

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DIAGNÓSTICO DEL IMPACTO DE LA OPERACIÓN DE CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS DE PASADA EN EL USO DE AGUA PARA RIEGO EN LA
CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA, CHILE**

GONZALO URZÚA Ó.¹
MARCELO OLIVARES A.²

RESUMEN

La alteración hidrológica en un río a causa de la operación de centrales hidroeléctricas de embalse es un tema ampliamente estudiado, mientras que la documentación de la interferencia operacional asociada a centrales de pasada es escasa y reciente. En el presente artículo se expone un diagnóstico de la alteración hidrológica en el río Tinguiririca como consecuencia de la operación de las centrales hidroeléctricas de pasada La Confluencia y La Higuera, las cuales cuentan con reservorios que permiten realizar una regulación intradiaria de los afluentes para aprovechar las horas del día de mayor demanda eléctrica. A fin de diagnosticar el impacto de la operación de las centrales en la disponibilidad y continuidad de los caudales aguas abajo, se analizan los caudales turbinados por ambas centrales y aquellos registrados por la estación río Tinguiririca Bajo Los Briones, en base a diversos indicadores del régimen hidrológico a escala intradiaria. Las métricas evidencian un aumento significativo de la alteración hidrológica intradiaria desde el inicio de operación de las centrales, particularmente fuera de la temporada de riego. Además, se observa que, para valores altos de índices de alteración, los esquemas de operación de las centrales pueden diferir notoriamente. Estos resultados muestran la necesidad de avanzar en la compatibilización de los usos hidroeléctrico y de riego en la cuenca.

¹ Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile– email: gonzalo.urzua@ug.uchile.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile– email: maroliva@uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La gestión del agua corresponde a la planificación, desarrollo, distribución y manejo del uso óptimo de los recursos hídricos, buscando satisfacer las demandas de distintos usuarios mediante la asignación de un bien escaso (Loucks & van Beek, 2017). Esta gestión, según diversos autores, debe tener a la cuenca como unidad territorial para el manejo sustentable de los recursos hídricos (Dourojeanni A. Jouravlev A., 2002; Golubev, 1988).

Como uso no consuntivo, en principio la operación de centrales hidroeléctrica no debería interferir con otros usos del agua, ubicados aguas abajo del punto de restitución, en términos de cantidad. Sin embargo, en la práctica existen situaciones en las que la hidroelectricidad afecta a otros usos del agua, siendo el principal caso el conflicto entre hidroelectricidad y riego. Contar con capacidad de almacenamiento permite a las centrales hidroeléctricas favorecer la generación eléctrica en los horarios punta de demanda energética, mediante una operación por bloques, trayendo como consecuencia mayores caudales restituidos al río en dichas horas. Este esquema de operación, conocido como *hydropeaking*, genera interferencia con los usos aguas abajo e impactos ambientales.

En la cuenca de Río Tinguiririca, perteneciente a la macrocuenca de río Rapel, situada en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, la disponibilidad de suelos y agua de regadío, sumado a un clima mediterráneo, han facilitado el desarrollo de la actividad agrícola, con una amplia superficie dedicada a la producción de vinos. En la parte alta de esta cuenca se ubican una serie de centrales hidroeléctricas de pasada, en particular La Confluencia y La Higuera, emplazadas aguas arriba de las obras de captación para riego, cuentan con cierta capacidad de regulación de caudal a escala intradiaria mediante reservorios.

El objetivo del presente estudio es evaluar el impacto de la operación hidroeléctrica de las centrales de pasada La Confluencia y La Higuera en la disponibilidad y continuidad del recurso hídrico para riego en la cuenca de río Tinguiririca, mediante métricas de alteración hidrológica a escala intradiaria, con el fin de explorar la necesidad de buscar esquemas de operación que permitan compatibilizar adecuadamente los usos.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Tinguiririca, definida en su desembocadura al Embalse Rapel, se ubica en la macrocuenca del río Rapel, región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Comprende una superficie total de 3.932 km^2 , y está conformada por las subcuencas de Río Tinguiririca Alto (BNA 0602) y Río Tinguiririca Bajo (BNA 0603) (Figura 1). El río Tinguiririca alimenta al Valle de Colchagua, una de las zonas agrícolas más importantes de Chile. En términos administrativos, está emplazada casi en su totalidad en la provincia de Colchagua, aunque comprende parte de las provincias de Cachapoal y Curicó. En la parte alta de la cuenca existen dos estaciones fluviométricas administradas por la Dirección General de Aguas, Río Tinguiririca Bajo Los Briones y Río Claro en el Valle, esta última con registros inactivos desde 1993. La estación Tinguiririca Bajo Los Briones entrega reportes fluviométricos, meteorológicos y de calidad del agua desde hace más de 60 años, y desde hace un par de décadas a escala horaria.

