

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

**IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE LAGOS DEL MODELO VARIABLE  
INFILTRATION CAPACITY (VIC) EN CUENCAS DEL SUR DE CHILE:  
OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN UN CONTEXTO DE ESCASO  
MONITOREO**

**JAVIERA CÁCERES HERNÁNDEZ<sup>1</sup>**  
**EDUARDO MUÑOZ CASTRO<sup>2</sup>**  
**YOHANN VIDELA G.<sup>3</sup>**  
**XIMENA VARGAS<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Los lagos participan en la hidrología de las cuencas retardando su escorrentía de salida y generando importantes flujos de salida por evaporación, razón por la cual es de suma importancia no omitir ni simplificar su presencia en el estudio de cuencas. El presente estudio se centra en el uso del modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC) para incluir lagos en la modelación de cuencas. En específico, se trabajan los lagos Ranco y Pirihueico, con los que se evalúa el desempeño predictivo del modelo en la estimación del hidrograma de salida y su sensibilidad a parámetros de lagos. La modelación se aborda de manera secuencial dividida en etapas para luego comparar los resultados con el caudal observado por las estaciones fluviométricas aguas abajo del lago mediante el índice KGE. El modelo muestra un mejor desempeño cuando se suponen condiciones para una baja escorrentía. Se encuentra además que el número de nodos que componen el perfil del lago no representa una decisión metodológica relevante. Se sugiere seguir investigando para mejorar la precisión y la utilidad práctica del módulo de lagos de VIC, además de aumentar el monitoreo de las características morfológicas de los lagos de todo el país para tener un panorama realista de la disponibilidad del recurso hídrico y de los efectos del cambio climático en estos.

---

<sup>1</sup> Profesional Ambiental, Centro de Ecología Aplicada (CEA) - email: jcaceres@cea.cl

<sup>2</sup> Hidrólogo, Montgomery & Associates Consultores – email: emunoz@elmontgomery.cl

<sup>3</sup> Secretario Académico, Fac. de Cs. Sociales., UAHC – email: yohann.videla@uacademia.cl

<sup>4</sup> Profesora Asociada, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: xvargas@uchile.cl

## **1 INTRODUCCIÓN**

Los lagos y sus zonas de inundación tienen un efecto a nivel local sobre el clima y la hidrología. Por un lado, moderan las temperaturas extremas de la región donde se emplazan durante todo el año (Scott y Huff, 1996), y por otro, debido a su capacidad de almacenamiento, controlan aspectos del balance hídrico de la cuenca atenuando y retrasando la escorrentía de salida y aumentando la evaporación (Bowling y Lettenmaier, 2009).

Los lagos también son especialmente sensibles a las condiciones climáticas e hidrológicas, y pueden ser más o menos sensibles a estas dependiendo de sus características morfológicas. Por esta razón, los cambios observados en lagos del mundo difieren dependiendo de la región; en regiones con tendencia al aumento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema debido al cambio climático se predice un aumento en el nivel de agua de lagos mientras que en regiones con tendencia a la disminución de precipitación se espera una disminución del nivel de agua de lagos y de la humedad de los suelos (zonas de inundación). En general para todas las regiones, se observan grandes fluctuaciones en el nivel de agua y un aumento en la temperatura superficial debido al cambio climático (IPCC, 2022). En Chile, de acuerdo con el estudio de Aranda et al. (2021), los lagos presentan un aumento en la temperatura superficial de alrededor de 0,01 °C/año en el periodo 2000-2016. Debido al irremplazable rol de los lagos en la hidrología de una cuenca, omitir o simplificar su presencia en el estudio de estas puede derivar en resultados sesgados o poco realistas.

En el presente estudio se busca modelar cuencas hidrográficas controladas con presencia de lagos mediante el modelo hidrológico VIC, modelo capaz de representar el efecto tardío en la escorrentía de los lagos y su evaporación. En específico, este trabajo se centra en el estudio de los lagos Ranco y Pirihueico y sus respectivas cuencas. Se espera estimar el hidrograma de salida de estas cuencas y validar el desempeño predictivo del modelo mediante la comparación del hidrograma con los datos fluviométricos observados. Finalmente, se sensibilizan parámetros referidos al módulo de lagos de VIC a modo de sugerir estrategias que permitan extender la metodología propuesta a cuencas con presencia de lagos con escasa o nula información fluviométrica.

## **2 ZONA DE ESTUDIO Y DATOS**

Los lagos Ranco y Pirihueico se localizan en la región de los Ríos en las cuencas del Río Valdivia y Río Bueno respectivamente (Figura 1, mapa B). El lago Pirihueico se ubica en un valle cordillerano a 603 msnm y forma parte de la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico, cuya estación fluviométrica se ubica justo en el punto de desagüe del lago. Es alimentado por el río Huahum, el que cuenta con una estación fluviométrica algunos kilómetros aguas arriba del lago. Por otra parte, el lago Ranco se emplaza en las faldas de la cordillera de los Andes a 72 msnm, en la cuenca Río Bueno en Bueno. Sus principales afluentes son los ríos Caunahue, Calcurrupe y Nilahue que cuentan con control fluviométrico cerca de su desembocadura. Tiene su control fluviométrico aproximadamente a 43 km aguas abajo del punto de desagüe del lago (Figura 1, mapa A), particularidad que produce diferencias metodológicas con el lago Pirihueico.

