

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RUGOSIDAD DE FONDO EN
LA HIDRODINÁMICA DEL CANAL DE CHACAO, CHILE**

LEANDRO SUAREZ A.¹
CRISTIAN ESCAURIAZA M.²

RESUMEN

El canal de Chacao es un canal situado en el sur de Chile, entre la isla de Chiloé y el continente, donde se generan fuertes corrientes principalmente causadas por el desfase de las mareas entre el golfo de Ancud y el océano Pacífico. Para estudiar de manera más precisa estas corrientes mareales, se utilizó un modelo numérico 3D a mallas triangulares, denominado FVCOM. Este modelo es validado a partir del análisis armónico de las componentes de mareas obtenidas experimentalmente a partir de mareógrafos y ADCP en la zona del canal de Chacao. Se utiliza entonces el modelo para estudiar el efecto de una variación de la rugosidad en la hidrodinámica del canal.

¹Profesional, Marine Energy Research and Innovation Center MERIC, – leandro.suarez@meric.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile – cescauri@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El Canal de Chacao es un canal marino donde se generan corrientes de gran energía cuya compleja hidrodinámica es principalmente dominada por la interacción del desfase de las ondas de marea con su batimetría. Ubicado en la X región de Los Lagos, Chile (41° S; 73° O), el Canal de Chacao está limitado al norte por el continente americano y al sur por la Isla de Chiloé; en la dirección este-oeste, el canal conecta al Golfo de Ancud con el Océano Pacífico. En el mapa de la Figura 1 se presenta la ubicación del Canal de Chacao.

El Canal de Chacao tiene una importancia estratégica a nivel nacional tanto en aspectos ambientales, sociales y económicos, como por ejemplo con la construcción del puente de Chacao que unirá la isla de Chiloé con el continente. Estudios previos (Castilla et al., 2012) mostraron una gran diversidad, que va desde los organismos bentónicos hasta ballenas, con algunos avistamientos. Por otra parte, el Canal de Chacao alberga varias caletas que dan trabajo a más de 4000 pescadores artesanales, y de él se extraen más de 25.000 toneladas en promedio de recursos como peces, moluscos y otros por año.

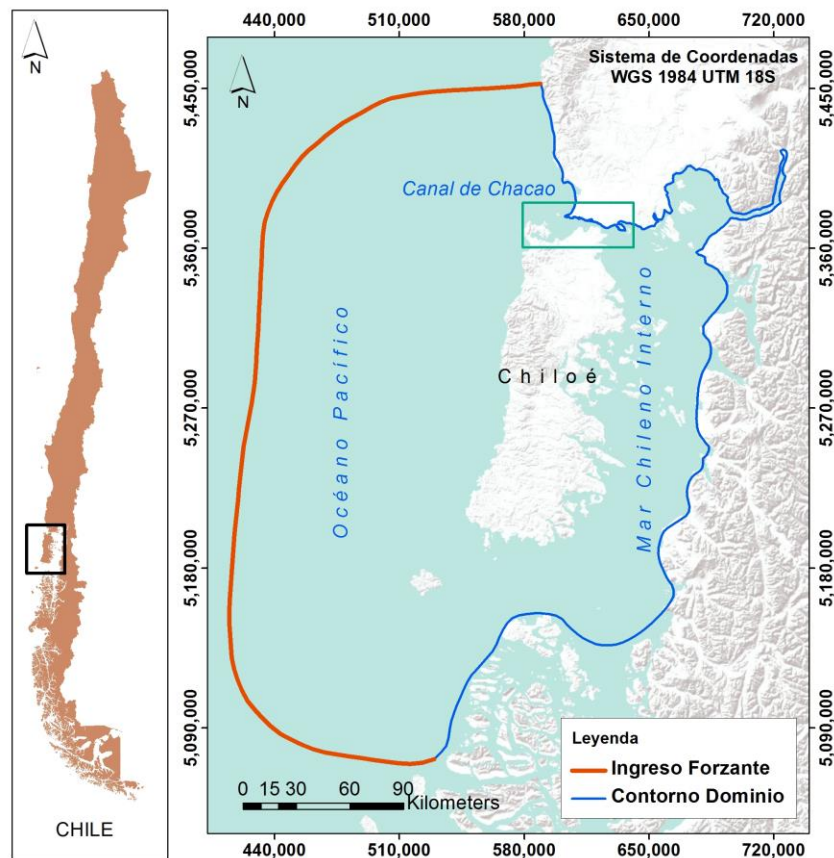


Figura 1.- Ubicación del Canal de Chacao, Chile. Las líneas azules y naranjas representan los bordes del dominio del modelo numérico. El cuadro verde muestra la ubicación del canal de Chacao.