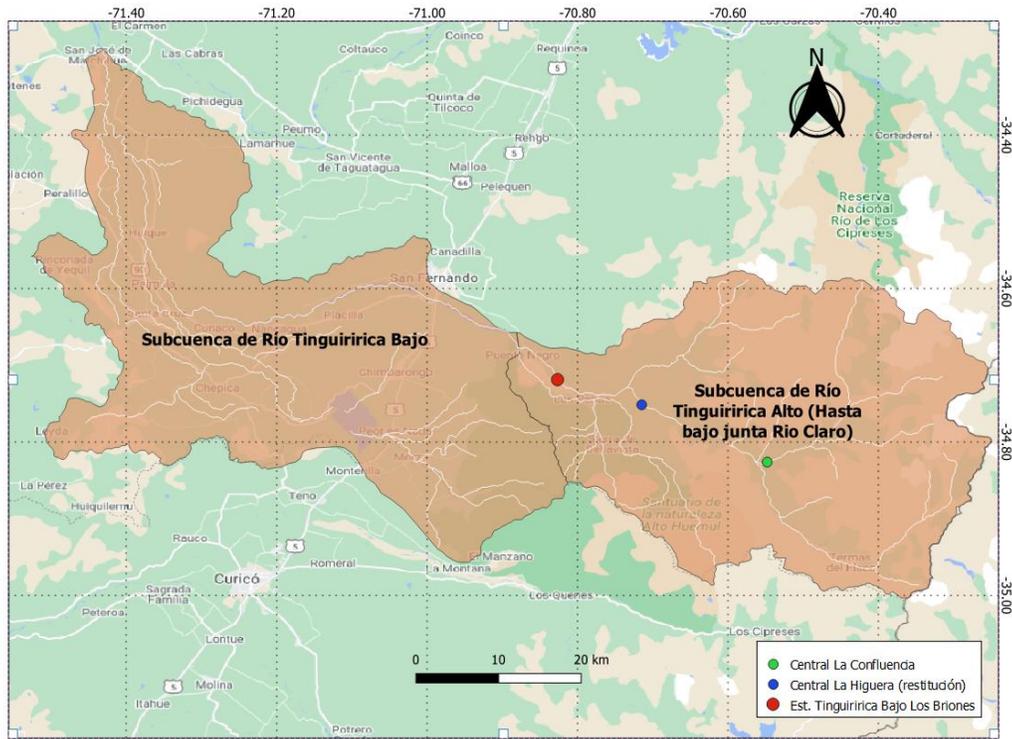


Figura 1: Mapa de la zona de estudio.

La cuenca se caracteriza por un clima mediterráneo, con estaciones claramente definidas, generando condiciones favorables para la producción vitivinícola. Presenta una estación seca prolongada, de 5 a 6 meses, con precipitaciones concentradas en los meses de invierno. El promedio anual de precipitaciones es cercano a los 800 mm (Figura 2). Las curvas de variación estacional para el período previo y posterior al inicio de operación de las centrales (Figura 3) indica una disminución en los caudales disponibles en Tinguiririca Bajo Los Briones, en promedio, durante todos los meses.

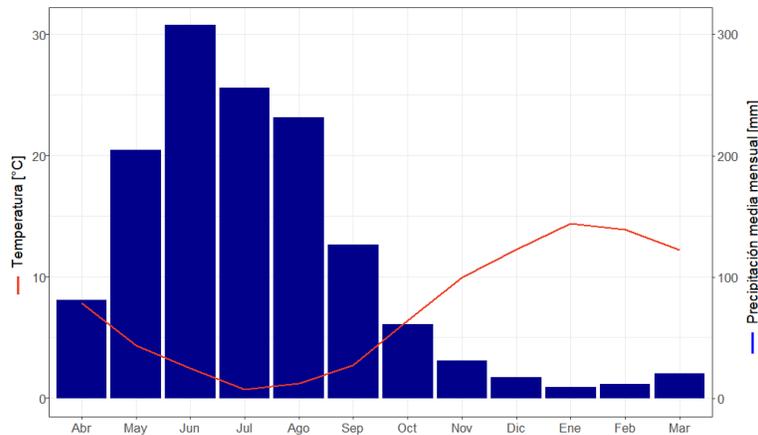


Figura 2: Temperatura y precipitación media mensual. Tinguiririca Bajo Los Briones. Período 1987-2016.

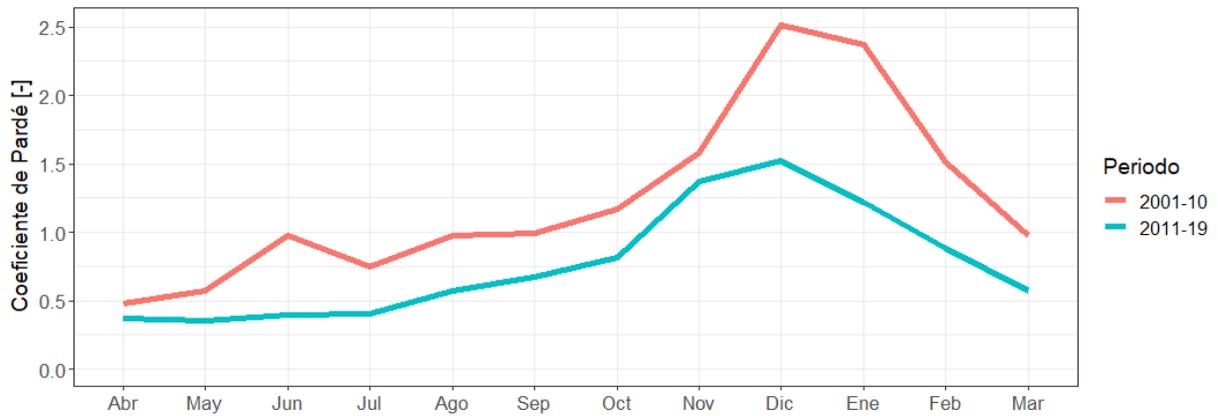


Figura 3: Régimen hidrológico en Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

