

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

MODELOS NUMÉRICOS Y MEDICIONES DE CAMPO: HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS PARA EL ESTUDIO DE LAGOS. CASO LAGO VILLARRICA

**CAROLINA MERUANE N.¹
YARKO NIÑO C.²**

RESUMEN

En la actualidad existen herramientas bastante sofisticadas para el estudio de lagos, basadas ya sea en modelos numéricos de alta resolución espacial o temporal, así como en tecnología de medición en terreno. En este trabajo se argumenta que el uso de estas herramientas, aplicadas complementariamente para el estudio de lagos en nuestro país, permitiría lograr un adecuado conocimiento del funcionamiento físico y bioquímico de ellos, y eventualmente establecer estrategias de mitigación, remediación y control de contaminación y/o eutrofización. Para ejemplificar esta argumentación se presenta un estudio realizado en el Lago Villarrica, en la IX Región, en el que se complementaron mediciones de terreno de alta resolución de parámetros meteorológicos forzantes y de perfiles de temperatura en la columna de agua, con resultados de simulaciones usando modelos numéricos bidimensionales para resolver tanto planos verticales como horizontales del flujo, así como la estructura térmica del lago y la respuesta de parámetros de calidad de agua y fitoplancton a la variación de la hidrodinámica del lago. Este estudio se centró en la caracterización del efecto que tienen eventos cuasi-periódicos de viento de alta velocidad, conocidos como Puelche, sobre la ecohidrodinámica del lago. Se concluye que este viento inyecta gran cantidad de energía cinética turbulenta al lago, generando circulación, ondas internas y una importante mezcla de la capa superficial de la columna de agua, favoreciendo la ocurrencia de florecimientos de microalgas, particularmente en el periodo final del verano. Debido a este efecto, el Lago Villarrica se presenta más susceptible a problemas de eutrofización que otros lagos en los que vientos como los asociados a eventos Puelche no ocurren.

¹ Estudiante Programa de Doctorado en Fluidodinámica, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
Email: carolina@dgf.uchile.

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - Email: ynino@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la limnología ha estudiado los lagos concentrándose en aspectos principalmente descriptivos. Una práctica común ha consistido en monitorear los cambios estacionales de los parámetros físicos y bioquímicos con el fin de establecer el nivel de trofía de estos sistemas. En la actualidad, modelos ecohidrodinámicos son ampliamente utilizados con fines predictivos, con el objeto de planear estrategias de control o remediación sobre estos cuerpos de agua.

Un modelo eco-hidrodinámico es una herramienta basada en la resolución numérica de ecuaciones que representan cambios temporales y espaciales de variables físicas, químicas y biológicas que caracterizan cuerpos de agua como lagos y embalses. Las variables físicas se relacionan con la termohidrodinámica del sistema y corresponden, por ejemplo, a la estructura vertical de temperatura, densidad, energía cinética turbulenta, velocidades, etc. Las variables químicas y biológicas se relacionan con parámetros de calidad de agua y de productividad biológica, típicamente biomasa de los principales grupos de fitoplancton presentes en el cuerpo de agua.

Lagos monomíticos templados, como la mayoría de los lagos en la zona centro-sur de Chile, se presentan estratificados por temperatura durante el verano, con una termoclina localizada a una profundidad de entre 25 a 60 m (Meruane y Riestra, 2003). Su hidrodinámica, por lo tanto, está relacionada con la respuesta de un fluido estratificado a factores forzantes externos, siendo los flujos atmosféricos y las corrientes de densidad afluentes, las principales fuentes de energía que impulsan estos cuerpos de agua (Hodges et al., 2000). El calentamiento superficial proveniente de la radiación solar es responsable de la estratificación térmica del cuerpo de agua. El viento, por otro lado, es el principal factor forzante que inyecta energía cinética a la columna de agua y de esa forma genera ondas superficiales e internas, así como también corrientes de circulación y turbulencia, y, eventualmente, mezcla vertical en la columna de agua (Stevens and Imberger, 1996).

Los modelos termohidrodinámicos para este tipo de sistemas, deben representar el intercambio de calor y momentum entre la atmósfera y el cuerpo de agua, el momentum introducido por afluentes y efluentes, así como también capturar los efectos boyantes asociados a la estratificación, que limitan la capacidad de mezcla vertical en la columna de agua. La dimensionalidad del modelo, así como su capacidad para representar procesos físicos con distinto nivel de detalle, deben ser compatibles con aquellos que se hayan identificado como los principales mecanismos que determinan el transporte de calor, masa, momentum y energía en el lago.

Resulta obvio que para aplicar un determinado modelo que simule el comportamiento integrado de las variables físicas y bioquímicas en lagos, se debe contar con un conocimiento previo de ellas con suficiente nivel de detalle. Resulta inevitable, con este fin, realizar un programa de monitoreo intensivo, midiendo con alta resolución temporal los principales parámetros representativos de la termohidrodinámica y calidad de aguas del sistema, durante el período más representativo de la ecohidrodinámica, el cual usualmente corresponde a la estación en la cual el lago presenta estratificación térmica (Saggio and Imberger, 1998). Esto permite entender la dinámica global del sistema y así establecer con propiedad el tipo de modelo eco-hidrodinámico

más adecuado para simular esta dinámica. Asimismo, esta información permite validar los resultados de las simulaciones.

Del punto de vista de la operación de modelos termo-hidrodinámicos, se requiere contar con información hidrometeorológica local, es decir, con información relativa a los parámetros forzantes del sistema, con una adecuada resolución temporal en el mismo periodo de monitoreo intensivo indicado en el párrafo anterior. Para realizar simulaciones de largo plazo, i.e., de algunos años de duración, se requiere contar con estaciones meteorológicas permanentes en el lago o su vecindad. Desde este punto de vista, es el viento el parámetro forzante de las condiciones locales al interior del lago y, por lo tanto, es necesario contar con mediciones representativas de esas condiciones.