El flujo en el Canal de Chacao exhibe un comportamiento cíclico dominado principalmente por el efecto de las mareas astronómicas, siendo la componente semidiurna, M2, de 12.42 horas de periodo, la de mayor importancia (Cáceres et al., 2003). Conocida es la presencia de grandes

amplitudes de marea y de corrientes mareales de gran magnitud que superan incluso los 4 m/s en periodo de sicigia (Aiken, 2008; Cáceres et al., 2003, Suarez et al., 2014). Con estas velocidades, se puede ver que el flujo dentro del canal niveles elevados de turbulencia, lo que se ha comprobado con mediciones de terreno (Thomson et al., 2012). La hidrodinámica del Canal de Chacao es de gran importancia para la definición de proyectos de acuicultura, de infraestructura y de extracción de energía que se planean llevar a cabo en la zona. Estudios indican la existencia de condiciones adecuadas dentro del Canal de Chacao para el aprovechamiento de energía mareomotriz (Garrad Hassan and Partners, 2009), haciéndose necesario caracterizar detalladamente su comportamiento y el efecto que la futura infraestructura y posible extracción de energía generarán sobre su hidro- y morfo-dinámica.

En esta investigación se propone a partir de un modelo hidrodinámico tridimensional estudiar la evolución del flujo en el canal de Chacao bajo la influencia de las mareas. La simulación es realizada a través del modelo hidrodinámico FVCOM desarrollado por Chen et al. (2003).

Este artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan las características principales del modelo numérico utilizado y la definición del caso de estudio; luego en la sección 3 se presenta una sección de análisis de los resultados y finalmente las conclusiones y una propuesta de trabajo futuro para esta investigación.

2. MODELO HIDRODINÁMICO

El modelo Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM; Chen et al., 2003) es un modelo hidrodinámico tridimensional no estructurado de volúmenes finitos que resuelve las ecuaciones primitivas de circulación oceánica. El modelo FVCOM es ampliamente utilizado en el estudio de procesos físicos y biológicos en regiones costeras caracterizadas por complejas batimetrías y diversas forzantes (mareas, viento, descargas de ríos, etc.). Para mayor detalle sobre el modelo FVCOM, el lector queda referido a Chen et al. (2003).

El esfuerzo de corte en el fondo τ_b es definido como:

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$$

Donde u, v son las componentes cartesianas horizontales de las velocidades y C_d el coeficiente de arrastre definido considerando una capa límite logarítmica a la altura z_{ab} , es decir:

$$C_d = \max\left(\frac{\kappa^2}{\ln\left(\frac{z_{ab}}{z_0}\right)}, 0.0025\right)$$

Donde $\kappa=0.4$ es la constante de von Karman, y z_0 es el parámetro de rugosidad de fondo.

El área modelada abarca la zona del Mar Chileno que rodea la Isla de Chiloé, incluyendo el Canal de Chacao y una parte de la plataforma continental (Ver Figura 1), de tal manera de estudiar el ingreso de las ondas de marea por el sur de la isla de Chiloé y observar el fenómeno de resonancia en el Mar Chileno Interno situado al este de Chiloé (Cáceres et al., 2003; Aiken, 2008, Suarez et al. 2014), y así desarrollar el flujo que ingresará al Canal de Chacao. La zona de estudio ha sido discretizada en una malla no-estructurada de aproximadamente 50.000 elementos triangulares, con una resolución que va desde 5000 m en el mar abierto hasta 50 m en la zona del Canal de Chacao, la cual se presenta en las Figuras 2 y 3.