3. METODOLOGÍA

A partir de las series de potencia horaria informadas por el Coordinador del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), en la base de datos pública de su sitio web³, se obtienen las series de caudales turbinados por cada central hidroeléctrica se realiza mediante los coeficientes de rendimiento de cada una, según la ecuación (1):

$$P_t = k \cdot Q_t^{turb} \quad (1)$$

Donde:

P_t : potencia generada en el bloque horario t, en [MW].

k : coeficiente de rendimiento de la central hidroeléctrica, en unidades de [MW/(m³/s)].

Q_t^{turb} : caudal horario turbinado, en [m³/s].

Para el análisis de alteración hidrológica se emplean tres índices: el índice de Richard-Baker (RBF), el coeficiente de variación (CDV) y el porcentaje del flujo total (PTF). El resumen de los tres índices de alteración hidrológica se indica en la Tabla 1.

El RBF permite cuantificar las oscilaciones en el caudal con respecto al flujo total en cierto período (Baker et al., 2004). Un valor mayor de RBF indica una mayor rapidez y frecuencia en los cambios de escorrentía en el corto plazo.

El *Percentage of Total Flow* (PTF) corresponde al rango intradiario de caudal dividido por la suma de los registros horarios de caudal. Este índice indica a qué fracción de la descarga total del día equivale el rango de caudales. Para días de altas fluctuaciones se espera un valor de PTF mayor (con un valor máximo de 1, para cuando la totalidad de los registros -excepto

³ Disponible en <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/>

uno- sean cero) y, de modo opuesto, para un día de caudal relativamente constante un *PTF* bajo (con mínimo 0, donde el valor máximo y mínimo son iguales).

El *Coefficient of Diel Variation* (CDV), propuesto por McKinney et al. (2001), permite analizar la dispersión de datos de caudal dentro de un día, usando para esto la desviación estándar de los registros horarios, normalizada por el promedio, como se indica en la fórmula respectiva de la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de indicadores de alteración hidrológica.

Índice	Descripción	Fórmula	Rango de valores	Referencia
RBF	Reporta la suma de las rampas de caudal, en valor absoluto, con respecto al flujo total en cierto período.	$\frac{\sum_{i=1}^n q_{i+1} - q_i + q_i - q_{i-1} }{2 \cdot \sum_{i=1}^n q_i}$	[0,2]	Baker et al. (2004)
PTF	Indica el rango intradiario del caudal, normalizado por el flujo total en cierto período	$\frac{\max(q_i) - \min(q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i}$	[0,1]	Lundquist & Cayan (2002)
CDV	Indica la dispersión de los registros de caudal, como el cociente entre la desviación estándar y el promedio de los caudales.	$\frac{s(q_i)}{\bar{q}_i}$	$[0, \sqrt{23}]$	McKinney et al. (2001)

4. RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación están enfocados en describir la variabilidad tanto interdiaria como intradiaria de los caudales turbinados por las centrales La Confluencia y La Higuera, así como de los caudales en la estación fluviométrica Tinguiririca Bajo Los Briones.

En primer lugar, en la Figura 4 se presentan las series de caudal medio diario turbinado en las centrales La Confluencia y La Higuera, respectivamente, para el período 2010-2020, donde los datos son agrupados en temporada de riego (de septiembre a abril) y temporada de no riego (de mayo a agosto). Las líneas segmentadas corresponden al promedio de caudal turbinado para cada temporada. Ambos gráficos evidencian la estacionalidad en la generación de las centrales, favorecidas por un régimen hidrológico nival, generando mayoritariamente en época de riego (septiembre a abril). Del mismo modo se aprecia que la

central La Confluencia prácticamente no opera nunca a capacidad, mientras que La Higuera lo hace con una frecuencia muy baja.