La operación de un modelo ecohidrodinámico correctamente validado con mediciones de terreno, permite establecer estrategias de mitigación, remediación y control de contaminación y eutrofización en lagos, medidas cuya efectividad se podrá estudiar con monitoreos posteriores, de baja frecuencia, de los parámetros importantes descritos en el modelo. En el caso de sistemas en peligro, la operación conjunta de modelos y monitoreo de alta frecuencia de las variables identificadas como peligrosas permite establecer un sistema de alerta adecuado (e.g., casos de florecimiento explosivo de algas tóxicas).

En este trabajo se discuten algunas herramientas modernas de medición en terreno y simulación numérica para el estudio de sistemas acuáticos ambientales como lagos y embalses. En particular, se describe, como ejemplo, un estudio del lago Villarrica basado en este tipo de metodología.

2. HERRAMIENTAS PARA EL ESTUDIO DE LAGOS

2.1 Caracterización de los principales fenómenos que ocurren en el lago

Una forma práctica de definir la dimensión más adecuada del modelo hidrodinámico a utilizar, consiste en estimar los valores de parámetros adimensionales que cuantifican el efecto del esfuerzo de corte del viento sobre la estructura térmica del lago y el efecto de la rotación terrestre en la celeridad de las ondas internas.

La respuesta de la estructura térmica al viento puede ser parametrizada en base a los valores del número de Wedderburn y el número de lago (Stevens and Imberger, 1996). El número de Wedderburn, se define como: $W = \Delta r g h^2 / (r_0 u_*^2 L)$, donde Δr es la diferencia de densidad entre la capa superficial y la capa debajo de ésta, L es el largo del lago en la dirección del viento, h es la profundidad de la termoclina diurna, que se obtiene del máximo gradiente en un perfil vertical de temperatura. W representa la respuesta de la capa superficial al viento. Cuando $W < 1$ ocurre afloramiento de la termoclina (Monismith (1986), Niño et. al. (2003)). Por otra parte, el número de lago está definido como: $L_N = M_{bc} / t A z_v$, donde M_{bc} es el momento baroclínico en el centro del volumen del lago, t es el esfuerzo de corte del viento, A es el área superficial y z_v es la profundidad del centro del volumen. L_N se calcula a partir de un perfil continuo de temperatura y representa la respuesta de la columna completa al esfuerzo de corte del viento. En el caso de $W < 1$, se identifican 2 tipos de modo de respuesta de la estructura térmica. Cuando

$L_N < 1$, ocurre el modo 1, lo que implica una mezcla importante en toda la columna de agua, en cuyo caso el sistema se puede aproximar a una estratificación en dos capas. En caso contrario, para $L_N > 1$, el modo de respuesta es el modo 2, en este caso se produce una estratificación en tres capas, en donde la primera interfaz, entre la capa superficial y la capa intermedia sube, mientras la segunda interfaz baja o permanece relativamente constante, esto significa que los procesos de mezcla ocurren sólo en la primera capa (Stevens and Imberger, 1996). Los comportamientos asociados a valores bajos de W requieren un análisis más complejo del lago que exige una simulación al menos bidimensional de su hidrodinámica.

El efecto de la rotación terrestre o de Coriolis, por su parte, tiene una influencia en el comportamiento bidimensional del sistema, ya que dicha rotación genera corrientes secundarias que perturban la homogeneidad en las propiedades del lago en el plano horizontal. Para este análisis se utiliza el número de Burger (Patterson et al., 1984), definido como el cociente entre el radio de deformación de Rossby interno, R_f , y la máxima dimensión superficial del lago, L : $S = R_f / L$. El radio de deformación de Rossby interno se define como: $R_f = c_i / f$, donde c_i es la celeridad de la onda interna en la termoclina y f es el parámetro de Coriolis, que depende de la latitud, \mathbf{j} , y la velocidad angular de rotación de la tierra, Ω , dado por $f = 2\Omega \text{sen } \mathbf{j}$. El radio de deformación interna de Rossby, es una medida de la longitud mínima que debe tener un cuerpo de agua para que los efectos de Coriolis sean considerables. Para que se generen corrientes secundarias, S debe ser menor que uno. En este caso, las ondas superficiales e interfaciales son modificadas, generándose dos tipos de ondas distintas, conocidas como las ondas de Kelvin y de Poincaré. Estas son dos respuestas distintas del cuerpo de agua al efecto Coriolis. Las ondas Kelvin están asociadas al litoral y éste coincide con la amplitud máxima de la onda. Las ondas de Poincaré, en cambio, viajan en aguas abiertas sin interferencia de la orilla (Antenucci and Imberger, 2001). En este caso, se requiere un análisis tridimensional de la hidrodinámica del cuerpo de agua.

2.2 Mediciones de terreno en lagos

El objetivo de los estudios en terreno es el de aislar y caracterizar los principales fenómenos que ocurren en el lago, además de contar con los datos para la operación de los modelos numéricos. Generalmente, los datos de entrada de los modelos, se dividen en 4 categorías: i) características físicas y espaciales del cuerpo de agua definidas por la batimetría; ii) variaciones temporales de las condiciones de borde descritas por los datos meteorológicos, de hidrología y de calidad de aguas de los afluentes al lago; iii) condiciones iniciales de las variables de estado del sistema; y iv) parámetros cinéticos e hidrodinámicos que caracterizan los procesos físicos, químicos y biológicos en el lago.

El grado de resolución temporal de los datos de entrada depende del paso del tiempo del modelo numérico, pero también del tipo de condición de borde. Por ejemplo, la resolución de los datos de hidrología: caudales afluentes, efluentes, nivel del lago, precipitación y evaporación, basta que corresponda a promedios diarios. En cambio, es muy importante tener una buena resolución temporal (e.g., a nivel subdiario) de las principales variables atmosféricas: viento, temperatura, humedad y nubosidad o radiación solar.