La batimetría de la zona de estudio ha sido construida a partir de mediciones de terreno con sonar multihaz de alta resolución (~10 m) realizadas específicamente para el proyecto FONDEF D09i1052 en la zona del canal de Chacao, en conjunto con cartas náuticas del Servicio

Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para las zonas donde no se hizo levantamiento topográfico. Adicionalmente, se cuenta con información de terreno de las variaciones temporales y espaciales de nivel del mar y de corrientes, a partir de mareógrafos y ADCP en la zona de estudio, las cuales son de utilidad para la calibración y validación del modelo hidrodinámico.

La modelación hidrodinámica tuvo una duración de 45 días para poder obtener información sobre las componentes armónicas principales. Como forzante, se consideraron todas las componentes armónicas de marea astronómica, las componentes principales observadas en el canal de Chacao siendo las tres componentes semi-diurnas M2, N2, S2, y dos componentes diurnas K1, O1. La marea ingresada por el borde oeste del dominio fue obtenida a partir del modelo global TPXO 7.1 de Egebert & Erofeeva (2002).

Para estudiar la influencia de la rugosidad de fondo en la hidrodinámica del canal de Chacao, se realizaron varias simulaciones, con los parámetros físicos idénticos, y variando la rugosidad de fondo. Los valores para la rugosidad de fondo son los siguientes:

Simulación	Sim004	Sim008	Sim012	Sim016	Sim020	Sim040	Sim060	Sim080	Sim100	Sim120
z_0 (m)	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.120

Existen muchos otros parámetros del modelo que tienen influencia sobre la hidrodinámica, pero en el marco de este estudio nos enfocaremos en la evaluación de la rugosidad de fondo. El coeficiente de mezcla horizontal es de $0.4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ con el método de parametrización de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), el coeficiente de mezcla vertical es de $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, y el cierre de la turbulencia se realiza con un modelo de tipo k- ϵ .

Para validar los resultados, consideramos los resultados en 2 ADCP, localizados en el canal de Chacao, cercanos a las localidades de Chocoi y Corona, que tienen mediciones de altura de agua y velocidades. Para las alturas de nivel de agua, se extrajeron las componentes armónicas, y se observa el error absoluto respecto de las mediciones. Para las corrientes, se extrajeron también las elipses de mareas de las componentes armónicas principales, y se realizó igualmente un análisis de sensibilidad respecto de los resultados.

3. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Podemos observar la variación de la superficie libre, juntos con las componentes armónicas en las figuras 2 y 3. Podemos observar que el modelo es capaz de reproducir las variaciones de las mareas, así como las amplitud y fases de las componentes armónicas de la superficie libre, notando que la componente M2 es preponderante en esta zona. La figura 4 muestra el error absoluto en cuanto a amplitud y fase de las componentes principales en función de la rugosidad de fondo. Vemos que los errores en amplitud se notan principalmente para la componente principal M2, pero estos errores permanecen inferiores a 5 cm en el caso de Chocoi, y 10 cm en el caso de Corona. Para la fase de las componentes armónicas, observamos diferencias inferiores a 10 grados para todas las componentes, a la excepción de la componente M4, que tiene un error que tiende a aumentar con el aumento de rugosidad. No obstante, podemos notar que, en los dos casos, la amplitud de la componente M4 es menor a 10 cm, por lo que estos errores no influyen demasiado en la modelación de la superficie libre. También podemos recalcar que la variación de rugosidad

en el fondo no tiene mayor influencia en la superficie libre, ya que los cambios de amplitud son del orden de algunos centímetros, lo que se nota en las series temporales de superficie libre, que se confunden con las mediciones.