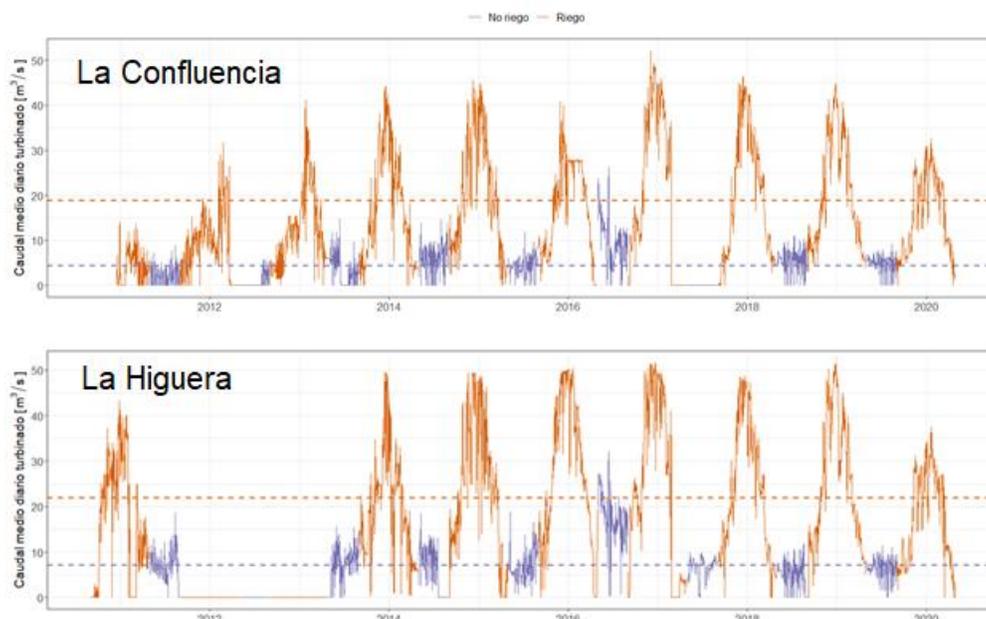


Figura 4: Series de caudales medios diarios turbinados por las centrales La Confluencia y La Higuera. Período 2010-2020.

La Figura 5 presenta las curvas de frecuencia acumulada de caudales horarios turbinados, para dos períodos: uno inicial correspondiente a los primeros años de funcionamiento de las centrales (2011, 2013-2014), y uno reciente, que incluye los años 2018-2019. Para ambos períodos, las series de caudales son divididas según bloques horarios de demanda eléctrica (horario punta, de 18 a 23 horas, y horario valle, de 23 a 18 horas), a fin de observar un posible esquema de operación en bloques. Se observa que los caudales turbinados por ambas centrales en general son superiores para el período reciente, posiblemente debido a una mayor disponibilidad de agua. Además, para los dos períodos los caudales turbinados resultan mayores en el horario punta. Esta diferencia, si bien es menor en el período 2011-14, para el período 2018-19 resulta considerable para frecuencia acumulada entre 25 y 75%, aproximadamente.

Debido a lo señalado, se constata una operación preferente por parte de las centrales en un horario donde el sistema eléctrico presenta una mayor demanda, acentuándose este fenómeno en el período reciente. Esto sugiere que las centrales operan con una lógica de maximización del valor económico de la energía producida.

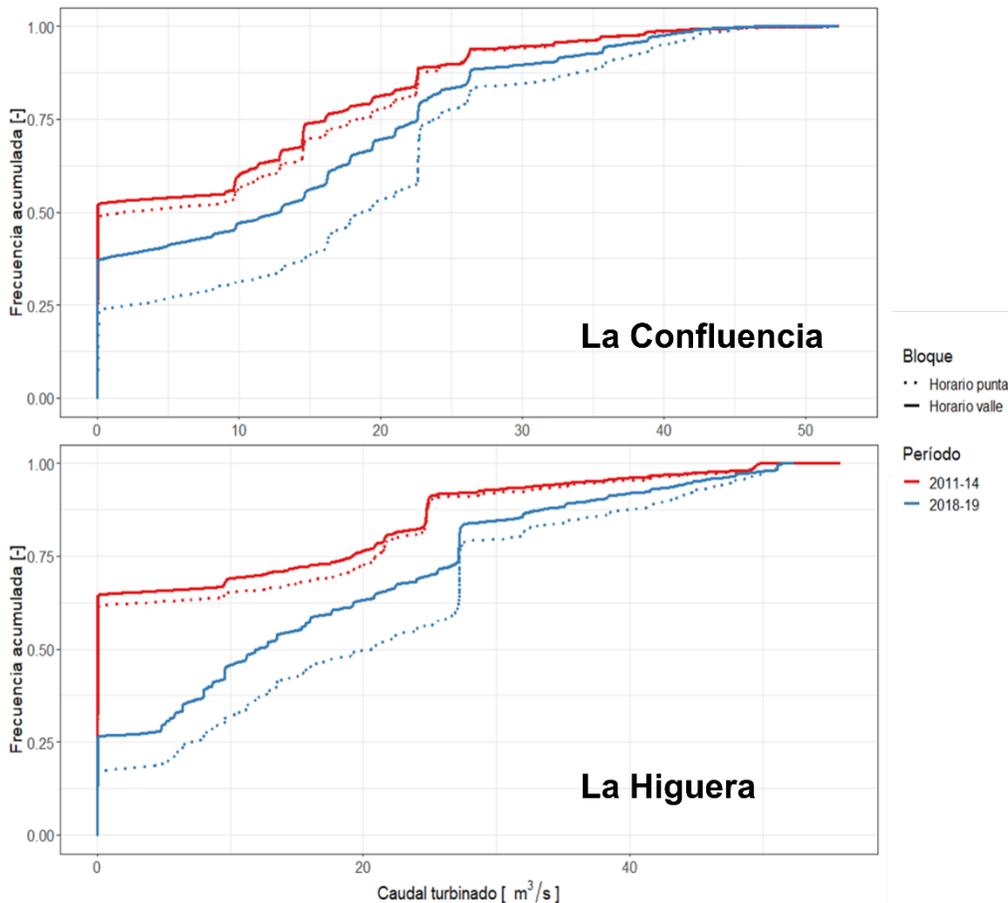


Figura 5: Porcentaje del tiempo que el caudal horario turbinado por las centrales La Confluencia (superior) y La Higuera (inferior) supera cierto umbral de caudal, según bloque de demanda. Períodos 2011-14 y 2018-19.