Cualquier variable que se quiera modelar, se debe medir en el lago, tanto para la inicialización del modelo, como para la posterior calibración de los parámetros cinéticos e hidrodinámicos y la validación de resultados. Generalmente las variables se dividen en dos grupos: i) parámetros físicos e hidrodinámicos: temperatura, transparencia, salinidad, velocidad del flujo; y ii) parámetros bioquímicos: pH, oxígeno disuelto, clorofila a, materia orgánica disuelta y particulada, fosfato, nitrato, nitrito, amonio, carbono y sílice.

Hoy en día, existen instrumentos que permiten obtener un perfil casi continuo de los parámetros físicos, así como de algunos parámetros bioquímicos. En general, se obtienen perfiles de temperatura con un perfilador (CTD) que en su caída mide con alta frecuencia (e.g., 2 Hz) conductividad, temperatura y presión. Estos perfiles corresponden a mediciones locales, en la estación de medición, realizadas a una hora dada del día, y por lo tanto no permiten una resolución temporal de ellos. Esta información puede complementarse con una o varias cadenas de termistores que se dejan instaladas en el lago por días, las que permiten medir la variación temporal de los perfiles verticales de temperatura.

Perfiles de velocidad se miden, eventualmente, para validar los resultados de los modelos, aunque muy a menudo se utiliza la temperatura como parámetro de calibración de la hidrodinámica. Es relativamente común obtener perfiles de intensidades turbulentas del campo de flujo, para estudiar el espectro de la turbulencia y los flujos turbulentos de calor, y así determinar los procesos de mezcla en la columna. Los perfiles de velocidad se obtienen habitualmente con un perfilador en base al efecto Doppler acústico (ADCP), pero en el caso en que se quiera definir la estructura de la turbulencia en la columna se ha recurrido al uso de sistemas basados en la tecnología Láser- Doppler.

Algunos parámetros físicos y bioquímicos (transparencia, pH, OD, clorofila a) se obtienen con una sonda que permite medir un perfil más discreto que con el perfilador CTD, pero que entrega la distribución vertical de los parámetros. Los otros parámetros bioquímicos, se miden típicamente con una botella muestreadora con mensajero, que permite obtener muestras de agua a diferentes profundidades.

Es importante remarcar que el desarrollo de la tecnología de medición permite en la actualidad contar con equipos que son capaces de obtener en corto plazo una representación tridimensional de los principales parámetros termo-hidrodinámicos y bio-químicos en lagos, así como también la transmisión vía satélite o vía comunicación celular de los datos de estaciones multiparamétricas instaladas directamente en estos sistemas.

2.3 Modelos Ecohidrodinámicos

Existe una gran cantidad de modelos eco-hidrodinámicos disponibles, tanto comerciales como de dominio público. Ellos difieren en su dimensionalidad y en la forma como tratan los procesos de transporte turbulento en la columna de agua. A continuación se revisan brevemente algunos de los modelos más conocidos, en orden de dimensionalidad creciente.

Uno de los modelos hidrodinámicos para lagos más populares es el DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model, CWR, 2003). Este es un modelo unidimensional, promediado horizontalmente, que permite predecir la evolución temporal de la estructura térmica del cuerpo

de agua en la vertical. El modelo opera a escala diaria o incluso subdiaria. Los procesos de mezcla y difusión turbulenta de calor en la vertical son determinados por el nivel de energía cinética turbulenta en cada capa en las que se divide el Lago. La mezcla entre capas ocurre cuando el nivel local de energía cinética turbulenta disponible supera el desnivel de energía potencial entre ellas, asociado a la diferencia local de densidades. El nivel de energía cinética turbulenta en cada capa queda a su vez determinado por el esfuerzo de corte ejercido por el viento sobre la superficie libre. Este enfoque, opuesto al planteamiento y resolución directa de ecuaciones diferenciales para modelar procesos de transporte turbulento, permite resolver la estructura térmica de sistemas reales, con discretizaciones espaciales y temporales con bajas exigencias computacionales, lo cual permite modelar la respuesta de la estructura térmica del cuerpo de agua durante escalas de tiempo suficientemente largas (del orden de varios años) como para hacer análisis y predicciones del comportamiento del sistema a mediano e incluso largo plazo.

CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model, CWR, 2003) es un modelo ecológico que ha sido diseñado para ser utilizado conjuntamente con modelos de hidrodinámica, como por ejemplo el DYRESM. El modelo ha sido usado rutinariamente para el análisis de eutrofización, simulación de nutrientes, fitoplancton y zooplancton, aunque también incluye la dinámica del oxígeno, pH, DBO, metales, macroalgas y otros procesos biogeoquímicos .

CE-QUAL-W2 (Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model) es un modelo bidimensional promediado lateralmente (Cole and Wells, 2003). Contiene dos modelos acoplados: uno de hidrodinámica y transporte, y otro de calidad de aguas. En el modelo de hidrodinámica y transporte de CE-QUAL-W2, se resuelven las ecuaciones de flujo y transporte a través del método de diferencias finitas, en donde se introduce un cierre algebraico y empírico para los coeficientes de viscosidad y difusión turbulenta, que toma en cuenta los efectos boyantes asociados a flujos estratificados. El modelo permite predecir la evolución temporal de la estructura térmica del cuerpo de agua sobre un plano vertical. El paso del tiempo en este modelo es de segundos, lo que significa contar con una alta resolución temporal de los datos de entrada. En el modelo de calidad de aguas, CE-QUAL-W2 cuenta con las herramientas necesarias para modelar varios grupos de algas. El modelo distingue los siguientes procesos que influyen en la degradación de los elementos principales: Asimilación del NO_3 , NH_4 y PO_4 por parte de los productores primarios, liberación de nutrientes inorgánicos por parte de los productores primarios, nitrificación, desnitrificación, sedimentación de las partículas orgánicas, mineralización, resuspensión de los nutrientes desde los sedimentos y flujo de nutrientes desde los sedimentos, principalmente de PO_4 y NH_4 . Para determinar las variaciones del oxígeno disuelto (OD), se consideran los procesos de intercambio de OD en la interfaz aire-agua, consumo de OD en los sedimentos, consumo y producción de OD por parte de los microorganismos y uso de OD en el proceso de nitrificación.