Ambas cuencas tienen una precipitación promedio anual muy similar de alrededor de 2900 (mm/año), de la que un 35% cae en el trimestre de invierno. En cuanto a la temperatura media, se alcanza la máxima en el mes de febrero con un valor de 15°C aprox. y la mínima en julio de 1,5°C para la cuenca del lago Pihueico y de 4°C para la cuenca del lago Ranco. Finalmente, la variación estacional del caudal indica que las cuencas siguen un régimen pluvial de inviernos caudalosos y veranos con escasez.

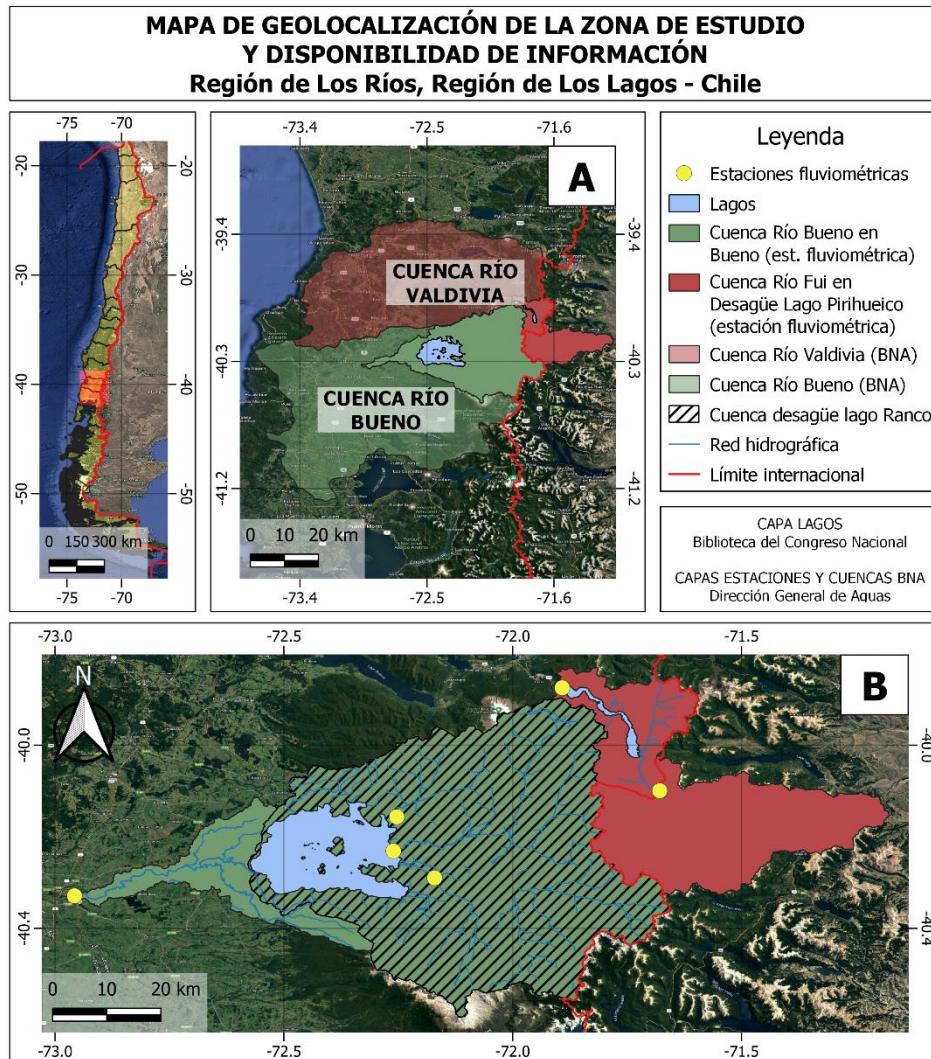


Figura 1: Mapa de geocalización de la zona de estudio (A) y ubicación de estaciones fluviométricas (B).

### 3 ENFOQUE METODOLÓGICO

La Figura 2 esquematiza la metodología seguida en VIC: forzantes y parámetros de entrada, modelación en VIC por etapas y evaluación del modelo, lo que será descrito en las secciones siguientes. Los datos empleados para configurar la modelación (e.g., batimetría digitalizada, forzantes, modelo VIC, etc.), se encuentran disponibles para su libre acceso a través del repositorio Zenodo (Cáceres et al., 2023).