En la Figura 6 se muestra el patrón de operación intradiario de la central La Higuera, en base al caudal promedio turbinado en cada hora del día (i.e., 1 corresponde al bloque de 0:00 a 0:59 horas, 2 al bloque 1:00 a 1:59 hrs, etc.) para los años 2011 a 2019, exceptuando 2012 donde las centrales no operaron. En todos los años se observa una mayor variabilidad intradiaria durante la temporada de no riego, correspondiente a los meses entre mayo y agosto. Esta central evidencia claramente horarios de generación preferentes, variando el patrón año a año, pero en general favoreciendo, la generación en los bloques horarios de 11 a 15 y de 19 a 23 hrs. aproximadamente. Las diferencias entre años pueden explicarse por condiciones operacionales, incluyendo el patrón de caudales afluentes a las bocatomas de las centrales, así como por diferencias en el valor de la energía producida. En particular, debido a la gran expansión de capacidad instalada solar en años recientes, los costos marginales del sistema se han reducido significativamente en el bloque de mediodía, desincentivando la generación hidroeléctrica en ese horario. En la temporada de riego la diferencia en la generación entre bloques horarios no resulta tan acentuada, sin embargo, de 2015 a 2019 se observa un leve aumento coincidente con el bloque vespertino.

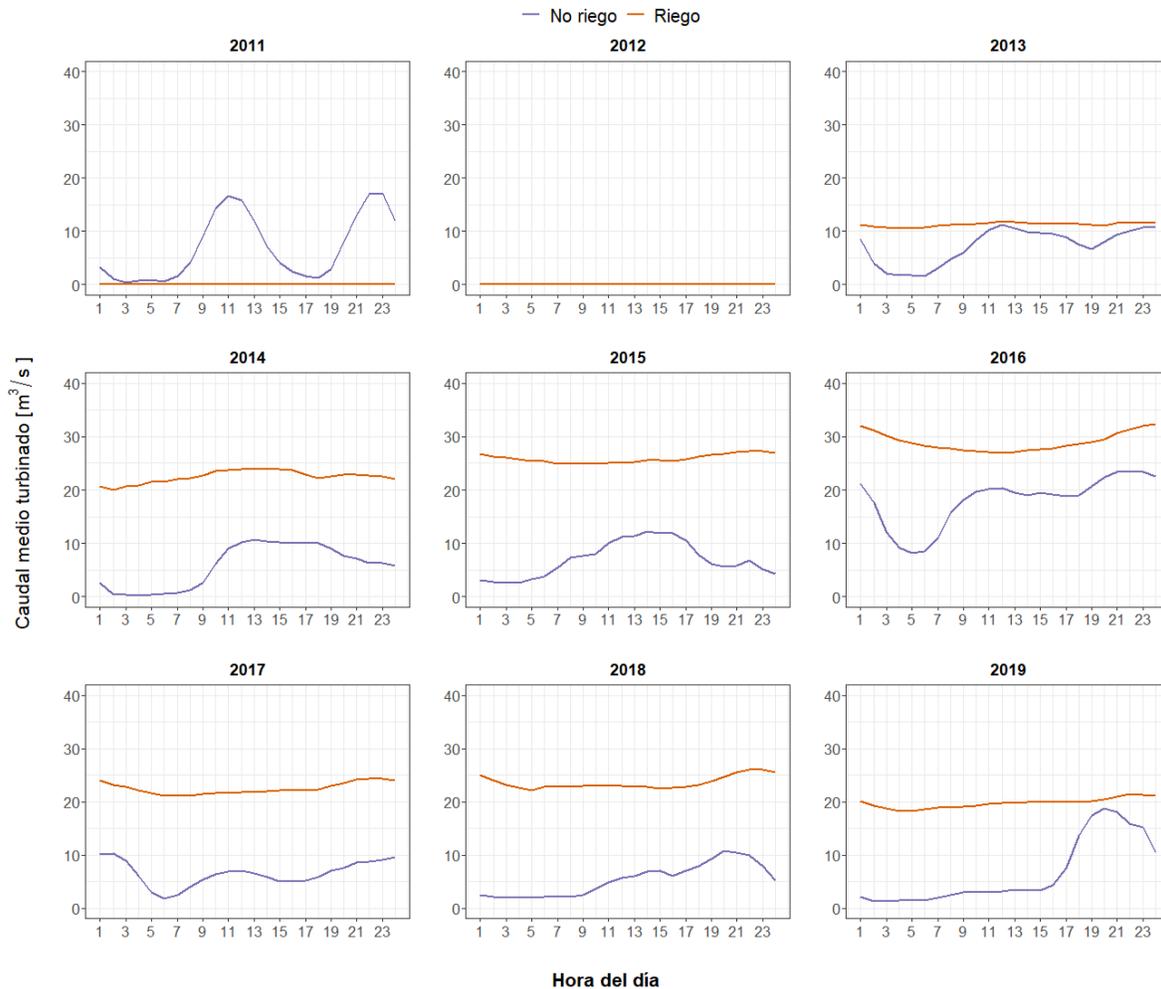


Figura 6: Caudal medio turbinado en la central La Higuera en cada bloque horario, para las temporadas de riego y no riego. Período 2011-2019.