Existen muchos modelos bidimensionales promediados verticalmente (e.g., MIKE 21, DELFT2D, RMA2/4, AQUASEA, etc.). Estos modelos, en general, resuelven desacopladamente las ecuaciones de flujo y transporte con diversas aproximaciones. Los módulos de flujo simulan variaciones temporales del nivel de agua y velocidades, las que son calculadas en una grilla de discretización especial, según la información de batimetría, rugosidad del fondo, campo de vientos y condiciones de borde como caudales afluentes y efluentes. Los módulos de advección-dispersión simulan el transporte de una sustancia en el entorno, bajo la influencia del campo de

velocidades calculado en el modulo de flujo y los procesos dispersivos. La sustancias transportadas pueden ser conservativas o no.

ELCOM (Estuary and Lake Computer Model, CWR, 2005), es un modelo hidrodinámico tridimensional, que ha sido aplicado para investigar ondas internas en lagos (Romero et.al., 2004). Este modelo está basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds, en donde se introduce un cierre algebraico y empírico para los coeficientes de viscosidad y difusión turbulenta. Utiliza un esquema de diferencias finitas semi-implícito y puede ser acoplado al modelo de calidad de aguas CAEDYM. Los datos de entrada, descritos por los datos meteorológicos, de hidrología y de calidad de aguas de los afluentes al lago, como las condiciones iniciales de las variables de estado del sistema, deben ser de alta resolución temporal y espacial. Otros modelos eco-hidrodinámicos tridimensionales que han sido aplicados al estudio de lagos son MIKE 3, DELFT3D, POM (Princeton Ocean Model).

3. APLICACION AL LAGO VILLARRICA

El lago Villarrica está ubicado en la IX Región de Chile a los pies de la cordillera de los Andes ($39^{\circ} 18' S$, $72^{\circ} 05' W$) a una altura de 230 msnm. Tiene una superficie de 176 km^2 y una profundidad máxima de 167 m (Fig. 1). Se clasifica como un lago mesotrófico, monomítico temperado. En esta localidad se presentan episodios de vientos fuertes del Este, tipo Foehn, con una duración de 1 a 3 días y una frecuencia de 3 a 6 episodios en la estación de verano, cuando el lago presenta una marcada estratificación térmica. Conocido localmente como viento Puelche, estos vientos fuerzan una mezcla importante en la columna de agua, aflorando en la superficie aguas más frías y usualmente con parámetros de calidad más deficientes.

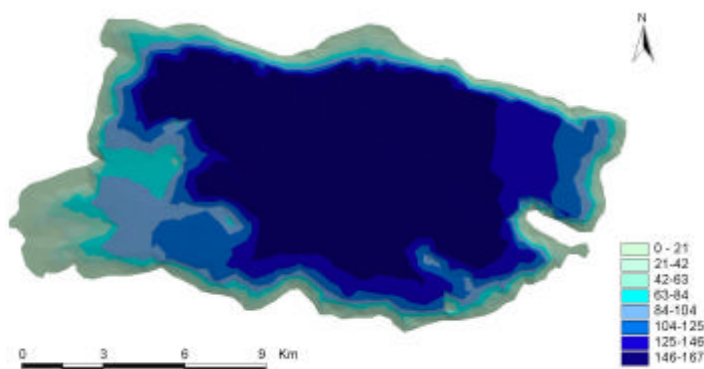


Figura 1 Batimetría del lago Villarrica (IGM, 1998).

En este estudio se realiza un análisis integrado, a través de mediciones en terreno y simulaciones numéricas, de las variables físicas y bioquímicas del lago Villarrica durante episodios de viento Puelche, con el objeto de lograr una visión general del efecto que tiene este viento sobre lago. El análisis se realiza entre Diciembre de 2003 y Abril de 2004, período en el que se instaló una estación meteorológica automática en la ciudad de Pucón, ubicada en la ribera Este del lago, y se realizaron campañas para medir perfiles de temperatura y parámetros de calidad de aguas.

3.1 Campaña a terreno

Se instaló una estación meteorológica automática en el lago durante el período de Diciembre de 2003 hasta Abril de 2004, en donde se midió datos promedio, sobre intervalos de 30 minutos, de viento, temperatura y humedad relativa. Durante este período se observaron tres episodios de viento Puelche, entre el 3 y 6 de Febrero, el 19 y 21 de Febrero, y entre el 10 y 11 de Marzo. La característica principal en todos ellos fue la dirección desde el Este y altas intensidades de viento ($v_{\max} = 13 \text{ m/s}$), observándose además una condición anormalmente cálida ($T_{\max} = 35^\circ \text{ C}$) y un brusco descenso en la humedad relativa hasta 10%.

