



## II CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

### “CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE RAPEL, Y POLUCIÓN TÉRMICA Y ALTERACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO RAPEL EN FUNCIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA”

ALBERTO DE LA FUENTE.<sup>1</sup>

ETIENNE MOTYKA.<sup>2</sup>

JANNIK HAAS.<sup>3</sup>

#### RESUMEN EXTENDIDO

La operación hidropeaking o de punta de centrales hidroeléctricas de embalse se caracteriza por importantes cambios del caudal efluente, los que son necesarios para compensar tanto variaciones de la demanda eléctrica como variaciones en la producción de energía de fuentes altamente fluctuantes como la energía eólica o solar. Producto de lo anterior, el río aguas abajo de centrales hidroeléctricas presenta importantes alteraciones hidrológicas que deterioran la calidad de ecosistema acuático. Una de las medidas existentes para mitigar los impactos negativos de la operación hidropeaking sobre los río es mediante la imposición de restricciones a la operación de la central, por ejemplo restringir los mínimos caudales efluentes (caudal ecológico) o acotar los máximos valores de la tasa de cambio de los caudales efluentes (rampas). La imposición de caudales ecológicos es la medida de mitigación que se ha implementado en la mayoría de las centrales hidroeléctricas (de embalse) en Chile. Sin embargo, aun cuando la operación hidropeaking es muy perjudicial para el río aguas debajo de las centrales, estudios recientes han mostrado que el hidropeaking está asociada a mayor mezcla vertical de la columna de agua del embalse [1,2], y que la calidad del agua de embalses no es neutral a la operación de centrales hidroeléctricas [3]. El objetivo de este trabajo es discutir los resultados de 2,5 años modelación de la hidrodinámica y calidad del agua del embalse Rapel, para 3 diferentes escenarios hidrológicos y 2 escenarios de operación de la central. En total se analizan 6 modelaciones.

Para lo anterior, se usó el modelo hidrodinámico y de calidad del agua ELCOM-CAEDYM que ha sido previamente calibrado y validado para el embalse Rapel [1–3], y que se basa en una grilla de elementos rectangulares del 50×50×2m. El modelo es forzado con estadística meteorológica obtenida del reanálisis atmosférico ERA-Interim [2], mientras que para

---

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil/ Universidad de Chile, [aldelafu@ing.uchile.cl](mailto:aldelafu@ing.uchile.cl)

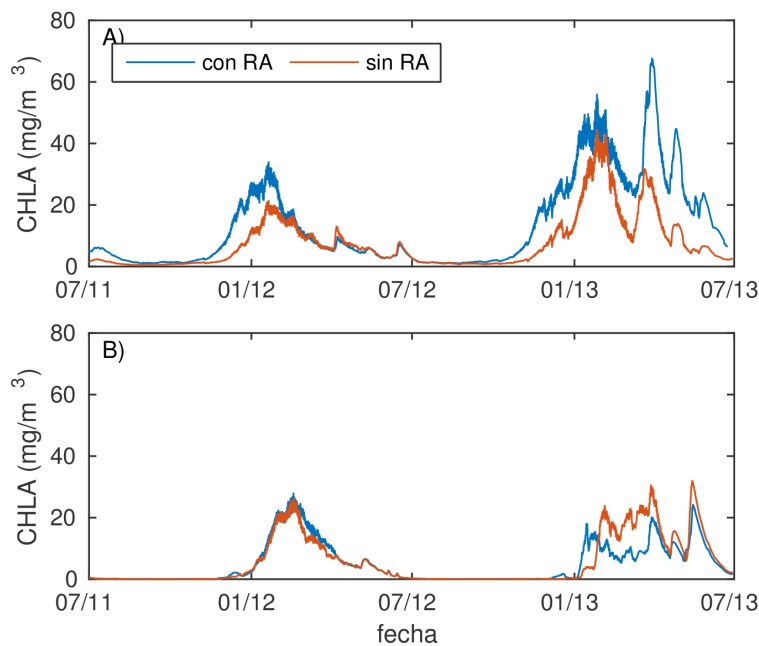
<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil/ Universidad de Chile