El efecto del esquema de operación de las centrales sobre los caudales en el río aguas abajo del punto de restitución se puede analizar comparando indicadores de alteración hidrológica intradiaria para el período previo y posterior a la entrada en operación de las centrales. La Figura 7 muestra la distribución de los valores de RBF para los caudales horarios en Río Tinguiririca Bajo Los Briones, para el período 2000-2019. El RBF presenta un valor medio y dispersión bajos durante el periodo 2001-2010 para ambas temporadas. Sin embargo, a partir de la entrada en operación de las centrales en el año 2011 se observa un aumento en ambos atributos, particularmente significativo en la temporada de no riego.

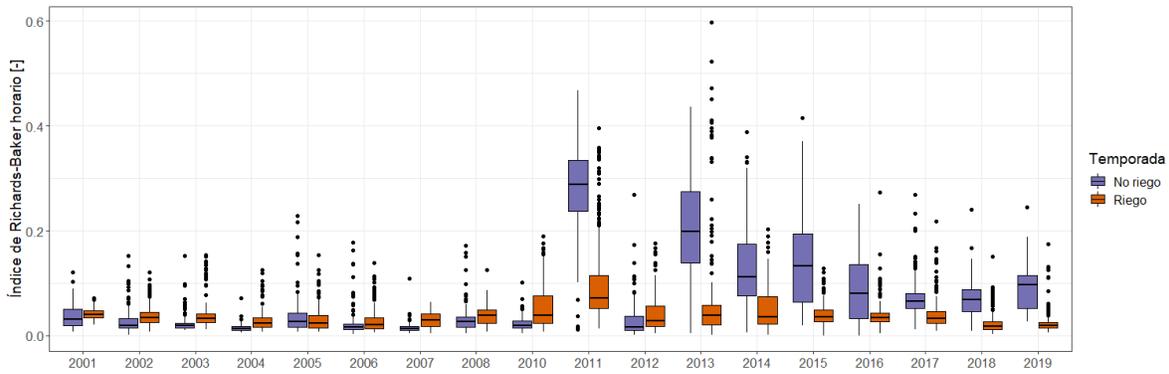


Figura 7: Comparación de RBF para Tinguiririca Bajo Los Briones, según temporada. Período 2001-2019.

Los valores del índice PTF evidencian un incremento considerable desde 2011 (Figura 8), con un aumento promedio del 94 y 306% para las temporadas de riego y no riego, respectivamente. Existe un aumento en la frecuencia de valores extremos, viéndose este fenómeno acentuado en los meses de no riego. La línea segmentada en la figura corresponde a un valor de PTF para el cual el rango diario es equivalente al caudal medio diario.

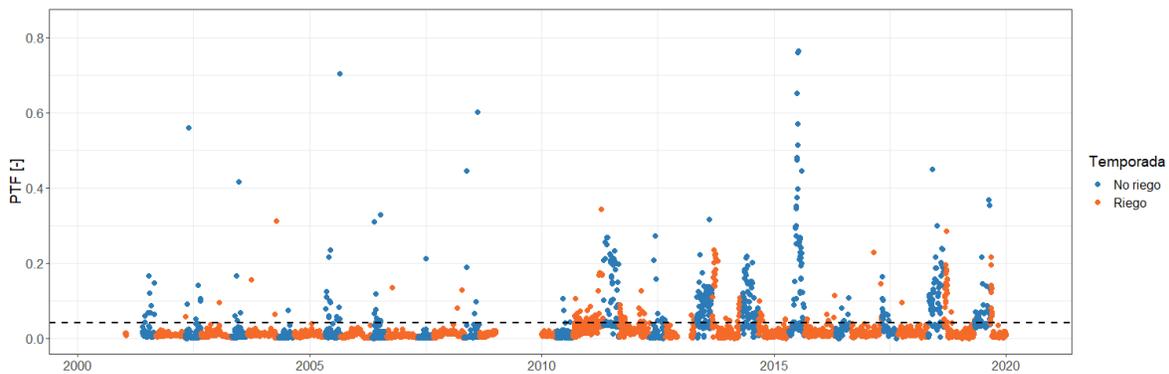


Figura 8: Comparación de PTF para Tinguiririca Bajo Los Briones, según temporada. Período 2001-2019.

Para completar el análisis de indicadores, la Figura 9 muestra el coeficiente de variación intradiaria de los caudales en Río Tinguiririca Bajo Los Briones. Se evidencia valores superiores de CDV, así como su dispersión, en los últimos 10 años, comparado a la situación previa a la operación de las centrales. Esta alteración se acentúa en las temporadas de no riego, y en las temporadas de riego de 2015 a 2019 se aprecia cierta semejanza con el estado en los años sin intervención, posiblemente como consecuencia de una resolución de conflicto entre usuarios de riego e hidroelectricidad.

