laboratorio Nacional de Computación del Alta Rendamiento NLHPC (ECM-02) y apoyo del proyecto ANID Fondecyt 11191077. Agradecemos a Estancia Olga Teresa por el apoyo logístico durante la campaña de mediciones de 2023.

## Referencias

- Artal, O., Pizarro, O., and Sepúlveda, H. H. (2019). The impact of spring-neap tidal-stream cycles in tidal energy assessments in the chilean inland sea. *Renewable Energy*, 139:496–506.
- Chen, C., Liu, H., and Beardsley, R. C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1):159–186.
- Cruz, J., Thomson, M. D., and Stavroulia, E. (2009). Preliminary site selection - chilean marine energy resources.
- de Los Recursos Energéticos de la Universidad de Magallanes, C. D. E. (2015). Elaboración de propuesta de matriz energética para magallanes al 2050.
- Dominicis, M. D., Wolf, J., and Murray, R. O. (2018). Comparative effects of climate change and tidal stream energy extraction in a shelf sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(7):5041–5067.
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2):183–204.

- Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J., and Suarez, L. (2017). Tidal energy resource characterization in chacao channel, chile. *International Journal of Marine Energy*, 20:1–16.
- Ministerio de Energía de Chile (2021). Energía 2050, política energética de chile.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using t\_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8):929–937.
- Pinilla, E., Soto-Riquelme, C., Martin, J. S., Valdebenito, P., Soto, G., Venegas, O., Salas, P., Cortés, J., and Arriagada, M. (2022). Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la patagonia chilena, 2021-2022.
- Polagye, B., Kawase, M., and Malte, P. (2009). In-stream tidal energy potential of puget sound, washington. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(5):571–587.
- Suarez, L., Ruíz, C., Guerra, M., Escauriaza, C., and Williams, M. (2021). Caracterización del recurso energético mareomotriz en el estrecho de magallanes. In *XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.