

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

**ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LAS ONDAS INTERNAS EN UN FIORDO  
UTILIZANDO OpenFOAM®**

**MICHELLE ROJAS<sup>1</sup>**  
**LUIS ZAMORANO<sup>2</sup>**  
**ALDO MUÑOZ<sup>3</sup>**  
**YARKO NIÑO<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Un fiordo es un valle largo, profundo y estrecho formado durante las glaciaciones del período cuaternario. Este valle se encuentra inundado y conectado al mar abierto, sin embargo, posee diferente densidad al océano adyacente, debido a los aportes de agua dulce desde su cabecera. Además, se caracteriza por la presencia de una barra o *sill*, el cual controla el escurrimiento. El objetivo general de este trabajo es estudiar la propagación y dinámica de ondas internas en condiciones controladas, las que rescatan de manera conceptual las principales características de los fiordos australes. Esto mediante la construcción de simulaciones numéricas en OpenFOAM®. Como resultado se obtiene que una onda interna solitaria se transporta disminuyendo exponencialmente su energía cinética a una tasa de decaimiento, que depende de la densidad relativa de los fluidos y amplitud inicial de la onda. Además, al interactuar la onda interna solitaria con la batimetría, se generan ondas internas secundarias, con números de onda prácticamente iguales a cada costado del *sill*, y que varían según la densidad relativa y posición de la picnoclina en la vertical. Por último, al agregar el efecto de marea, se producen ondas internas con varios números de onda, los cuales son distintos a cada lado del *sill*.

---

<sup>1</sup>Alumna memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - michelle.rojas@ing.uchile.cl

<sup>2</sup>Jefe de Investigación, Innovación y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica - luiszamorano@inh.cl

<sup>3</sup>Ingeniero de Investigación y Desarrollo, Advanced Mining Technology Center AMTC, Universidad de Chile; Estudiante de Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile - aldo.munoz@amtc.cl

<sup>4</sup>Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil and Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - ynino@ing.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Los fiordos australes están conformados por una red de canales que se extienden entre las latitudes 41°S a 56°S, ocupando una extensa área de aproximadamente 240.000 km<sup>2</sup>. Los canales australes están caracterizados por tener una estructura de dos capas, estratificadas por su diferencia de densidad, y poseer variados y complejos procesos que determinan su hidrodinámica. Debido a la especial interacción que existe entre las aguas provenientes desde los ríos y océano, se forma un ecosistema especialmente rico en recursos naturales y muy atractivo para llevar actividades extractivas y de explotación por parte ser humano.

En el presente trabajo se estudia la hidrodinámica de las ondas internas que ocurren en un fiordo, utilizando simulaciones numéricas en el software libre y de código abierto OpenFOAM®. En el sistema, existe estratificación en dos capas por la coexistencia de agua dulce y salada, y por ende, existen movimientos periódicos en su interfase denominados ondas internas, fenómeno objetivo del estudio.

En el pasado, se han realizado modelaciones numéricas de un fiordo austral. Campuzano et al. (2008) realizan simulaciones numéricas en 2D del fiordo de Aysén, utilizando el sistema de modelación Mohid (Leitão et al., 2008), donde incluyen tanto el efecto de la marea y descarga del río Aysén. Los autores obtienen como resultado las corrientes residuales y distribución de salinidad y temperatura, donde luego comparan sus resultados con datos empíricos.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar, a través de simulaciones numéricas desarrolladas en el software OpenFOAM®, las ondas internas que se producen en un modelo conceptual simplificado de un fiordo, bajo diferentes escenarios.

## 2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE UN FIORDO

Los fiordos son un tipo de relieve terrestre que solo se encuentra en altas latitudes, sobre 43°N en el hemisferio norte y sobre 42°S en el hemisferio sur. Desde el punto de vista oceanográfico, un fiordo posee características propias de un estuario. Es decir, es un cuerpo de agua costero, semicerrado que tiene una conexión libre con el mar abierto, al menos en forma intermitente y dentro del cual la salinidad es significativamente distinta a la salinidad del mar abierto adyacente (Pritchard, 1952).

Los fiordos australes poseen una geomorfología típica determinada por los procesos glaciares desarrollados en su génesis. Estos posee una forma larga, angosta y profunda cuya sección posee bordes suavizados, en forma de U, debido al poder de erosión del hielo. Por otra parte, el avance del glaciar produce deposición de sedimento, lo cual es la causa de que en la boca del fiordo existan antiguas morrenas que se convierten en zonas de baja profundidad en el canal, denominadas *barras* o *sills*.

### 3. MODELACIÓN NUMÉRICA

#### 3.1. Consideraciones previas

Para el estudio de problemas de flujos complejos, se aplica la dinámica de fluidos computacional (en inglés *Computational Fluid Dynamics, CFD*). Este resuelve las ecuaciones teóricas de la mecánica de fluidos que se aplican al problema, a través de métodos numéricos y algoritmos. OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) es un *software* de CFD de código abierto y gratuito, el cual es indicado para realizar simulaciones de un fenómeno hidrodinámico, como lo son las ondas internas.