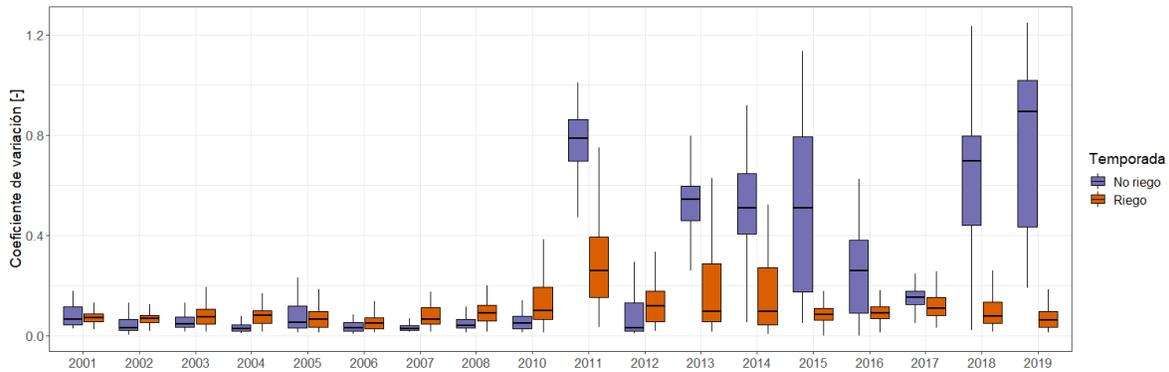
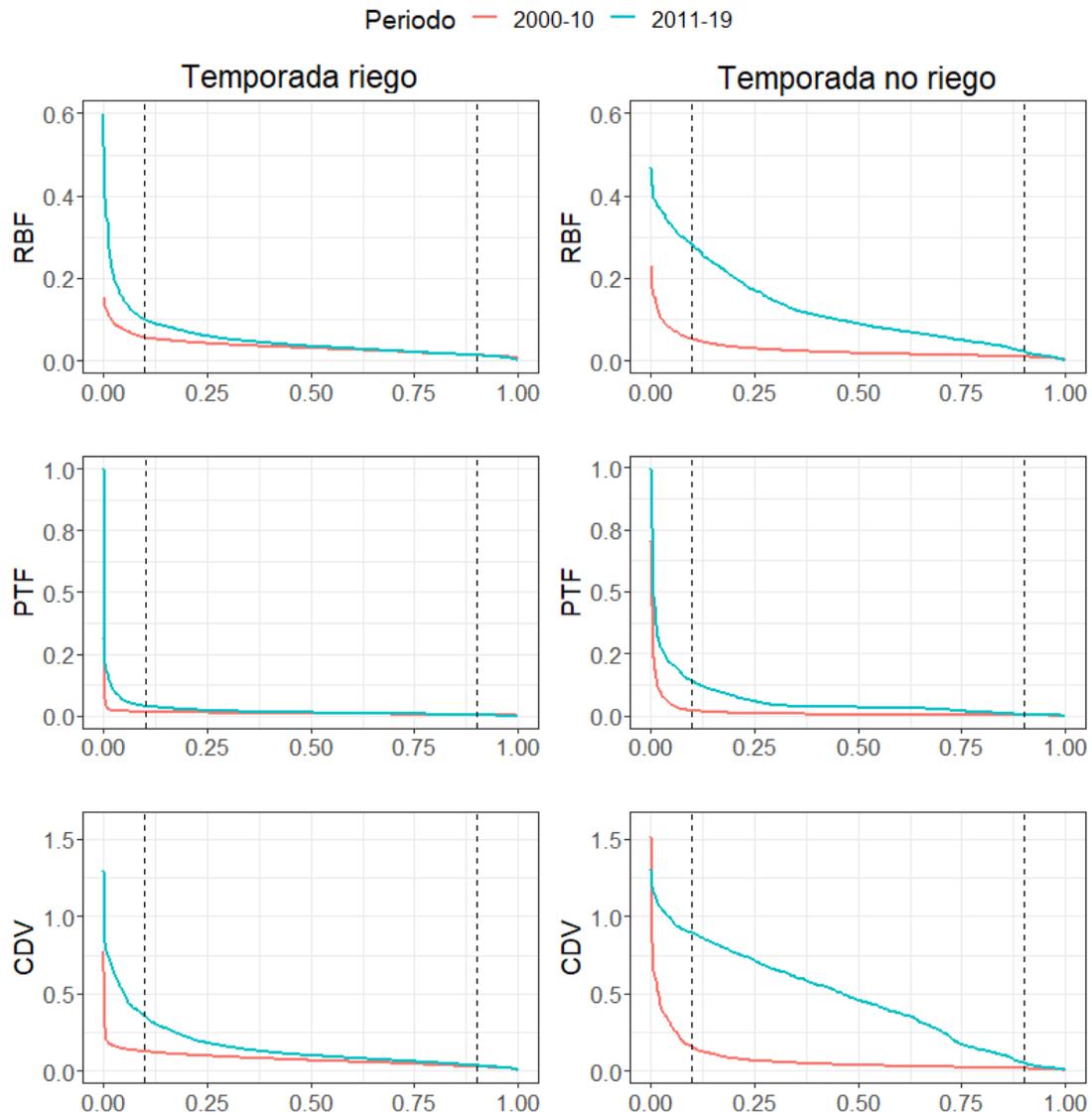


Figura 9: Comparación de CDV para Tinguiririca Bajo Los Briones, según temporada. Período 2001-2019.