<sup>3</sup>Department of Stochastic Simulation and Safety Research for Hydrosystems (IWS/SC Simtech), University of Stuttgart.



definir los diferentes escenarios de operación de la Central se utilizó el modelo MIP-UC [4] que emula la operación del sistema eléctrico de Chile, en función de minimizar los costos de operación del sistema [5,6]. Por tres condiciones hidrológicas (seca, normal y húmeda, con probabilidad de excedencia del 90%, 50% y 30%, respectivamente), dos diferentes escenarios de operación de la central son evaluadas: sin restricciones ambientales (sin RA), y con restricciones ambientales (con RA, combinación de caudal mínimo, 20% del caudal medio mensual; y rampa del 6% del caudal medio mensual).

El análisis de los resultados se centra en la evolución temporal de Clorofila (máximo de Clorofila A) en el embalse (Figura 1) que muestra tanto la variación estacional esperada, pero también una dependencia de este valor con el escenario de operación de la central. La Figura 2 compara la mediana de la concentración de clorofila a con el tiempo de retención, la alteración intradiaria térmica (medido con el índice de termopeaking [8]), la mezcla del embalse inducida por los caudales efluentes (medida con el número de Richardson [1] y la variabilidad hidrológica (cuantificada a través del índice de Richard-Baker [7]). Ejemplos de los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 1 y 2.