Superficie Libre Chocoi

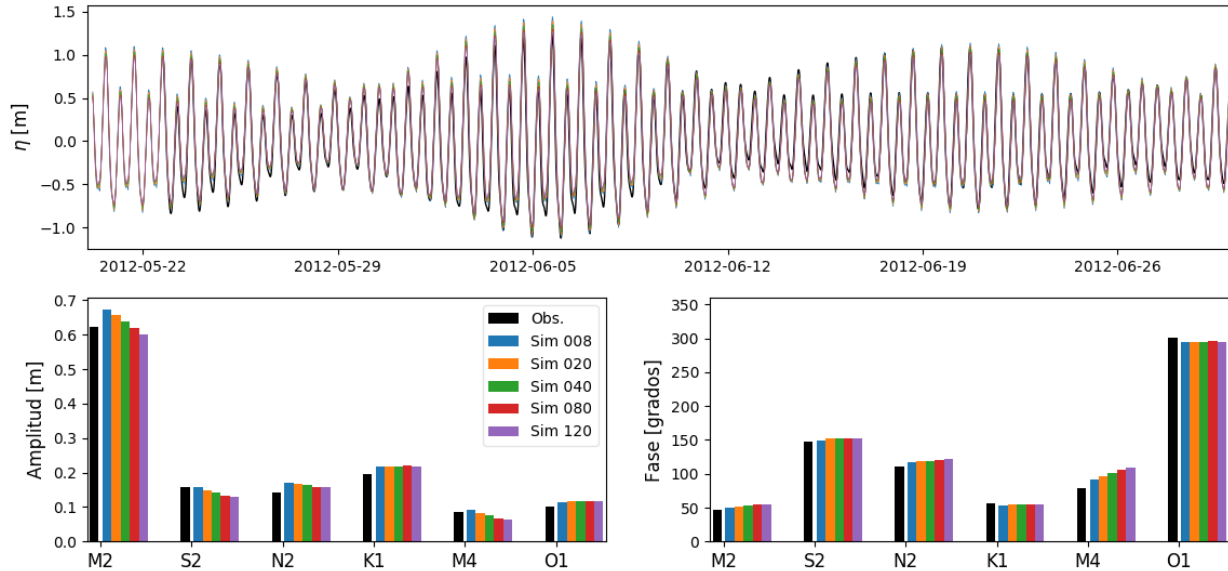


Figura 2.- Comparación de la superficie libre entre los datos experimentales del ADCP Chocoi en la zona del canal de Chacao y el modelo numérico FVCOM en el nodo más cercano. Figura superior: superficie libre. Figuras inferiores: amplitud y fase de las 5 componentes armónicas principales.