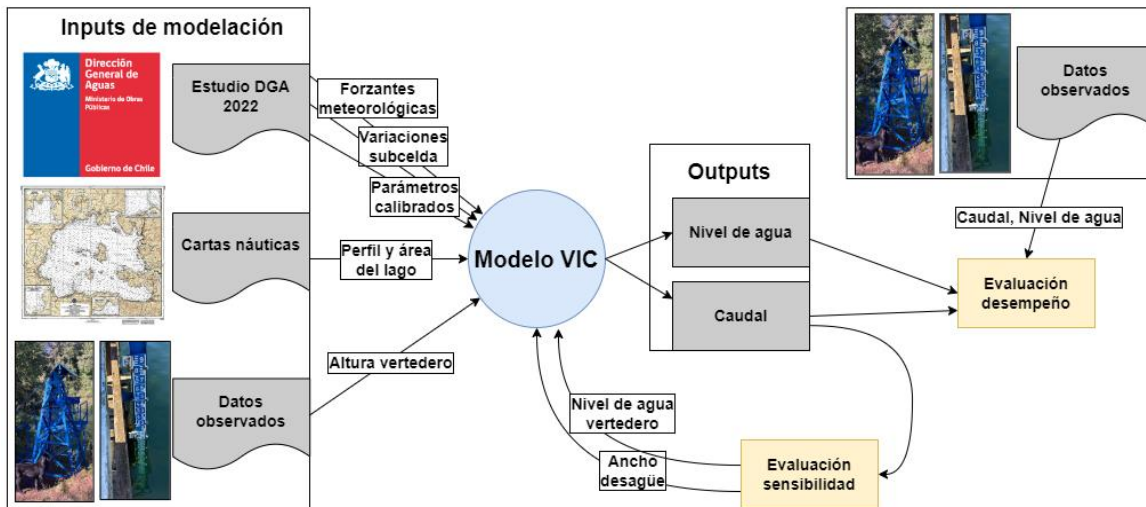


Figura 2: Esquema metodológico seguido para la configuración y evaluación del modelo VIC.

### 3.1 Forzantes para la modelación hidrológica

Se utilizan las forzantes meteorológicas empleadas en DGA (2022), las cuales se obtienen mediante la combinación del producto grillado CR2MET v2.5 (Boisier et al., 2018) y las distribuciones subdiarias de ERA5 (Hersbach et al., 2020) para obtener las series trihorarias de precipitación (mm/3h) y temperatura (°C). De este mismo estudio se usan las variaciones a nivel subcelda de las capas de suelo y vegetación y el valor de los parámetros calibrados, correspondiente a parámetros de caracterización de las capas de suelo y de la precipitación; cabe destacar que estos fueron calibrados sin considerar la presencia de lagos.

### 3.2 Modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC)

#### 3.2.1 Descripción del modelo hidrológico

El modelo VIC es un modelo hidrológico formulado por Liang et al. en 1994 que se caracteriza por ser de macroescala y semidistribuido, en otras palabras, divide la cuenca en una grilla de celdas mayores a un kilómetro y realiza un balance hídrico y energético para cada una de ellas. VIC permite incorporar para cada celda la variabilidad en la vegetación y en las capas de suelo. La escorrentía superficial (o *runoff*) se estima según la curva de infiltración variable (de ahí su nombre) con lo que considera la relación entre la capacidad de infiltración del suelo y la distribución espacial de la humedad (Bowling y Lettenmaier, 2009).

#### 3.2.2 Descripción del módulo de lagos

El efecto de lagos y zonas de inundación<sup>5</sup> en la modelación de cuencas en VIC viene dado por los estudios de Cherkauer y Lettenmaier (1999) y Bowling y Lettenmaier (2009). La Figura 3 muestra el algoritmo que sigue VIC para calcular el caudal de salida, el que puede dividirse en cuatro pasos (Gao et al., 2010). Primero, se calcula la evaporación del lago en

<sup>5</sup> Porción de suelo que está cubiertas por agua dependiendo la estación del año (Zoltai, 1979).

cada tiempo a partir de la solución de las ecuaciones de transporte de calor, siendo la ecuación de balance de energía en la superficie del lago una de ellas. Luego, se realiza un balance de masa o agua, que parte con el ingreso del caudal de entrada al píxel de lago así como de la escorrentía proveniente de áreas con vegetación o zonas de inundación dentro de la misma celda (Figura 3, paso II). Se obtiene un nuevo nivel de agua a partir del cual se calcula el exceso de escorrentía (paso III), el que es liberado (paso IV).