Por la naturaleza del fenómeno que se estudia, el esquema conceptual consiste en un escenario de tres fases, una de aire y dos de agua, con densidad y viscosidad definidas, lo cual es válido para todos los casos de estudio. Es por esta característica, que el *solver* adecuado para resolver el problema es *multiphaseInterFoam*. Este resuelve las Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas de Reynolds (en inglés *Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) Equations*), en los casos estudiados, en un modelo en dos dimensiones (2D), de tres capas inmiscibles, a las que se agrega la ecuación de continuidad, la ecuación para las interfases, y ecuaciones para la turbulencia, las cuales varían según el modelo utilizado.

#### 3.2. Ecuaciones fundamentales

El movimiento del flujo se define a partir de las leyes de conservación de masa, momentum y energía. Los fluidos se trabajan como isotérmicos, newtonianos e incompresibles y, por ende, no es necesario usar la ecuación de energía interna como ecuación fundamental. Solo se toma en consideración la ecuación de continuidad y el balance de momentum, simplificadas según las consideraciones mencionadas. Además, para definir la ubicación de las interfases, se agrega una ecuación para la variable  $\alpha$ , que representa la fracción de cada fluido que compone el sistema y que, por ende, varía su valor según en qué fase se encuentra. Las ecuaciones anteriores, se detallan en Kissling et al. (2010).

Por otra parte, se emplea el modelo  $k - \varepsilon$ , para la modelación de la turbulencia. Este resuelve ecuaciones para la energía cinética turbulenta  $k$  (que posteriormente, en este trabajo, se denomina como  $e_k$ ) y su disipación  $\varepsilon$ . Estas ecuaciones se señalan en El Tahry (1983) y Launder and Spalding (1974).

#### 3.3. Casos simulados

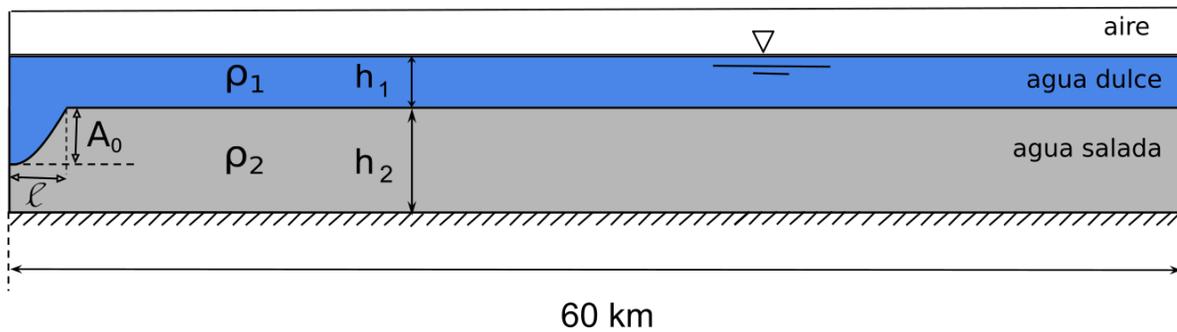
##### ■ Caso 1

En este caso se analiza la energía cinética turbulenta de una onda generada a través del método de colapso por gravedad (en inglés *gravity collapse method*) (Zou et al., 2018). En este, se genera un tipo de onda interna llamado onda solitaria. Esta se caracteriza, básicamente, por

ser una onda viajera no lineal que posee solo una perturbación sobre el nivel en reposo, es decir, con la forma de un pulso (Daily and Stephan, 1952).

La geometría del problema en este caso consiste en solo un canal, sin incluir el *sill*, por lo que el objetivo de este caso es caracterizar cómo se comporta la onda interna al propagarse en el medio, sin incluir el efecto de la batimetría sobre su dinámica.

Las variables del problema, que cambian en cada simulación, son la amplitud inicial de la perturbación ( $A_0$ ) y la densidad del fluido más denso ( $\rho_2$ ), representados de forma adimensional como  $A_0^* = A_0/h_2$  y  $\Phi = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ , cuyos valores se señalan en la Tabla 1. Por lo tanto, se mantienen como constantes  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $\ell$  y  $\rho_1$ , señaladas en la Figura 1 junto a la geometría del problema.