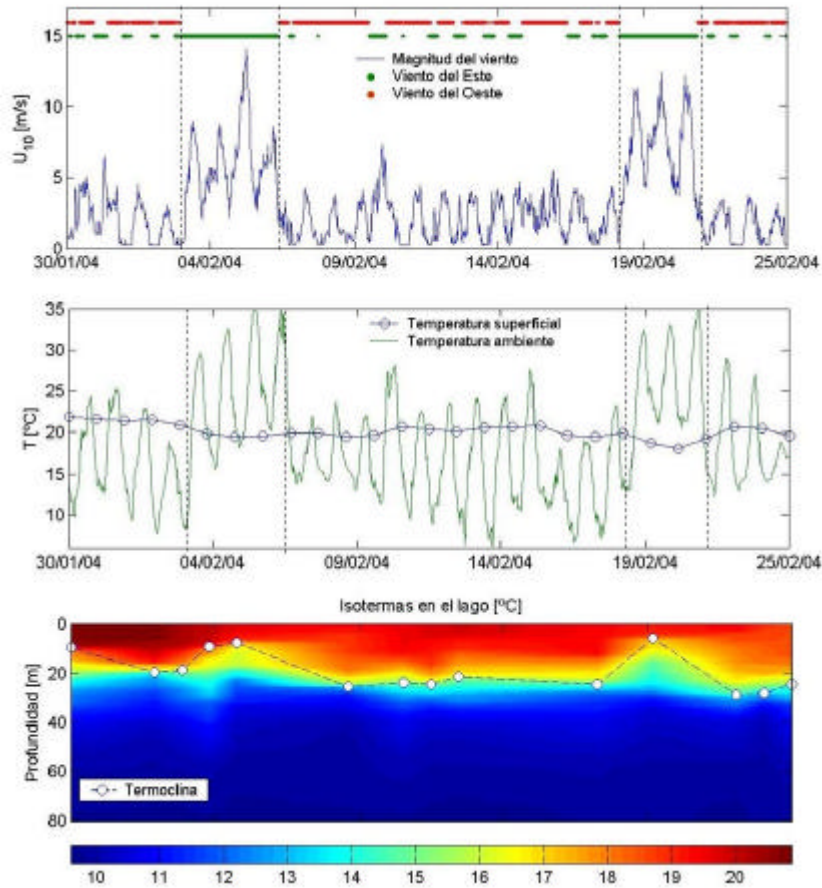


Figura 2 Viento a 10 metros de altura (interpolación logarítmica del viento en superficie), temperatura ambiente y superficial e isothermas en el lago (interpolación lineal entre los 14 perfiles medidos).

Además, se midió 14 perfiles verticales de temperatura distribuidos a lo largo de Febrero de 2004 (Figura 2), junto con mediciones de nitrógeno y fósforo al inicio y fin de este mes. Estos datos complementan la información de calidad de aguas del lago y afluentes recolectada por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA) en las 4 estaciones del año. Valores de temperatura superficial en el lago, caudales afluentes y efluentes, precipitación y evaporación, son medidos en forma diaria por la DGA.

En la Figura 2, se observa que en los períodos de viento fuerte la interfaz entre la capa superficial y la capa intermedia sube, mientras la segunda interfaz permanece casi invariante. El 5 de Febrero ($W=0.4$ y $L_N=2$) y el 19 de Febrero ($W=0.2$ y $L_N=1.8$) ocurre afloramiento de la termoclina en Pucón y el modo de respuesta es un modo 2. Esto significa que la hidrodinámica del lago debe ser modelada con un modelo bidimensional.

El parámetro de Burger, obtenido con los perfiles de temperatura, es menor a 1 ($S=0.22$), lo que indica que sobre el lago existe efecto de la rotación terrestre y ya no sería válido un modelo bidimensional de la hidrodinámica del lago. Sin embargo, la resolución temporal y espacial de los datos registrados no permite calibrar y validar un modelo tridimensional, por lo que se estudió la hidrodinámica del lago con dos modelos bidimensionales, CE-QUAL-W2, que reproduce el flujo y transporte vertical, y AQUASEA, que reproduce el flujo y transporte horizontal.

3.2 Modelación Hidrodinámica

Los resultados de la calibración hidrodinámica, usando la temperatura como parámetro de control, se muestran en la Figura 3. Se observa un buen ajuste, manteniendo la misma tendencia de la temperatura superficial y la estructura vertical de temperatura.

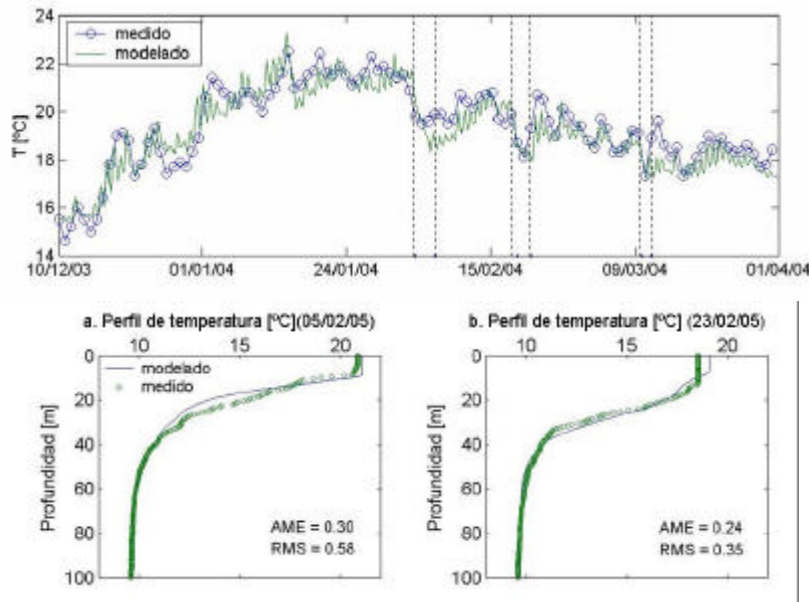


Figura 3 Temperatura superficial y vertical, medida y modelada en el lago.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la temperatura del lago durante el primer episodio de Puelche. La termoclina oscila con un período de aproximadamente un día. La temperatura en superficie bajó en 2°C , aproximadamente, y la termoclina se profundiza en 15 metros luego de finalizado el episodio. Configuraciones parecidas se obtienen en los otros 2 eventos registrados.

