

# VARIACIÓN ESTACIONAL DE LAS ONDAS INTERNAS EN EL LAGO LLANQUIHUE

Javiera Abarca Mesa<sup>1</sup> y Yarko Niño Campos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile. Santiago, Chile.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile & Advanced Mining Technology Center. Santiago, Chile.

E-mail: javiera.abarca.m@ug.uchile.cl, ynino@ing.uchile.cl

## Introducción

El Lago Llanquihue es el segundo lago más grande de Chile (870 km<sup>2</sup>), con una longitud de 42 km y una profundidad máxima de 317 m. El lago es monomítico y en verano la termoclina se encuentra a una profundidad de aproximadamente 40 m. La estratificación máxima es en los primeros días de Febrero, donde la diferencia de temperatura entre el epilimnion e hipolimnion llega a 6,5°C. En verano el lago es forzado diariamente por una brisa de vientos preferentemente de dirección sur, que se detiene en la madrugada y comienza nuevamente alrededor de las 8 a.m. Sin embargo, en ciertas ocasiones estos vientos pueden no detenerse por completo durante varios días. Estos factores se combinan para convertir el lago en un lugar ideal para el estudio de ondas internas afectadas por Coriolis, dado que en verano se alcanza un número de Burger máximo igual a 0,1. Este parámetro adimensional, indica que los efectos de la rotación son más importantes a medida que se acerca a cero. Cuando el número de Burger es pequeño (menor a 1), los efectos rotacionales se vuelven importantes y es posible la generación de las ondas Kelvin y Poincaré. La onda Kelvin, corresponde a una onda que se propaga en forma ciclónica y su velocidad tiene una fuerte componente azimutal, cuya magnitud decae en forma exponencial hacia el centro del lago, siendo máxima en la costa. Por otro lado, la onda Poincaré se caracteriza por ser superinercial, y tener un flujo horizontal que realiza trayectorias elípticas en sentido anticiclónico, donde la razón entre ambos ejes para las trayectorias es igual a  $\omega/f$  (con  $\omega$  la frecuencia de la onda y  $f$  la frecuencia inercial) y cuya amplitud es mayor en el centro del lago.

La importancia de las ondas internas en los lagos radica en el transporte de masa y momentum, especialmente en lagos con gran tiempo de residencia, lo cual produce la distribución de nutrientes (especialmente en el epilimnion, donde se producen los procesos biológicos), contaminantes y sedimentos (Imberger, 1998). Por otro lado, las ondas internas producen una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, además de tener un importante rol en energizar la dispersión horizontal y mezcla vertical en el lago, donde ésta última altera la interfaz natural de la estratificación y facilita la incorporación de nutrientes provenientes del hipolimnion a la capa superficial (Gómez-Giraldo et al., 2006). Por último, otra consecuencia, es que se puede producir la resuspensión de sedimentos, nutrientes y contaminantes (Gloor et al., 1994). Es por esto que entender las ondas internas conlleva al conocimiento de la calidad de las aguas en los lagos.

En este estudio se realizó una simulación numérica mediante el software Delft3D-FLOW, con el fin de identificar las principales ondas internas que se generan en el lago y su variación estacional. Este software resuelve las ecuaciones de momentum, continuidad y transporte, considerando la aproximación de Boussinesq.

## Características del modelo

La grilla utilizada corresponde al tipo "Z", y contiene 20 capas verticales, donde las capas superficiales tienen una mayor resolución que la parte inferior (como se muestra en la Figura 1), esto con el fin de reproducir de mejor manera la estratificación. Por otro lado, la parte inferior de la grilla tiene la forma de la batimetría, como se observa en la Figura 1. En cuanto a la resolución horizontal, la dimensión de la grilla es de 130 m x 130 m, excepto en los bordes, donde la celda se adapta a la forma del lago (Figura 2). El paso del tiempo utilizado corresponde a 1,5 minutos.

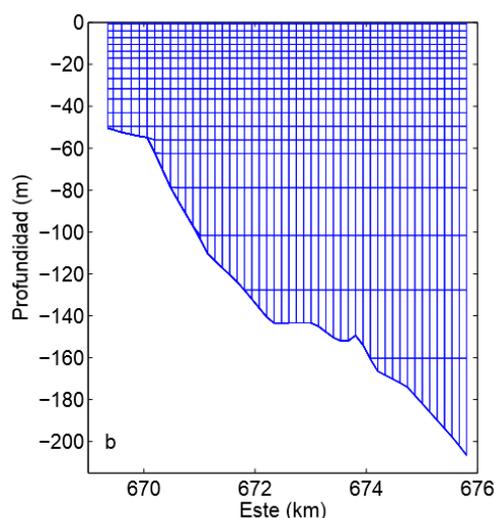


Figura 1.- Resolución vertical de la grilla. Los ejes representan coordenadas UTM en el uso 18S.