**Figura 1:** Configuración condición inicial Caso 1.

**Tabla 1:** Variables adimensionales iniciales Caso 1.

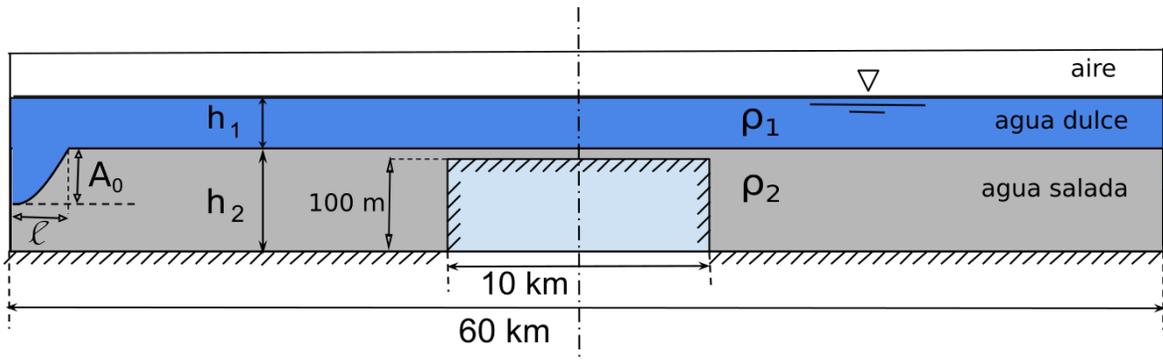
Simulación	$A_0^*$	$\Phi$
1	0.30	0.03
2	0.40	0.03
3	0.50	0.03
4	0.30	0.02
5	0.40	0.02
6	0.50	0.02

## ■ Caso 2

Se estudian las ondas internas secundarias que se producen al interactuar una perturbación inicial con la batimetría simplificada del fiordo. Para ello, se mantiene constante la geometría del canal, el cual incluye una grada que reproduce a un *sill*, y se realizan simulaciones en que se varía la posición de la pycnoclina en la vertical ( $h_1$ ,  $h_2$ ) y la densidad del fluido más denso ( $\rho_2$ ), los cuales se representan con las variables adimensionales  $h_* = h_1/(h_1 + h_2)$  y  $\Phi = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ , que toman los valores de la Tabla 2. Se mantienen como constantes  $A_0$ ,  $\ell$ ,  $h_1 + h_2$  y  $\rho_1$ . La geometría y parámetros del problema se muestran en la Figura 2.

Para estudiar este caso, se analizan los resultados de cada lado del *sill* por separado. Se emplea la transformada rápida de Fourier (en inglés *Fast Fourier Transform*, FFT) para hallar los

número de onda relevantes a cada costado de la barra. Al igual que el Caso 1, la perturbación inicial que se propaga se genera con el método de colapso por gravedad (Zou et al., 2018).



**Figura 2:** Configuración condición inicial Caso 2.

**Tabla 2:** Variables adimensionales iniciales Caso 2.

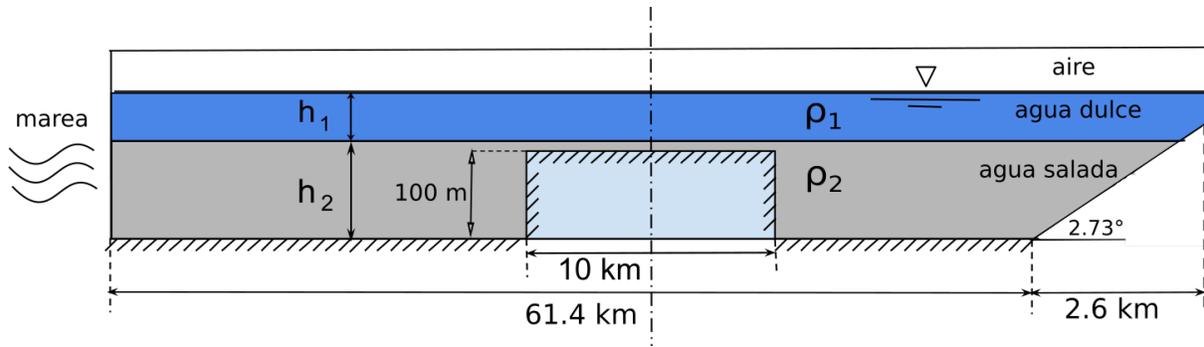
Simulación	$h_*$	$\Phi$
1	0.03	0.03
2	0.20	0.03
3	0.33	0.03
4	0.03	0.02
5	0.20	0.02
6	0.33	0.02

### ■ Caso 3

Este caso corresponde a analizar las ondas internas que resultan al agregar un efecto de marea como condición de borde y caudal de entrada de río. El campo de velocidad y variación en el nivel de la superficie libre por efecto de la marea interactúa con el *sill*, por lo tanto, se tiene como objetivo caracterizar las ondas internas que se producen como resultado de esta acción.

Al igual que el Caso 2, se utiliza la transformada rápida de Fourier. Esta permite encontrar los números de onda relevantes. Además, con este análisis, se encuentra el momento del ciclo de marea en que se generan los tipos de onda características, en las cuales la amplitud de la FFT presenta su máximo.