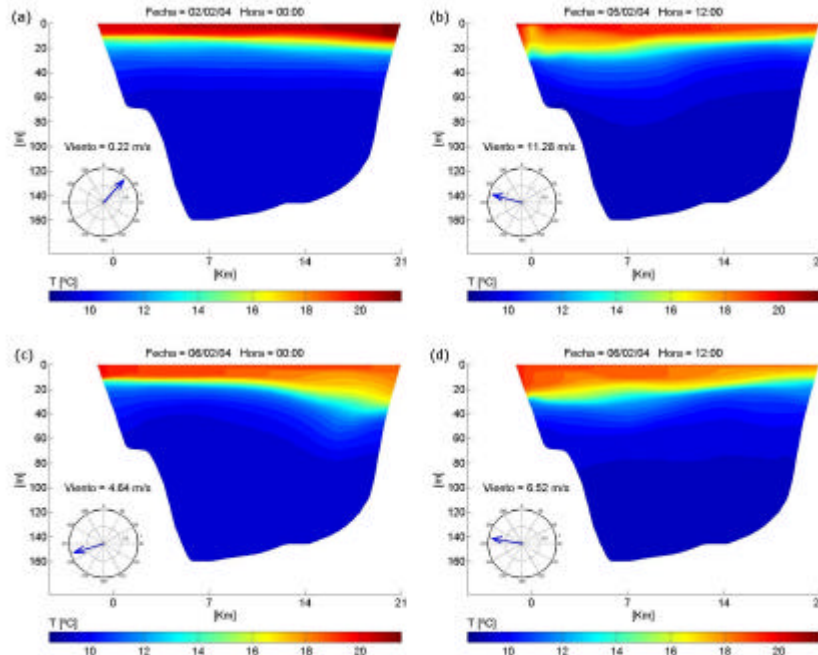


Figura 4 Evolución de la temperatura del lago durante el primer episodio de Puelche.

En la Figura 5, se muestra la evolución de la magnitud y dirección del flujo en el lago. Se observa que las velocidades son principalmente horizontales y cuando comienza el viento las velocidades en superficie aumentan y en el sector de Villarrica se forma una corriente fuerte en dirección hacia Pucón que alcanza 0,5 m/s a una profundidad cercana a la termoclina. Configuraciones parecidas se obtienen en los otros eventos de viento Puelche.

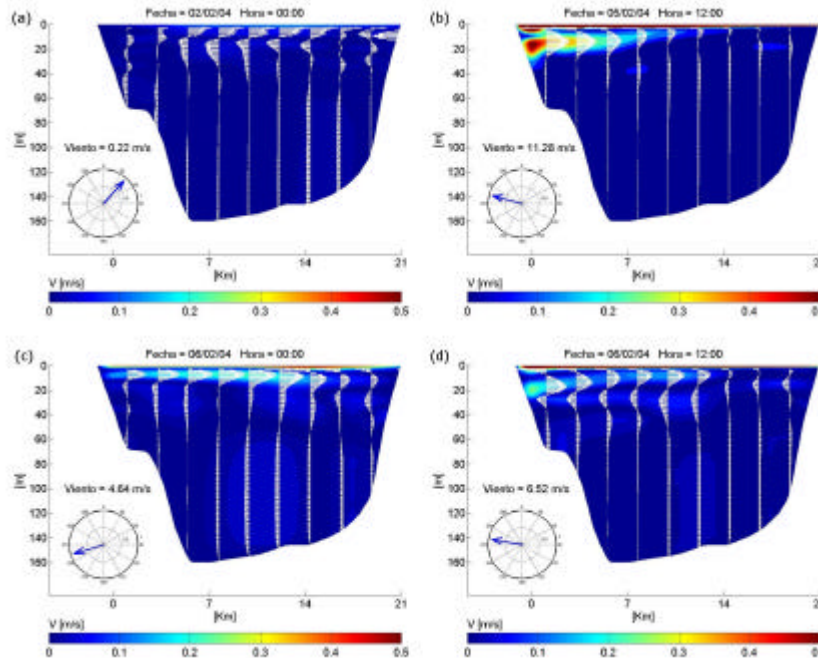


Figura 5 Evolución de la magnitud y dirección del flujo vertical en el lago, durante el primer episodio de Puelche.

Para la simulación del flujo y transporte horizontal, no se tienen datos de velocidad para validar el modelo, por lo que AQUASEA se utilizó como herramienta para describir en forma cualitativa las corrientes que se producen en el lago.

En la Figura 6 se muestran los resultados del modelo. En condiciones normales, el viento sopla desde el Oeste, forzando a las corrientes del centro del lago a ir en la misma dirección, mientras por continuidad de masa, el agua se devuelve por los bordes del lago hacia Villarrica. Cuando se establece el Puelche, en el centro del lago las corrientes giran en sentido horario hacia Villarrica (Figura 6a), mientras en las costas Sur y Norte se forma una corriente fuerte hacia Pucón. Luego de finalizado el evento (Figura 6b), las corrientes lentamente giran en sentido horario, por efecto Coriolis, formándose una circulación general en este sentido. Las corrientes del borde Norte y Sur son transportadas en sentido ciclónico, siguiendo la costa, por una onda de aproximadamente 14 días de período (tiempo que demora en dar la vuelta al lago), mientras van perdiendo intensidad (Figuras 6c, d, e y f).