Superficie Libre Corona

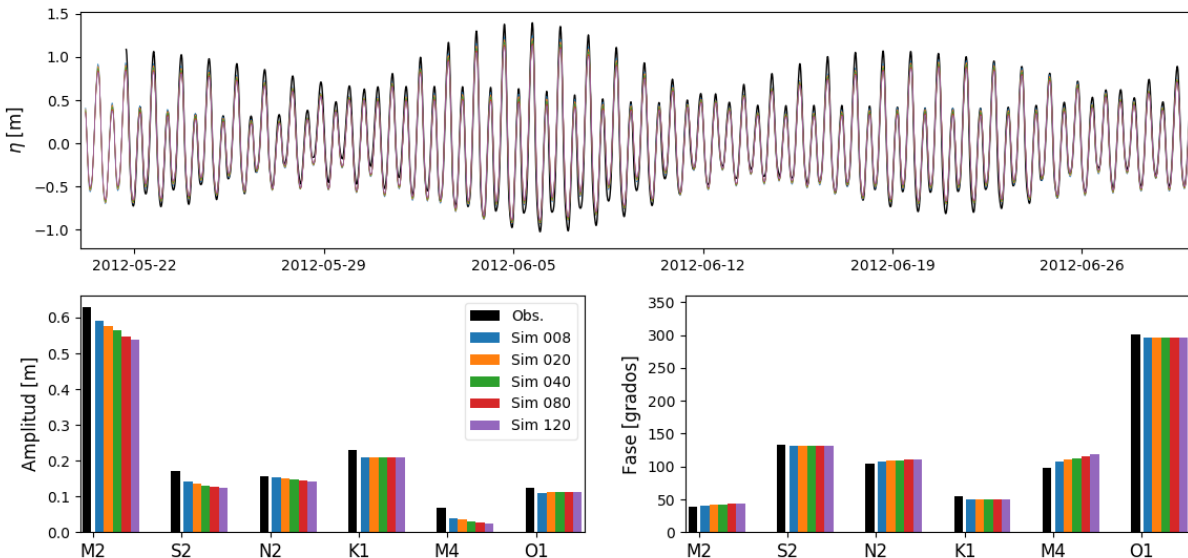


Figura 3.- Idem que la figura 2, con el ADCP Corona

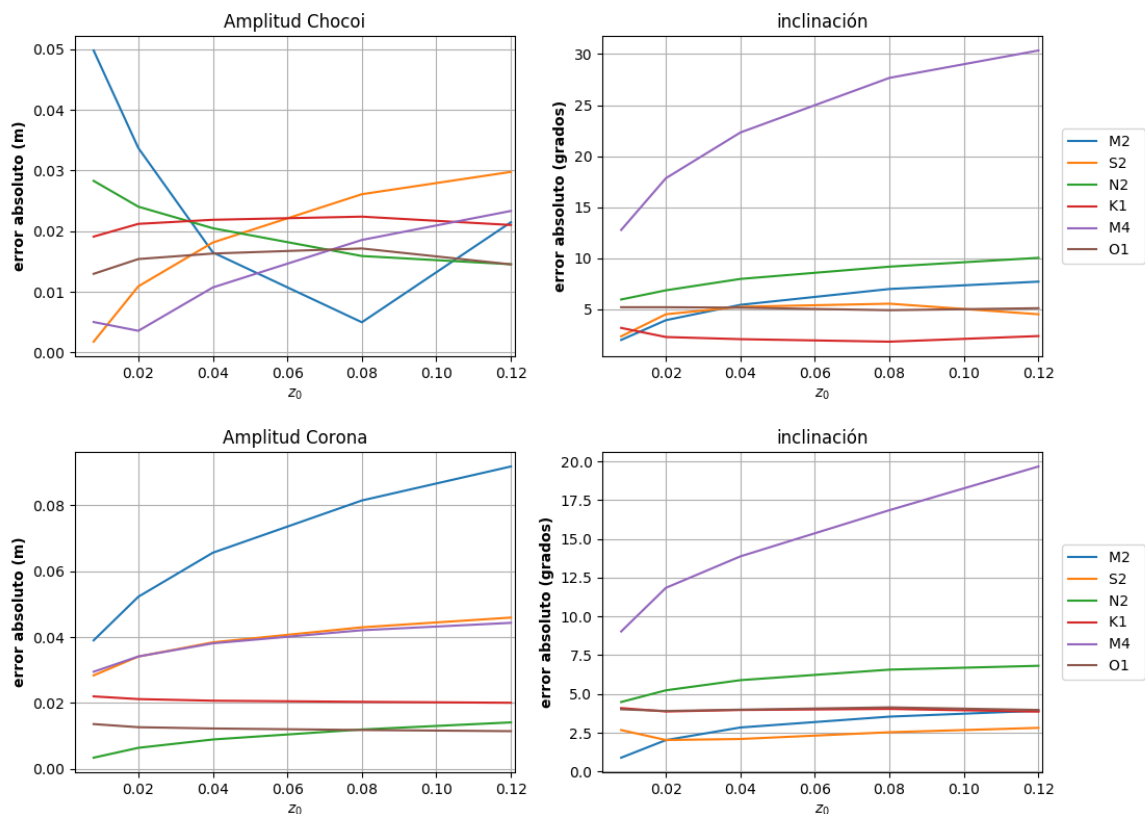


Figura 4.- error absoluto en amplitud y fase de las componentes armónicas para los ADCP Chocoi y Corona.

En cuanto a velocidades, observamos en la figura 5 que las magnitudes de las velocidades promediadas en la vertical son bien reproducidas por el modelo, con corrientes de hasta 3 m/s en el caso de Chocoi, y 2 m/s en el caso de Corona.

Si miramos ahora las elipses de mareas de las velocidades en los dos ADCPs, en Figura 6, notamos que las amplitudes de los semi-ejes son bastante bien reproducidas, con una sobreestimación de la velocidad en los dos casos. Existe también un error angular en la inclinación de las elipses, que es bastante similar para las 3 componentes armónicas principales, y tiende a disminuir cuando se aumenta la rugosidad de fondo.