Se varía la ubicación a la que se encuentra la pycnoclina ( $h_1$ ,  $h_2$ ) y la densidad del fluido más denso ( $\rho_2$ ), que se definen en variables adimensionales como  $h_* = h_1/(h_1 + h_2)$  y  $\Phi = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ , siendo los mismos que el Caso 2. La condición de marea, caudal de entrada del río, profundidad total ( $h_1 + h_2$ ) y  $\rho_1$  son constantes. En la Figura 3 se esquematiza la geometría del problema, sus variables y ubicación de la condición de borde de marea.



**Figura 3:** Configuración condición inicial Caso 3.

**Tabla 3:** Variables adimensionales iniciales Caso 3.

Simulación	$h_*$	$\Phi$
1	0.03	0.03
2	0.20	0.03
3	0.32	0.03
4	0.03	0.02
5	0.20	0.02
6	0.32	0.02

## 4. RESULTADOS

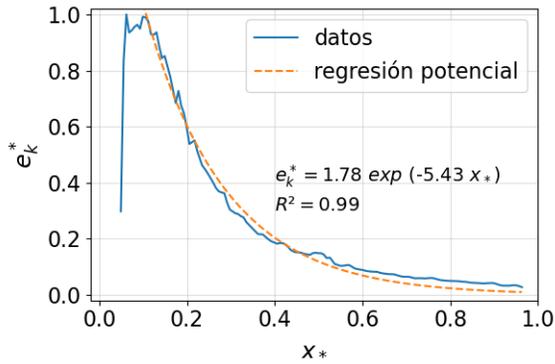
### 4.1. Caso 1: Energía cinética turbulenta de la onda

Se realiza un seguimiento de la energía cinética turbulenta ( $e_k$ ) para el frente de la onda. Se observa que esta aumenta rápidamente al colapsar la columna de fluido, hasta alcanzar un máximo, luego decae exponencialmente al propagarse (Ec. 1).

$$e_k^*(x_*) = a \cdot \exp(-\omega \cdot x_*) \quad (1)$$

Donde  $e_k^*$  es la energía cinética turbulenta adimensional (definida en la Nomenclatura al final de este artículo).  $x_*$  es la distancia horizontal adimensional, definida como  $x_* = x/L$ , con  $x$  distancia horizontal (km), y  $L$  largo del canal (60 km).  $a$  es una constante de ajuste para la función exponencial.  $\omega$  es la constante de decaimiento exponencial.

Se ajusta una curva de decaimiento exponencial  $\omega$  a cada una de las simulaciones, tal como se presenta en el ejemplo de la Figura 4, y lo cual se resume en la Tabla 4.



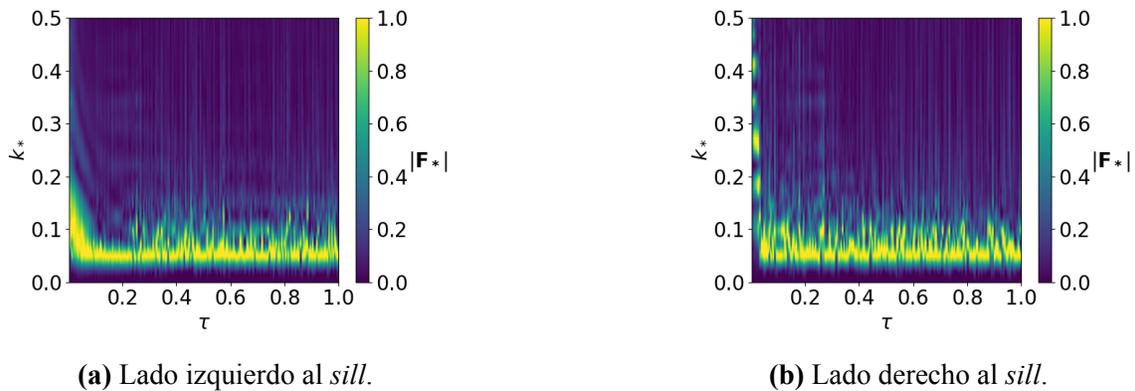
**Figura 4:** Gráfico  $e_k^*$  en función de  $x_*$ .  
Caso 1, Simulación 1.

**Tabla 4:** Constante de decaimiento exponencial  $\omega$ . Caso 1.

Simulación	$A_0^*$	$\Phi$	$\omega$
1	0.30	0.03	5.43
2	0.40	0.03	6.16
3	0.50	0.03	7.57
4	0.30	0.02	4.62
5	0.40	0.02	5.44
6	0.50	0.02	6.87

#### 4.2. Caso 2: Números de onda para ondas internas secundarias

En la Figura 5 se muestra el espectro de Fourier, obtenido con transformada rápida de Fourier (FFT) en el tiempo adimensional  $\tau$ . La franja amarilla señala la zona de mayor amplitud de la FFT, y con esto se encuentra el o los números de onda adimensional ( $k_*$ ) que caracterizan a las ondas internas secundarias. Los datos que se han procesado corresponde a la velocidad horizontal  $u$ , para una línea horizontal ubicada a la misma profundidad que la piconclina, para cada instante de tiempo obtenido. Las variables adimensionales usadas en los gráficos se detallan en la Nomenclatura al final del artículo.