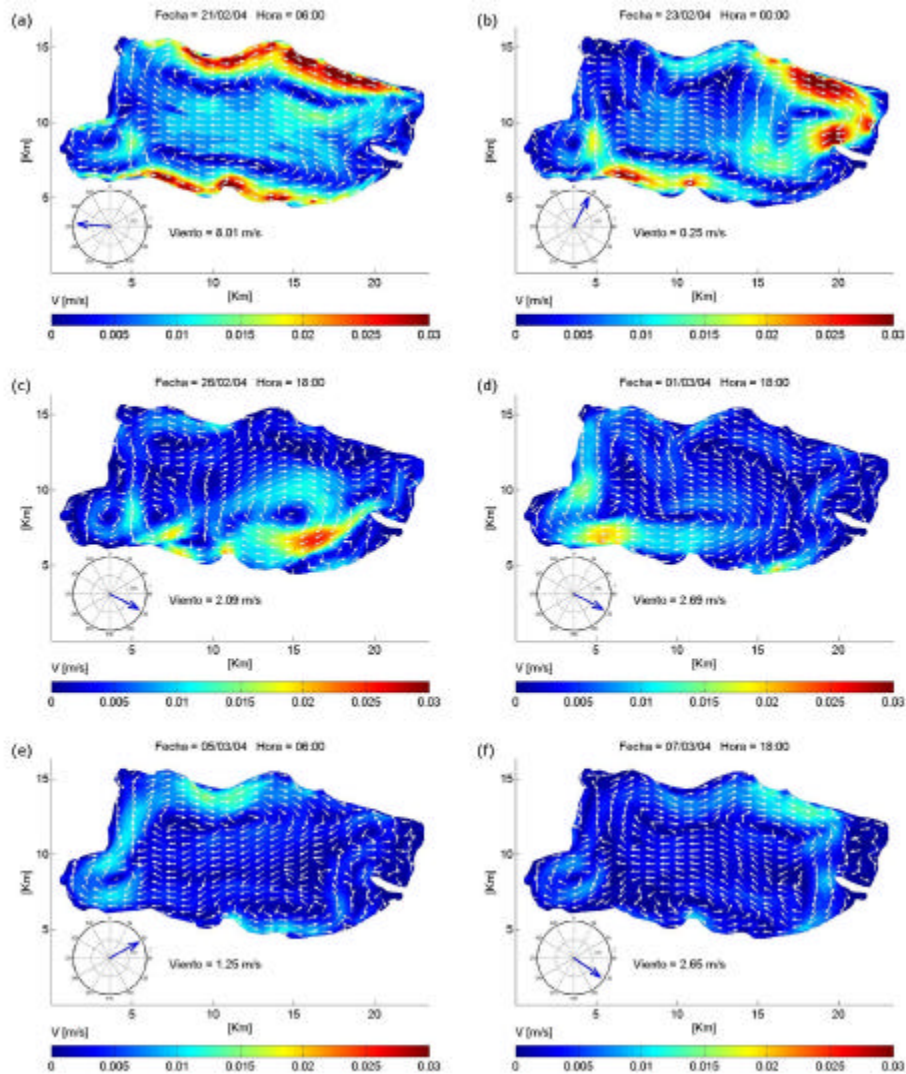


Figura 6 Evolución de la magnitud y dirección del flujo horizontal en el lago, durante el primer episodio de Puelche.

3.3 Modelación Ecología Acuática

Una vez, calibrado y validado el modelo de flujo y transporte vertical de CE-QUAL-W2, es interesante acoplar el módulo de calidad de aguas, de modo de observar la respuesta del fitoplancton al Puelche.

En la Figura 7 se presentan los resultados de la calibración de los parámetros químicos en el lago. Si bien, no se tienen suficientes datos para validar, los resultados se pueden considerar satisfactorios, dentro de los órdenes de magnitud esperados.

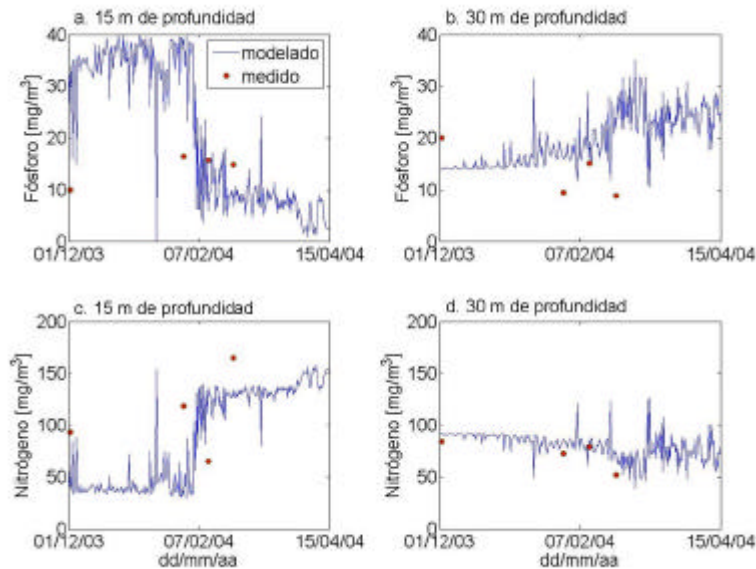


Figura 7 Fósforo (PO_4) y Nitrógeno modelado y medido a 15 y 30 m de profundidad

En la Figura 8 se presentan los resultados de la simulación, en donde las líneas segmentadas representan los eventos de viento Puelche. En Diciembre, los nutrientes aportados por el afluente principal son transportados por una corriente de densidad intermedia en la termoclina, producto de la menor temperatura de éste respecto a la temperatura de la capa superficial del lago ($12^{\circ}C$). Esto se traduce en un aumento en la concentración de fósforo en la capa intermedia, y una disminución en la capa superficial dada por la presencia de algas (Figura 8d). El nitrógeno, en cambio, aumenta en la capa superficial por la presencia de algas (Figura 8c). En Enero la máxima concentración de algas se encuentra en los 15 metros de profundidad aproximadamente (Figura 8e), dado que se ha agotado el fósforo en superficie. Esto, sumado a las condiciones de luz bajo los 15 metros, que limita el crecimiento de algas aunque exista fósforo en exceso, llevaría a un continuo descenso en la concentración de la biomasa fitoplanctónica en el verano. Sin embargo, los episodios de viento Puelche ayudaron a aumentar la concentración de fósforo en superficie, generándose un nuevo florecimiento masivo de algas luego de finalizado cada uno de los episodios de Puelche (Figura 8e).