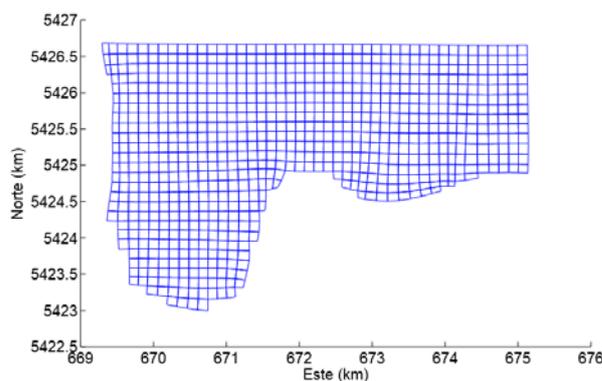


Figura 2.- Parte de la grilla utilizada.

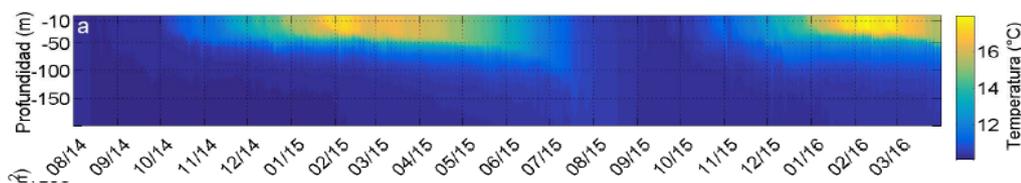


Figura 3.- Temperatura en un punto en el centro del lago.

Para los vientos se utilizaron 6 estaciones meteorológicas cercanas al lago, con resolución temporal de 1 hora, y cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 4. Por lo tanto, para ingresar el campo de vientos al modelo se realizó una interpolación espacial de estas 6 estaciones, como se muestra en la misma figura. Por otro lado, para las otras variables meteorológicas necesarias para la simulación (temperatura del aire, humedad relativa y radiación) se utilizaron los datos de las dos estaciones más cercanas: Octay y Ensenada.

Para la validación del modelo radiativo, se utilizó el único estudio previo del lago realizado por Campos et al. (1988), el cual presenta perfiles mensuales de temperatura. Luego de comparar estos perfiles con los promedios mensuales obtenidos del modelo, se observó que en general, existe una buena representación de las temperaturas en el lago y que se modela de forma correcta la profundidad de la termoclina. En la Figura 3 se muestra la evolución temporal del perfil de temperaturas según el modelo, para un punto ubicado en el centro del lago.

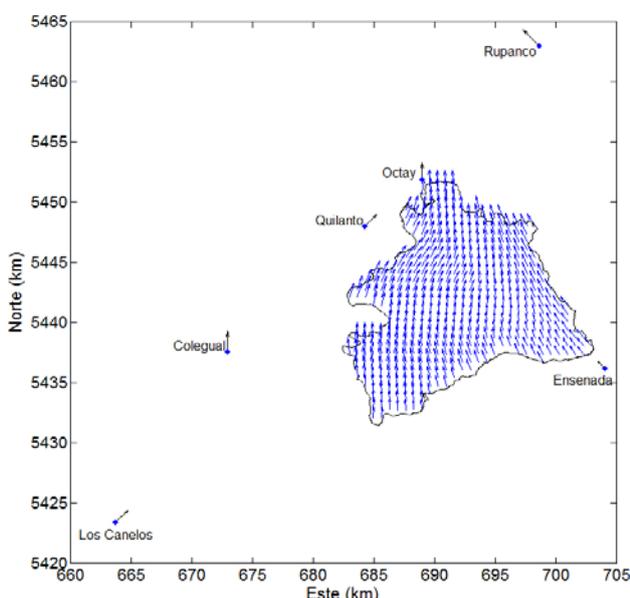


Figura 4.- Interpolación de vientos considerando las 6 estaciones meteorológicas.

## Resultados

Dado que las ondas Poincaré tienen un comportamiento anticiclónico, para identificarlas se utilizó una herramienta de análisis de datos llamada espectro de frecuencia rotacional, que consiste en clasificar una serie de tiempo de velocidades para una frecuencia determinada,  $\omega$ , en rotación circular en sentido horario o antihorario, con amplitudes  $A^-$  y  $A^+$  y fases  $\theta^+$  y  $\theta^-$  respectivamente.