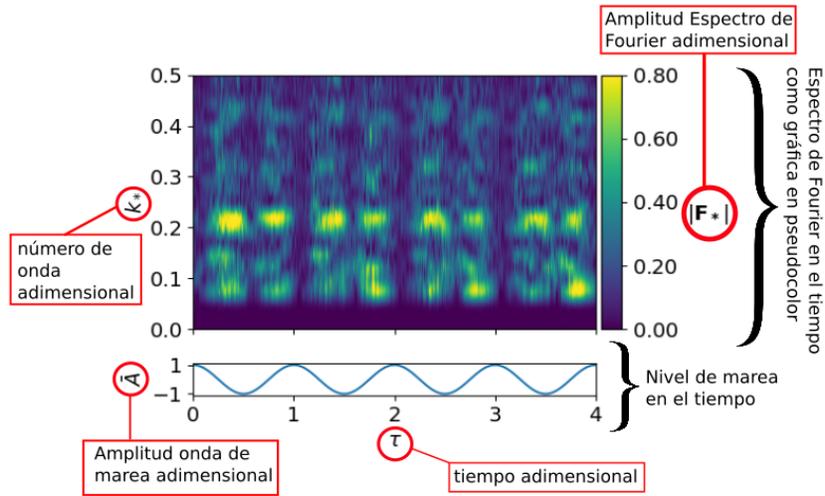


**Figura 5:** Espectro de Fourier en el tiempo. Caso 2, Simulación 1.

#### 4.3. Caso 3: Números de onda para ondas internas, con condición de marea

La onda de marea que interactúa con la batimetría del fiordo tiene el potencial de generar ondas internas. En este caso, el análisis con transformada rápida de Fourier (FFT) se realiza para un

vector de datos conformado por la componente horizontal de la velocidad ( $u$ ), a una profundidad determinada ( $z$ ), para todos los tiempos de la simulación y para cada costado del *sill*. Se obtienen resultados como los explicados en la Figura 6. En este caso, el tiempo adimensional se define como  $\tau = t/T$ , donde  $T$  es el periodo del ciclo de marea (12 hrs). Las demás variables se explican en la nomenclatura al final de este artículo.

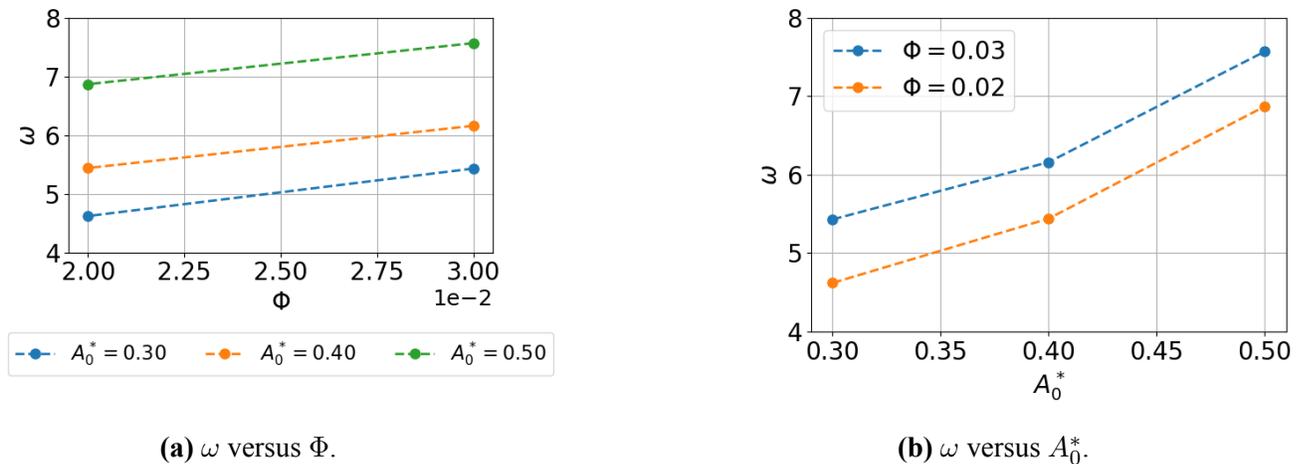


**Figura 6:** Componentes de los gráficos para los resultados del Caso 3.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Caso 1

En la Tabla 4, se observa que la constante de decaimiento exponencial  $\omega$ , depende tanto de la densidad relativa  $\Phi$ , como de la amplitud inicial de la onda  $A_0^*$ . Esto se visualiza más claramente de forma gráfica en la Figura 7.