Como complemento al análisis previo, en la Figura 10 se presentan las curvas de duración de los indicadores RBF, PTF y CDV asociados a los caudales horarios en Tinguiririca Bajo Los Briones, para los registros previos y posteriores a inicio de operaciones de las centrales, separados por temporada del año. Las líneas punteadas indican probabilidades de excedencia de 10 y 90%.

En términos generales, se observan valores mayores de los tres indicadores en el período más reciente, en ambas temporadas, para todas las probabilidades de excedencia, indicando la existencia de caudales más fluctuantes en horas consecutivas, con rangos intradiarios mayores y con una mayor dispersión. La separación entre las curvas de cada período se acentúa en la temporada de no riego. Por ejemplo, para una probabilidad de excedencia del 10%, en la temporada de no riego se quintuplica el valor de los índices RBF y CDV (de 0,06 a 0,30, y de 0,18 a 0,90, respectivamente). Para la temporada de riego, este indicador es aproximadamente igual a cero para más de la mitad del registro. Sin embargo, la operación de las centrales induce un leve aumento con respecto al período previo para los valores pertenecientes al 20% mayor del registro. En la temporada de no riego esta diferencia se acentúa. En síntesis, para el período de operación de las centrales se observan valores considerablemente mayores de los tres indicadores en ambas temporadas, evidenciando el impacto de la operación de las centrales en los registros de caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones (Tabla 2).



Probabilidad de excedencia [-]

Figura 10: Curvas de duración de RBF, PTF y CDV en Tinguiririca Bajo Los Briones, para los periodos pre y post inicio de operación de las centrales, según temporada.

Tabla 2: Valor promedio de índices de alteración hidrológica en Tinguiririca Bajo Los Briones en los períodos pre y post inicio de operaciones de las centrales.

Índice	Temporada	Período 2000-2010	Período 2011-2019
RBF	Riego	0,0343	0,0516
	No riego	0,0267	0,1214
PTF	Riego	0,0106	0,0207
	No riego	0,0148	0,0599
CDV	Riego	0,0762	0,1534
	No riego	0,1270	0,4429

5. CONCLUSIONES

El análisis de los efectos de la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera en el cauce de río Tinguiririca evidencia que gran parte del tiempo se genera en un esquema de *hydropeaking*, asociada a una generación hidroeléctrica en bloques horarios de mediodía y vespertino. Este fenómeno se observa principalmente y en mayor grado, en los meses de no riego, con un incremento notable en los índices de alteración hidrológica. Cabe notar que el bloque punta de mediodía tiende a desaparecer en los años más recientes, posiblemente debido a la expansión masiva de energía solar, que ha resultado en costos marginales más bajos en ese período, y por lo tanto un desincentivo a la generación hidroeléctrica.

En relación con la alteración hidrológica intradiaria, realizada a partir de los indicadores Richard-Baker, porcentaje de caudal total (PTF), y coeficiente de variación (CDV), los resultados indican que a partir de la entrada en operación de las centrales se observan valores considerablemente mayores de los tres indicadores para los caudales en Tinguiririca Bajo Los Briones. La alteración hidrológica en el río Tinguiririca producto de la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera involucra caudales más fluctuantes dentro del día, además de mayores caudales en días específicos de la semana. Si bien el impacto se aprecia en mayor medida durante la temporada de no riego, cuando la operación fluctuante de las centrales no interfiere con el riego, también existe un aumento no despreciable durante la temporada de riego.

Estos resultados demuestran una potencial interferencia operacional entre las centrales y el riego aguas abajo y por lo tanto sugieren la necesidad de explorar esquemas de operación que permitan compatibilizar de mejor forma ambos usos.

Este trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, aportando a la meta de lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, con el objetivo de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado a través del proyecto NSFC190025 del Programa de Cooperación Internacional de la Agencia Nacional de Investigación (ANID). Los autores agradecen la información y retroalimentación proporcionada por Miguel Ángel Guzmán, Gerente de la Junta de Vigilancia del río Tinguiririca.

REFERENCIAS

- Baker, D. B., Richards, R. P., Loftus, T. T., & Kramer, J. W. (2004). A new flashiness index: Characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2), 503–522.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x>

- Dourojeanni A. Jouravlev A., y C. G. (2002). Gestión del Agua a Nivel de Cuencas. In *Recursos naturales e infraestructura* (Vol. 47). CEPAL. <http://www.eclac.cl>
- Golubev, G. N. (1988). Sustainable management of water resources: A basinwide approach. *International Journal of Water Resources Development*, 4(4), 219–223. <https://doi.org/10.1080/07900628808722395>
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). Water Resources Planning and Management: An Overview. In *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications* (pp. 1–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1_1
- Lundquist, J. D., & Cayan, D. R. (2002). Seasonal and spatial patterns in diurnal cycles in streamflow in the western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 3(5), 591–603. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0591:SASPID>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0591:SASPID>2.0.CO;2)
- McKinney, T., Speas, D. W., Rogers, R. S., & Persons, W. R. (2001). Rainbow Trout in a Regulated River below Glen Canyon Dam, Arizona, following Increased Minimum Flows and Reduced Discharge Variability. *North American Journal of Fisheries Management*, 21(1), 216–222. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2001\)021<0216:rtiarr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2001)021<0216:rtiarr>2.0.co;2)