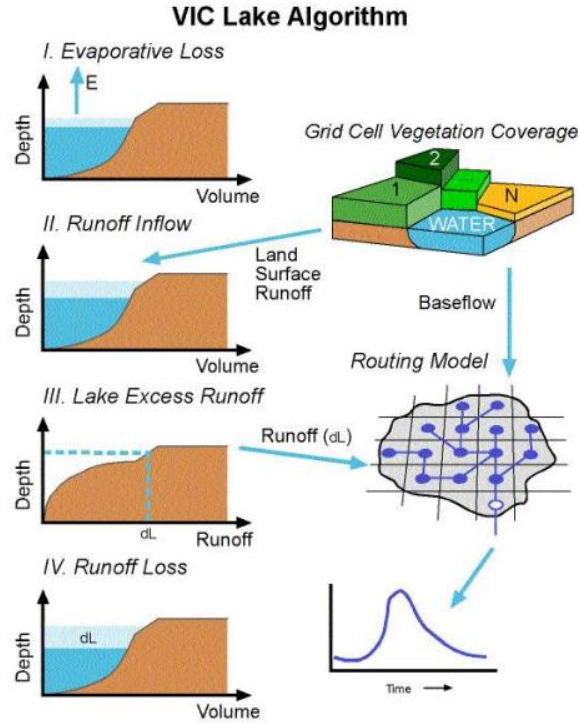


Figura 3: Esquema del algoritmo de VIC para lagos. I: Evaporación del lago se calcula con balance de energía. II: Caudal entra al lago desde la superficie terrestre con vegetación. III: Caudal de salida del lago se calcula con el nuevo escenario. IV: El escenario es recalculado. Obtenida de Gao et al., (2010).

El balance de agua del lago está representado por la siguiente ecuación:

$$\Delta S = P + (D_{in}) + [E_w f_{lake} + E_v(1 - f_{lake})] - R_{lake} - B_{lake} \quad (3.1)$$

Donde  $\Delta S$  es el cambio en el almacenamiento de agua del suelo, lago, hielo y nieve,  $P$  la precipitación,  $E_w$  y  $E_v$  la evaporación del lago y de la vegetación de las zonas de inundación respectivamente,  $D_{in}$  el caudal (escorrentía más flujo base) que entra al lago desde fuera del sistema lago-zonas de inundación,  $R_{lake}$  la escorrentía del lago, y  $B_{lake}$  el flujo base del lago. A continuación, se muestran las ecuaciones que usa VIC para el cálculo del flujo base  $Q$ , y la escorrentía del lago  $R_{lake}$ .

$$Q = c_d b \sqrt{g} \left[ \frac{2}{3} (z - z_{min})^{3/2} \right] \quad (3.2)$$

$$R_{lake}(z) = \begin{cases} 0 & z \leq z_{min} \\ \frac{4}{3} \frac{C_d \sqrt{g \pi A(z)} (z - z_{min})^{3/2} dt f}{A(z)} & z > z_{min}' \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde  $c_d$  (m) es el coeficiente de descarga,  $b$  (m) el ancho del flujo,  $g$  ( $m/s^2$ ) la aceleración de gravedad,  $z$  la profundidad actual del lago, y  $z_{min}$  (m) la elevación en el desagüe. Por su parte,  $dt$  es el tiempo de cada paso en segundos,  $A(z)$  ( $m^2$ ) la superficie del lago a profundidad  $z$ , y el término  $2[\pi A(z)]$  corresponde a la superficie del lago asumiendo una forma circular, esto con el objetivo de que el ancho de desagüe esté en proporción con el área mediante la fracción  $f = \text{ancho desagüe} / \text{área circunferencial del lago}$ .

Entre los parámetros del lago que requiere el modelo se encuentran el nivel de agua de vertedero ( $h_{vert}$ ), el nivel de agua y área superficial inicial, el ancho de desagüe, el perfil del lago (pares de puntos de nivel de agua y fracción de área cubierta) y el n° de nodos (n° de pares del perfil del lago). También, requiere la serie de caudal de entrada como forzante.

### 3.2.3 Etapas de modelación

Para efectos de la modelación hidrológica se procede según etapas, las cuales dependen del lago en cuestión. Para ambos lagos se comienza modelando toda la cuenca sin considerar la presencia del lago (Figura 4, Etapa 1), para luego modelar sólo el lago considerándolo como un único píxel (Etapa 2). Al tratarse de un único píxel, las forzantes meteorológicas y las características de las capas de suelo de los píxeles que componen el lago son espacialmente promediadas. El caudal de entrada se calcula como la suma de los caudales de los píxeles aportantes. El caudal de salida del lago  $Q_{out\ lago}$  se estima usando las salidas del módulo como:

$$Q_{out\ lago} = (r_o + bf + V_{lago}) * f_{lago} \quad (3.4)$$

Donde  $V_{lago}$  es el volumen de salida del lago y  $f_{lago}$  el área de lago como fracción del área de la celda. Para el lago Pirihueico  $Q_{out\ lago}$  es igual al caudal de salida de la cuenca. Sólo en el caso del lago Ranco, se calcula el caudal de salida de la cuenca sumando el caudal de salida del lago y el caudal producido por los píxeles aguas abajo (Figura 4, Etapa 3).