**(a)**  $\omega$  versus  $\Phi$ .

**(b)**  $\omega$  versus  $A_0^*$ .

**Figura 7:** Análisis parámetros adimensionales Caso 1.

De la Figura 7 se observa que para un aumento del 50 % de la densidad relativa  $\Phi$ , la constante de decaimiento  $\omega$ , aumenta en promedio 14 %, es decir,  $e_k^*$  decae a una mayor tasa. Además, la constante de decaimiento  $\omega$  se incrementa con  $A_0^*$ . Realizando una regresión potencial del tipo  $\omega = c_1 \cdot A_0^{*n} + c_2$ , para ambos valores de  $\Phi$ , se obtiene que, en promedio,  $n = 3,4$ , es decir,  $\omega \sim A_0^{*3,4}$ .

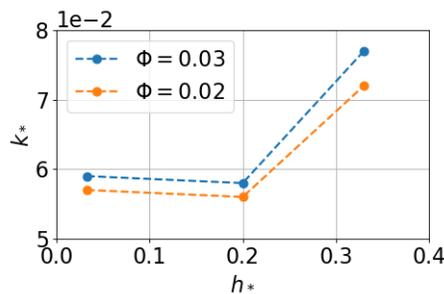
## 5.2. Caso 2

Se verifica que al propagarse una onda como la presentada en el Caso 1, esta interactúa con el *sill*, generando ondas internas secundarias, las cuales se puede caracterizar a partir de su número de onda adimensional  $k_*$ . En la Tabla 5 se muestran los números de onda adimensionales que dominan en cada simulación, a cada costado de la grada. Se nota que solo en la simulación 3, donde la pinoquina está ubicada a mayor profundidad, a ambos costados del *sill*, dominan dos longitudes de onda diferentes, mientras que en las demás, solo una. Además, los valores de  $k_*$  no cambian significativamente a cada lado de la barra.

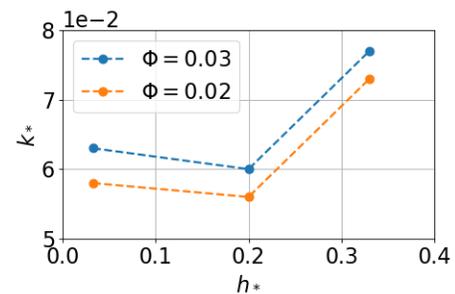
**Tabla 5:** Números de onda adimensionales  $k_*$  característicos, Caso 2.

Simulación	$k_*$	
	Lado Izquierdo	Lado Derecho
1	0.059	0.063
2	0.058	0.060
3	0.077; 0.135	0.077; 0.141
4	0.057	0.058
5	0.056	0.056
6	0.072	0.073

Promediando los resultados para la densidad relativa ( $\Phi$ ), para  $h_* = 0,03$  y  $h_* = 0,20$  el número de onda varía en promedio un 1 %, es decir, prácticamente se mantiene constante. Por otra parte, en  $h_* = 0,33$ , sí se nota una variación importante, del 28 % en relación a las simulaciones con pinoquina más somera. Lo anterior, se observa más claramente en la Figura 8.



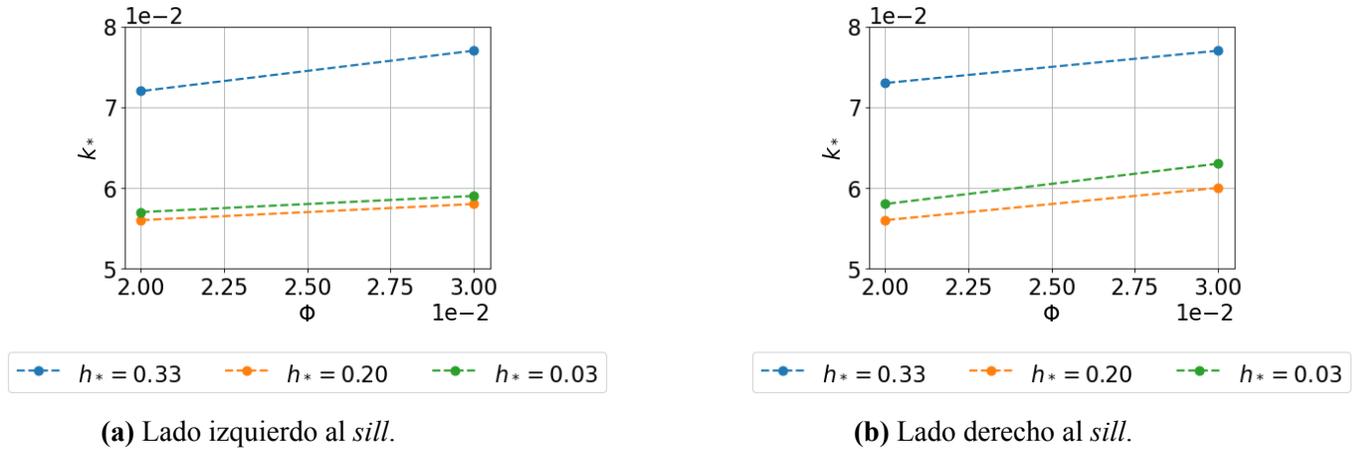
(a) Lado izquierdo al *sill*.