Como resultado, se obtuvo que el periodo dominante de este tipo de onda se acerca bastante al periodo inercial del lago (igual a 18,3 h), y se caracteriza por tener una mayor intensidad en la parte central del lago. En la Figura 5 se observa la variación espacial del espectro de potencia rotacional anticiclónico para el periodo dominante en distintas épocas del año (señaladas en la parte superior de cada columna). Se observa que en los meses de mayor estratificación (enero y febrero) la onda Poincaré es más intensa en la parte del epilimnion, mientras que en los meses previos a la máxima estratificación la onda Poincaré domina en el metalimnion (alrededor de los 60 metros). En cuanto al periodo de mezcla completa del lago (agosto), se observa que la intensidad de la onda es homogénea en la vertical, y de menor intensidad.

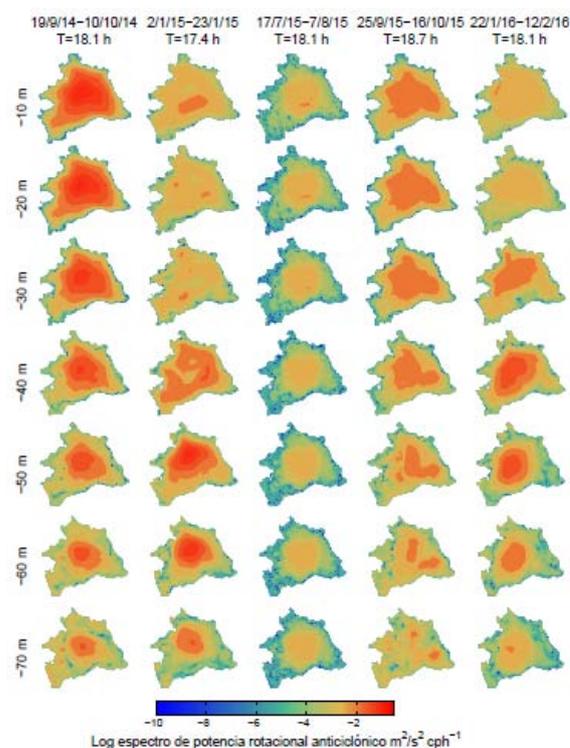


Figura 5.- Espectro de potencia rotacional anticiclónico para periodos dominantes, en distintas épocas del año y para distintas profundidades.

Para la caracterización de la onda Kelvin, esta vez se analizó el espectro de potencia rotacional ciclónico, el cual se muestra en la Figura 6. En esta figura se observa que la intensidad de la onda aumenta en las orillas del lago. Además se tiene que el periodo de la onda Kelvin varía entre 160 h y 56 h dependiendo del grado de estratificación del lago, lo cual se debe a la variación del número de Burger en el año.

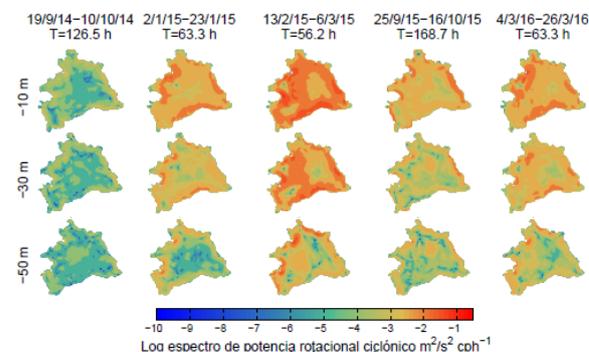


Figura 6.- Espectro de potencia rotacional ciclónico para periodos dominantes, en distintas épocas del año y para distintas profundidades.

## Referencias

- Campos, H., Stefen, W., Aguera, G., Parra, O. and Zúñiga, L. (1988). "Limnological Study of Lake Llanquihue (Chile)". Morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity. Arch. Hydrobiol./ Suppl 81, 37-67.
- Gloor, M., Wuest, A. and Munnich, M. (1994). "Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches". Hydrobiologia 284(1), 59-68.
- Gómez-Giraldo, A., Imberger, J. and Antenucci, J. P. (2006). "Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret". Limnology and Oceanography 51(1), 229-246.
- Imberger, J. (1998). "Flux paths in a stratified lake: A review". Physical Processes in lakes and oceans, vol. 54. pp. 1-17.