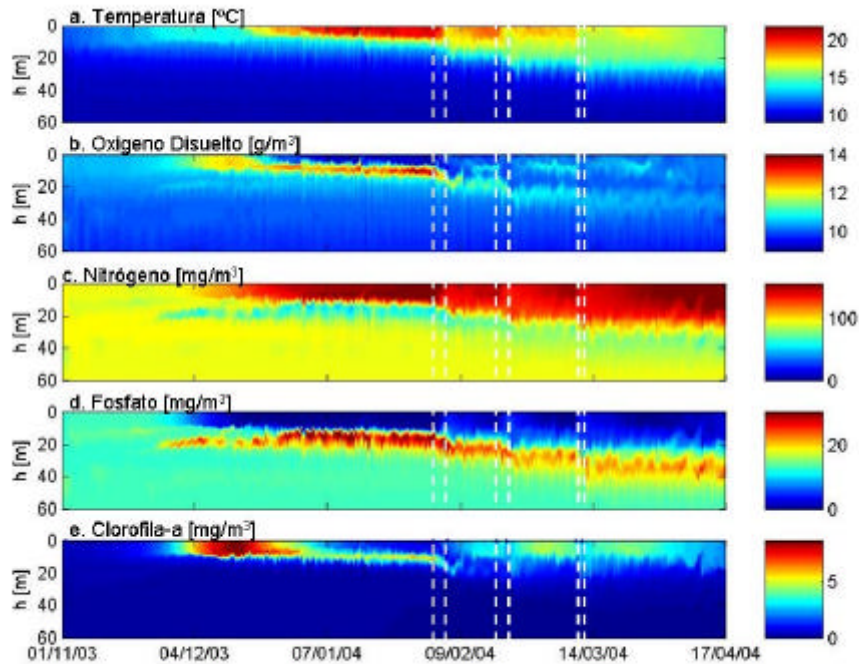


Figura 8 Parámetros bioquímicos simulados en el centro del lago.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de las mediciones en terreno y simulaciones numéricas durante el verano de 2004 en el Lago Villarrica, mostraron que la presencia del flujo del Este anormalmente intenso sobre el lago, fuerza una mezcla importante en la columna de agua, que se traduce en un cambio en la estructura térmica del lago, en el transporte vertical de nutrientes a partir de la termoclina y en el transporte desde las zonas litorales hacia las aguas libres, que consecuentemente favorecería el aumento en la productividad del lago. Este efecto es particularmente importante, cuando el Puelche ocurre al final de la estación de verano, época en que la productividad en el lago tendería a decaer naturalmente en ausencia de este fenómeno meteorológico.

Si bien las simulaciones numéricas han mostrado que el Lago Villarrica es más vulnerable a la eutrofización con respecto a otros lagos no afectados por vientos fuertes, es necesario validar la dinámica del fósforo y el fitoplancton con mediciones de estos parámetros durante los episodios de Puelche. Sería interesante, entonces, realizar una simulación tridimensional del lago, dado que la respuesta del campo de flujo al viento es tanto horizontal como vertical. En este caso, se requeriría tener una base de datos con mayor resolución temporal y espacial de los parámetros físicos y bioquímicos, para que el modelo sea debidamente calibrado y validado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen: el apoyo del Proyecto Fondecyt 1040494; la beca de doctorado otorgada por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile a la primera autora; a los Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica de la Universidad de Chile; y la ayuda de las siguientes instituciones: Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas y la Armada de Chile.

REFERENCIAS

Antenucci, J., and Imberger, J. 2001. Energetics of long internal gravity waves in large lakes. *Limnology and Oceanography*, 46(7), 1760–1773.

Cole, T. and Wells, S. 2003. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.1. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University.

CWR, 2003. Dynamic reservoir simulation model and computational aquatic ecosystem dynamics model. DYRESM-CEDYM Science Manual. Center for Water Research, The University of Western Australia.

Hodges, B. R., Imberger, J., Saggio, A and Winters, K. B. 2000. Modeling basin-scale internal waves in stratified lake. *Limnology and Oceanography*, 45(7), 1603-1620.

Meruane, C. 2005. El efecto del viento Puelche sobre la hidrodinámica y calidad de aguas del lago Villarrica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Meruane, C. y Riestra, F. 2003. Caracterización de la estructura térmica de los lagos de la red mínima de control de la Dirección General de Aguas. XII Taller Nacional de Limnología. Concepción, Chile.

Monismith, G. 1986. An experimental study of upwelling response of stratified reservoir to surface shear stress. *Fluid Mech.*, 171, 407–439.

Niño, Y., Caballero, R., and Reyes, L. 2003. Mixing and interface dynamics in a two-layer stratified fluid due to surface shear stress. *Hydraulic Research*, 41, 609–621.

Patterson, J. C., Hambling, P. F., and Imberger, J. 1984. Classification and dynamic simulation of the vertical density structure of lakes. *Limnology and Oceanography*, 29, 845–861.

Romero, J. R., Antenucci, J.P. and Imberger, J. 2004. One- and three-dimensional biogeochemical simulations of two differing reservoirs. *Ecological Modelling*, 174, 143–160.

Saggio, A., and Imberger, J. 1998. Internal wave weather in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*, 43(8), 1780-1795.

Stevens, C., and Imberger, J. 1996. The initial response of stratified lake to a surface shear stress. *Fluid Mech.*, 312, 39–66.