(b) Lado derecho al *sill*.

**Figura 8:**  $k_*$  versus  $h_*$ , Caso 2.

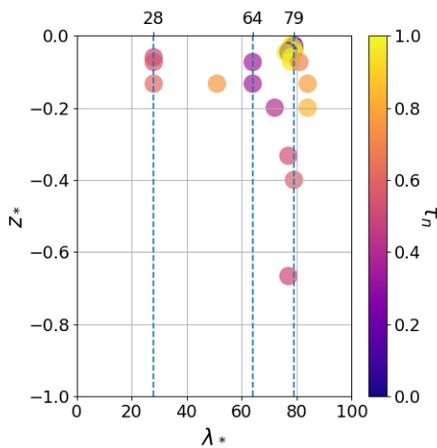
Además, al aumentar un 50 % la densidad relativa  $\Phi$ , el número de onda adimensional  $k_*$  se ve incrementado en un 6 %, en promedio, tal como se nota en la Figura 9.



**Figura 9:**  $k_*$  versus  $\Phi$ , Caso 2.

### 5.3. Caso 3

Se obtienen las longitudes de onda adimensionales  $\lambda_*$  (ver Nomenclatura), que son relevantes a cada costado del *sill*. Los resultados se organizan en función de la profundidad adimensional  $z^*$  y el momento del ciclo de marea en qué ocurre,  $\tau_n$  (Figura 10).  $\tau_n$  toma valores entre 0 y 1, siendo 0 al inicio del ciclo (marea alta) y 0.5 en la mitad de este (marea baja). Los resultados se presentan en la Tabla 6.



**Figura 10:**  $\lambda_*$  y  $\tau_n$  Caso 3, Simulación 4. Lado derecho al *sill*.

**Tabla 6:** Longitud de onda adimensional  $\lambda_*$  dominante, a cada costado del *sill*.

Simulación	$\lambda_*$					
	Lado Izquierdo			Lado Derecho		
1	29	66	81	-	42	-
2	11	40	55	66	29	-
3	30	51	72	-	43	53
4	28	64	79	-	81	-
5	9	31	57	64	29	-
6	29	42	71	-	38	80

De la Tabla 6, se nota que la longitud de onda adimensional  $\lambda_*$ , cambia a cada lado del *sill*. Además, al costado donde está presente la condición de borde de marea (lado izquierdo), se detectan más longitudes de onda que dominan, en comparación al costado derecho a la barra.

## 6. CONCLUSIONES

Se han detectado ondas internas secundarias que se generan a partir de la interacción de una onda interna solitaria con la batimetría poco profunda, en este caso una grada que esquematiza el *sill* de un fiordo. Esto verifica lo señalado por Vlasenko and Alpers (2005), quienes estudian ondas internas de gran amplitud que interactúan con el banco oceánico Dreadnaught, en el mar de Andamán.

Por otra parte, se identifican ondas internas provocadas únicamente por forzante de marea barotrópica, cuya zona de generación se ubica en la región del *sill*. Lo anterior se condice con los hallazgos de la modelación numérica realizada por Staalstrøm and Røed (2016) en el Drøbak Sill (fiordo de Oslo, Noruega).

Se concluye que una onda solitaria que se propaga, disminuye exponencialmente su energía cinética turbulenta, cuya tasa de decaimiento aumenta al ser mayor la densidad relativa de los fluidos que componen el canal, como también se incrementa al ser mayor la perturbación inicial impuesta. Además, al interactuar una onda interna con la batimetría, se generan ondas internas secundarias a ambos costados de la barra con igual número de onda, el cual aumenta al ubicarse la picnoclina en la misma profundidad que el *sill*, como también al incrementar la densidad relativa del sistema.

Por último, al agregar el efecto de la marea en el modelo, se producen ondas internas con diferentes números de onda, los cuales son diferentes a cada costado de la barra. Se detecta una mayor variabilidad en los números de onda detectados, al costado donde está presente la condición de borde de marea.

Se debe considerar que los resultados anteriores deben ser considerados con reserva, debido a las simplificaciones y restricciones de los escenarios simulados y porque no se han hallado investigaciones previas que los verifiquen. Sin embargo, se pueden utilizar como punto de partida y de comparación para futuros estudios sobre este tema.