Si miramos ahora los errores absolutos de las elipses de mareas, en la figura 7, podemos ver que los errores más grandes son en la amplitud del eje mayor. Este error tiende a disminuir cuando se aumenta la rugosidad en el caso de Chocoi, y para el caso de Corona, tiene un error mínimo para $z_0=0.020$ m y empieza a aumentar nuevamente cuando se sigue aumentando la rugosidad de fondo. En cuanto a la inclinación de las elipses, notamos que la rugosidad de fondo tiene poca influencia, ya que esta inclinación tiene una variación inferior a 2 grados para todas las componentes.

Podemos entonces decir que es necesario profundizar el estudio hidrodinámico, realizando un análisis de sensibilidad sobre otros parámetros, como la difusión horizontal y vertical, y el modelo de cierre turbulento. También es necesario evaluar la influencia de la resolución de la malla tanto

en horizontal como en el número de capas sigma empleadas, que serán materia para futuros trabajos.

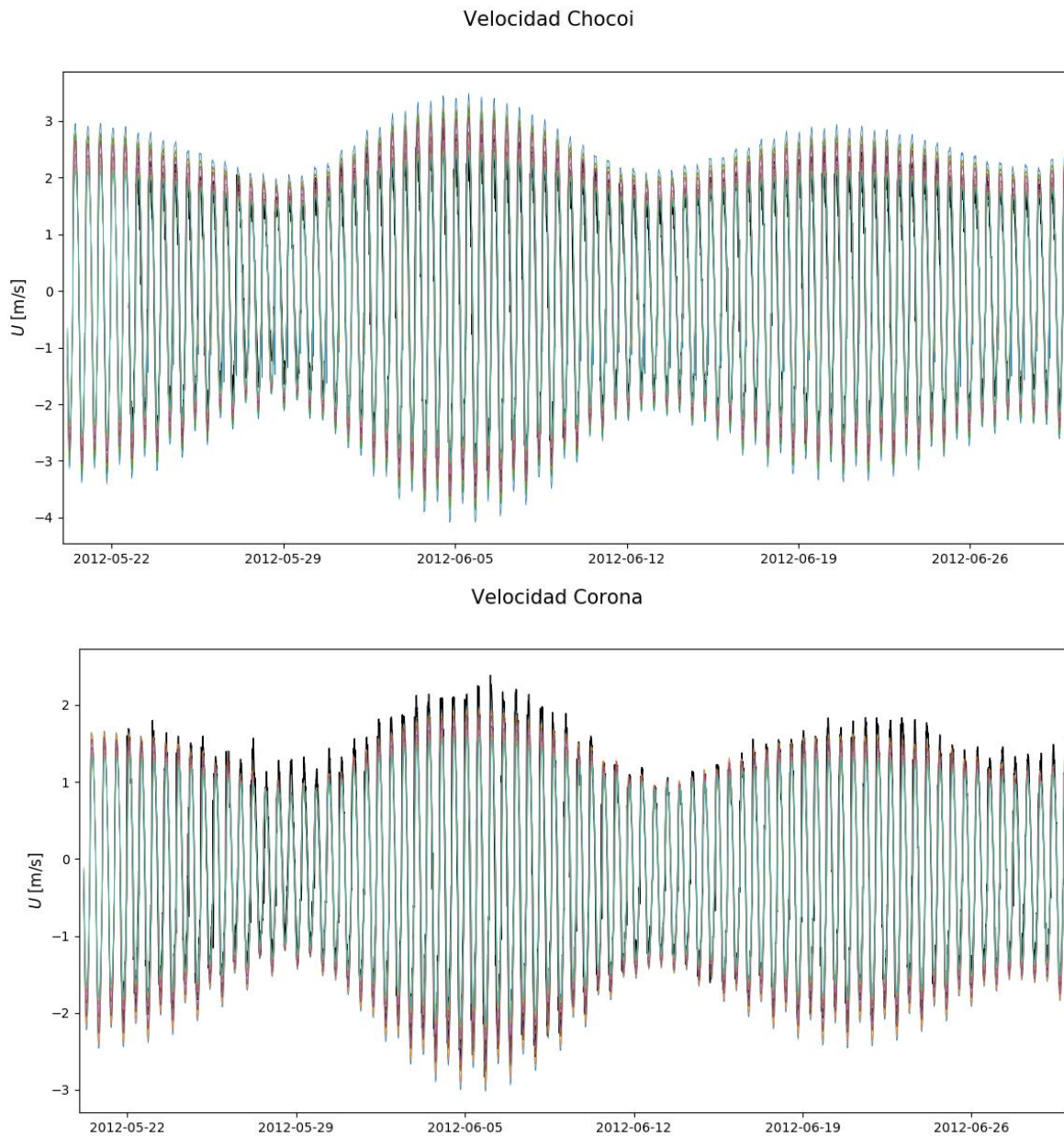


Figura 5.- Magnitud de la velocidad promediada en al vertical para los ADCP Chocoi y Corona. Las velocidades positivas corresponden a un flujo orientado hacia el Este.

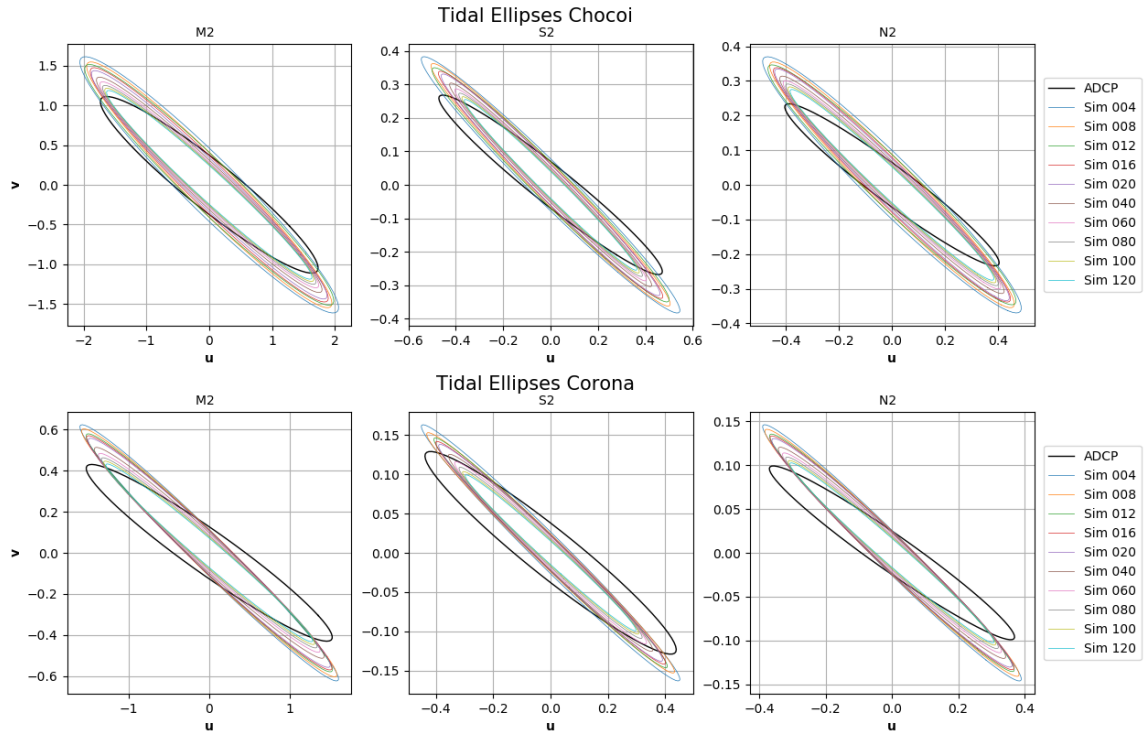


Figura 6.- Elipses de marea de las 3 componentes principales para los ADCP Chocoi y Corona.