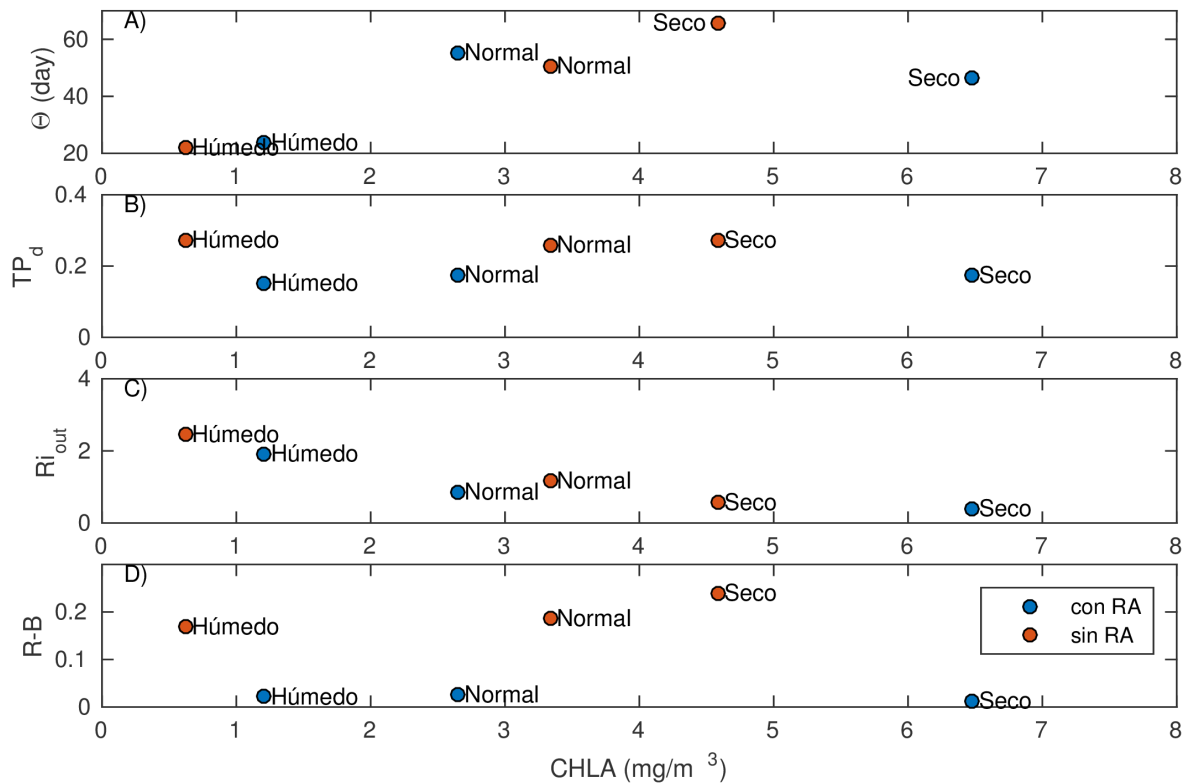


**Figura 1.** A) and B) series de tiempo del máximo de concentración de clorofila a (CHLA) modelada cerca del muro, para condiciones hidrológicas seca (panel A) y húmedas (panel B) para los escenarios con y sin restricciones ambientales (RA).

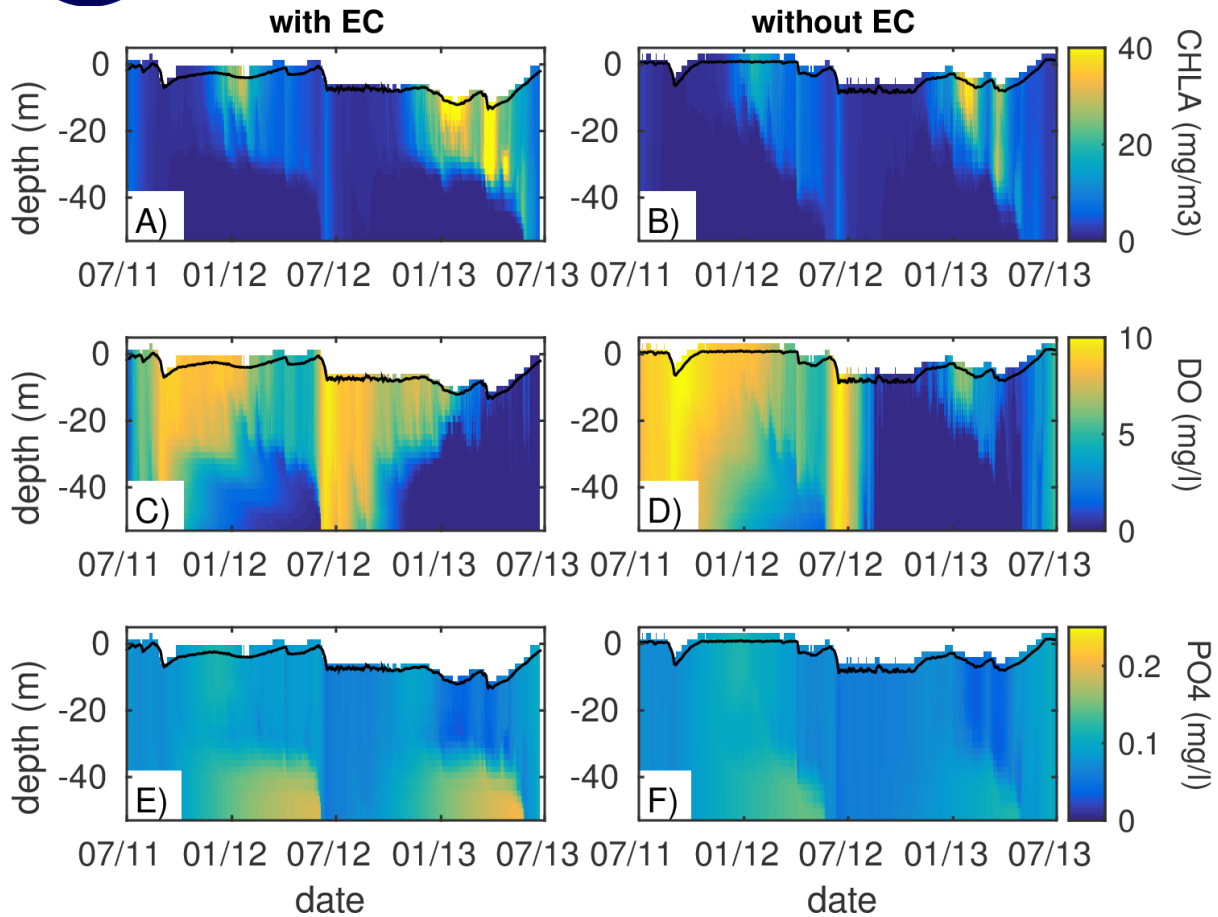
Se concluye que evitar la operación hidrokeping de la central hidroeléctrica Rapel podría empeorar el ya estresado ecosistema del embalse (comparar resultados de escenario sin y con RA para hidrología seca). Este resultado, sumado a los mayores costos de operación del sistema eléctrico, abre la necesidad de evaluar otras alternativas de mitigación (del impacto ambiental sobre el río de aguas abajo) para el caso de Rapel, por ejemplo embalses de regulación aguas abajo de las turbinas. Los resultados también sugieren que distintos modos de operación de la central podrían usarse estratégicamente para inducir mezclas en