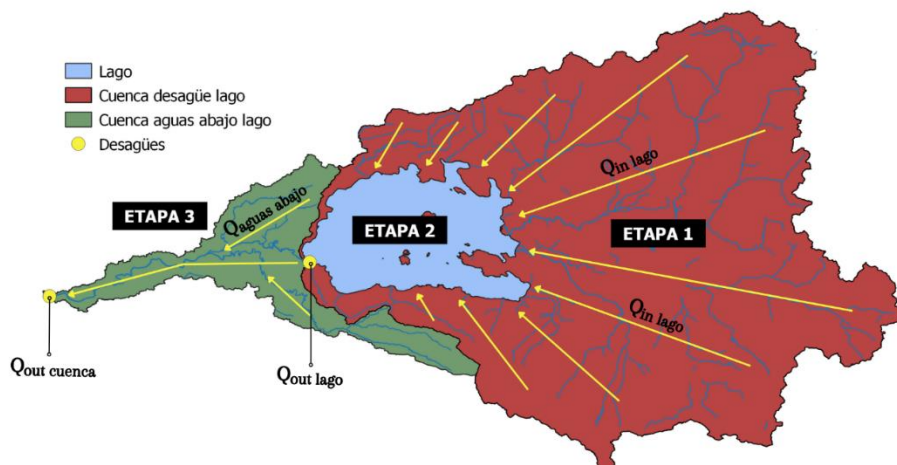


Figura 4: Esquema metodológico de la modelación de lagos por etapas en VIC, lago Ranco.

### 3.3 Configuración del módulo de lagos

Ambos lagos se modelan para perfiles de lago de 5, 10, 20, 25 y 50 nodos los que fueron obtenidos de la digitalización de las cartas náuticas del SHOA (Figura 2). El nivel de agua inicial de los lagos se configura como su profundidad máxima: 144 y 200 m para Pirihueico y Ranco, respectivamente. El parámetro  $h_{vert}$  se configura como el valor obtenido del ajuste logarítmico lineal realizado a la altura y caudal instantáneos observados, igual a 143,94 y 199,99 m, respectivamente. El ancho de desagüe es de 81,2 m para Pirihueico y 69,9 m para Ranco, obtenido de Google Earth Pro. Finalmente, el rango temporal de la modelación se configura de 1981-01-01 a 2020-04-30 y el paso de tiempo de ejecución es trihorario.

### 3.4 Evaluación del desempeño de la modelación y sensibilidad

El desempeño del modelo se evalúa en primera instancia analizando la bondad de ajuste del caudal simulado a la salida de la cuenca con respecto al caudal observado por la estación fluviométrica de salida mediante el índice estadístico *Kling-Gupta efficiency* o KGE, que está definido a partir de la descomposición de los indicadores MSE (*mean squared error*) y NSE (*Nash-Scutcliffe efficiency*) en sus tres componentes: la correlación lineal  $r$ , la tendencia  $\beta$  y la variabilidad  $\alpha$ . La sensibilidad del hidrograma de salida se evalúa variando los parámetros  $h_{vert}$  y ancho de desagüe en su rango de error amplificado por 5. Se genera una muestra aleatoria de largo 500 para cada uno y se realizan 500 simulaciones usando como perfil de lago aquel que muestre mejor desempeño en la simulación inicial. Finalmente, se usa la configuración  $h_{vert}$ -ancho de desagüe que genera un mejor desempeño para comparar el nivel de agua simulado con las observaciones limnimétricas registradas por la DGA relativizadas a la cota del limnómetro.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Evaluación de la modelación hidrológica

A partir de simulaciones secuenciales diferenciadas sólo por la discretización del perfil de profundidad (n° de nodos), se obtienen los valores de KGE resumidos en la Tabla 1. Se incluyen también los valores de los tres componentes del KGE.

Tabla 1: Valores de KGE y sus componentes para cada perfil de lago. En gris el perfil con mejor KGE.

Lago	N° nodos	KGE	$r$	$\beta$	$\alpha$	KGE DGA (2022)
Pirihueico	5	0,585	0,617	1,139	1,079	0,85
	10	0,573	0,618	1,163	1,097	
	20	0,572	0,618	1,165	1,099	
	25	0,569	0,618	1,171	1,104	
	50	0,570	0,618	1,169	1,102	
Ranco	5	0,360	0,612	0,929	0,496	0,69
	10	0,359	0,612	0,927	0,494	
	20	0,363	0,613	0,931	0,498	
	25	0,363	0,613	0,932	0,499	
	50	0,366	0,613	0,936	0,502	

Para la cuenca en que se anida el lago Pirihueico se obtiene un desempeño aceptable, mientras que la del lago Ranco un desempeño deficiente. Considerando que el lago Ranco representa casi un 11% de la superficie de su cuenca vs. el 2% que ocupa el lago Pirihueico en la suya, el desempeño aceptable del modelo en este último puede deberse a que los parámetros utilizados se emplazan en una condición muy similar a la que fueron calibrados.

El número de nodos produce poca variación en el KGE y sus componentes. A esto se suma que no existe una relación entre las variaciones de los lagos (e.g. aumenta/disminuye valor del KGE con el número de nodos), por lo que no es posible concluir al respecto. Así, el número de nodos es poco determinante en la modelación de lagos en VIC y, de acuerdo con el modelo, la morfología de un lago no afecta mayormente en su balance másico.