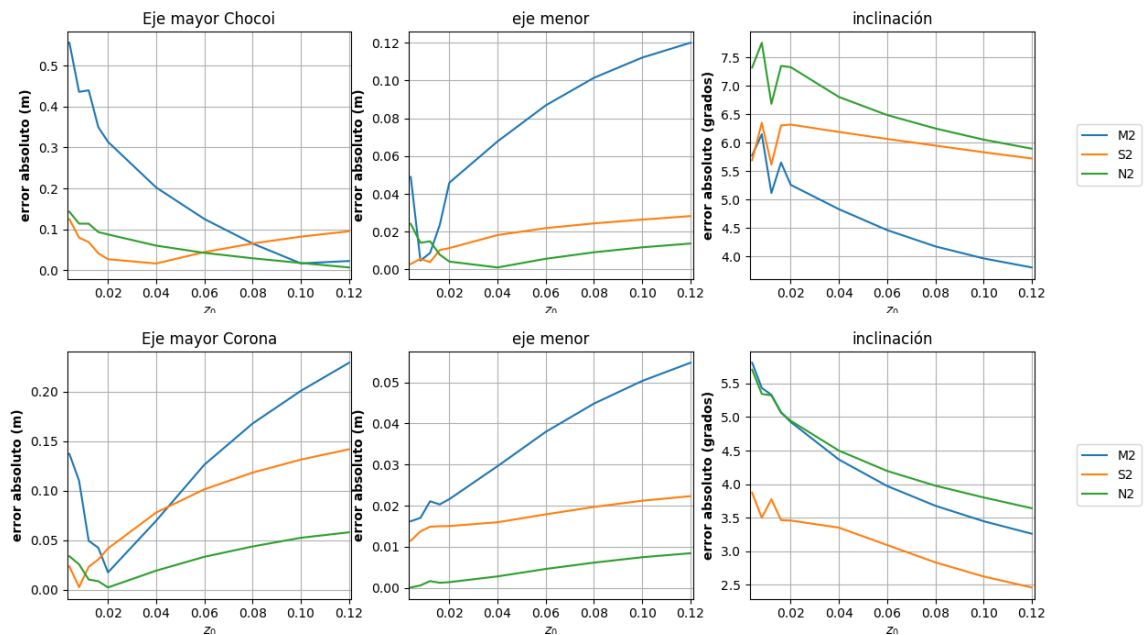


Figura 7.- error absoluto de los ejes principales e inclinación de las elipses de marea de las 3 componentes principales para los ADCP Chocoi y Corona.

4. CONCLUSION

Para estudiar el comportamiento de las corrientes mareales en la zona del canal de Chacao, se utilizó un modelo numérico 3D a mallas triangulares. El modelo es validado a partir de resultados experimentales de ADCP en la zona del canal de Chacao. A partir de un análisis de sensibilidad sobre la rugosidad de fondo, podemos determinar que esta rugosidad tiene poca influencia en la elevación de la superficie libre, así como en la fase de las componentes armónicas. La rugosidad de fondo tiene mayor influencia en cuanto a las velocidades en el canal, pero más en la amplitud que en la inclinación de las elipses. Es necesario profundizar este estudio observando con otros datos de mareógrafos y ADCP disponibles la variación del error con la rugosidad de fondo, dado que a partir de estos resultados, no es posible poder definir una rugosidad de fondo óptima para la modelación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del proyecto MERIC - Marine Energy Research & Innovation Center (14CEI2-28228). Se agradece igualmente al proyecto Fondef/Conicyt D09i1052 para la obtención de los datos necesarios a las modelaciones numéricas. Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

REFERENCIAS

Aiken C.M. (2008). "Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113.

Cáceres, M., Valle-Levinson, A. & Atkinson, L. (2003). "Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108.

Castilla, JC et al. 2012

Chen, Ch., Liu, H., y Beardsley, R. (2003). "An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries". *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, Vol. 20, pp. 159-186.

Egbert, G. & Erofeeva, S. (2002). "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, pp. 183-204.

Garrad Hassan & Partners. (2009). Preliminary Site Selection – Chilean Marine Energy Resources. Comisión Nacional de Energía.

Smagorinsky, J., 1963. "General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment." *Monthly Weather Review*, 91:99-164

Thomson, J., M. Richmond, B. Polagye, V. Durgesh, Measurements of turbulence at two tidal energy sites, *J. Ocean. Eng.*, 37 (2012).