el embalse, y así mejorar la calidad de sus aguas. Esta estrategia, junto a una solución adecuada para cuidar el río aguas abajo, parece ser promisorio y novedoso para el manejo de calidad de agua, y es objeto de estudios futuros.



**Figura 2.** Comparación entre mediana de la clorofila a simulada cerca del embalse y A) el tiempo de retención del embalse, B) índice de variabilidad térmica del efluente, C) Número de Richardson del efluente, D) índice de Richard Baker (R-B).



**Figure 3:** Paneles de la izquierda están asociados a modelación para hidrología seca con restricciones ambientales (RA), y paneles de la izquierda para hidrología seca sin restricciones ambientales. Paneles A, B) perfiles de la concentración de clorofila A (CHLA) en el muro en función del tiempo. C, D) Oxígeno disuelto. E, F) Fosfato.

### Agradecimientos

El primer autor agradece el financiamiento de Fondecyt a través del proyecto número 1181222

### Referencias

1. Ibarra, G.; de la Fuente, A.; Contreras, M. Effects of hydropeaking on the hydrodynamics of a stratified reservoir: the Rapel Reservoir case study. *J. Hydraul. Res.* **2015**, *53*, 760–772, doi:10.1080/00221686.2015.1060271.
2. Carpentier, D.; Haas, J.; Olivares, M. A.; de la Fuente, A. Modeling the Multi-Seasonal Link between the Hydrodynamics of a Reservoir and Its Hydropower Plant Operation. *Water* **2017**, *9*, 367, doi:10.3390/w9060367.
3. Rossel, V.; de la Fuente, A. Assessing the link between environmental flow, hydropeaking operation and water quality of reservoirs. *Ecol. Eng.* **2015**, *85*, 26–38,



doi:10.1016/j.ecoleng.2015.09.074.

4. Benavides, C. Herramienta computacional para modelo de predespacho económico de carga (Unit commitment tool), Universidad de Chile, 2008.
5. Haas, J.; Olivares, M. A.; Palma-Behnke, R. Grid-wide subdaily hydrologic alteration under massive wind power penetration in Chile. *J. Environ. Manage.* **2015**, *154*, 183–189, doi:10.1016/j.jenvman.2015.02.017.
6. Olivares, M. A.; Haas, J.; Palma-Behnke, R.; Benavides, C. A framework to identify Pareto-efficient subdaily environmental flow constraints on hydropower reservoirs using a grid-wide power dispatch model. *Water Resour. Res.* **2015**, *51*, 3664–3680, doi:10.1002/2014WR016215.
7. Baker, D. B.; Richards, R. P.; Loftus, T. T.; Kramer, J. W. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2004**, *40*, 503–522, doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.
8. Vanzo, D.; Siviglia, A.; Carolli, M.; Zolezzi, G. Characterization of sub-daily thermal regime in alpine rivers: Quantification of alterations induced by hydropeaking. *Hydrol. Process.* **2016**, *30*, 1052–1070, doi:10.1002/hyp.10682.