La inclusión del lago en la modelación produce una baja de rendimiento en los parámetros de modelación hidrológica calibrados sin lagos, puesto que los valores de KGE resultantes son menores con respecto a los obtenidos por DGA (2022). Se deduce que los parámetros calibrados por dicho estudio reducen su rendimiento con la presencia de lago, lo que implica a su vez que el efecto del lago en la hidrología de la cuenca (retardo en la escorrentía por almacenamiento, altos valores de evaporación, etc.) fue compensado en la modelación del estudio por los parámetros calibrados resultando potencialmente en valores sesgados y poco realistas. Queda propuesto calibrar los parámetros de modelación considerando la presencia de lagos, observándose un potencial de mejora en esta materia.

## 4.2 Sensibilización de los parámetros de lago

Los resultados de la sensibilización del nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe de los lagos son interpolados para construir un mapa de calor y contornos de la distribución del valor que toma el KGE. Para el lago Pirihueico (Figura 1) el KGE toma valores desde 0,52 a 0,61. El máximo valor de KGE es 0,60 para  $h_{\text{vert}} = 137,590$  m y ancho = 104,331 m. Para el lago Ranco el rango de variación del KGE es mayor, con un mínimo de 0,29 y un máximo de 0,43. La simulación que maximiza el KGE tiene una configuración de  $h_{\text{vert}} = 205,9$  m y ancho = 94,5 m. En ambos lagos el análisis de incertidumbre expande los límites del KGE tanto hacia valores mejores como peores.

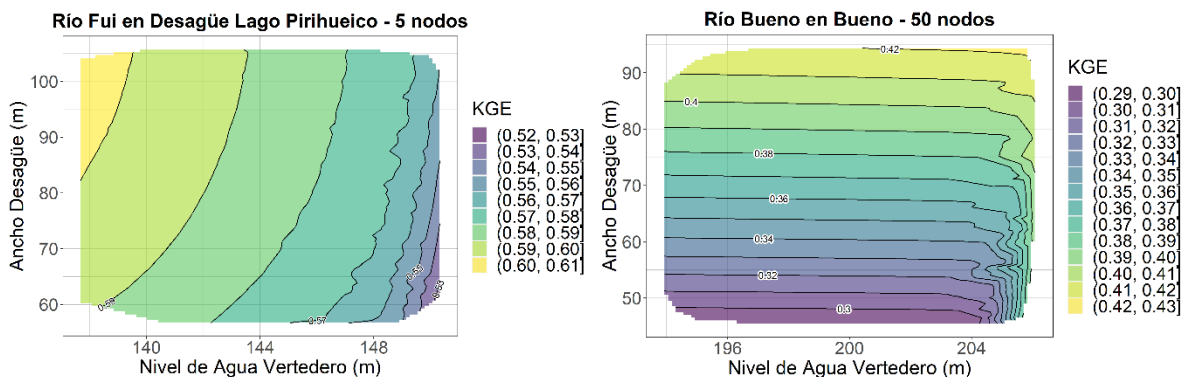


Figura 5: Gráficos de variación de KGE según parámetros de lago en el periodo 2003-2019 para Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico (izquierda) y 2002-2019 para Río Bueno en Bueno (derecha).

Se observa que para el lago Pirihueico el modelo es más sensible al parámetro  $h_{\text{vert}}$  que al ancho de salida, dado que las líneas de contorno del KGE tienen una pendiente muy alta. Estas líneas se muestran menos erráticas con el aumento del índice. El lago Ranco muestra resultados opuestos: la variación de  $h_{\text{vert}}$  juega un papel de pequeño a nulo en la sensibilidad del modelo hasta los  $h_{\text{vert}} = 205$  m aproximadamente, desde donde se puede decir que el modelo funciona mejor para valores altos de  $h_{\text{vert}}$ , es decir, para cuando existe menos margen de flujo o carga del vertedero, es decir, cuando se suponen condiciones para una baja escorrentía (ecuaciones (3.2) y (3.3)). Queda propuesto observar la distribución del KGE en la cuenca del lago Ranco a mayores valores del nivel de agua de vertedero.

Considerando los mapas de calor de ambos lagos, el único patrón o similitud que puede extraerse es que un aumento del ancho de desagüe se relaciona con el aumento del KGE, pero este aumento está limitado por la hidrografía del lugar.

### 4.3 Análisis de variaciones en lagos

Las Figura 6 y Figura 7 muestran los gráficos de serie de tiempo y variación estacional de las series simuladas y observadas de nivel de agua para el lago Pirihueico (cota lago: 603 msnm) y Ranco (cota lago: 72 msnm) respectivamente.

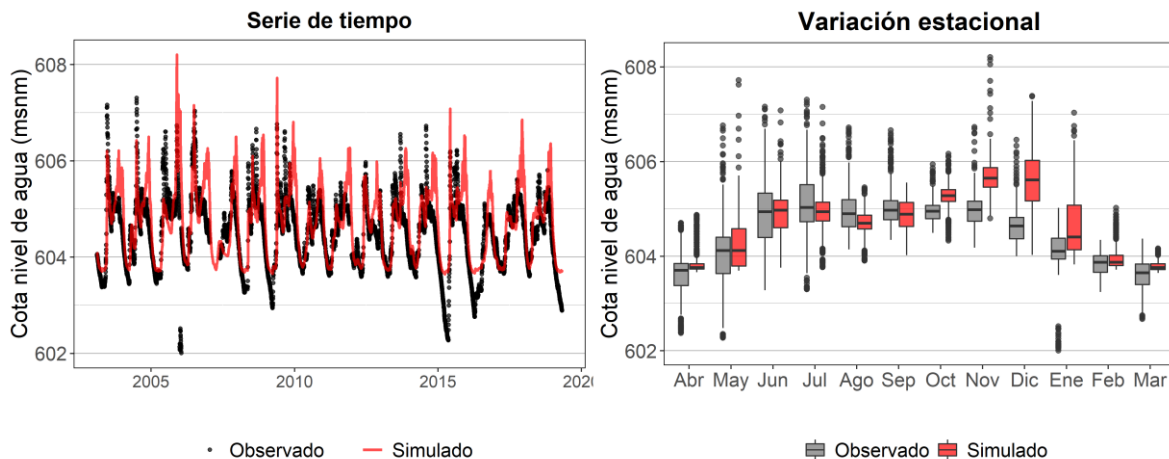


Figura 6: Serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Pirihueico en el periodo 2003-2019.

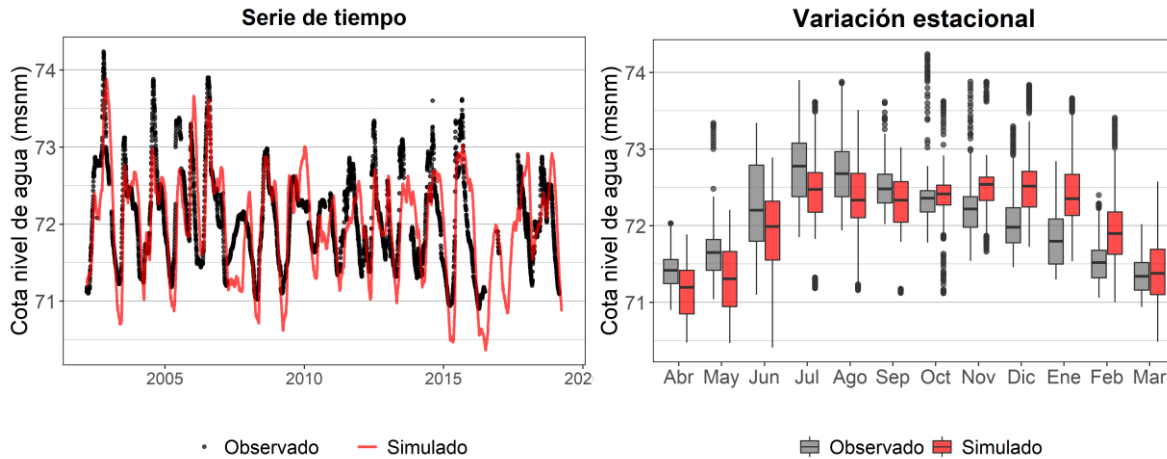


Figura 7: Serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Ranco en el periodo 2002-2019.

El modelo es capaz de representar adecuadamente la variación del nivel de agua de los lagos, lo cual se cuantifica en un KGE de 0,73 para el lago Pirihueico y 0,72 para el lago Ranco. Para el lago Pirihueico, el modelo presenta un menor desempeño en los meses de deshielo, sobreestimando el nivel de agua, en tanto para el lago Ranco se subestiman los niveles extremos ocurridos en invierno y verano y se observa una representación errónea de la estacionalidad. Se desprende también que el modelo disminuye su desempeño al computar los niveles de agua bajos, sobreestimándolos para el lago Pirihueico y subestimándolos para el lago Ranco.

Relativizando los niveles de agua de vertedero del lago Ranco mostrados en la Figura 5, se tiene que un  $h_{vert} = 205$  m se encuentra a 69 msnm, altura que se encuentra por debajo del rango de variación del nivel de agua según la Figura 7, que tiene una cota mínima de 70 msnm aprox. Se deduce que  $h_{vert}$  debiese tomar valores dentro del rango de variación del nivel de agua del lago (o uno cercano al nivel de agua máximo) para sensibilizar al modelo, e incluso, para mejorar su desempeño.

## 5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

En el presente estudio se usa el modelo VIC y su componente de lagos para modelar las cuencas de los lagos Ranco y Pirihueico. El caudal simulado en la salida de las cuencas es comparado con el caudal observado por las estaciones fluviométricas mediante el índice KGE con el objetivo de evaluar el desempeño predictivo del modelo, para luego evaluar su sensibilidad a los parámetros del lago nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe.

Se obtiene un desempeño de bajo a aceptable en la modelación de los lagos y, con esto, los parámetros calibrados sin considerar la presencia de lagos reducen en gran medida su rendimiento. Se deduce que el efecto de los lagos en la hidrología de las cuencas es compensado por los parámetros y, por tanto, los resultados obtenidos pueden no representar la hidrología de la cuenca correctamente. Se propone como trabajo a futuro realizar la calibración de los parámetros de modelación hidrológica incluyendo el módulo de lagos para simular los caudales de acuerdo con los procesos que ocurren en el sistema. Por otra parte, el

modelo logra un buen desempeño en la representación de la variación del nivel de agua de los lagos.

El análisis de sensibilidad permite expandir el espectro de desempeño del modelo y reconocer la influencia de los parámetros sensibilizados en la estimación del hidrograma de salida. Para el lago Ranco, el modelo presenta un mejor funcionamiento cuando se suponen condiciones para una baja escorrentía y se recomienda que el nivel de agua de vertedero adopte valores dentro del rango de variación del nivel de agua del lago. Por otra parte, el aumento del ancho de desagüe se relaciona con el aumento del KGE, pero su potencial está limitado por la hidrografía del lugar.

La metodología seguida permitió concluir sobre la utilidad en la precisión del cálculo de ciertos parámetros del módulo de lagos. El número de nodos es poco determinante en la modelación de lagos en VIC, por tanto, el perfil de un lago no tiene mayor influencia en el balance energético e hídrico de acuerdo con este modelo. El modelo es sensible al valor del nivel de agua de vertedero que puede fijarse unos metros bajo el nivel de agua máximo del lago, sin embargo, no es posible validar esta metodología sin un estadístico de ajuste de bondad (i.e. sin datos observados de caudal) por lo cual se propone buscar una relación empírica entre los niveles de agua de vertedero de lagos controlados que sea extrapolable a otros lagos.

La metodología puede extenderse a otros lagos con control aguas abajo (20 lagos en Chile). El principal desafío recae en aquellos lagos sin control en su salida, por lo que se espera contar a futuro con mayores fuentes de monitoreo in situ y/o remoto, estatal y/o ciudadano, del nivel de agua para todos los lagos del país, promoviendo así su inclusión no sólo en este modelo, sino que en todo tipo de estudios hídricos. Además, el rol crucial que juegan los lagos y su alta sensibilidad a las condiciones climáticas e hidrológicas hace fundamental considerar su presencia en el estudio de cuencas, para así obtener un panorama realista de la disponibilidad del recurso hídrico y de los efectos del cambio climático en este.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile por el financiamiento otorgado para la visita a terreno realizada en el marco del trabajo de título del que se desprende el presente estudio (Cáceres, J., 2023).

## **REFERENCIAS**

Aranda, A.C., D. Rivera-Ruiz, L. Rodríguez-López, P. Pedreros, J.L. Arumí-Ribera, L. Morales-Salinas, G. Fuentes-Jaque, R. Urrutia. 2021. Evidence of Climate Change Based on Lake Surface Temperature Trends in South Central Chile. *Remote Sens*, 13(22), 4535.

Boisier, J. P., C. Álvarez-Garretón, J. Cepeda, A. Osses, N. Vásquez, R. Rondanelli. 2018. CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 19739.

Bowling, L., y D. Lettenmaier. 2009. Modeling the Effects of Lakes and Wetlands on the Water Balance of Arctic Environments. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 276-295.

Cáceres, J. 2023. Incertidumbre en la estimación del hidrograma de salida en lagos usando productos satelitales. Trabajo de Título, Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194524>.

Cáceres, J., E. Muñoz-Castro, y X. Vargas. 2023. A database for VIC lake modelling in two testbed catchments in Southern Chile. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7864766>.

Cherkauer, K.A., y D.P. Lettenmaier. 1999. Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D16), 19599-19610.

DGA. 2022. Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. SIT N° 524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Gao, H., Q. Tang, X. Shi, C. Zhu, T. Bohn, F. Su, J. Sheffield, M. Pan, D. Lettenmaier. (2010). Chapter 6 Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. Algorithm Theoretical Basis Document, Version 1.2.

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Liang, X., D.P. Lettenmaier, E.F. Wood, S.J. Burges. 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415-14428.

Scott, R.W., y F. Huff. 1996. Impacts of the Great Lakes on regional climate conditions. *Journal of Great Lakes Research*, 22(4), 845-863.

Zoltai, S.C. 1980. An outline of the wetland regions of Canada. En Proc. De un taller de humedales canadienses: reunión de la Natl. Wetl. Work. Group, Saskatoon, Saskat., 11-13 de junio de 1979/comp., ed. CDA Rubec, FC Pollett= *Compte-rendu d'un atelier sur les terres humides du Canada*. [Ottawa]: Environment Canada, Lands Directorate, c1980.