Finalmente, este trabajo aporta a los objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos por los estados miembros de las Naciones Unidas en 2015. En particular al objetivo 14, que se refiere a “Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos”, ya que actualmente los fiordos australes son centros económicos por sus recursos acuícolas, además son zonas que proveen diversos servicios ecosistémicos y que albergan gran riqueza biológica, por esta razón, son altamente frágiles y vulnerables. Entender la hidrodinámica de los fiordos a través de modelos numéricos, es un aporte para crear herramientas para su protección.

## NOMENCLATURA

$t$ : tiempo (s)	$e_k^*$ : energía cinética turbulenta adimensional (-)
$h_1$ : espesor capa superior (m)	$e_k^* = e_k / e_{k \max}$
$h_2$ : espesor capa inferior (m)	$\ell$ : largo perturbación inicial (m)
$\rho_1$ : densidad capa superior (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ : longitud de onda (m)
$\rho_2$ : densidad capa inferior (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ : número de onda (1/m)
$e_{k \max}$ : energía cinética turbulenta máxima de la simulación (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$k = 2\pi/\lambda$
	$H_{sill}$ : altura del <i>sill</i> (100 m)

$k_*$ : número de onda adimensional (-)	$ \mathbf{F}_*  =  \mathbf{F}(\mathbf{u}(\mathbf{x}))  /  \tilde{\mathbf{F}}_{\max} $ (Caso 3)
$k_* = k \cdot H_{sill}$	$\bar{A}$ : amplitud adimensional onda de marea (m)
$t_{ref}$ : tiempo de referencia (Caso 2) (10 hrs)	$\tau_n$ : tiempo adimensional normalizado (-)
$\tau$ : tiempo adimensional (Caso 2) (-)	$T$ : periodo ciclo de marea (12 hrs)
$\tau = t/t_{ref}$ (Caso 2) (-)	$\tau_n = t/T - \lfloor t/T \rfloor, \lfloor * \rfloor$ , función parte entera
$ \mathbf{F}_* $ : amplitud adimensional FFT (-)	$\lambda_*$ : longitud de onda adimensional (-)
$ \mathbf{F}_{\max}(\mathbf{t}) $ : amplitud máxima FFT para un tiempo determinado (Caso 2) (m/s)	$\lambda_* = \lambda/H_{sill}$
$ \mathbf{F}_*  =  \mathbf{F}(\mathbf{u}(\mathbf{x}))  /  \mathbf{F}_{\max}(\mathbf{t}) $ (Caso 2)	$z$ : profundidad (m)
$ \tilde{\mathbf{F}}_{\max} $ : amplitud máxima FFT (Caso 3) (m/s)	$z_*$ : profundidad adimensional (-)
	$z_* = z/(h_1 + h_2)$

## AGRADECIMIENTOS

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercomputación del NLHPC (ECM-02). Aldo Muñoz agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por los fondos otorgado para sus estudios de Doctorado. ANID-Subdirección de Capital Humano/ Doctorado Nacional /2021-21212042.

## REFERENCIAS

- Campuzano, F., Leitão, P., Gonçalves, M., Marin, V., and Tironi, A. (2008). Hydrodynamical vertical 2d model for the aysen fjord. In Neves R., Baretta J.W., M. M., editor, Perspectives on integrated coastal zone management in South America, pages 555–566. IST Press, Lisboa, Portugal.
- Daily, J. W. and Stephan, Jr., S. C. (1952). The solitary wave: Its celerity, profile, internal velocities and amplitude attenuation in a horizontal smooth channel. Coastal Engineering Proceedings, 1(3):2.
- El Tahry, S. (1983). K-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. Journal of Energy, 7:345–353.
- Kissling, K., Springer, J., Jasak, H., Schutz, S., Urban, K., and Piesche, M. (2010). A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids. In Proceedings of the V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010.
- Launder, B. and Spalding, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2):269–289.
- Leitão, P., Mateus, M., Braunschweig, F., Fernandes, L., and Neves, R. (2008). Modelling coastal systems: the MOHID water numerical lab, pages 77–88.
- Pritchard, D. W. (1952). Estuarine hydrography. In Advances in geophysics, volume 1, pages 243–280. Elsevier.
- Staalstrøm, A. and Røed, L. P. (2016). Vertical mixing and internal wave energy fluxes in a sill fjord. Journal of Marine Systems, 159:15–32.
- Vlasenko, V. and Alpers, W. (2005). Generation of secondary internal waves by the interaction of an internal solitary wave with an underwater bank. Journal of Geophysical Research: Oceans, 110(C2).
- Zou, L., Yu, Y., Sun, Z., Zhang, J., Li, Z., and Yu, Z. (2018). CFD simulation of internal solitary wave using the volume-of-fluid method within openfoam. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering.